



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA EN CHAÑARAL DESPUÉS DEL ALUVIÓN DE
MARZO DE 2015, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

NICOLE ANDREA SALAS HERRERA

PROFESORA GUÍA:
DRA. DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DR. GABRIEL VARGAS EASTON
DRA. CLAUDIA CANNATELLI

Este trabajo ha sido financiado por el Diplomado de Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile y por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA)

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Nicole Salas
FECHA: 01/08/2017
PROFESORA GUÍA: Dolorinda Daniele

PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA EN CHAÑARAL DESPUÉS DEL ALUVIÓN DE MARZO DE 2015, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

El objetivo general del presente trabajo es determinar las concentraciones químicas presentes en aguas y sedimentos posteriores al aluvión de marzo de 2015 en la cuenca del río Salado, y en niveles de una columna estratigráfica prestando particular atención a la existencia de componentes potencialmente nocivos para la salud humana.

La conexión existente entre la cuenca del salar de Pedernales y la del río Salado permitió que salmuera fuera vertida al caudal del río, por lo que la mayor parte de la concentración de los elementos que se hallaron en las muestras de agua provendrían del salar, explicando los altos valores encontrados: Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , HCO_3^- , B, Li y As, además de otros elementos traza. Otra fuente importante para algunos elementos en las aguas es el desarrollo de la actividad minera (El Salvador-Potrerrillos) que históricamente depositó desechos de relave en la cuenca del río Salado: Mn, Cu, Mo, Se, Fe, Mn y parte del As que, además, se encuentran enriquecidos por la mineralización metálica en la zona de estudio.

La distribución de concentración de los elementos en los sedimentos bastante errática por lo que fue difícil determinar un origen. Sin embargo, el alto contenido de Fe, Cu, Mn y S en la muestra de relave induce a creer que sería una fuente importante de esos elementos para las otras muestras. El resto de los elementos provendría de la meteorización, interacción de agua con rocas y sedimentos, y del arrastre de material del salar de Pedernales (principalmente Cl, Ca, K y Mg).

Una matriz de correlación entre los elementos encontrados en las muestras de agua y sedimento apoyó la relación existente entre los elementos provenientes del salar de pedernales y los de depósitos de relave, en el caso de aguas, y que no hay relación clara en el caso de sedimentos. El potencial iónico de los aniones y cationes permitió justificar que, en general, las concentraciones encontradas estaban ligadas a su solubilidad. La comparación de los resultados obtenidos de las muestras de agua con los de un trabajo previo al aluvión permitió notar que aumentó la concentración de Li y As por el aporte del salar de Pedernales, y de Cu por la interacción de depósitos de relave.

Los resultados de las aguas fueron comparados con los estándares de calidad de aguas de la normativa chilena (NCh409 y NCh1333), y los sedimentos (incluyendo los de la columna estratigráfica) con los valores de referencia de calidad de suelo de Canadá y Brasil. Se concluye que ninguna muestra de agua analizada estaría apta para su consumo ni para su uso como agua de riego, mientras que las muestras de sedimento no estarían aptas para el desarrollo de actividades agrícolas, residenciales, comerciales ni industriales. Por lo tanto, la peculiaridad geológica más las actividades antrópicas hacen del medio ambiente de la cuenca del río Salado un área con concentraciones elevadas de elementos químicos potencialmente nocivos para la salud.

*A mi mamá,
esa luz que siempre brilla en nosotros.
A mi papá,
mi apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Esta investigación fue sustentada por el programa de postgrado en Hidrogeología de la Universidad de Chile, y el proyecto Fondap-Conicyt 15090013 del Centro de Excelencia de Geotermia de los Andes (CEGA).

Quisiera agradecer a mi profesora guía y a los miembros de mi comisión por su ayuda y apoyo durante este tiempo de trabajo. Gracias a todo el equipo de terreno de Chañaral, en especial a Cristian Cerda por su hospitalidad, apoyo logístico y gran motivación.

Especialmente, agradezco a mi familia: a mi papá, mis hermanos, mis tatas, tíos y primitos. Porque la familia es incondicional, y ustedes me han ayudado enormemente a forjar este camino gracias a sus valores, enseñanzas y amor. A mi mamá, que me inculcó desde pequeña a superarme, y sé que está a mi lado contenta y radiante.

A mis amigas de la vida, Caro, Rai, Pía, Vane, Javi y Pao, gracias por estar al dar los primeros grandes pasos y por siempre creer en mí. A la Panchana, Violchen y Natascha que hicieron divertidos días completos en la U; gracias por su amistad. También a los otros geo-amigos. A la Javi y la Cata, Nachin y Claudio, porque plan común no hubiese sido lo mismo sin sus locuras.

No puedo dejar de nombrar a mi segunda familia, los Villela-Ramírez. Muchas gracias por acompañarme en estos últimos años, por su preocupación constante y por entregarme tanto cariño.

A mi principal apoyo, gracias por tu paciencia y ayuda, por los retos y presiones, por tener siempre las palabras precisas y los abrazos más tranquilizadores. Gracias por permitirme recorrer junto a ti varios años de traspasos, superaciones, risas y alegrías. Gracias por tu amor, Bruno.

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 ⁻ | 27 |
| 3.1.3.2 | SO ₄ ⁻² | 29 |
| 3.1.3.3 | Br ⁻ | 31 |
| 3.1.3.4 | NO ₃ ⁻ | 32 |
| 3.1.3.5 | HCO ₃ ⁻ | 33 |
| 3.1.3.6 | Na ⁺ y K ⁺ | 35 |
| 3.1.3.7 | Ca ⁺² | 39 |
| 3.1.3.8 | Mg ⁺² | 41 |
| 3.1.3.9 | SiO ₂ | 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 Cl^- | 28 |
| Figura 3.4 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de 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 SO_4^{-2} y Cl^- , en mg/l. | 30 |
| Figura 3.6 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Br^- | 32 |
| Figura 3.7 Relación entre la concentración de Br^- y Cl^- , en mg/l. | 32 |
| Figura 3.8 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de NO_3^- | 33 |
| Figura 3.9 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de HCO_3^- | 35 |
| Figura 3.10 Relación entre la concentración de HCO_3^- y Cl^- , en mg/l. | 35 |
| Figura 3.11 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Na^+ | 38 |
| Figura 3.12 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de K^+ | 38 |
| Figura 3.13 Relación entre la concentración de Na^+ y Cl^- , en mg/l. | 39 |
| Figura 3.14 Relación entre la concentración de K^+ y Cl^- , en mg/l. | 39 |
| Figura 3.15 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Ca^{+2} | 40 |
| Figura 3.16 Relación entre la concentración de Ca^{+2} y Cl^- , en mg/l. | 41 |
| Figura 3.17 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mg^{+2} | 42 |
| Figura 3.18 Relación entre la concentración de Mg^{+2} y Cl^- , en mg/l. | 43 |
| Figura 3.19 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de SiO_2 | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.20 Relación entre la concentración de SiO ₂ y Cl ⁻ , 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) Cl^- , (B) SO_4^{2-} , (C) NO_3^- y (D) 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

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

1.1.1 *Exposición del problema*

En marzo de 2015, la región de Atacama fue golpeada por precipitaciones inusuales (> 40 mm) que provocaron crecidas, desborde de ríos y grandes flujos aluvionales que afectaron a diferentes ciudades de la región como Chañaral y Copiapó, además de una serie de otras localidades ubicadas en las cuencas de los ríos Salado y Copiapó. Chañaral, en particular, que se ubica en la desembocadura del río Salado, sufrió la llegada del enorme caudal que bajó desde la cabecera de la cuenca del río Salado. El flujo, que llegó a modificar la morfología de la bahía de Chañaral, arrasó con gran parte de las localidades que encontró a su paso como Llanta, El Salado y Diego de Almagro.

Se conoce que el cauce del río Salado, históricamente, transportó restos mineros que han cambiado la morfología costera colmatando parte de la bahía natural, y depositando sedimentos relacionados con las actividades mineras desarrolladas en la cuenca del río. El aluvión ocurrido en marzo de 2015 ha renovado los temores en relación a la contaminación ambiental y a la exposición de estos contaminantes por parte de la población local. La ocurrencia de eventos extremos modifica el territorio pudiendo cambiar y complicar los procesos geoquímicos en aguas y sedimentos. Esto, además, puede contribuir a la movilización de elementos no deseados y a la exposición a potenciales contaminantes dañinos para la salud humana.

1.1.2 *Fundamentación y discusión bibliográfica*

La dinámica de la morfología de ambientes desérticos determina condiciones favorables para que exista gran producción de material detrítico, disponible en quebradas y cauces; dichos materiales son susceptibles de ser puestos en carga y movilizados por las aguas superficiales como un flujo aluvional que puede ser muy destructivo. En zonas desérticas, como la región de Atacama, el mecanismo de activación de los flujos aluvionales es la lluvia intensa que produce una rápida saturación de la superficie coluvial, permitiendo el movimiento de material saturado en agua. Las lluvias, en esta zona del país, son esporádicas con recurrencias de 10 años, asociadas a eventos de El Niño, y se caracterizan por concentrarse en cortos periodos de tiempo. Se estima que el promedio anual de lluvias en Chañaral es de 12 mm, pero existen años excepcionales donde se registran valores promedios de 42 mm. Según Hauser (1997), a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile, durante el fenómeno de El Niño de 1991 cayeron 41,4 mm en Chañaral, provocando crecidas y desbordes de ríos, causando inundaciones en las calles y viviendas (Castro *et al.*, 2010). Las circunstancias fueron muy similares a lo acontecido en marzo de 2015, donde cayeron más de 40 mm de lluvia en menos de 48 horas, provocando la crecida y desborde del río Salado.

Cabe considerar que la minería ha sido la principal actividad económica para los habitantes de las localidades de la zona de estudio por lo que ha sido la responsable de los depósitos de relave en todo el territorio.

Desde 1938 hasta 1975, los relaves de flotación del distrito minero Potrerillos-El Salvador, fueron descargados al valle El Salado, y transportados en suspensión hacia el mar en la bahía de Chañaral. Se depositaron más de 220 Mt de relaves, resultando en un desplazamiento de 1 km de la línea de costa hacia el océano y en una acumulación de 10 a 15 m de espesor de relaves, cubriendo aproximadamente 4 km². El caso de Chañaral fue clasificado por el United Nations Environmental Programme (UNEP), en 1983, como uno de los casos más serios de contaminación marina en el Pacífico. Después de su depositación, los relaves han sido expuestos a oxidación y liberación de cationes metales como Cu, Ni y Zn, así como As y Mo (Dold, 2006).

El Catastro Nacional de Depósitos de Relave, del Departamento Depósitos de Relaves, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), a comienzos del 2015 identificó 163 registros en la Región de Atacama, de los cuales 17 se encuentran en la hoya hidrográfica del río Salado. De ellos, 13 corresponden a tranques de relave, que pueden ser fuente potencial de elementos nocivos como As, Pb, Cu, Mo, Ni, entre otros.

Resumiendo, la bahía de Chañaral ha recibido materiales de actividades mineras desde 1938 cuando comenzó la explotación del distrito minero Potrerillos-El Salado de forma directa, hasta la actualidad de forma indirecta mediante la exposición a tranques de relave activos e inactivos.

El diagnóstico ambiental es de suma importancia para determinar el nivel de emergencia, los eventuales cambios y sobre todo para disponer de datos científicos que puedan ser incluidos en la ordenación del territorio que debería hacerse después de una catástrofe. Considerando, además, el posible transporte de elementos contaminantes a lo largo del valle El Salado durante el aluvión de marzo de 2015, es primordial levantar un diagnóstico de la situación ambiental para disminuir la tensión social y contribuir así a crear las bases para un futuro desarrollo sustentable de esta zona.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es determinar las concentraciones químicas presentes en las aguas y sedimentos posteriores al aluvión en la cuenca del río Salado prestando particular atención a la existencia de componentes potencialmente nocivos para la salud humana.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Analizar y comparar la concentración de cationes, aniones y elementos traza en las muestras de agua y sedimentos, determinando su variación a lo largo de la cuenca del río Salado.

2. Establecer, en la medida de lo posible, el origen de las composiciones químicas encontradas.
3. Determinar los elementos químicos que, en las muestras de agua y sedimentos, presentan una concentración que excede los límites fijados por la normativa chilena e internacional, según corresponda.
4. Comparar los resultados obtenidos con datos previos al aluvión de marzo 2015.
5. Comparar la distribución de la concentración de elementos químicos, en profundidad, en las muestras de sedimentos tomados en una columna estratigráfica situada en Chañaral.

1.3 Hipótesis de trabajo

El aluvión de marzo de 2015 ha sido un hidro-evento extremo que pudo movilizar y transportar elementos potencialmente tóxicos hacia la desembocadura del río Salado, depositándolos a lo largo de su recorrido en función de las características hidrogeológicas y geomorfológicas del área por la cual discurría el caudal y, donde se encuentran localidades pobladas.

Debido a las numerosas faenas mineras presentes en toda la cuenca del río Salado, en la población se ha despertado el temor de que las aguas y los sedimentos transportados contienen altas concentraciones de elementos potencialmente dañinos para la salud humana.

La hipótesis de trabajo es que, durante las lluvias de marzo de 2015, el caudal que pasó por el valle El Salado pudo haber activado los relaves mineros aumentando la exposición de los habitantes a elementos potencialmente contaminantes.

1.4 Metodología

La realización del presente trabajo se llevó a cabo mediante la toma de muestras y al análisis de datos obtenidos en la zona afectada por el aluvión de marzo de 2015, previo a una fotointerpretación del lugar, y el estudio de documentos y artículos existentes. Por lo tanto, se distinguen tres etapas en el desarrollo del trabajo: revisión de los antecedentes previamente al terreno en Chañaral, toma de muestras durante el terreno en Chañaral y trabajo de gabinete para análisis de los datos obtenidos.

En el periodo anterior al terreno, se hizo una recopilación de material bibliográfico, incluyendo artículos y cartas geológicas de la zona de estudio, además de información nacional oficial de los relaves mineros con su ubicación relativa al valle del río Salado. Se realizó una fotointerpretación mediante los softwares *Google Earth* y *ArcGIS*, con énfasis en la cuenca hidrográfica de Chañaral y sus localidades. Se definieron los puntos de muestreo y el organigrama de actividades a realizar en el terreno.

Desde el día 30 de abril al 3 de mayo de 2015 se realizó el trabajo en terreno focalizado en la toma de muestras de agua y sedimentos a lo largo de la hoya hidrográfica

del río Salado, prestando especial atención al área de Chañaral y su bahía, zona mayormente afectada por el aluvión. Se tomaron muestras de agua y de sedimentos activos del río, así como muestras de sedimento del aluvión y de relaves situados en el cauce del río y que fueron inundados por el flujo del aluvión, particularmente, en la zona de Diego de Almagro (Figura 1.1).

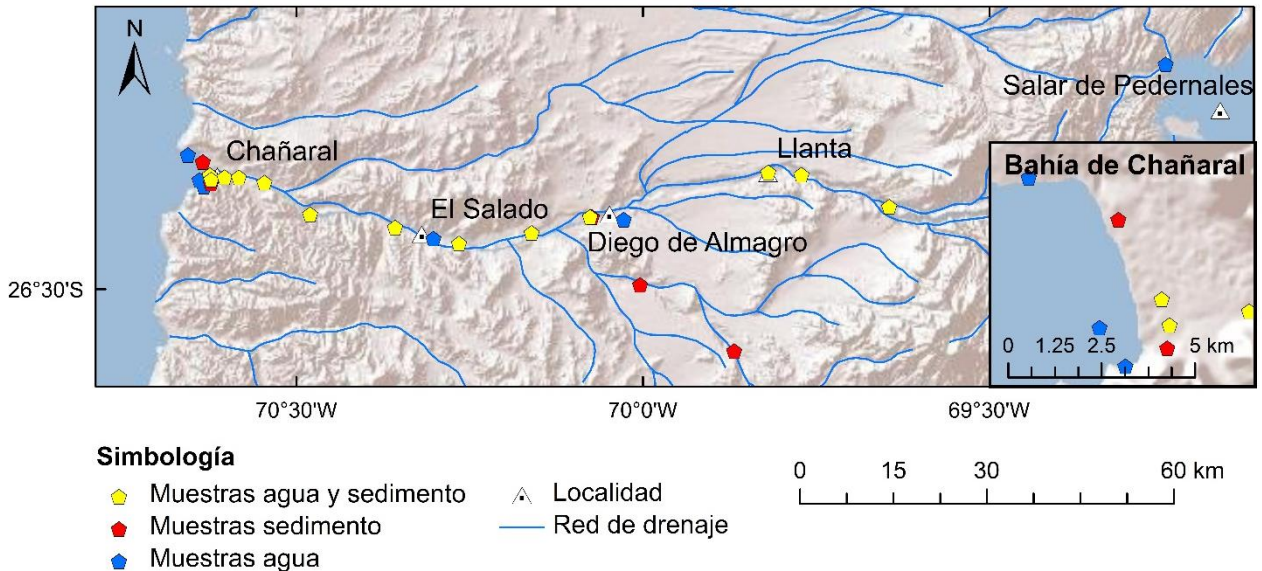


Figura 1.1 Localidades a lo largo de la cuenca del río Salado con la ubicación de la extracción de muestras.

Las aguas analizadas corresponden a 12 muestras del río Salado, tres de agua de mar, dos de agua de mezcla entre aguas dulces y marinas que se definieron como aguas costeras, una de agua subterránea y una de agua de salar de Pedernales. *In situ*, se midieron parámetros físico-químicos, como pH, conductividad eléctrica (EC), temperatura y potencial de óxido-reducción (Eh). El instrumento de medición de estos parámetros es un multiparámetro portátil Hach HQ40D. Las muestras se conservaron en recipientes de polietileno, preparados según los estándares del laboratorio y etiquetados para realizar análisis de las concentraciones de cationes, aniones y elementos traza.

Se extrajeron 33 muestras de suelo y sedimento en puntos significativos: 11 son sedimentos activos del río Salado, siete son muestras de sedimento depositado por el aluvión, dos del salar de Pedernales, una muestra es de arena de playa y otra es de material de relave. Además, 11 muestras pertenecen a las capas de una columna estratigráfica de 224 cm, localizada en un socavón de la parte sur de la bahía de Chañaral (26°20'45"S 70°37'23"W). Este muestreo vertical de los sedimentos acumulados en la costa permite reconocer los cambios en la geoquímica, teniendo, como elemento de comparación, los depósitos anteriores y la composición del material depositado durante el último evento. Todas las muestras de sedimento fueron adecuadamente extraídas en bolsas de polietileno, limpias y etiquetadas para un análisis posterior.

Posteriormente al terreno, se llevó a cabo el trabajo de gabinete que consistió en el análisis de aniones y cationes de las muestras de agua en los laboratorios especializados del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), y el análisis de elementos traza efectuado en la empresa SGS Chile Ltda.

La instrumentación utilizada para el análisis de los aniones, fue un cromatógrafo iónico Thermo Scientific Dionex ICS-2100, mientras que la concentración de bicarbonato fue determinada mediante la titulación ácido-base de las muestras de agua, mediante el indicador anaranjado de metilo. La instrumentación utilizada para el análisis de cationes fue un espectrofotómetro de absorción atómica con llama (F-AAS) Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador estándar, a excepción del potasio que fue analizado por el método de emisión atómica con llama. Además, se incluyó la medición de concentración de sílice (SiO₂) mediante un espectrofotómetro portátil Hanna Instruments HI 96705.

La instrumentación utilizada para el análisis de los elementos traza, excepto el boro, fue un espectrómetro de masas ICP-MS mediante el método EPA 200.8: 1994 Rev 5.4. La concentración de boro, por otro lado, fue determinada por Carmine Espectrofotometría de absorción molecular UV-VIS, por medio del método SM 4500 BC.

El análisis de las muestras de sedimento se realizó mediante fluorescencia de rayos-X en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

1.4.1 Metodología asociada a objetivos específicos

La metodología aplicada a los objetivos específicos nombrados anteriormente, consistió en:

1. Las muestras de agua fueron analizadas en los laboratorios de Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) y SGS Chile Ltda., mientras que, las muestras de sedimento, se analizaron en el laboratorio de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Los resultados se analizaron mediante tablas comparativas y gráficos de dispersión según el tipo y la localización de las muestras.
2. Los resultados se interpretaron en función de la geología local y regional, así como considerando los residuos mineros de la zona de estudio.
3. Las normas nacionales e internacionales se compararon a los resultados obtenidos mediante tablas y gráficos de dispersión representativos.
4. Se compararon los resultados obtenidos de las muestras de agua con los resultados obtenidos previamente por Tapia y Verdejo (2015).
5. La composición de la columna estratigráfica se obtuvo mediante análisis de rayos X de las muestras de sedimento. La variación en profundidad se estudió con tablas comparativas y gráficos de dispersión.

1.5 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio está localizada en la región de Atacama de Chile, en la Provincia de Chañaral. La ciudad de Chañaral está ubicada en la desembocadura del río Salado a los 26°20'42"S y 70°36'57"W. La zona afectada por el aluvión de marzo de 2015 comprende todo el cauce del río Salado, que comienza cerca del salar de Pedernales a

los $26^{\circ}14'31''\text{S}$ y $69^{\circ}09'59''\text{W}$ y desemboca en la Bahía. En todo ese trayecto, se ubican también otras localidades afectadas por el acontecimiento, tales como Diego de Almagro ($26^{\circ}23'30''\text{S}$ y $70^{\circ}02'50''\text{W}$), El Salado ($26^{\circ}25'16''\text{S}$ y $70^{\circ}16'07''\text{W}$) y Llanta ($26^{\circ}19'59''\text{S}$ y $69^{\circ}49'09''\text{W}$), de oeste a este.

La región de Atacama se une al resto de Chile vía terrestre por la Ruta 5, que empalma las principales ciudades de la región: Chañaral, Caldera, Copiapó y Vallenar. El resto de las ciudades de la región de unen por diversas rutas paralelas. La C-13 une Chañaral con Potrerillos, pasando por las localidades principales en las que se sitúa la zona de estudio y recorriendo gran parte del valle del río Salado. Comprende Chañaral, El Salado, Diego de Almagro y Llanta. La carretera C-13 está conectada con la C-17 en Diego de Almagro, la que conecta a dicha ciudad con Copiapó hacia el sur. A 1,5 km de Llanta, hacia el este, la C-13 deja el lecho del río Salado para dirigirse al norte hacia Potrerillos, pasando por Portal del Inca. Por otro lado, en ese mismo lugar, nace la carretera C-163, y luego la C-173 que continúan hacia la cabecera del río, y permiten la continuidad del presente estudio hacia el este, hasta el salar de Pedernales (Figura 1.2).

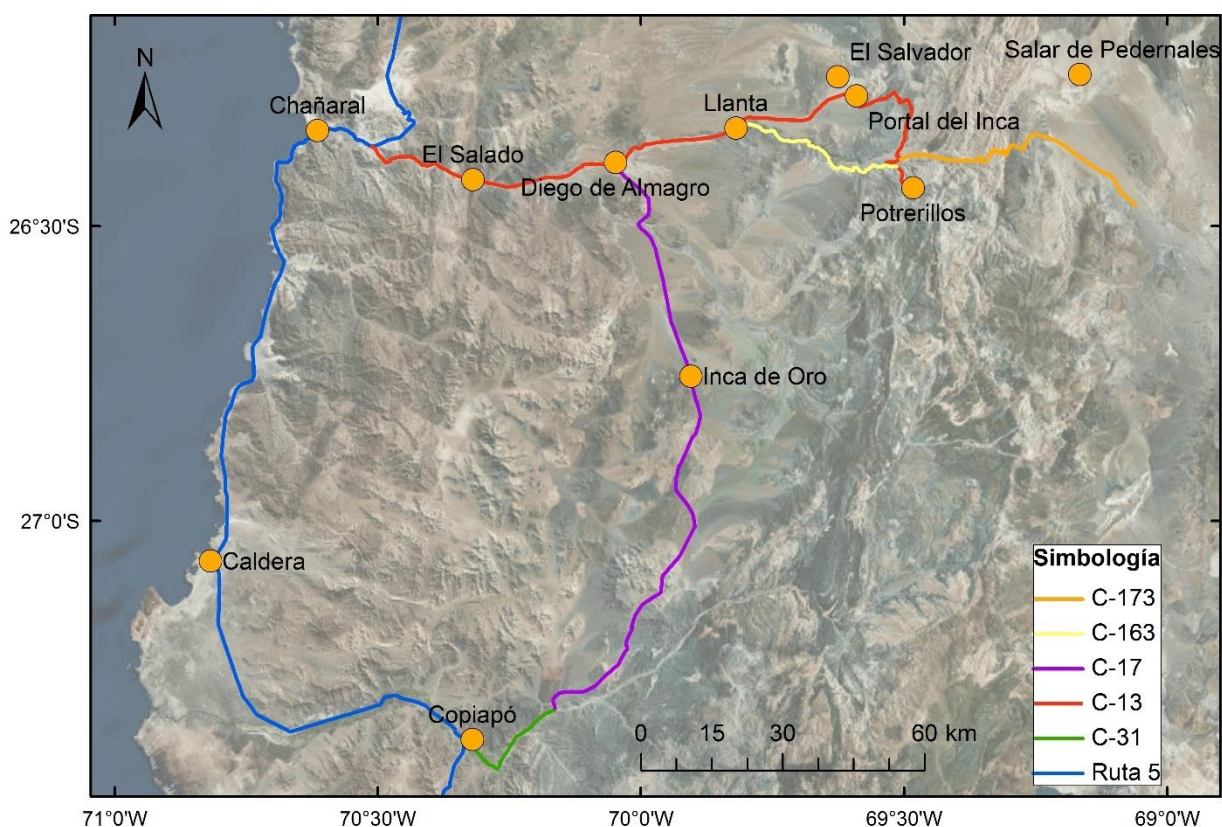


Figura 1.2 Vías de acceso a la zona de estudio.

2 MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

2.1 Generalidades

La evolución de la orogenia Andina, desde el Jurásico, ha estado gobernada por la subducción de la placa oceánica Farallón (Nazca) bajo el continente Sudamericano. Desde el Mioceno Tardío, la mayor parte del acortamiento en los Andes Centrales ha estado concentrado en la faja plegada y corrida sub-andina de piel delgada, contemporáneo al alzamiento de la meseta Altiplano-Puna a alturas de más de 4000 m. Por el otro lado, el antearco del norte de Chile, en la región sur del Desierto de Atacama, parece tener un dominio tectónico mucho más estable, registrando solo acortamiento horizontal menor Neógeno (Cornejo *et al.*, 1993; Godoy y Lara, 1998; Mpodozis y Clavero, 2002; Riquelme *et al.*, 2003; Arriagada *et al.*, 2006).

En la zona de estudio, el clima varía de desértico normal costero, con frecuente camanchaca, a desértico normal y gran sequedad en los llanos interiores de la Depresión central y faldeos de la cordillera de Domeyko (Fuenzalida, 1967), con precipitaciones nivales ocasionales en los meses de invierno (Godoy y Lara, 2005).

2.2 Unidades morfotectónicas

A lo largo de la transecta Chañaral-Pedernales, la ladera oeste de los Andes comprende cinco unidades morfotectónicas (Figura 2.1): la Cordillera de la costa, la Depresión Central, la Precordillera, la Depresión Pre-Andina (incluyendo las cuencas Pedernales-Maricunga) y, finalmente, la Cordillera Claudio Gay, bordeando el arco volcánico moderno de la Cordillera Occidental (Nalpas *et al.*, 2008).

La Cordillera de la Costa consiste en remanentes erodados del arco Andino del Jurásico Inferior temprano a Cretácico Inferior, con grandes complejos plutónicos y secuencias volcánicas del Jurásico a Cretácico Inferior, y donde la principal característica tectónica es el Sistema de Fallas Atacama (SFA). Los escasos afloramientos en la Depresión Central están dominados por secuencias volcánicas y sedimentarias cubiertas por complejos volcánicos del Paleoceno a Eoceno Inferior. En la parte más al oeste de la Precordillera, en las cercanías de El Salvador y Potrerillos, sedimentos de trasarco son intruidos por stocks y pórfidos asociados a las fallas Sierra Castillo y Agua Amarga, y a la Faja Plegada y Corrida Potrerillos. Las cuencas Pre-Andinas Pedernales y Maricunga, se ubican a lo largo de borde este de la Precordillera y registran actividad volcánica joven del Oligoceno-Mioceno. Hacia el este, la Cordillera Claudio Gay está formada por un bloque de basamento Paleozoico cubierto por secuencias sedimentarias y volcánicas del Eoceno a Mioceno que hacen de límite oeste de la Cordillera Occidental, formada por estratovolcanes parcialmente activos y complejos de calderas de la Zona Volcánica Andina Central (ZVC), que alcanza sobre 6000 m (Cornejo *et al.*, 1993; Mpodozis *et al.*, 1995; Nalpas *et al.*, 2008). Secuencias no consolidadas de gravas del Neógeno (Gravas de Atacama) están distribuidas desde la Precordillera hasta la Cordillera de la Costa (Cornejo *et al.*, 1993).

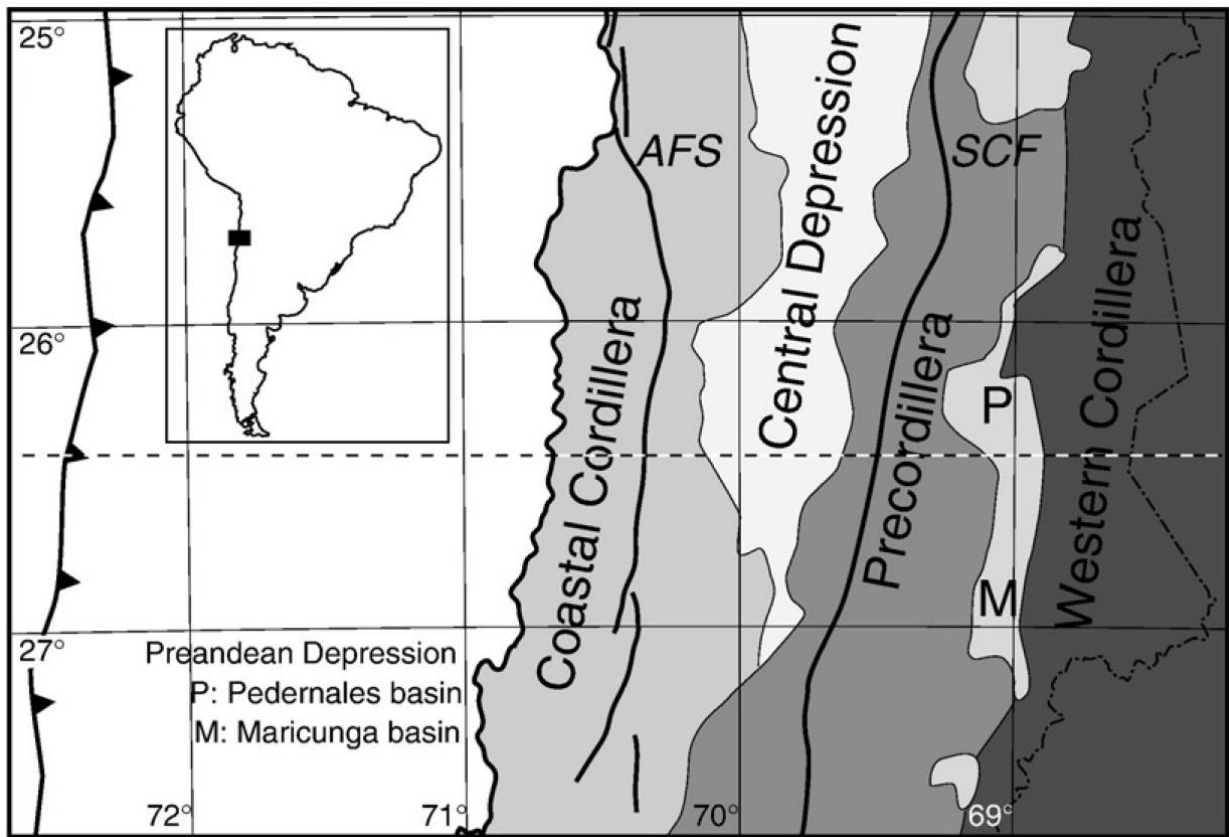


Figura 2.1 Unidades morfoestructónicas que forman la parte más occidental de la Cordillera Andina en el norte de Chile. La zona de estudio, transecta Chañaral-Pedernales, se encuentra inmediatamente sobre la línea horizontal segmentada (Nalpas *et al.*, 2008).

2.3 Geología

2.3.1 Rocas estratificadas

Se incluyen en este subcapítulo las rocas que no tienen un carácter plutónico; estas corresponden a rocas epimetamórficas, sedimentarias, volcánicas e hipabisales. La Figura 2.2 muestra, de manera simplificada, la geología de la zona de estudio y sus alrededores.

2.3.1.1 Paleozoico

Para la zona de estudio, esta era comprende dos unidades estratificadas. El *Complejo Epimetamórfico Chañaral*, del Devónico-Carbonífero, corresponde a una asociación principalmente metaturbidítica, que incluye facies de 'mélange' y escasas metabasitas y metacalizas, y aflora adyacente a la costa y hasta 32 km hacia el interior. Presenta cornificación variable y sobreimposición de alteración hidrotermal asociada a plutones del Pérmico al Jurásico (Godoy y Lara, 1998).

Por otro lado, la *Formación La Tabla*, del Paleozoico superior, consiste en una secuencia volcánico-continental principalmente de tobas soldadas y brechas riolíticas, y

en menor proporción, brechas andesíticas, y se ubica al suroeste del salar de Pedernales, al este de la zona de estudio (Tomlinson *et al.*, 1999).

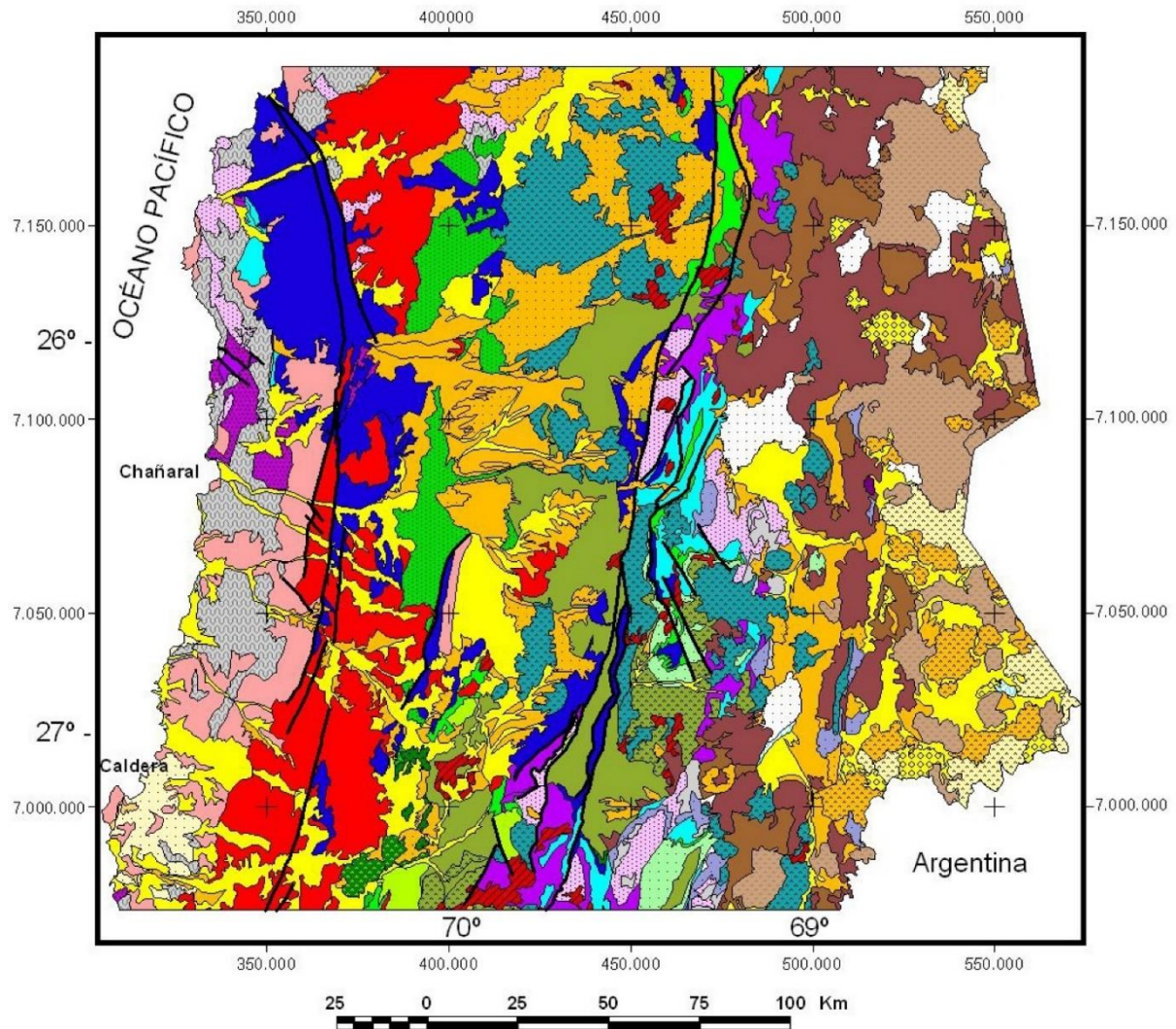


Figura 2.2 Mapa geológico simplificado de la Hoja El Salvador Occidental (Godoy y Lara, 2005).

2.3.1.2 Mesozoico

De edad mesozoica, se encuentra una mayor cantidad de unidades estratificadas, por lo que se presentarán de acuerdo al periodo al cual pertenecen.

2.3.1.2.1 Triásico

La *Formación Agua Chica* es del Triásico Superior y consiste en una secuencia sedimentaria volcánica continental, expuesta al norte de Chañaral. Principalmente, son conglomerados brechosos, lavas andesíticas, areniscas rojas, lutitas y tobas (Godoy y Lara, 2005). Además, en la zona oeste cercana al salar de Pedernales, se encuentra la *Formación Quebrada del Salitre*, del Triásico Superior-Jurásico Inferior, una secuencia volcánica-sedimentaria de origen marino y continental. Se trata de lavas y brechas basálticas y riolíticas, con areniscas, conglomerados, calizas y domos riolíticos (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.1.2.2 Jurásico

Cubriendo concordantemente a la Formación Agua Chica, al sur de la Quebrada Pan de Azúcar, se encuentra la *Formación Pan de Azúcar*, del Hettangiano-Sinemuriano, la cual está compuesta por calizas, litarenitas, calcilutitas y conglomerados, asociados a un ambiente litoral (Godoy y Lara, 2005).

En la zona central de la zona de estudio, aflora la *Formación La Negra*, del Jurásico Medio-Jurásico Superior (Cornejo *et al.*, 2013), una sucesión de lavas andesítico-basáltica e intercalaciones sedimentarias marinas detríticas, intruída por abundantes plutones y filones de composición intermedia. Muestra un paso gradual, secuencia arriba, hacia la Formación Punta del Cobre (Godoy y Lara, 2005).

La *Formación Sierra Fraga*, del Jurásico Medio-Cretácico Inferior, es una secuencia compuesta de lavas andesíticas y andesítico-basálticas con intercalaciones volcanosedimentarias y niveles calcáreos marinos. Aflora en el área de El Salvador a lo largo de la vertiente occidental de la cordillera de Domeyko (Cornejo *et al.*, 2013).

En las cercanías de Diego de Almagro, se ubica La *Formación Punta del Cobre* del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, que corresponde a una potente secuencia de lavas andesítico-basálticas macizas y brechas volcanoclásticas, junto a domos andesíticos y dacíticos (Godoy y Lara, 2005).

En los sectores cercanos al salar de Pedernales, afloran dos formaciones de carácter sedimentario marino: *Formación Montandón* (Pliensbachiano-Bajociano medio) y *Formación Asientos* (Bajociano-Caloviano). La primera está compuesta por calizas y calcilutitas fosilíferas y, la segunda, por calizas fosilíferas, areniscas calcáreas y volcanoclásticas, y lutitas calcáreas. Además, se hallan los *Estratos de Quebrada Vicuña* (Jurásico Medio-Superior), rocas volcánicas con intercalaciones calcáreas marinas, que incluyen lavas y filones andesítico-basálticos, y la *Formación Pedernales* (Titoniano-Valanginiano), secuencia sedimentaria marina de calizas y areniscas

calcáreas, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas volcanoclásticas y lutitas calcáreas (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.1.2.3 Cretácico

El *Grupo Chañarcillo*, del Valanginiano-Aptiano (Cornejo *et al.*, 2013) se ubica en la sierra Santo Domingo, al norte de la quebrada Chañaral Alto. Incluye cuatro formaciones compuestas por rocas carbonatadas marinas de areniscas y calizas coquináceas (Godoy y Lara, 2005).

En la localidad de Llanta, en la quebrada del Salado, se define la *Formación Llanta* (Campaniano-Maastrichtiano), secuencia volcanosedimentaria continental de más de 2.000 m de espesor. Consta de un nivel inferior sedimentario de areniscas, conglomerados, calizas, brechas y lavas traquíticas; un nivel intermedio sedimentario-volcánico de brechas y conglomerados sedimentario-volcánicos, e ignimbritas dacíticas a andesíticas; y un nivel superior volcánico de lavas de andesitas y andesitas basálticas (Cornejo *et al.*, 2013).

En el sector del salar de Pedernales aflora la *Formación Agua Helada*, del Cretácico Inferior, una secuencia sedimentaria continental de areniscas y limolitas (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.1.3 Cenozoico

De este periodo, aflora la *Formación El Salvador*, del Paleoceno medio-superior, en torno al yacimiento El Salvador y el cerro Indio Muerto. Es una secuencia volcánica compuesta de tobas riolíticas, lavas andesíticas y daciandesíticas, lavas y lavas-domos dacíticos y brechas volcánicas polimícticas (Cornejo *et al.*, 2013).

Existen dos grupos de estratos que afloran en la zona de estudio. *Estratos de Cerro Valiente* (Paleoceno), que se encuentra cerca de Potrerillos, es una secuencia volcánica, efusiva y piroclástica, con un nivel inferior de lavas y brechas andesíticas, un nivel intermedio de ignimbritas y flujos riolíticos, y un nivel superior de lavas traquíticas. Por otro lado, *Estratos de Cerro el Buitre* (Eoceno medio-superior) aflora en Pedernales y se trata de una secuencia volcanoclástica y sedimentaria, con un nivel inferior de brechas volcanoclásticas y otro superior de conglomerados polimícticos (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.2 Rocas intrusivas

En forma general, la Figura 2.2 muestra la ubicación de las unidades intrusivas de la zona de estudio y sus alrededores.

2.3.2.1 Paleozoico

En el sector de Pedernales afloran *Granitoides de Montandón*, monzogranitos y granodioritas del Pérmico, además del *Batolito Pedernales* compuesto por dioritas, granodioritas, granitos, monzonitas, y pórfidos granodioríticos, riolíticos y micrograníticos,

de la misma edad y que se ubica al suroeste del salar de Pedernales. Al oeste de la Falla Barrancas, se encuentra el *Batolito Sierra Castillo*, del Pérmico, formado por dioritas, granodioritas, granitos, tonalitas y monzogranitos (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.2.2 Mesozoico

Las unidades mesozoicas consisten en cuerpos intrusivos, principalmente, monzogranitos, granodioritas, dioritas y granitoides.

2.3.2.2.1 Triásico

Al norte de la desembocadura del río Salado, aflora el *Granito Pan de Azúcar*, un cuerpo intrusivo, elongado en sentido norte-sur, formado por monzo a sienogranitos, que intruye o está en contacto por falla con el Complejo Epimetamórfico Chañaral. Por otro lado, el *Granito Cerros del Vetado* está compuesto por monzogranitos, en parte porfídicos, aflora entre las quebradas del Salado y Peralillo y se emplaza en el Complejo Epimetamórfico Chañaral (Godoy y Lara, 2005).

2.3.2.2.2 Jurásico

Al sur de Chañaral aflora un monzogranito del *Plutón Barquito*, del Jurásico Inferior-Medio, mientras que, al norte de la misma, en el Cerro Chañaral, se encuentran granodioritas del *Plutón Peralillo*. El *Plutón Las Ánimas* (Jurásico Medio-Cretácico Inferior) aflora al oeste de la Falla Occidental del SFA como una franja norte-sur de dioritas, monzodioritas, granodioritas, granitos, microdioritas, tonalitas y algunos gabros (Godoy y Lara, 2005).

Hacia el sector de Pedernales, se encuentran *Filonés hipabisales andesítico-basálticos* que se emplazan concordantemente, norte-sur, en las formaciones Montandón y Asientos (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.2.2.3 Cretácico

Del Cretácico Inferior, se encuentran los plutones y pórfidos descritos a continuación. Con una elongación norte-sur, al oeste de la Falla Central del SFA, en las cercanías de la localidad El Salado, aflora el *Plutón Las Tazas* que está constituido por granodioritas con inclusiones de dioritas, y monzodioritas. Al este del SFA y con la misma orientación del anterior, se encuentra el *Plutón Sierra Áspera* donde predominan dioritas y, en forma secundaria, gabros, monzogranitos, granodioritas y tonalitas. Al sur del cerro Salado se emplaza el *Plutón Sierra Dieciocho* compuesto por granitoides, predominando las facies dioríticas cuarcíferas y granodioríticas, y en la Sierra Merceditas, al sureste de la localidad El Salado, aflora el *Plutón Remolino*, un cuerpo intrusivo de tonalitas, microdioritas, granodioritas, dioritas cuarcíferas y stocks serpentoriales de tonalita. En la zona nororiente del río Salado, afloran *Pórfidos dacíticos Pampa Austral*, cuellos volcánicos y domos de dacitas emplazados en las formaciones La Negra y Punta del Cobre (Godoy y Lara, 2005).

Hacia el área de Pedernales, afloran *Pórfidos, diques y filones* andesíticos del Cretácico Superior (Tomlinson *et al.*, 1999), y del Cretácico Superior alto, las *Monzodioritas y monzonitas cuarcíferas de Sierra Caballo Muerto, Quebrada del Salado y Sierra Miranda* intruyen a la Formación Llanta y consisten en extensos plutones de monzodioritas a monzonitas cuarcíferas (Cornejo *et al.*, 2013).

2.3.2.3 Cenozoico

2.3.2.3.1 Paleógeno

En la Sierra Caballo Muerto afloran *Cuerpos intrusivos hipabisales dacíticos y daciandesíticos porfídicos de la Sierra Caballo Muerto* del Paleoceno, con una elongación noroeste, y *Cuerpos hipabisales andesíticos, daciandesíticos porfídicos y microdioríticos*, del Paleoceno Superior, emplazados como *sills* y lacolitos, intruyendo la Formación Llanta. Al noroeste de la ciudad El Salvador, se encuentran *Gabros y dioritas del cerro La Cruz*, del Paleoceno, caracterizados por cuerpos menores como *sills* y pequeños *stocks* de rocas afaníticas básicas (Cornejo *et al.*, 2013).

Domos riolíticos y riodacíticos del Cerro Indio Muerto y San Juan (Paleoceno Superior) conforman un cordón NNE que forma el Cerro Indio Muerto y se hallan hacia el sur entre las quebradas Pisqueros y San Juan, donde se asocian lacolitos, diques y *sills* riolíticos. Además, un conjunto de pórfidos riolíticos subvolcánicos y domos extrusivos conforman los *Cuerpos hipabisales riolíticos del Kilómetro Catorce y Pampa del Inca* (Paleoceno Superior) en las cercanías de la localidad El Salvador (Cornejo *et al.*, 2013).

En torno al Cerro Vicuña, afloran *Granodioritas y monzodioritas cuarcíferas del Cerro Vicuña*, del Eoceno Inferior-Eoceno Medio, un complejo intrusivo compuesto por varios plutones de composición granodiorítica a tonalítica y monzodiorítica. Un cuerpo pequeño se ubica en el costado oriental del mismo cerro, conformado por *Granitos gráficos y monzogranitos del Cerro Vicuña*, de la misma edad. *Pórfidos riodacíticos del Campamento Antiguo, lacolitos y diques asociados* (Eoceno) consisten en un conjunto de cuerpos tabulares emplazados como diques o *stocks* menores en las cercanías del yacimiento El Salvador, donde también se asocian *Cuerpos hipabisales granodioríticos y dacíticos porfídicos del Yacimiento El Salvador* compuestos por diques y *stocks* (Cornejo *et al.*, 2013).

Al sur de Potrerillos, se encuentra el *Domo riolítico de Potrerillos*, riolitas fluidales alteradas del Paleoceno, mientras que, en la zona de Pedernales, afloran *Monzonitas y monzodioritas paleocenas* en forma de *stocks*, *Pórfidos dioríticos y diques andesíticos de piroxeno*, conformados por *stocks*, diques y filones, además de *Pórfidos riolíticos y diques silíceos*, afaníticos y porfídicos, todos del Paleoceno (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.3 Depósitos no consolidados

2.3.3.1 Neógeno

Las *Gravas de Atacama* conforman la mayor distribución de los depósitos no consolidados en la zona de estudio. Consisten en depósitos de gravas y arenas que

representan la sedimentación aluvial y fluvial de paleosistemas de drenaje del río Salado, quebrada del Salado y quebrada Inés Chica, activos durante el Mioceno Inferior a Medio y que aparecen ‘colgados’ en las laderas de los valles actuales. Se componen de bancos de gravas, bloques, arenas y arenas de gravilla (Cornejo *et al.*, 2013), generalmente no consolidadas u ocasionalmente cementadas (Godoy y Lara, 2005).

La *Ignimbrita Los Cristales*, del Mioceno Medio, aflora en la cuesta El Jardín, en el sector de Pedernales, como una intercalación ignimbrítica riódacítica, mientras que en el sector de la localidad El Salvador, en la Quebrada San Andrés, se encuentra la *Ignimbrita San Andrés* (Mioceno Superior), una toba riolítica de tamaño lapilli (Cornejo *et al.*, 2013). Del Mioceno Superior-Plioceno son los *Depósitos aluviales antiguos*, situados tanto en las pampas del interior como en el sector costero. Son depósitos de gravas, arenas y limos que constituyen conos aluviales inactivos (Godoy y Lara, 2005). En el sector de Pedernales, del Mioceno Medio, se encuentran la *Ignimbrita Inés Chica*, una toba riolítica, y *Aparatos volcánicos centrales y campos de lavas*, flujos piroclásticos dacíticos y daciandesíticos, domos daciandesíticos y lavas daciandesíticas a andesítico-basálticas; además de los *Depósitos salinos antiguos del salar de Pedernales*, costras rugosas de cloruros y sulfatos, y limos salinos estratificados (Tomlinson *et al.*, 1999).

2.3.3.2 Cuaternario

Del Pleistoceno-Holoceno, los *Depósitos aluviales* consisten en gravas, arenas y limos de selección variable, de origen fluvial como aluvial, y se ubican en las quebradas principales de la zona de estudio (Godoy y Lara, 2005), y los *Depósitos coluviales* son sedimentos con bloques angulosos y matriz areno-arcillosa, y se encuentran en laderas de fuerte pendiente. *Depósitos eólicos* compuestos por limos y arenas finas ubicados al sureste del salar de Pedernales, mientras que, al suroeste del mismo, se encuentran los *Depósitos salinos recientes del salar de Pedernales*, costras de sales y limos salinos húmedos (Tomlinson *et al.*, 1999). *Depósitos eólicos y de playa*, conformados por arenas finas a medias, se ubican en las cercanías a la costa de la zona de estudio (Godoy y Lara, 1998), y *Depósitos antrópicos* del Holoceno se asocian a los relaves del yacimiento El Salvador y otros distritos mineros, consistentes en bancos de limos finos con variable contenido de agua (Cornejo *et al.*, 2013).

2.3.4 Geología estructural

El rasgo estructural más destacado de la zona de estudio es el segmento El Salado del Sistema de Fallas Atacama (AFS, su sigla en inglés, *Atacama Fault System*) definido por Arabasz en 1971 y cuya actividad se adjudica a la deformación cretácica temprana, y se sitúa en la Cordillera de la Costa (Figura 2.3). Consiste en una serie de fallas discontinuas y que se sobreponen, con una orientación sub-paralela al margen continental que puede ser seguida por más de 1000 km desde Iquique (20°30’S) a La Serena (29°45’S), pasando por la zona de estudio a la altura de Chañaral (Riquelme *et al.*, 2003). Los cambios en la orientación del sistema permiten definir tres segmentos, de norte a sur: salar del Carmen, Paposo y El Salado (Thiele y Pincheira, 1987), siendo este último el segmento de la SFA asociado al presente trabajo.

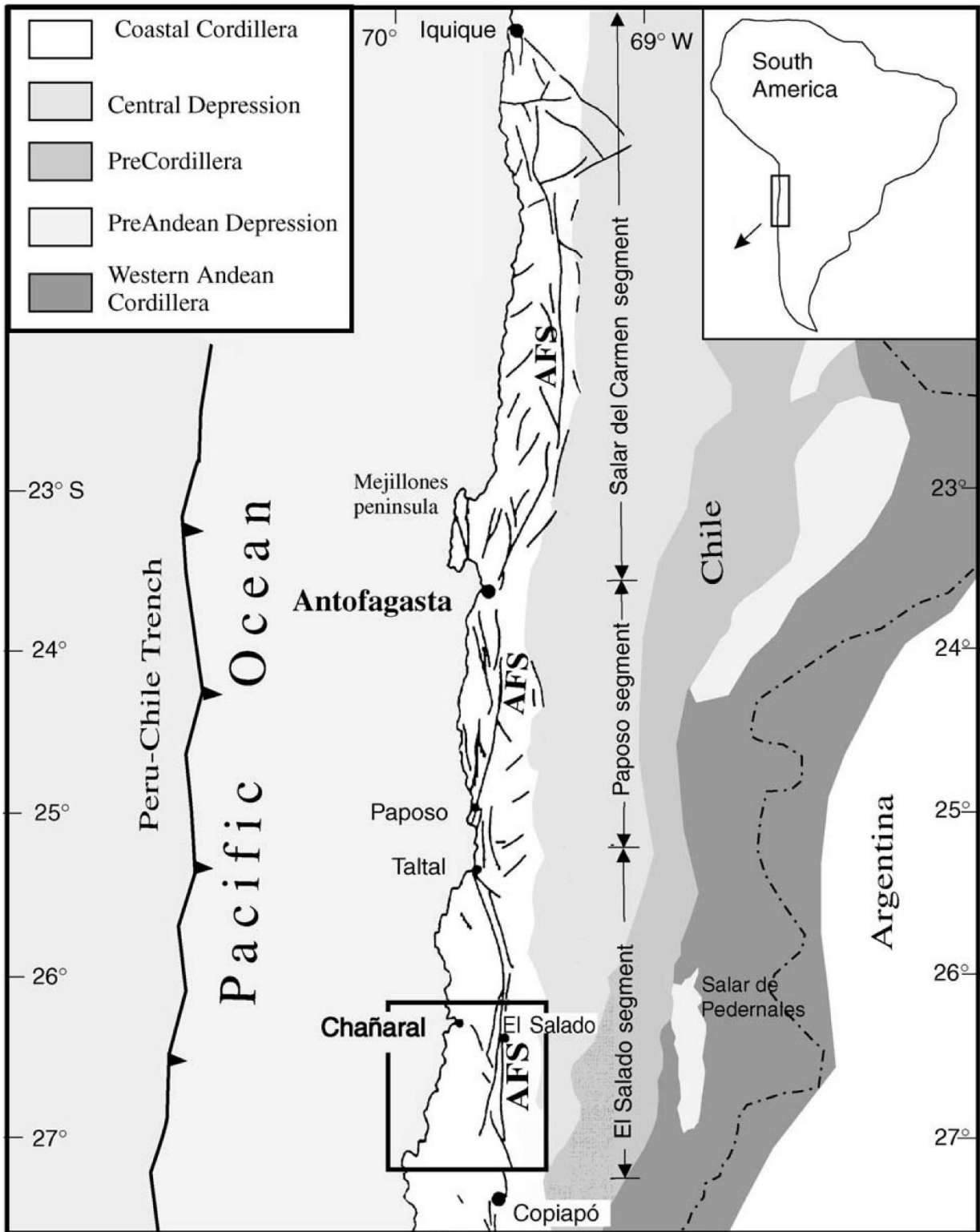


Figura 2.3 Mapa de la región del Desierto de Atacama con las unidades morfotectónicas principales y la ubicación del AFS (Riquelme *et al.*, 2003).

Acotado a la zona de estudio, en su mitad norte las fallas principales de la SFA presentan trazas de rumbo norte-sur mientras que, hacia el este, destacan fallas

secundarias de rumbo nornoreste (por ejemplo, Falla Cerro Salado) a lo largo de las cuales se suele observar alteración (Gelcich, 1998). Las estructuras tienen un manteo subvertical y las formaciones del Jurásico y Cretácico presentan manteo hacia el este.

Hacia el sector oriental, la asociación estructural incluye fallas normales reactivadas como inversas, pliegues de diversa longitud de onda, fallas inversas y fallas transcurrentes, como resultado de la extensión del Cretácico Superior, deformación compresiva en el límite Cretácico-Terciario, volcanismo explosivo paleoceno y transpresión sinistral en el Eoceno (Fase Incaica), seguido por alzamiento y erosión en el Eoceno-Oligoceno (Cornejo *et al.*, 2013). Destacan fallas de rumbo norte-sur y algunas noroeste o noreste en las cercanías de El Salvador, que cortan la zona de estudio, tales como las fallas Sierra Castillo-Agua Amarga, río de la Sal, Barrancas y Agua de la Piedra, algunas de las cuales se alinean a los valles principales: la falla Río de la Sal se alinea con el río Salado, caudal principal en el cual se basa el presente estudio (Tomlinson *et al.*, 1999). En el sector occidental de la Precordillera se ubica la Faja Plegada y Corrida Potrerillos, una faja de 14 km de ancho y 45 km de largo, aproximadamente, con vergencia al este (Tomlinson *et al.*, 1993).

2.4 Unidades hidrográficas

Una cuenca hidrográfica se define como una unidad física bien caracterizada, donde un área de suelo es drenada por un determinado curso de agua y limitada periféricamente por el divisor de aguas. Para fines de análisis hidrológicos, se consideran sub-cuenca aquellas que presentan una red de drenajes de pequeño orden (primer o segundo) en áreas que varían entre 1 a 100 ha (Merten *et al.*, 2001).

La zona de estudio abarca dos cuencas hidrográficas. Al este se halla la cuenca del río Salado, y al oeste, la cuenca del salar de Pedernales, que actualmente se encuentran conectadas, en el sector noroccidental del salar de Pedernales, por un túnel por el cual se vierte salmuera desde el salar al río Salado (Figura 2.4). El caudal en esta salida fue medido en 51 l/s (Risacher *et al.*, 1999).



Figura 2.4 Canal artificial que conecta la cuenca del río Salado con la del salar de Pedernales.

2.4.1 Cuenca del río Salado

La cuenca del río Salado es una cuenca exorreica con una superficie total de 7.500 km² (Contreras *et al.*, 2015). Limita al norte con cuencas menores y secas del extremo sur del Desierto de Atacama, al sur con la hoya de la quebrada Flamenco y de la quebrada Paipote. Al este, queda separada de la cuenca del salar de Pedernales por un cordón montañoso de baja altura (Niemeyer, 1980).

La cabecera principal del río Salado tiene su origen en las Vegas de Vicuña, al pie occidental del cerro Doña Inés ubicado en el extremo sur de la cordillera de Domeyko. Desarrolla su curso en un cañón profundo de dirección SSW por 50 km, para luego tomar franco rumbo al oeste hasta la desembocadura en el mar, tras un recorrido de otros 125 km. Desde la Precordillera recibe varias quebradas tributarias, como la de Asientos que proviene desde el sur. En el curso medio, a 10 km de Diego de Almagro, por el costado sur, recibe a la quebrada Chañaral Alto y a la quebrada de la Angostura. Casi en la desembocadura, desde el sur, recibe a la quebrada de Las Ánimas, y algo más al interior, la quebrada de El Saladito (Niemeyer, 1980).

Esta cuenca está subdividida en 3 subcuencas: del Río Salado Alto, Quebrada del Chañaral y la del Río Salado Bajo (Figura 2.5). Las dos primeras captan aguas caídas en la Precordillera y Depresión Central, mientras que la última se ubica en la Cordillera de la Costa (Contreras *et al.*, 2015). Además, las subcuencas se vuelven a dividir en subsubcuencas. Río Salado Alto y Río Salado Bajo están constituidas por 4 subsuncuencas cada una, mientras que Quebrada del Chañaral, contiene a 3, existiendo un total de 11 subsuncuencas en la cuenca del Río Salado.

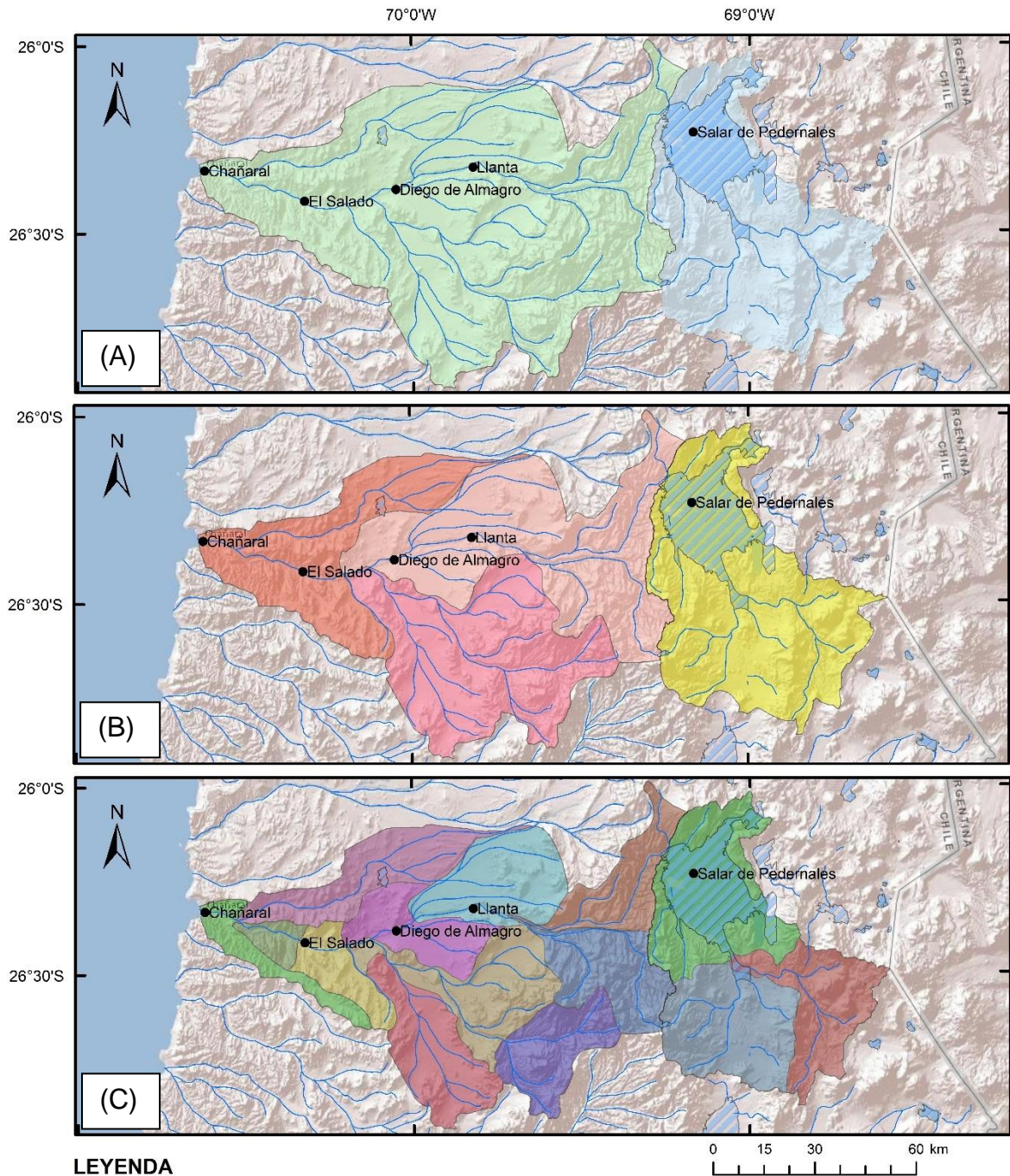
2.4.2 Cuenca del salar de Pedernales

La cuenca del salar de Pedernales es la cuenca endorreica más extensa de la región de Atacama, con una superficie de 3.620 km², y comprende terrenos sedimentarios, formaciones volcánicas y rocas plutónicas. Asimismo, el salar también es el más grande de la región y se ubica en el límite occidental de la cuenca, con una superficie de 335 km² (Risacher *et al.*, 1999).

Esta cuenca se desarrolla en altitudes desde los 3.450 hasta sobrepasar los 5.000 m s.n.m. Por el norte, queda delimitada por las estribaciones australes de la cordillera de Domeyko; por el sur, queda separada de la hoya del salar de Maricunga por un cordón montañoso bajo; al oriente la circunda la cordillera de Claudio Gay; y el flanco oeste está limitado por la cuenca del río Salado (Niemeyer, 1980).

El salar de Pedernales constituye un enorme embalse subterráneo de agua salobre cubierto, en gran parte, por una costra de sales compuesta, en lo principal por yeso y halita. Además, contiene carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos, por lo que pueden presentar altas concentraciones de litio, potasio, boro y sodio (Gajardo, 2014) La principal alimentación provendría de infiltraciones desde los dos ríos principales de la cuenca: Juncalito y La Ola (Niemeyer, 1980).

De acuerdo a los tributarios de esta cuenca, se la puede subdividir en 3 subsubcuencas: Río Juncalito, Río La Ola y Salar de Pedernales (Figura 2.5).



LEYENDA

Cuencas

- Salar de Pedernales
- Río Salado

Subcuencas

- Salar de Pedernales
- Quebrada Del Chañaral
- Río Salado Alto
- Río Salado Bajo

Subsubcuencas

- Río de Juncalito
- Río de La Ola

Salar de Pedernales

Quebrada Potrerillos

Quebrada de la Angostura

Quebrada del Chañaral Alto hasta

Bajo Junta Quebrada del Salto

Quebrada del Chañaral entre

Quebrada del Salto y Río Salado

Quebrada del Saladito

Río Salado Entre Arriba Junta Quebrada

del Carmen y Quebrada del Saladito

Río Salado Entre Quebrada Potrerillos

y Bajo Junta Quebrada Salinas

Río Salado Entre Quebrada

Salinas y Quebrada del Chañaral

Río Salado Entre Quebrada del

Saladito y Desembocadura

Río Salado entre Quebrada del

Chañaral y Quebrada del Carmen

Río de la Sal o Salado Hasta

Junta Quebrada Potrerillos

SIMBOLOGÍA

Localidad

Red de drenaje

Masas de agua

Figura 2.5 Ubicación de cuencas, subcuencas y subsubcuencas en la zona de estudio. (A) Cuencas. (B) Subcuencas. (C) Subsubcuencas (Fuente: DGA).

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Geoquímica de aguas

Las muestras de agua fueron recogidas principalmente a lo largo del río Salado y, algunas en la desembocadura al mar. De esta forma, se obtuvo una distribución suficientemente continua, dentro de lo que permitía la situación de emergencia y la hidrogeología y geomorfología de la zona, para poder realizar un análisis comparativo más completo.

La Tabla 3.1 detalla el símbolo de cada muestra con el tipo de agua correspondiente, además del color a que se le asocia, mientras que la Figura 1.1 indica los puntos de localización de la extracción de muestras de agua.

Tabla 3.1 Simbología, tipo de agua y color asociado a cada muestra.

| Muestra | Tipo de agua | Color |
|---------|--------------|------------|
| A01 | Mar | Amarelo |
| A02 | Mar | Amarelo |
| A03 | Mar | Amarelo |
| A04 | Costera | Laranja |
| A05 | Costera | Laranja |
| A06 | Superficial | Azul claro |
| A07 | Superficial | Azul claro |
| A08 | Superficial | Azul claro |
| A09 | Superficial | Azul claro |
| A10 | Superficial | Azul claro |
| A11 | Superficial | Azul claro |
| A12 | Superficial | Azul claro |
| A13 | Superficial | Azul claro |
| A14 | Superficial | Azul claro |
| A15 | Subterránea | Verde |
| A16 | Superficial | Azul claro |
| A17 | Superficial | Azul claro |
| A18 | Superficial | Azul claro |
| A19 | Salar | Verde |

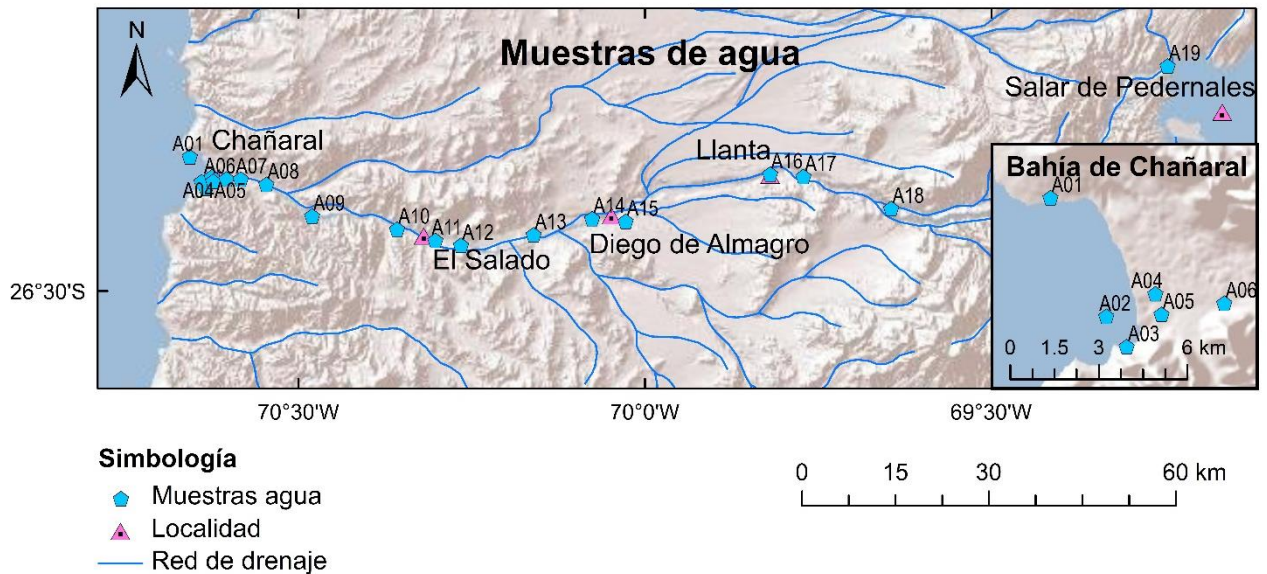


Figura 3.1 Ubicación de los puntos de toma de muestras de agua.

En el presente subcapítulo, se detalla la concentración de los elementos químicos obtenidos en las muestras junto a su análisis y la comparación con estudios previos. Tapia y Verdejo (2015), realizaron un estudio geoquímico en esta misma zona previo al aluvión de marzo 2015 que puede servir para observar eventuales cambios. Además, los datos obtenidos se compararán con las normas nacionales de concentración de elementos químicos entregados por el INN (Instituto Nacional de Normalización). En la Tabla 3.2 se detallan las concentraciones de los elementos mayores en las muestras analizadas y en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4, las de los elementos traza. Las concentraciones en mg/l de todos los elementos analizados en las muestras de agua se encuentran detallados en el Anexo A.

Tabla 3.2 Concentración de elementos mayores en muestras de agua, en mg/l.

| Muestra | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | NO ₃ ⁻ | Br ⁻ | HCO ₃ ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | SiO ₂ |
|---------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| A01 | 20.006 | 2.257 | - | 77,7 | 167,75 | 10.700 | 540 | 400 | 1.278 | - |
| A02 | 20.032 | 2.276 | - | 75,9 | 207,40 | 12.400 | 610 | 404 | 1.273 | - |
| A03 | 19.993 | 2.277 | - | 75,0 | 167,75 | 10.800 | 550 | 406 | 1.273 | 0,3 |
| A04 | 21.274 | 2.699 | - | 77,6 | 170,80 | 11.600 | 500 | 454 | 1.256 | - |
| A05 | 26.771 | 2.731 | - | 66,4 | 170,80 | 15.000 | 660 | 551 | 1.287 | 2 |
| A06 | 99.435 | 2.611 | - | - | 216,55 | 61.200 | 2.500 | 1.652 | 1.770 | 10,9 |
| A07 | 87.447 | 2.339 | - | - | 244 | 52.600 | 2.090 | 1.606 | 1.560 | 10,4 |
| A08 | 86.996 | 2.254 | - | - | 186,05 | 53.600 | 2.180 | 1.530 | 1.554 | 10,4 |
| A09 | 76.629 | 2.123 | - | - | 176,90 | 45.800 | 1.920 | 1.469 | 1.404 | 10,4 |
| A10 | 89.141 | 2.229 | - | - | 237,90 | 54.800 | 2.090 | 1.521 | 1.466 | 10,3 |
| A11 | 53.385 | 1.766 | - | - | 131,15 | 29.000 | 1.250 | 1.382 | 1.078 | 12,7 |
| A12 | 195.399 | 3.969 | - | - | 417,85 | 103.200 | 4.370 | 1.402 | 2.848 | 7 |
| A13 | 198.128 | 3.921 | - | - | 396,50 | 105.600 | 4.960 | 1.365 | 3.082 | 6,7 |
| A14 | 193.139 | 4.665 | 19,5 | 14,9 | 372,10 | 111.200 | 4.410 | 1.472 | 2.910 | 8,1 |
| A15 | 174 | 793 | - | - | 76,25 | 221 | 8,68 | 211 | 6,59 | 1,1 |
| A16 | 197.705 | 4.710 | 26,5 | 19,7 | 323,30 | 106.400 | 4.320 | 1.513 | 2.838 | 7,2 |
| A17 | 192.730 | 4.676 | 26,2 | 18,4 | 314,15 | 112.800 | 4.230 | 1.522 | 2.806 | 6,9 |
| A18 | 187.942 | 4.777 | 22,1 | 14,4 | 286,70 | 109.600 | 4.160 | 1.562 | 2.728 | 8,2 |
| A19 | 197.716 | 4.149 | - | - | 1052,25 | 106.800 | 4.090 | 1.127 | 2.504 | 4,3 |

Tabla 3.3 Concentración de elementos traza en muestras de agua, en mg/l: Al, As, B, Ba, Co, Cu, Fe, Li.

| Muestra | Al | As | B | Ba | Co | Cu | Fe | Li |
|---------|------|--------|-------|--------|--------|--------|------|---------|
| A01 | - | 0,005 | 2,8 | - | - | - | - | - |
| A02 | - | 0,004 | 1,3 | - | - | - | - | - |
| A03 | - | 0,007 | 3,5 | - | - | 0,0058 | - | - |
| A04 | - | 0,023 | 7,6 | 0,0211 | - | 0,2299 | - | 3,973 |
| A05 | - | 0,059 | 17,7 | 0,0289 | - | 0,0582 | - | 19,527 |
| A06 | - | 0,690 | 118,4 | 0,2412 | - | - | - | 234,472 |
| A07 | - | 0,561 | 117,2 | 0,2365 | - | - | - | 201,141 |
| A08 | - | 0,614 | 115,4 | 0,2176 | - | - | - | 204,863 |
| A09 | - | 0,502 | 103 | 0,2029 | - | - | 0,05 | 184,900 |
| A10 | 0,07 | 0,504 | 168,8 | 0,1816 | - | 0,0338 | 0,10 | 180,319 |
| A11 | 0,04 | 0,015 | 106,4 | 0,0635 | - | - | 0,04 | 110,421 |
| A12 | 0,15 | 1,462 | 158,8 | 0,1644 | - | 0,1958 | 0,11 | 412,912 |
| A13 | - | 1,979 | 115 | 0,1971 | - | 0,0761 | 0,06 | 515,748 |
| A14 | - | 1,922 | 106,6 | 0,2134 | - | 0,0910 | 0,02 | 484,784 |
| A15 | 0,02 | 0,0003 | 0,63 | 0,0194 | 0,0003 | - | 0,02 | 0,178 |
| A16 | - | 2,016 | 129,2 | 0,1884 | - | 0,0318 | 0,03 | 446,379 |
| A17 | - | 2,069 | 138,0 | 0,1930 | - | 0,0675 | 0,09 | 402,408 |
| A18 | - | 2,155 | 108,4 | 0,1817 | - | 0,0171 | 0,07 | 408,588 |
| A19 | 0,01 | 7,776 | 121,6 | 0,0124 | - | 0,0106 | 0,13 | 412,848 |

Tabla 3.4 Concentración de elementos traza en muestras de agua, en mg/l: Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn.

| Muestra | Mn | Mo | Ni | Pb | Se | V | Zn |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|
| A01 | - | - | - | <0,005 | 0,2167 | - | 0,09 |
| A02 | - | - | - | - | 0,2430 | - | - |
| A03 | - | - | - | - | 0,2190 | - | - |
| A04 | 0,5108 | 0,0164 | - | - | 0,1500 | - | - |
| A05 | 0,6318 | 0,0322 | - | - | 0,1969 | - | - |
| A06 | 1,8430 | 0,2158 | - | - | 0,0272 | 0,0273 | - |
| A07 | 2,1200 | 0,1852 | - | - | 0,0371 | 0,0185 | - |
| A08 | 1,2857 | 0,1746 | - | - | 0,0862 | 0,0171 | - |
| A09 | 1,4020 | 0,1570 | - | - | 0,0158 | 0,0126 | - |
| A10 | 1,6885 | 0,1425 | - | - | 0,0488 | 0,0179 | - |
| A11 | 0,0741 | 0,0418 | - | - | 0,0461 | - | - |
| A12 | 1,3138 | 0,3905 | - | 0,023 | 0,0747 | 0,0378 | - |
| A13 | 1,1304 | 0,5066 | - | - | 0,0727 | 0,0574 | - |
| A14 | 1,1040 | 0,5148 | - | - | 0,0752 | 0,0703 | - |
| A15 | 0,0596 | 0,0248 | 0,00265 | - | 0,0017 | - | 0,04754 |
| A16 | 0,2503 | 0,4472 | - | - | 0,0439 | 0,0706 | - |
| A17 | 0,1836 | 0,4387 | - | - | 0,0547 | 0,0900 | - |
| A18 | 0,0654 | 0,4180 | - | - | 0,0465 | 0,0722 | - |
| A19 | 0,0354 | 0,6138 | - | - | 0,0730 | 0,0986 | - |

Las muestras de la A01 a A03 corresponden a agua marina, y las A04 y A05 a aguas costeras caracterizadas por presentar una mezcla entre agua continental, del río Salado, y agua marina, obtenidas de socavones que fueron resultado del aluvión de marzo del 2015. De la A06 a A18, son muestras de río, excepto la A15 que es la única muestra de agua subterránea. La A19, aquella más oriental, es una muestra de agua del salar de Pedernales.

3.1.1 Diagrama Piper

El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de diagramas y gráficos. En particular, los diagramas triangulares son ideales para representar tres componentes, donde cada vértice del triángulo equilátero simboliza el 100% de cada uno de ellos (Custodio y Llamas, 2001). El Diagrama Piper permite agrupar en áreas bien definidas las aguas con similitud hidroquímica (Custodio, 1965). En efecto, en la Figura 3.2 se observan dos grupos principales de acuerdo al origen de las muestras de agua.

Un grupo contiene las muestras de agua de mar (G1) de tipo clorurado sódico, que se agrupan cerca de las muestras del segundo grupo (G2), conformado por las muestras superficiales y la muestra de salar cuyo tipo químico es prácticamente idéntico al G1. El segundo grupo, sin embargo, se halló más cercano al vértice inferior derecho en los diagramas triangulares, indicando mayor concentración relativa de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, en los cationes, y de Cl^- en los aniones con respecto a las aguas de mar.

La muestra de agua subterránea A15 representada por un triángulo en la Figura 3.2, presenta un tipo hidroquímico más sulfatado cálcico y se aleja de los dos grupos anteriormente descritos.

En el campo central romboidal de la Figura 3.2 se observa que todas las muestras analizadas caen en la mitad superior del rombo, en la zona inferior derecha.

Este tipo de diagramas refleja fácilmente fenómenos modificadores sobre el agua, tanto como mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, intercambios iónicos, reducciones, etc., pues se representan por relaciones entre segmentos que unen los puntos de muestras, los vértices de los triángulos, etc. Sin embargo, los resultados de la representación en el diagrama Piper (Figura 3.2) no permiten hacer tales deducciones, dada la cercanía de los puntos graficados.

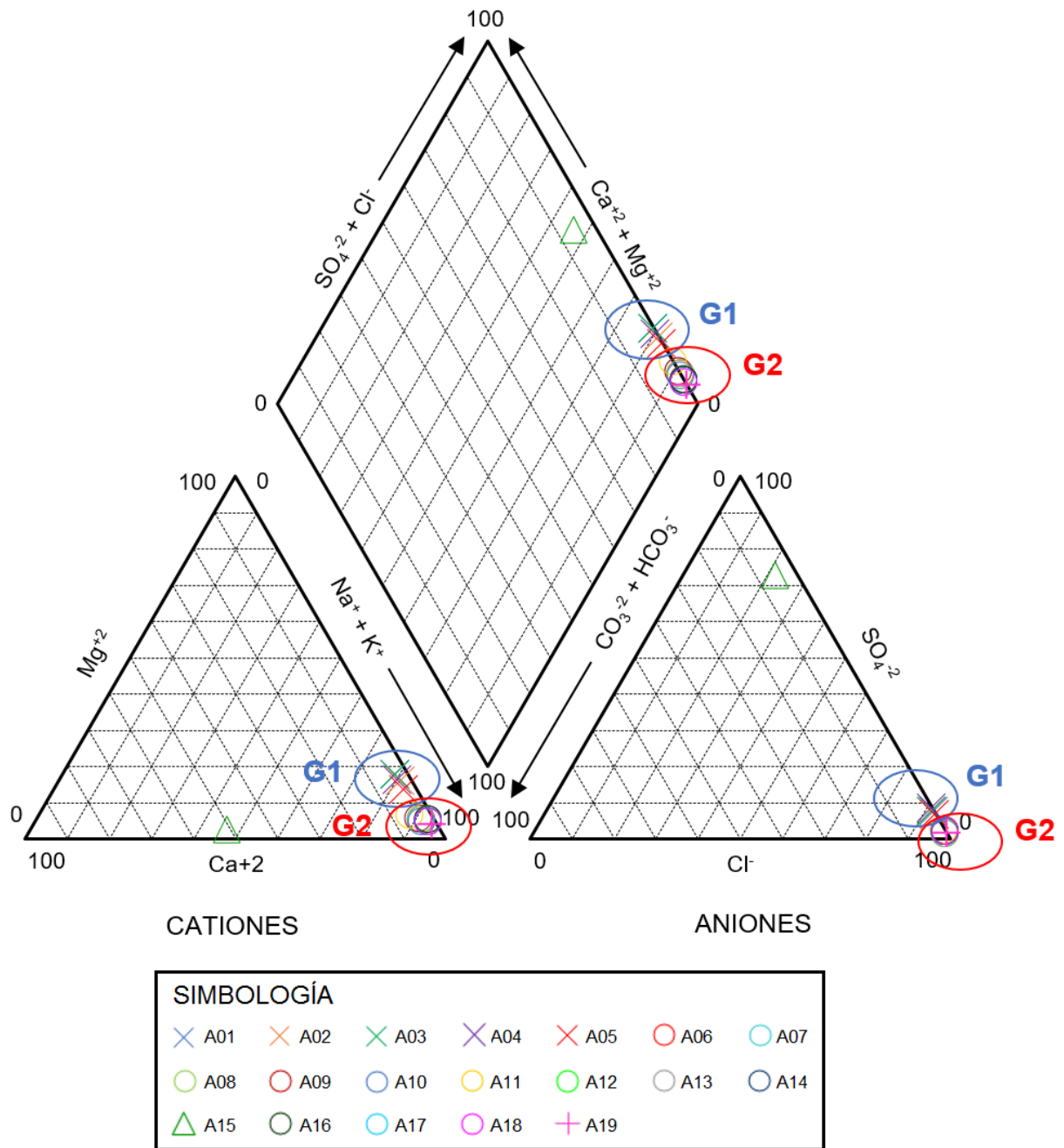


Figura 3.2 Diagrama Piper de las muestras de agua. La simbología representa los tipos de agua. X: muestra de mar; O: muestra superficial; Δ: muestra de agua subterránea; y +: muestra de salar. G1: Grupo 1; G2: Grupo 2.

3.1.2 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno son la conductividad eléctrica (CE), temperatura, pH y Eh (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Parámetros fisicoquímicos para cada muestra: conductividad eléctrica (C.E.), temperatura (T), pH y Eh. FDR: Fuera de rango; SD: Sin datos.

| Muestra | C.E. (mS/cm) | T (°C) | pH | Eh (mV) |
|---------|--------------|--------|------|---------|
| A01 | 58,6 | 17,9 | 8,01 | 203,7 |
| A02 | 58,9 | 15 | 8,17 | 233,8 |
| A03 | 57,9 | 18,1 | 7,93 | 196,7 |
| A04 | 60,9 | 21 | 8,1 | 200,6 |
| A05 | 74,5 | 18,7 | 7,85 | 198,7 |
| A06 | 215,6 | 24 | 7,36 | 239,8 |
| A07 | 195,6 | 21,5 | 7,47 | 238,3 |
| A08 | 195,1 | 16,6 | 7,41 | 247,5 |
| A09 | 180,1 | 16,6 | 7,49 | 245,7 |
| A10 | 197,8 | 17,1 | 7,48 | 220,8 |
| A11 | 137,5 | 21,2 | 7,62 | 234,4 |
| A12 | FDR | 21,1 | 7,07 | 258,9 |
| A13 | FDR | 23,4 | 7,05 | 259 |
| A14 | FDR | 19,9 | 7,07 | SD |
| A15 | 2,003 | 22,6 | 8,62 | 155,4 |
| A16 | FDR | 21,5 | 7,09 | 256,1 |
| A17 | FDR | 24,9 | 7,13 | SD |
| A18 | FDR | 21,1 | 7,15 | 234,7 |
| A19 | FDR | 8,2 | 7,23 | SD |

El pH medido está entre 7,85 y 8,17 en las muestras de agua marina y costeras, y entre 7,05 y 7,62 en aguas del río Salado. En la única muestra de agua subterránea y del salar de Pedernales se midió un pH de 8,62 y 7,23 respectivamente.

La temperatura de las muestras de agua de mar y costeras está entre 15 y 21°C, mientras que la de las aguas superficiales, entre 16,6 y 24,9 °C; en el agua subterránea se midió 22,6°C, y, en el agua de salar, 8,2°C.

La conductividad eléctrica medida en el agua de mar está entre 57,9 mS/cm y 74,5 mS/cm, mientras que la de las aguas superficiales está entre 137,5 y más de 200 mS/cm, que es el límite de detección instrumental. En el agua subterránea se midió una conductividad de 2,003 mS/cm y, en el caso del agua de salar, superó el límite de detección.

La conductividad eléctrica de las muestras de río es considerablemente mayor a los valores comunes que se obtienen en otros estudios de aguas superficiales, que alcanzan 0,3 y 0,8 mS/cm, teniendo una CE típica de aguas de salmueras. Lo común es tener una CE de 45 a 60 mS/cm en aguas de mar, lo que se cumple las muestras marinas, mientras que las muestras costeras superan el límite superior, y caen en el rango de salmueras. La única muestra subterránea supera el rango frecuente de agua potable que varía entre 0,05 y 1 mS/cm, pues tiene una CE típica de aguas salobres, de 2-20 mS/cm (Walton 1989).

Finalmente, los valores de Eh de las muestras son todos positivos, estando entre 196,7 mV y 233,8 mV los valores de las muestras de agua de mar y, entre 220,8 mV y 259 mV los valores de las aguas superficiales. En la muestra de agua subterránea se midió 155,4 mV mientras que en la del salar no se logró estabilizar el valor medido con la sonda.

Los valores promedio para cada tipo de muestra se detallan en la Tabla 3.6. Entre estos valores destaca la temperatura de la muestra de agua del salar, 8,2 °C, y la conductividad eléctrica del agua subterránea, 2,003 mS/cm, que resultaron menores al resto de las muestras tomadas. Se debe tener en consideración que, en las muestras de agua superficial, a partir de la muestra tomada a 5,5 km al este de El Salado (A12) y todas las tomadas hacia la cabecera, la conductividad eléctrica aumentó hasta superar el límite de detección instrumental, factor a considerar a la hora de interpretar los valores de la Tabla 3.6 tanto para estas muestras como para la muestra tomada en el salar.

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.

| Tipo de agua | C.E. (mS/cm) | T (°C) | pH | Eh (mV) |
|--------------|--------------|--------|------|---------|
| Mar | 62,16 | 18,14 | 8,01 | 206,70 |
| Superficial | 186,95 | 20,74 | 7,28 | 243,52 |
| Subterránea | 2,003 | 22,60 | 8,62 | 155,40 |
| Salar | FDR | 8,20 | 7,23 | SD |

3.1.3 Elementos mayores

Los elementos mayores analizados en las muestras de agua son: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), bromuro (Br^-), nitrato (NO_3^-), bicarbonato (HCO_3^-), sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}) y sílice (SiO_2).

A continuación, se detallan los resultados obtenidos y se incluyen las variaciones de concentraciones con respecto al tipo y ubicación de cada muestra a lo largo de la zona de estudio. Los elementos que no fueron detectados por el instrumento no serán considerados en la discusión, como es el caso del F^- .

3.1.3.1 Cl^-

El Cl presenta concentraciones muy altas en la mayoría de las muestras de agua, variando de 174 mg/l (A15, agua subterránea) hasta 198.128 mg/l en la muestra A13, mientras que el promedio es de 103.370 mg/l (Figura 3.3). El agua de mar y costera tiene una media de 21.615 mg/l de Cl^- . No se observa una tendencia específica, pero las muestras de aguas superficiales tienden a la disminución progresiva a partir de la cabecera del río Salado hasta la muestra A12, a 5,5 km de El Salado. Luego se observa otra disminución progresiva, pero de valores menores de concentración de Cl^- entre las muestras de río hacia el oeste (remarcada por una diferencia brusca), es decir, desde la muestra ubicada al oriente de El Salado (A11) hasta Chañaral (A06). Luego Las muestras superficiales tienen un promedio de 138.173 mg/l de Cl^- , mayor al promedio del total de

muestras. En ellas, el mínimo valor se midió en la A11, con 53.385 mg/l y, el máximo, en la A13, entre El Salado y Diego de Almagro. Por su parte, la muestra de salar tiene un contenido de Cl^- de 197.716 mg/l, cifra que se encuentra por sobre el promedio total.

Las concentraciones naturales de Cl^- en salmueras, aquellas con más contenido de sustancias disueltas, pueden llegar a 220.000 mg/l. Las aguas dulces pueden contener entre 10 y 250 mg/l, no siendo extraño encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de mg/l, mientras que el agua de mar tiene entre 18.000 y 21.000 mg/l (Custodio y Llamas, 2001). Dado lo anterior, las muestras de agua de mar se encuentran dentro del rango entregado por Custodio y Llamas (2001), con dos de ellas superándolo levemente, lo que se puede adjudicar a la cercanía a la costa y la interacción con agua continental (muestras A04 y A05) con contenidos mayores de Cl^- . Las muestras superficiales y la del salar tienen Cl^- en concentraciones cercanas a las de las salmueras, mientras que la muestra de agua subterránea está dentro del rango de aguas dulces.

Custodio y Llamas (2001) indican que el Cl^- procede, principalmente, de lavado de terrenos de origen marino, aguas congénitas y fósiles, además del agua de lluvia, y mezcla con agua marina en zonas costeras. En general, la meteorización de rocas genera un aporte pequeño de Cl^- , pero localmente tiene interés por la presencia rocas evaporíticas, como ocurre en la zona del salar de Pedernales.

La composición principal del salar comprende costras de halita (NaCl) y yeso (CaSO_4), por lo que se interpreta que el origen más probable de la alta concentración de Cl^- , en todas las muestras superficiales, se puede asociar con las rocas evaporíticas del salar. Además, es conocido que el río Salado recibe aporte directo de aguas de la cuenca del salar de Pedernales, hecho que influye en la concentración de Cl^- medida. Esto, además, explica que el contenido del anión disminuya en la dirección del flujo del río.

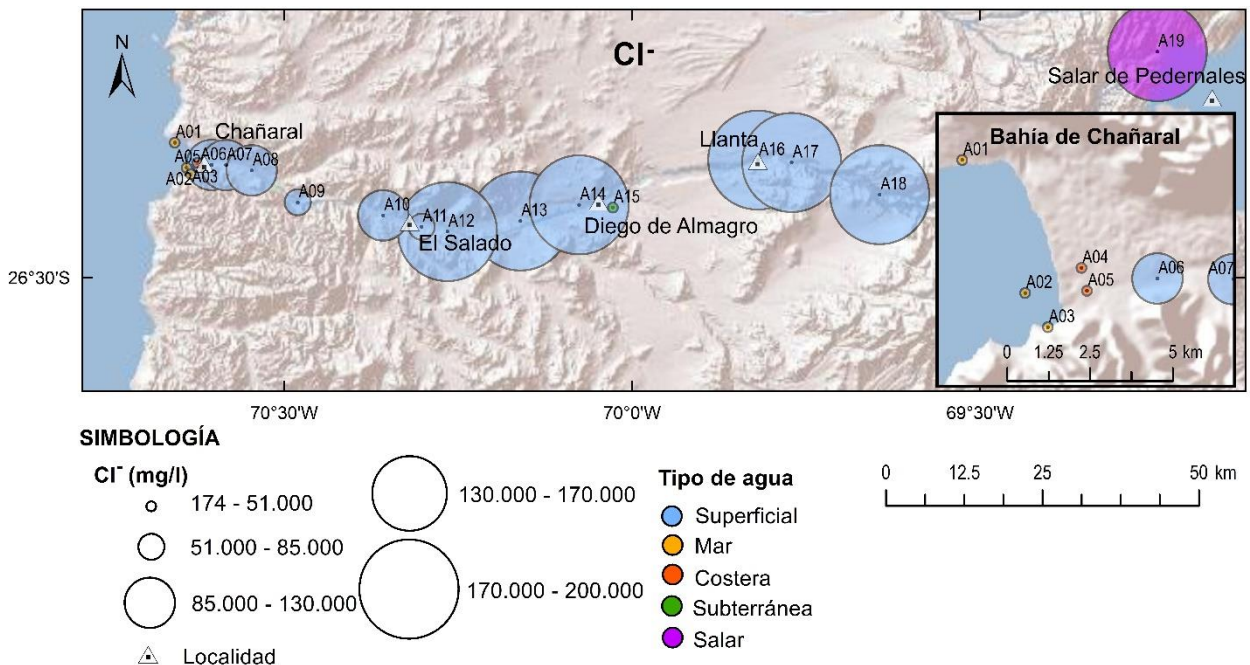


Figura 3.3 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Cl^- .

3.1.3.2 SO_4^{-2}

La disminución brusca de concentración que se detectó en el Cl^- se observa, también, para el SO_4^{-2} entre las mismas muestras (Figura 3.4).

En promedio, las muestras de agua contienen 3.012 mg/l de SO_4^{-2} , donde la menor concentración la tiene el agua subterránea (A15), y la máxima, la muestra de río (A18) ubicada más al este (Figura 3.4). La media de las muestras de mar y costeras es de 2.448 mg/l, menor al promedio total, con el mínimo valor en la A01, la más al norte, con 2.257 mg/l, y el máximo en la costera A05, la más al este, con 2.731 mg/l. Se observa que las muestras costeras contienen mayor SO_4^{-2} que las marinas, lo que refleja la mezcla de agua dulce. Por su parte, la media de sulfato de las muestras de río es de 3.337 mg/l, superior al promedio total, con la menor concentración en la A11, directamente al este de El Salado, con 1.766 mg/l, y la mínima, en la A18, la más oriental, con 4.777 mg/l.

A partir de la muestra A11 hacia la desembocadura del río Salado se observa una notoria disminución en el contenido de SO_4^{-2} , interpretándose como una dilución debido al aporte de agua dulce proveniente de un afluente secundario.

La muestra de agua subterránea es la de menor concentración de todas, pues la muestra con mayor contenido de SO_4^{-2} (A18) tiene más de 6 veces su valor. Contiene 793 mg/l, y está muy por debajo del promedio. Por su parte, la muestra de salar contiene 4.149 mg/l.

En la naturaleza, el ion SO_4^{-2} se concentra entre 2 y 15 mg/l en aguas dulces, hasta 5.000 mg/l en aguas salinas si existe Ca, y hasta 200.000 mg/l si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua de mar, por su parte, contiene alrededor de 3.000 mg/l (Custodio y Llamas, 2001). Por lo tanto, todas las muestras de mar del estudio contienen al anión en concentraciones levemente menores a la indicada por la bibliografía como agua de mar, mientras que las muestras superficiales y de salar lo contienen en valores un poco menores a los típicos de aguas salinas asociadas al Ca. Sin embargo, la muestra de agua subterránea supera en un orden de magnitud, en el contenido de SO_4^{-2} , a lo determinado por los autores como agua dulce natural.

Custodio y Llamas (2001) indican que el ion SO_4^{-2} procede, esencialmente, de lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino, de oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, y de disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos. En menor medida, lo asocian a la concentración en el suelo de agua de lluvia, actividades urbanas, industriales y agrícolas. En el caso de esta zona de estudio, se infiere que la concentración de SO_4^{-2} se debe probablemente a la disolución de yeso proveniente de la cuenca del salar de Pedernales y su descarga en la cuenca del río Salado, tal como lo corrobora la distribución espacial (disminución hacia la costa).

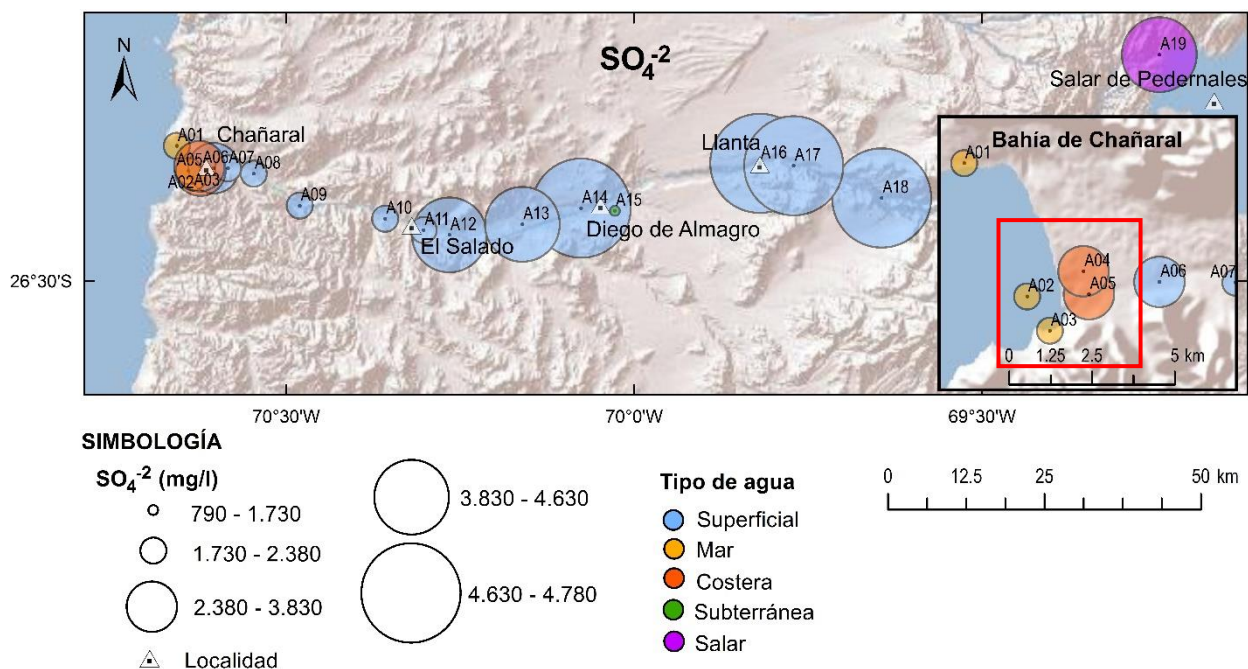


Figura 3.4 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de SO_4^{-2} . Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

La relación existente entre el Cl^- y el SO_4^{-2} (Figura 3.5) podría indicar que los iones tienen un origen común y puede que se den procesos de dilución, a lo largo del cauce del río. Hay una correlación entre ambos iones evidenciada por la tendencia a disminuir la concentración desde la muestra del salar A19 (4.149 mg/l) hasta la de agua subterránea A15 (793 mg/l) incluyendo en su trayectoria a todas las muestras de río. Se observa la misma tendencia en las muestras de mar, tomando en cuenta que la concentración de los iones disminuye desde A05 hacia A15 en dirección oeste.

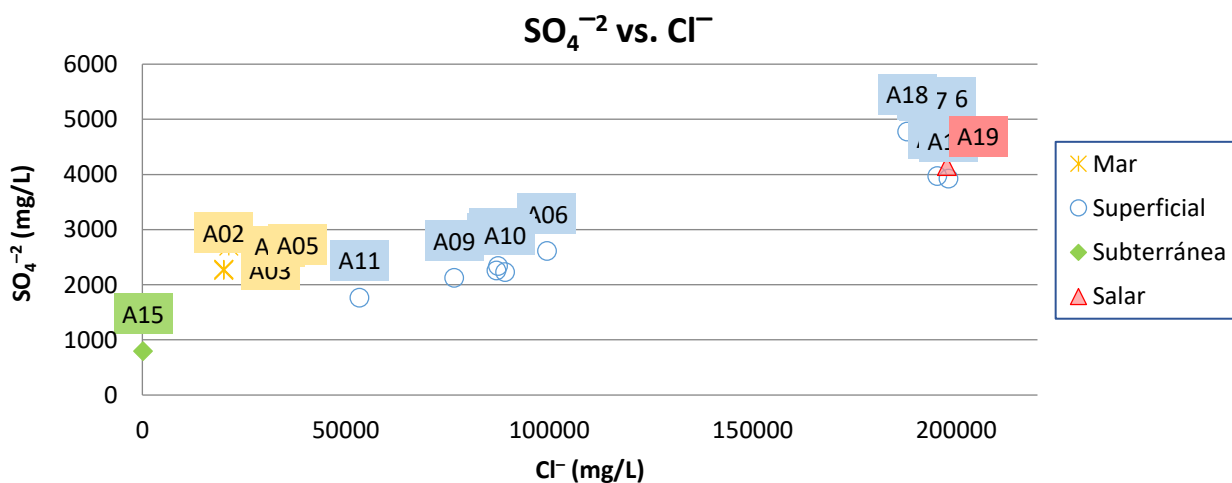


Figura 3.5 Relación entre la concentración de SO_4^{-2} y Cl^- , en mg/l.

3.1.3.3 Br⁻

El Br⁻ no fue detectado en la mayoría de las muestras, a excepción de las cuatro superficiales más orientales, desde la A14, localizada al oeste de Diego de Almagro, hasta la A18, ubicada entre Llanta y el salar de Pedernales (Figura 3.6). Las muestras superficiales que contienen Br⁻ promedian 16,85 mg/l, en las que la de menor concentración es la más cercana a Diego de Almagro (A14) con 14,90 mg/l, y la de mayor, la más cercana a Llanta (A16) con 19,70 mg/l. Por otra parte, en las muestras de mar y costeras se han encontrado concentraciones que promedian 74,52 mg/l, en un rango que varía entre 66,40 mg/l en la muestra más occidental (A05), dado el aporte de agua dulce, y 77,70 mg/l en la muestra más interior del océano (A01).

No se observa una tendencia en el contenido de Br⁻, pero sí resalta la variación en la concentración desde la muestra A18 hasta la A15, en la dirección de la corriente del río Salado.

Custodio y Llamas (2001) indican que el Br⁻ se concentra, en general, en menos de 0,01 mg/l en aguas dulces, mientras que el agua del mar tiene 65 mg/l. Así, se observa que todas las muestras en las que no se detectó el ion están en los rangos naturales, pero las 4 muestras superficiales orientales contienen al anión en concentraciones mucho más elevadas que las aguas dulces naturales. Por su parte, las muestras de agua de mar están cerca del valor indicado por los autores anteriores, pues la concentración de Br⁻ es levemente mayor, pero no de forma alarmante, pues WHO (2009) indican que, en este tipo de aguas, el Br⁻ puede alcanzar los 85 mg/l.

Las precipitaciones son una fuente importante de Br⁻ en las aguas continentales. La mayor parte del Br⁻ presente en el agua potable se origina en la atmósfera, pues hasta el 10% del Br⁻ atmosférico es absorbido por material orgánico sobre el terreno a medida que se infiltra (Davis *et al.*, 1998; Gerritse *et al.*, 1988). Así, las áreas con una alta concentración de Br⁻ en el agua, se asocian a zonas con gran cantidad de material orgánico (Davis *et al.*, 1998). Además, varias fuentes antropogénicas de Br⁻ pueden aumentar las pequeñas concentraciones que se producen naturalmente en el medio ambiente de forma local, tales como la gasolina con plomo y los plaguicidas.

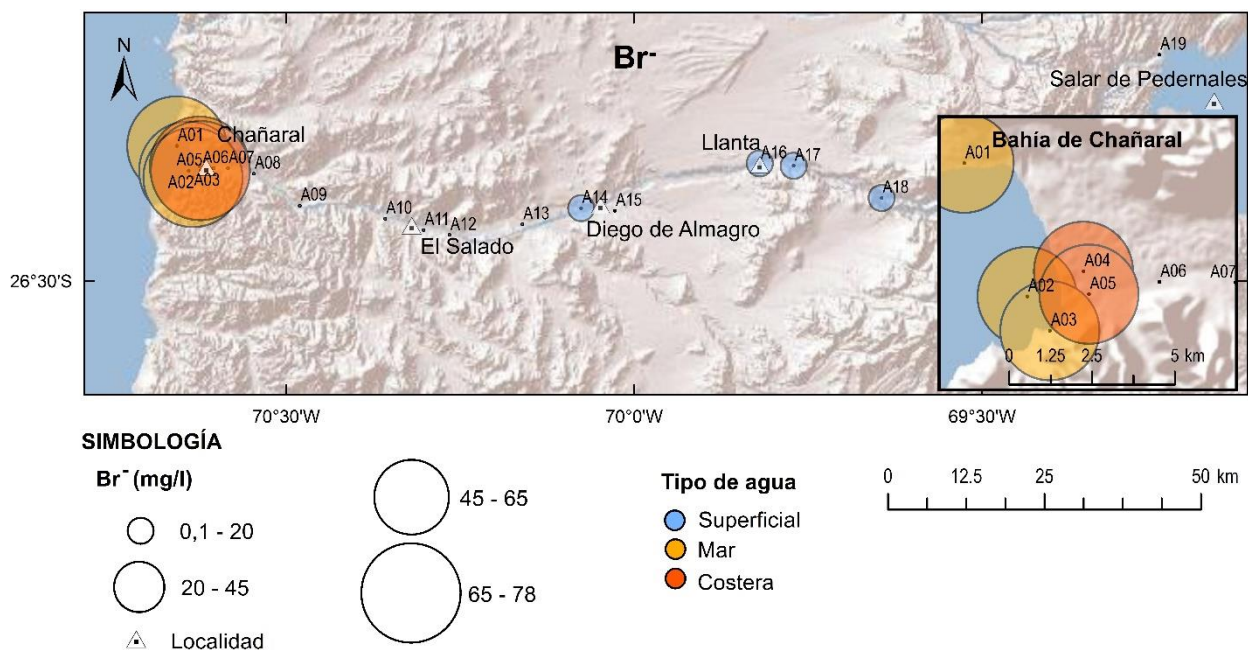


Figura 3.6 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Br⁻.

Las pocas muestras que contiene Br⁻ no permiten un buen análisis de la relación que existe con el Cl⁻. Sin embargo, en la Figura 3.7, se observan dos grupos bien definidos, uno para el agua de mar y otro para las aguas superficiales orientales. El primer grupo presenta una relación inversa entre el aumento de salinidad y el contenido de Br⁻, mientras que, en el segundo grupo, la relación es directa.

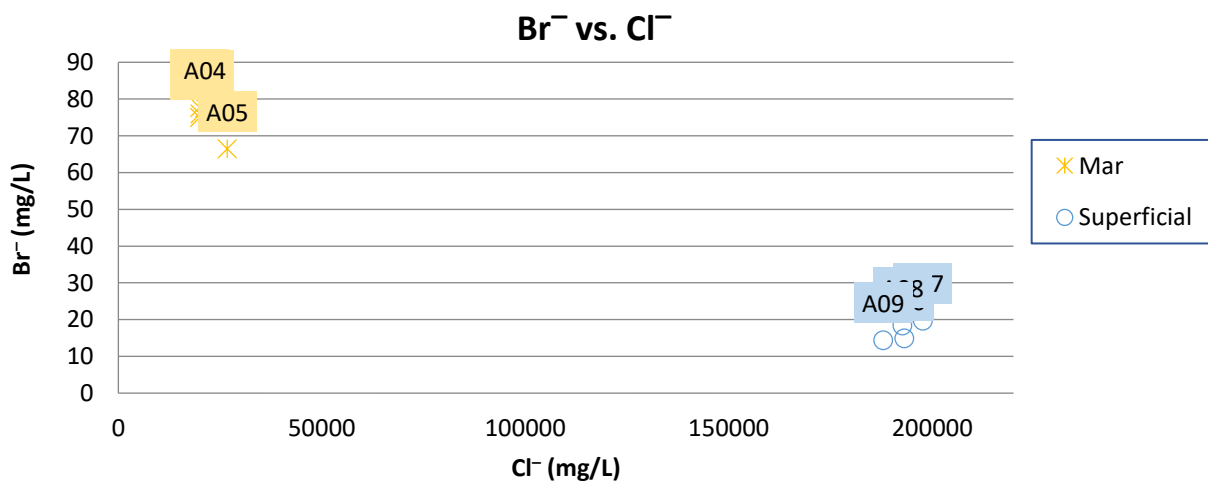


Figura 3.7 Relación entre la concentración de Br⁻ y Cl⁻, en mg/l.

3.1.3.4 NO₃⁻

El NO₃⁻ tiene un comportamiento similar al Br⁻ en las muestras superficiales, pues se encuentra en concentraciones detectables en las mismas cuatro muestras más cercanas a la cabecera del río Salado, sin una tendencia aparente, y un promedio de 23,58 mg/l entre ellas. El resto de las muestras presenta una concentración inferior al límite de detección fijado en 0,1 mg/l (Figura 3.8).

Este anión normalmente se encuentra en concentraciones entre 0,1 y 10 mg/l, pero en aguas contaminadas puede llegar a 200 mg/l y, en algún caso, hasta 1.000 mg/l. Asimismo, el agua del mar tiene alrededor de 1 mg/l o menos (Custodio y Llamas, 2001). Es por esto que las muestras en las cuales se detectó el ion lo contienen en una concentración anormal, que podría indicar contaminación de las aguas.

El origen del NO_3^- no es siempre claro. Es un anión relativamente estable, pero puede ser fijado a veces por el terreno o ser reducido a N_2 o NH_4 en ambientes reductores. Por lo general, procede de procesos de nitrificación naturales, por ejemplo, en raíces de leguminosas, de la descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera, de abonos agrícolas (fertilizantes); en pequeña proporción del agua de lluvia, y muy raramente, del lavado de minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos (Custodio y Llamas, 2001).

En la zona de estudio, no es común la actividad agrícola o ganadera, menos aún en el sector donde se detectó NO_3^- . Por lo tanto, el NO_3^- encontrado probablemente proviene de desechos humanos (estiércol) proporcionado por las roturas de alcantarillado producto de la fuerza ejercida por el aluvión, y en menor medida, por agua de lluvia del acontecimiento de marzo de 2015, así como el lavado de minerales nitrogenados, proveniente de depósitos de sales (Ericksen y Salas, 1990).

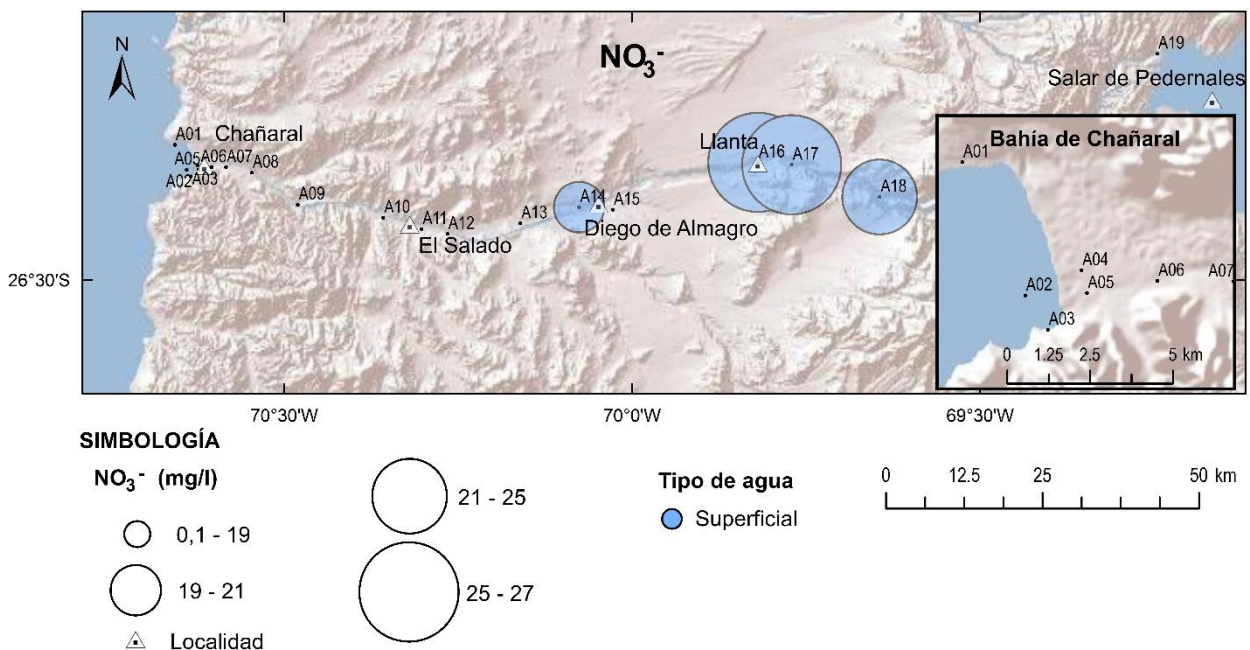


Figura 3.8 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de NO_3^- .

3.1.3.5 HCO_3^-

El contenido medio de HCO_3^- del total de muestras es de 279,80 mg/l. La mínima concentración, 76,25 mg/l, se obtuvo en la muestra de agua subterránea (A15), y la máxima, la alcanzó la muestra de agua de salar (A19), con 1.052,25 mg/l. El HCO_3^- en las muestras de agua de mar y costera se encuentra, en promedio, en 176,90 mg/l, menos

que la media total: el menor contenido lo tiene la A03, la más al sur, con 167,75 mg/l, y el mayor contenido, la A02, mar adentro, con 207,40 mg/l.

Las muestras de agua superficial tienen un promedio de 275,26 mg/l, similar a la media total, pero una vez más se observa un cambio en la concentración a la altura de la muestra A11. Desde la cabecera del río hasta la muestra A12 se hallaron las concentraciones más altas; en la A11 disminuye a 131,15 mg/l, el valor más bajo encontrado, y al oeste de la A11, la concentración de HCO_3^- es próxima a 199 mg/l. En el tramo oriental, el máximo valor se encontró en la A12, con 417,85 mg/l, y hacia el este la concentración va disminuyendo hasta llegar a 286,70 mg/l en la muestra superficial más cercana a la cabecera del río Salado (A18). Además, el tramo con mayores concentraciones de HCO_3^- es comprendido entre El Salado y Diego de Almagro.

La muestra del salar de Pedernales es la que presenta mayor contenido de HCO_3^- alcanzando 1.025,25 mg/l, un orden más que todas las otras muestras, y dos órdenes más que la muestra subterránea representativa de 76,25 mg/l (Figura 3.9).

El ion HCO_3^- varía entre 50 y 350 mg/l en aguas dulces, pudiendo llegar a veces hasta 800 mg/l, mientras que el agua de mar tiene alrededor de 100 mg/l (Custodio y Llamas, 2001). Así, la muestra de agua subterránea contiene HCO_3^- dentro del rango de aguas dulces, como también las muestras superficiales, mientras que las muestras de mar están por sobre el valor bibliográfico, pero no se trata de una diferencia alarmante. La muestra de salar, por su parte contiene más del HCO_3^- que normalmente tienen las aguas con mayor contenido del ion.

La procedencia del HCO_3^- en la naturaleza es de la disolución de CO_2 atmosférico o del suelo, la disolución de calizas y dolomías ayudada por el CO_2 y/o ácidos naturales e hidrólisis de silicatos ayudada por el mismo. Por esto, se infiere que el HCO_3^- proviene de una mezcla de los casos anteriores, dada la variada litología encontrada en la zona de estudio. La alta concentración en el salar de Pedernales se puede deber, además, a las evaporitas que dieron paso a la formación de minerales carbonatados.

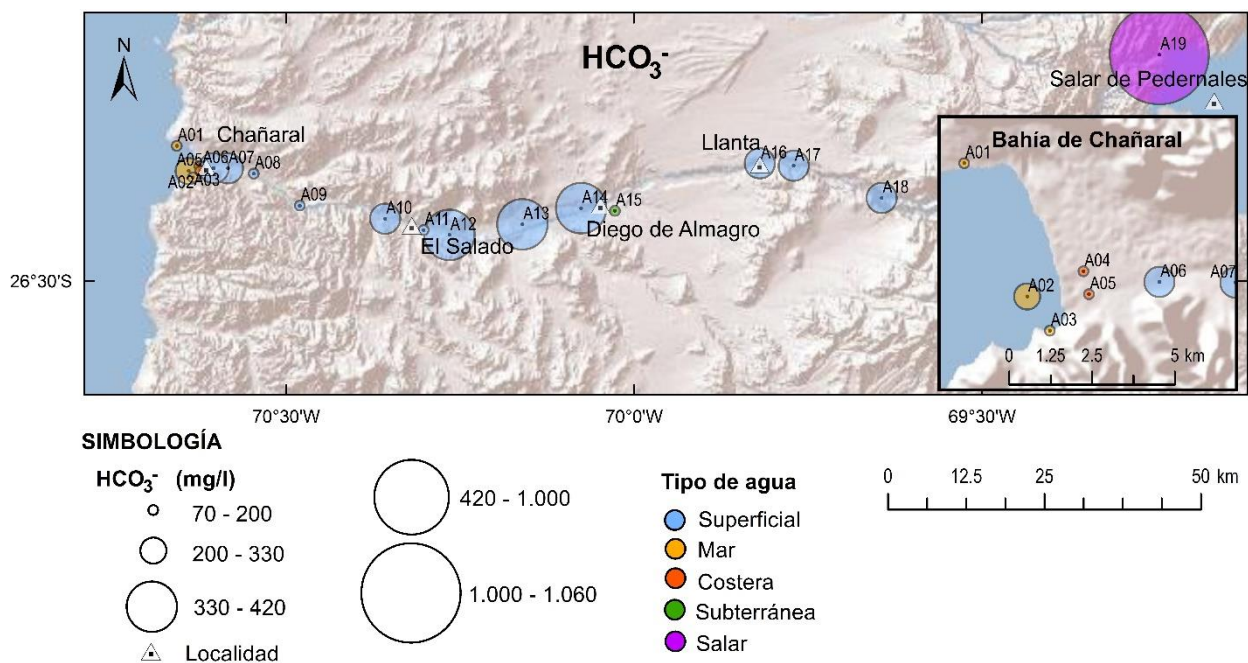


Figura 3.9 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de HCO_3^- .

La Figura 3.10 muestra la relación entre la salinidad, mediante la concentración de Cl^- , y el HCO_3^- . Sin bien, no se observa una relación directa entre todas las muestras, sí se encontraron grupos de muestras con cierta relación. Los dos grupos de muestras superficiales que se logran diferenciar son el que se ubica en el centro del gráfico y el del lado derecho del mismo. En ambos existe una relación directa entre el aumento de Cl^- y el de HCO_3^- .

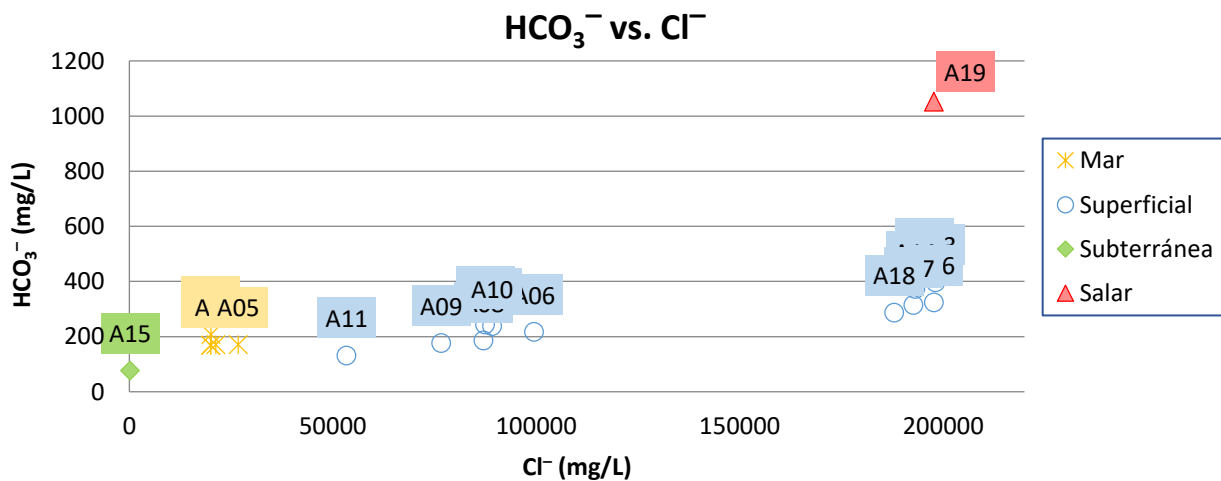


Figura 3.10 Relación entre la concentración de HCO_3^- y Cl^- , en mg/l.

3.1.3.6 Na^+ y K^+

El Na^+ (Figura 3.11) presenta la concentración mínima en la muestra de agua subterránea, A15, con 221 mg/l, y la máxima concentración, en la muestra de río A17 ubicada al este de Llanta, con 112.800 mg/l de Na^+ . El promedio total de 58.596 mg/l.

Las muestras de agua de mar y costera promedian 12.100 mg/l de Na^+ . La muestra marina A01, tomada al norte de la bahía, con 10.700 mg/l tiene la menor concentración, y el mayor valor en la A05, la del socavón más al este, con 15.000 mg/l. No se observa mayor diferencia en la concentración del ion entre las muestras marinas y costeras. Este promedio de Na^+ aumenta en las muestras del río Salado, con un promedio de 78.817 mg/l, por sobre la media total. Varía entre 29.000 mg/l, en la muestra A11, al este de El Salado, y 112.800 mg/l en la A17. Desde la cabecera del río Salado hasta la muestra A12 se encontraron altas concentraciones de Na^+ con valores cercanos a los 108.000 mg/l. A partir de la A12 hacia la desembocadura se mantiene el mismo orden de magnitud que la muestra más cercana a la costa (61.200 mg/l). Justo después de este cambio, la muestra A11 presenta una disminución en la concentración de Na^+ .

El agua subterránea (A15) tiene el menor contenido en Na^+ , mientras que el agua de salar tiene concentraciones similares a las muestras de río más cercanas, pues alcanza los 106.800 mg/l, por sobre la media total.

Para el K^+ (Figura 3.12) las muestras de agua promedian una concentración de 2.391 mg/l, donde el menor contenido está en la A15, agua subterránea, con 8,68 mg/l, y el mayor contenido, en la A13, entre El Salado y Diego de Almagro, con 4.960 mg/l. En detalle, las muestras de mar y costeras tienen una media de 572 mg/l de K^+ , cifra que se encuentra por debajo del promedio total, con el mínimo en la A04 con 500 mg/l, y el máximo en la A05 con 660 mg/l, ambas costeras, la primera la norte de la segunda. Así, no se logra determinar una tendencia en este tipo de agua.

Las muestras de río contienen, en promedio, 3.207 mg/l de K^+ , donde el mínimo es de 1.250 mg/l en la muestra A11, y el máximo es de 4.960 mg/l en la A13, ambas entre El Salado y Diego de Almagro. Ocurre algo similar en la concentración de K^+ , con respecto al Na^+ en las muestras de río, pues desde la cabecera del río Salado hasta la muestra A12 bordea los 2.000 mg/l, y al su oeste, incluyéndola, la concentración está cerca de los 4.400 mg/l. Justo después de este cambio, la muestra A11 presenta una disminución en la concentración K^+ .

La muestra subterránea es la de menor concentración hasta por tres órdenes de magnitud, mientras que la muestra de salar contiene 4.090 mg/l de K^+ , valor que supera la media total.

Una diferencia marcada entre ambos cationes es que el K^+ posee una solubilidad muy elevada y es difícil de precipitar. Además, es afectado fácilmente por el cambio iónico y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita) para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia notablemente del Na^+ . Por ello, las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienen menos K^+ que Na^+ excepto en las muy diluidas (Custodio y Llamas, 2001).

El Na^+ se concentra naturalmente entre 1 y 150 mg/l en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de mg/l. El agua de mar tiene alrededor de 10.000 mg/l, y las salmueras naturales pueden llegar a tener 100.000 mg/l (Custodio y Llamas, 2001). Esto significa que las muestras de agua de mar y

costeras están levemente por sobre las concentraciones naturales de Na^+ entregadas por otros autores, al igual que la muestra de agua subterránea con respecto a las aguas dulces, mientras que las 6 muestras superficiales más la de salar contienen al catión en niveles propios de salmueras naturales concentradas.

Esta concentración puede deberse a varios factores, según Custodio y Llamas (2001). Principalmente, de la meteorización de rocas con feldespatos, feldespatoideos y otros silicatos, el lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen, mezcla con agua de mar, localmente de la disolución de halita o sulfato sódico natural (sales evaporíticas), y raramente de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos, contaminación urbana e industrial y concentración del agua de lluvia. Dadas las condiciones geológicas de la zona de estudio, se infiere que la alta concentración Na^+ hallado en las muestras se debe a la disolución de halita de las costras evaporíticas del salar de Pedernales, que ingresa al afluyente del río Salado.

Por otra parte, el K^+ se encuentra naturalmente en concentraciones entre 0,1 y 10 mg/l en aguas dulces, aunque extraordinariamente pueden contener algunos cientos de mg/l, y solo muy raramente pueden existir salmueras con hasta 100.000 mg/l. Asimismo, el agua de mar contiene alrededor de 400 mg/l del catión (Custodio y Llamas, 2001). En consideración con lo anterior, el contenido de K^+ en la muestra de agua subterránea está dentro del rango de aguas dulces, al igual que las superficiales y la del salar. Además, las muestras de agua de mar y costeras están por sobre los valores bibliográficos de la concentración de K^+ , pero no de manera alarmante.

Los autores Custodio y Llamas (2001) indican que el K^+ proviene mayormente de la meteorización de rocas con ortoclasa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.), localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvita, carnalita, etc.), en pequeña cantidad de aportes del agua de lluvia y, en ocasiones, de la contaminación industrial, minera y agrícola (abonos). Por lo tanto, en esta zona de estudio se concluye que el contenido de catión encontrado en las muestras analizadas proviene de los minerales con alto contenido en K^+ como la ortoclasa, como también de la disolución de sales potásicas propias de depósitos evaporíticos como los del salar de Pedernales, pero en menor proporción que el resto de los elementos mayores anteriormente mencionados, dada la baja variación en concentración entre las distintas muestras.

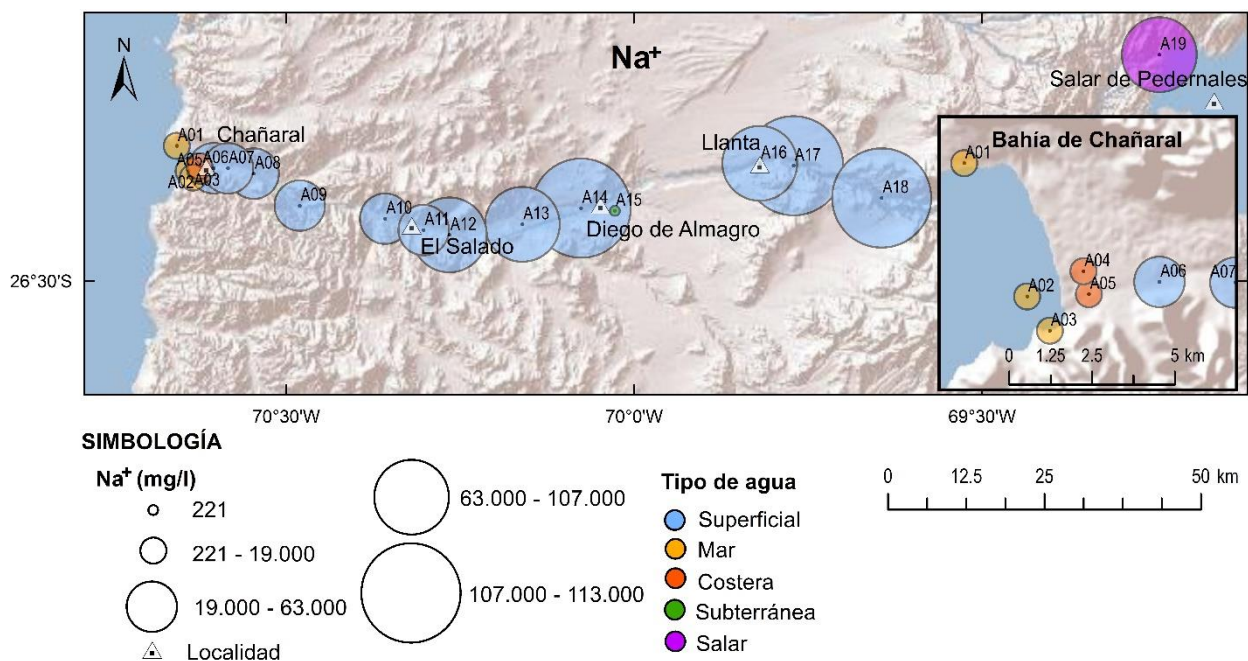


Figura 3.11 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Na⁺.

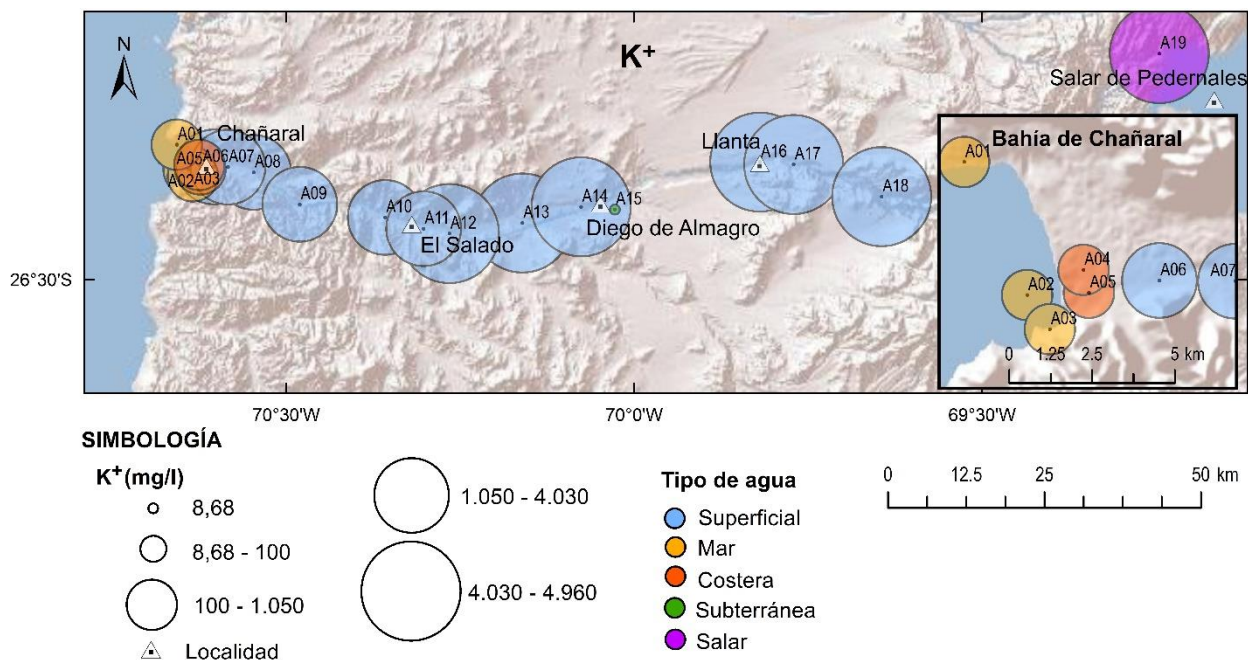


Figura 3.12 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de K⁺.

En cuanto a la relación del Na⁺ y el K⁺ con respecto al Cl⁻ (Figura 3.13 y Figura 3.14, respectivamente), estos presentan un comportamiento similar, pues, a partir de la muestra representativa subterránea, hay una relación lineal en el resto de las muestras, pasando por el agua de mar, agua de río y, de salar. Sin embargo, se observa un vacío entre las muestras A06 y A18, representando un salto en la concentración de Na⁺ y K⁺

con respecto al Cl^- . Estos son los elementos que presentan una relación directa más evidente entre el aumento de salinidad de las aguas y la concentración de Na^+ y K^+ .

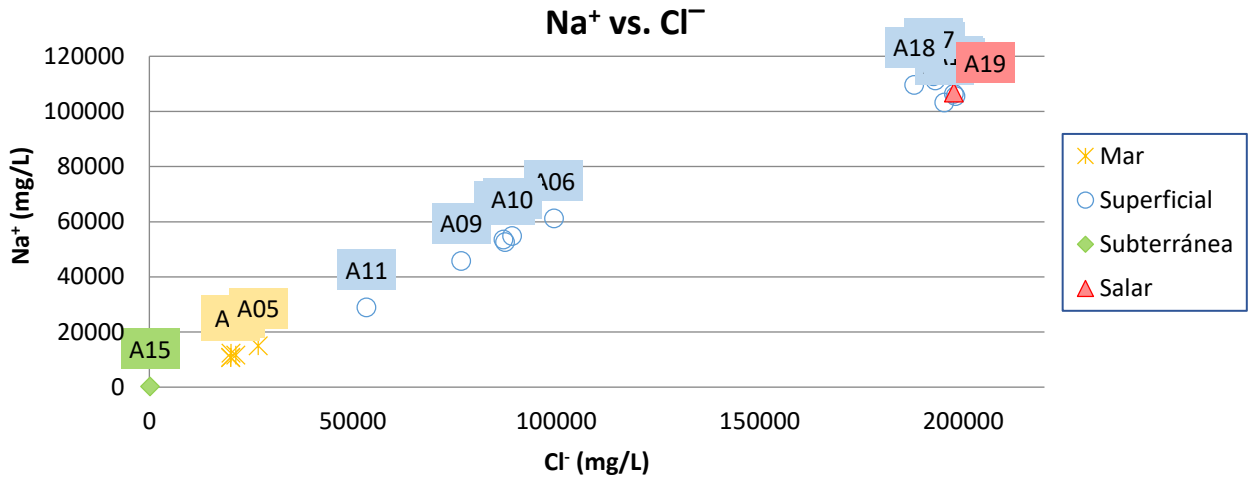


Figura 3.13 Relación entre la concentración de Na^+ y Cl^- , en mg/l.

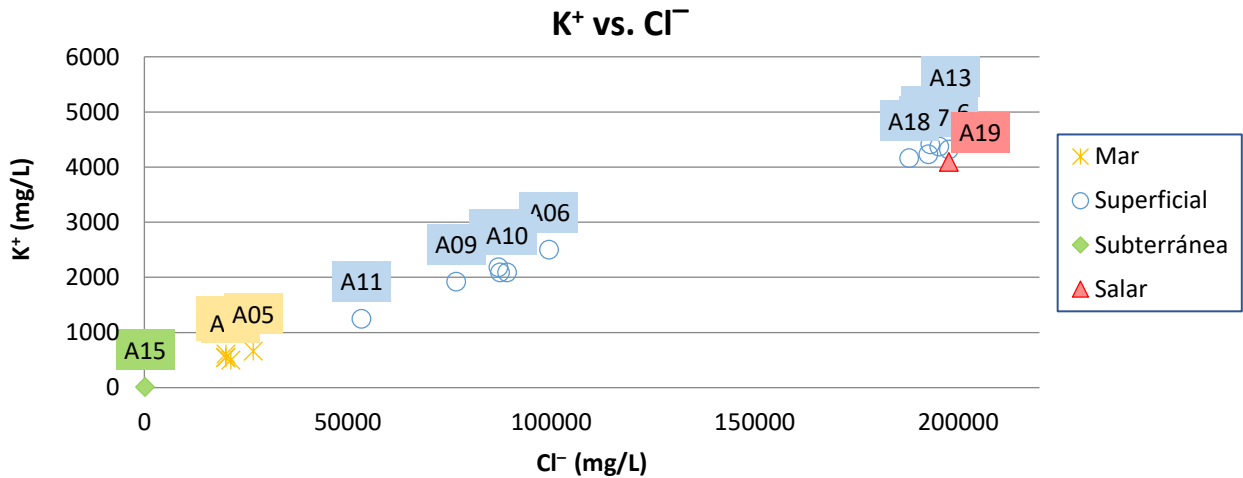


Figura 3.14 Relación entre la concentración de K^+ y Cl^- , en mg/l.

3.1.3.7 Ca^{+2}

La media de concentración de Ca^{+2} en las muestras de agua es de 1.134 mg/l, donde el mínimo valor lo tiene el agua subterránea, A15, y el máximo, la muestra de río más cercana a la costa, A06, con 1.652 mg/l (Figura 3.15).

Las muestras de agua de mar y costeras promedian 443 mg/l, cifra menor a la media total, y aumenta la concentración de Ca^{+2} progresivamente desde mar adentro hacia el este hasta las muestras costeras, desde 400 mg/l en A01 a 551 mg/l en A05, existiendo una continuidad entre aguas marinas y costeras. En el río Salado se observa poca variación de Ca^{+2} , con un promedio de 1.500 mg/l, valor por sobre la media total, donde el mínimo está en la muestra A13, entre El Salado y Diego de Almagro, con 1.365 mg/l, y el máximo en la A06, la más al oeste. No existe una tendencia aparente, pero se

observa que en la muestra A11 hay una disminución de Ca^{+2} menos marcada que lo ocurrido con los cationes antes mencionados.

La muestra de agua subterránea tiene una muy baja concentración de Ca^{+2} , en comparación a cualquier otra muestra, de 211 mg/l, mientras que la muestra del salar está muy cercana al promedio en el contenido de Ca^{+2} , con 1.127 mg/l.

Custodio y Llamas (2001) definen al Ca^{+2} como un ion que forma sales moderadamente solubles a muy solubles, y muy fácil de precipitar como halita. Se encuentra en concentraciones entre 10 y 250 mg/l en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 mg/l en aguas selenitosas (elevado contenido de sulfato), mientras que el agua del mar contiene alrededor de 400 mg/l. Excepcionalmente, se puede tener 50.000 mg/l en salmueras de CaCl_2 . De acuerdo a lo anterior, todas las muestras superficiales y la del salar contienen al catión dentro de los rangos mencionados, más ligadas a las aguas dulces selenitosas. Lo mismo ocurre con la muestra de agua subterránea, cuyo contenido de Ca^{+2} está dentro del rango de aguas dulces. Las muestras de agua de mar y costera, por su parte, se encuentran también acorde a los valores entregados.

La procedencia natural del Ca^{+2} consiste en la disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita, la meteorización de rocas con feldespatos y otros silicatos cálcicos, la disolución de cemento calcáreo de rocas y, en menor medida de la concentración del agua de lluvia (Custodio y Llamas, 2001). Por tanto, las altas concentraciones del catión encontradas en las muestras de agua, se deben a la composición de las rocas que componen la zona de estudio, así como también de la disolución de minerales ricos en Ca^{+2} como el yeso proveniente de los depósitos evaporíticos del salar de Pedernales.

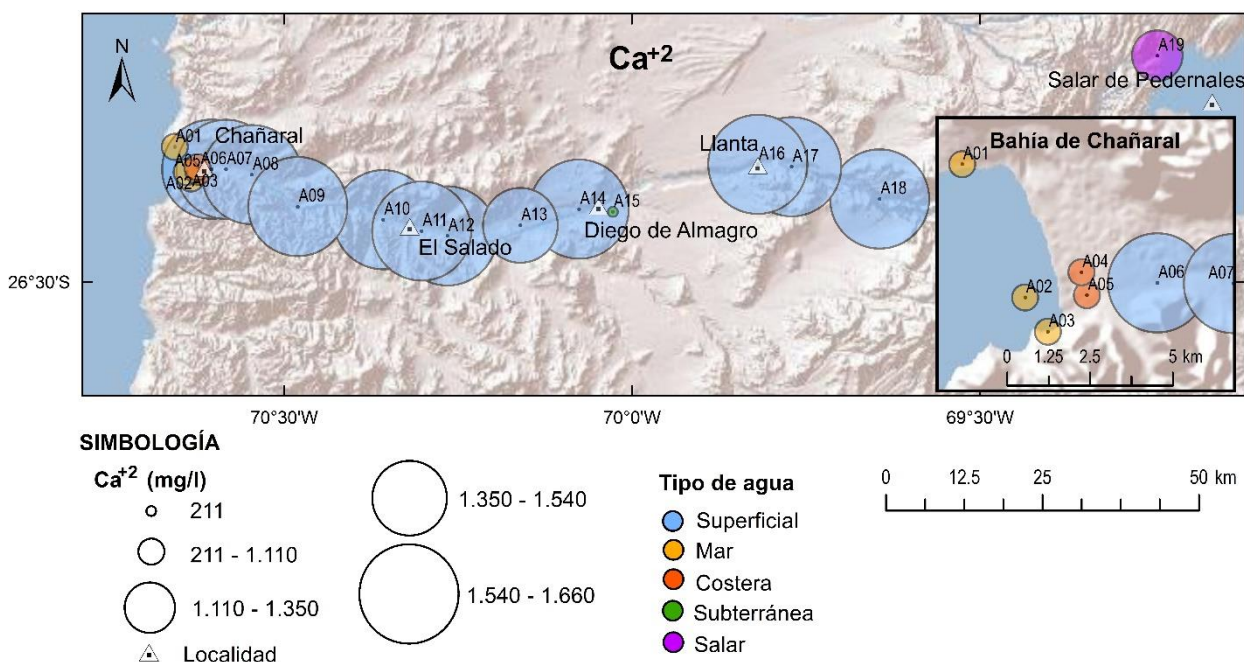


Figura 3.15 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Ca^{+2} .

En relación al Cl^- (Figura 3.16), se observa que entre las muestras A11 y A06 hay un aumento progresivo en la concentración de Ca^{+2} , luego no hay muestras entre las A06 y A18, y entre la A18 y A19, siendo A19 la muestra de agua de salar, disminuye la concentración a una tasa mayor, llegando a 1.127 mg/l en el salar. Así, hay una directa relación entre el aumento de la salinidad con el aumento de Ca^{+2} , en las muestras del lado izquierdo del gráfico, mientras que, en las muestras del sector derecho, la relación es inversa.

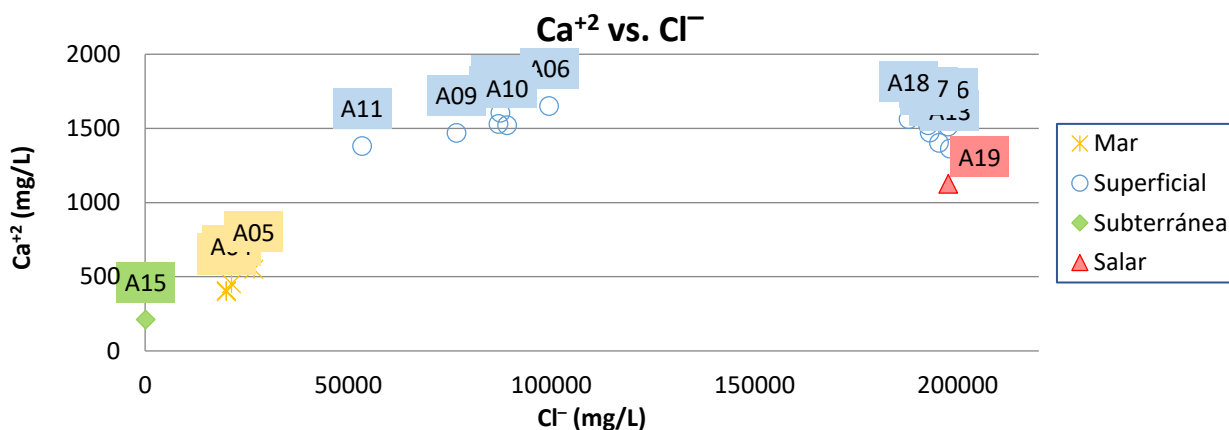


Figura 3.16 Relación entre la concentración de Ca^{+2} y Cl^- , en mg/l.

3.1.3.8 Mg^{+2}

El Mg^{+2} (Figura 3.17) se encontró en las muestras de agua en un promedio de 1.837 mg/l, con variaciones muy bajas en su concentración, a excepción de la muestra de agua subterránea (A15) en la que se hallaron 6,59 mg/l, siendo la de menor contenido de todas. Al contrario, la muestra con mayor concentración de Mg^{+2} es A13, muestra de río tomada entre El Salado y Diego de Almagro, que contiene 3.082 mg/l.

El promedio de las muestras de agua de mar y costera es de 1.273 mg/l, menor a la media total, con una leve variación en la concentración de Mg^{+2} , pues el mínimo valor está en A04 con 1.256 mg/l, y el máximo, en A05, la más al este, con 1.287 mg/l, ambas costeras, por lo que no se halló una diferencia marcada entre aguas marinas y de mezcla. En tanto, el promedio de las aguas de río es de 2.170 mg/l, valor por sobre la media total, donde la menor concentración está en la A11, al este de El Salado, con 1.078 mg/l, y la mayor, en A13, entre la misma localidad y Diego de Almagro, con 3.082 mg/l.

A lo largo del río Salado hay una tendencia a aumentar levemente la concentración de Mg^{+2} en dos segmentos desde el salar de Pedernales hacia la desembocadura del río, separados por una disminución brusca en la muestra A11. Los valores de concentración al este de A11 son mayores a las del oeste.

La muestra de agua subterránea tiene tres órdenes de magnitud menos que todas las otras muestras en la concentración de Mg^{+2} , de 6,59 mg/l, mientras que la muestra de salar continúa correctamente las tendencias mencionadas anteriormente, con una concentración de 2.504 mg/l de Mg^{+2} , cifra superior a la media total.

Custodio y Llamas (2001) detallan que el ion Mg^{+2} tiene propiedades similares al ion Ca^{+2} pero más soluble y levemente más difícil de precipitar. Se encuentra en concentraciones entre 1 y 100 mg/l en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de mg/l en aguas salinas o salmueras, mientras que el agua del mar contiene 1.200 mg/l. Es por esto que, todas las muestras analizadas contienen Mg^{+2} en cantidades que caen dentro de los rangos entregados anteriormente.

La proveniencia del Mg^{+2} es detallada por los mismos autores, y consiste primordialmente en la disolución de dolomías y calizas dolomíticas, la meteorización de rocas con silicatos magnésicos y ferromagnésicos, localmente el lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita, kieserita, etc.), y en menor medida, mezcla con agua de mar, y contaminación industrial y minera. En el caso de estudio, se sospecha que la concentración levemente alta de Mg^{+2} hallada en las muestras de agua, principalmente en las superficiales, se debe a la disolución de minerales propios de depósitos evaporíticos del salar de Pedernales.

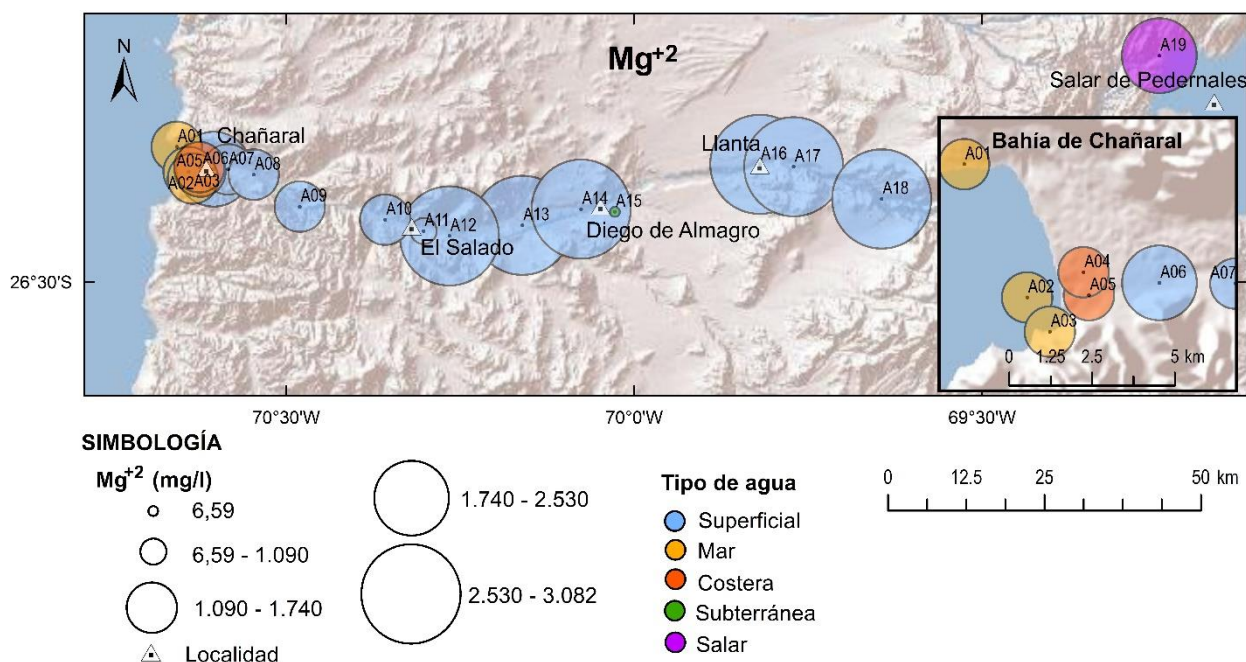


Figura 3.17 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mg^{+2} .

En relación al Cl^- (Figura 3.18), comenzando por la muestra de agua subterránea representativa hacia la muestra del salar, se observa un aumento progresivo tanto en la concentración de Mg^{+2} y de Cl^- , con un vacío de concentraciones entre las muestras A06 y A18, al igual que otros cationes antes mencionados. Por ello, el aumento de la salinidad está directamente relacionado al aumento de la concentración de Mg^{+2} .

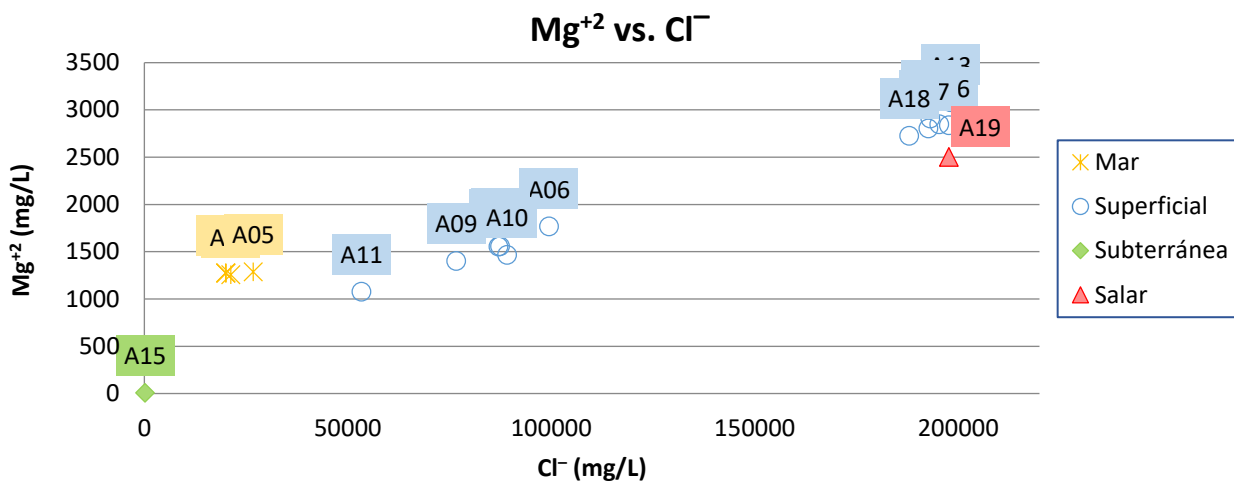


Figura 3.18 Relación entre la concentración de Mg^{+2} y Cl^{-} , en mg/l.

3.1.3.9 SiO_2

El promedio de concentración de SiO_2 en todas las muestras analizadas es de 6,2 mg/l, donde el mínimo valor está en tres muestras de SiO_2 (< 0,2 mg/l) y el máximo, en A11 (12,7 mg/l) (Figura 3.19).

Todas las muestras de agua de mar, las costeras y la única muestra de agua subterránea (1,1 mg/l) presentan valores bajos de SiO_2 , pues dos de las aguas de mar y una costera no contienen SiO_2 detectable (<0,2 mg/l), mientras que la marina A03 contiene 0,3 mg/l y la costera A05, 2 mg/l, con un promedio de 0,6 mg/l. Las muestras del río Salado, en toda su extensión, tienen una concentración relativamente alta que varía entre 6,7 en la muestra A13, entre El Salado y Diego de Almagro, y 12,7 mg/l en A11, al este de El Salado, con un promedio de 9,1 mg/l y mostrando un patrón de aumento de concentración desde la cabecera del río hacia su desembocadura. Se vuelve a observar un comportamiento particular entre las muestras A10 y A12, pero esta vez es al contrario que todos los otros elementos, pues en la muestra A11 hay un aumento brusco en la concentración de SiO_2 , y a partir de A10, continua su aumento. La muestra de agua del salar de Pedernales, por su parte, tiene una concentración de SiO_2 de 4,3 mg/l, cifra menor al promedio total.

La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 mg/l en SiO_2 pudiendo llegar hasta 100 mg/l, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. Además, en aguas muy básicas se puede llegar a 1.000 mg/l (Custodio y Llamas, 2001). Así, todas las muestras analizadas contienen SiO_2 en cantidades dentro de los rangos de aguas naturales.

El SiO_2 procede, principalmente, la meteorización de rocas con silicatos y otras rocas que contienen sílice soluble, y en muy pequeñas cantidades, de la disolución de cuarzo y sus formas alotrópicas (Custodio y Llamas, 2001), lo cual se ve reflejado en la variedad litológica y composicional por la que fluye el río Salado.

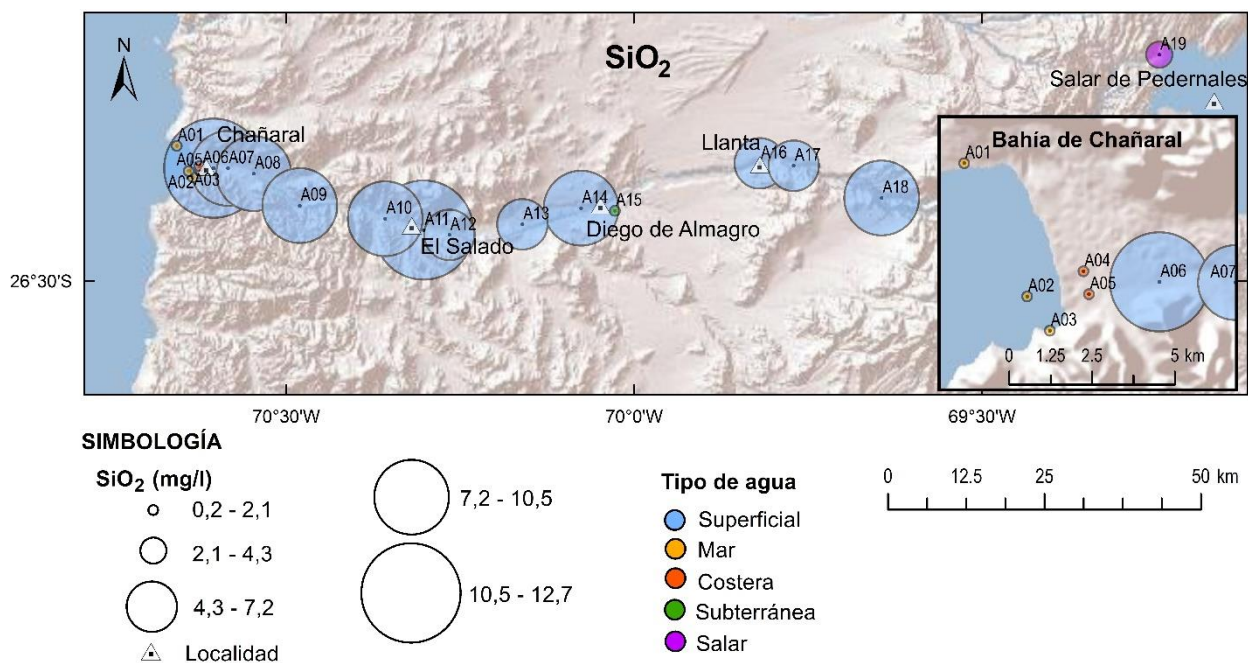


Figura 3.19 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de SiO₂.

La Figura 3.20 corresponde a un gráfico que relaciona el contenido de Cl⁻ con el de SiO₂. En este caso, no se observa una relación generalizada en las muestras, pero sí se pueden diferenciar tres grupos de ellas. El primero corresponde las muestras de mar que se agrupan, en su mayoría, en un área reducido. El segundo, es el grupo central del gráfico compuesto por muestras superficiales, las que no parecen tener relación entre Cl⁻ y SiO₂. Y, el tercero, es el grupo de muestras localizado en el sector derecho del gráfico, que contiene a las muestras superficiales más orientales y al agua de salar. En este último grupo se logra observar una relación indirecta entre el aumento de salinidad y SiO₂, pues al aumentar el contenido de Cl⁻, la concentración de SiO₂ disminuye.

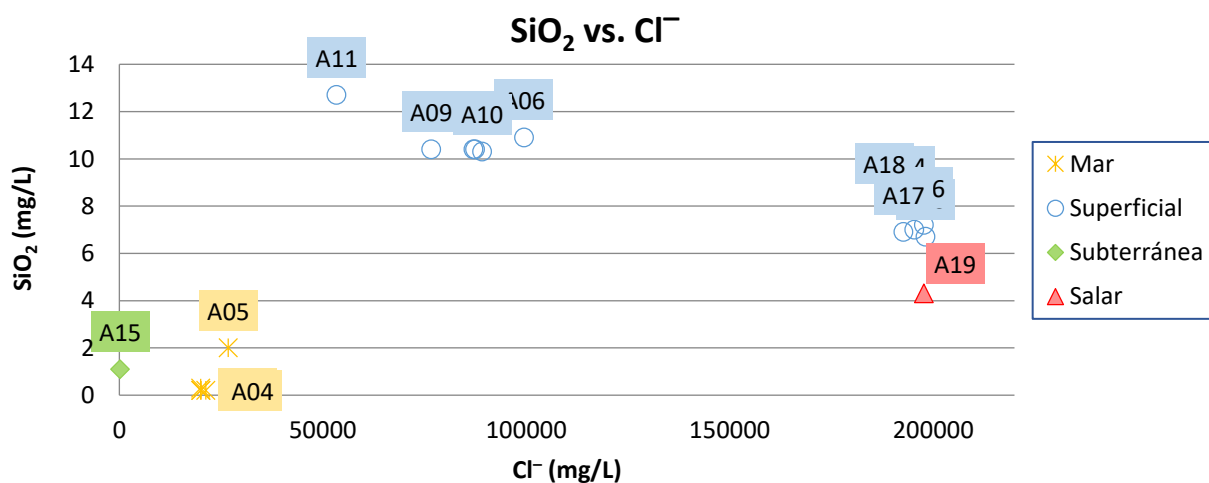


Figura 3.20 Relación entre la concentración de SiO₂ y Cl⁻, en mg/l.

3.1.4 Elementos traza

Los elementos traza analizados en las muestras de agua son: aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilo, boro, cadmio, cinc, cobalto, cobre, cromo, escandio, estaño, galio, germanio, hierro, holmio, lantano, litio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, talio, titanio, torio, uranio, wolframio y vanadio. De ellos, se encontraron solo 15 en concentraciones detectables por el instrumento: Al, As, B, Ba, Co, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V y Zn.

A continuación, se detallan las concentraciones de dichos elementos en muestras de agua junto a su distribución espacial. Además, se presentan gráficos de dispersión que permitan visualizar posibles relaciones entre elementos. Dada la magnitud de su concentración, el B y Li se muestran en mg/l, mientras que el resto de los elementos se presentan en ppb.

3.1.4.1 B

La mayor concentración de B (Figura 3.21) fue encontrada en la muestra A10, agua de río tomada al este de El Salado, con 168,80 mg/l. Contrariamente, la muestra de agua subterránea A15 tiene 0,63 mg/l del elemento, y posee la menor concentración de un promedio total de 86,33 mg/l.

Las muestras de agua de mar y costera varían de 1,30 mg/l a 17,70 mg/l de B, en las muestras A02, mar adentro, y A05, la de mezcla más al este, respectivamente, con un promedio de 6,58 mg/l, un orden de magnitud menor a la media total, y con una tendencia a disminuir la concentración de B de este a oeste.

Por otro lado, las muestras superficiales de río contienen B en el mismo orden de magnitud que la única muestra del salar de Pedernales (A19, 121,60 mg/l), en las que la mínima concentración se encontró en la muestra A09, tomada entre Chañaral y El Salado (103 mg/l) y, la máxima en A10. El promedio de B en este tipo de agua es de 123,77 mg/l, cifra superior a la media del total de muestras, y no se observa una tendencia al aumento o disminución en la concentración del elemento.

Por lo general, el B se encuentra disuelto como BO_3H_3 , parcialmente disociado a BO_3H_2^- , por lo que contribuye en cierta medida a la alcalinidad. Su concentración en aguas continentales, normalmente, es menor a 0,1 mg/l, pero a veces puede llegar a 10 mg/l y, excepcionalmente, a 30 mg/l, así como el agua del mar contiene 4,6 mg/l. El contenido del elemento suele ser elevado en aguas antiguas y termales (Custodio y Llamas, 2001). Así, las muestras de agua de mar bordean el valor común de concentración de B, pero las dos muestras costeras tienen concentraciones mayores debido a la influencia de aguas continentales. Además, todas las muestras de río y la del salar contienen más de los 30 mg/l que describen Custodio y Llamas (2001), y la muestra de agua subterránea se encuentra dentro del rango estipulado.

El B puede ser liberado al agua por medio de proceso de meteorización de rocas, volatilización de ácido bórico del agua del mar y la actividad volcánica. También se asocia a fuentes antropogénicas, pero en menor medida, tales como la agricultura, los

desperdicios de la combustión de leña, la generación de energía usando carbón y petróleo, la fabricación de productos de vidrio, el procesamiento y minería de boratos, la lixiviación de madera/papel tratados y la eliminación de aguas residuales (WHO, 1998.a). Por lo tanto, las concentraciones elevadas de B en las muestras analizadas se deben principalmente a procesos naturales como la concentración de boratos de una provincia boratífera que abarca el sector oriental de la zona de estudio y que incluye el salar de Pedernales (Chong *et al.*, 2000), pero también podría haber influencia antropogénica por la meteorización de material de relaves.

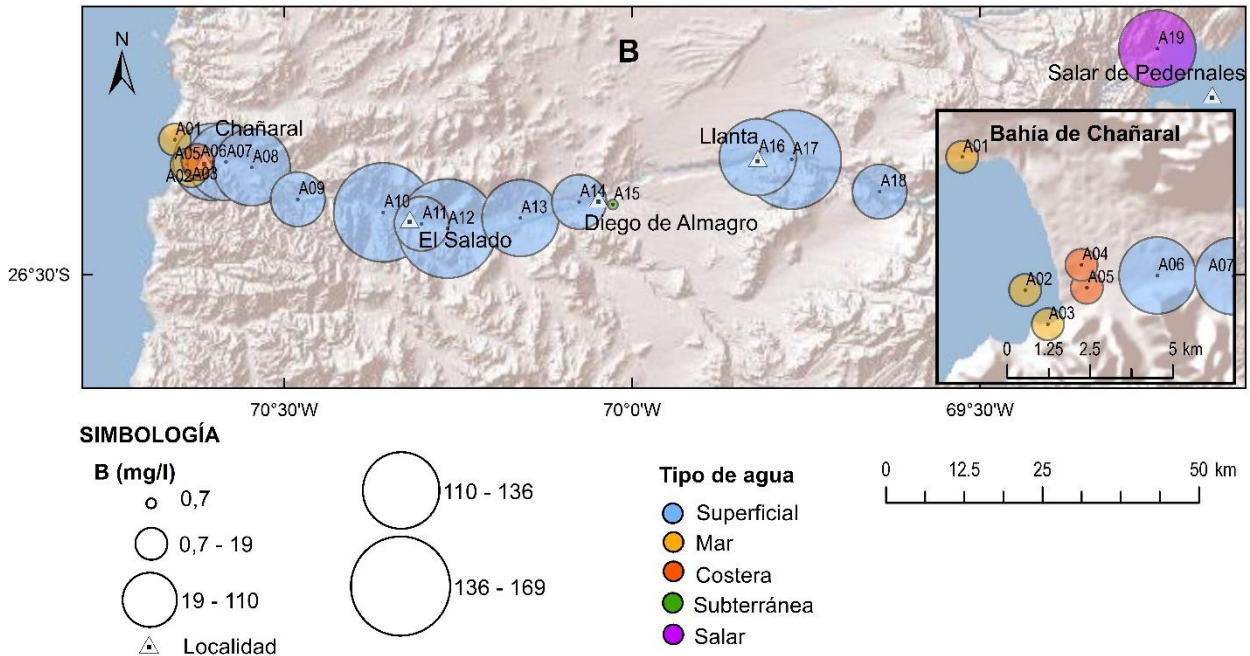


Figura 3.21 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de B en mg/l.

3.1.4.2 Li

El Li se encontró en una concentración promedio de 222,29 mg/l, donde la muestra con mayor concentración es la A13, agua de río localizada entre El Salado y Diego de Almagro con 515,75 mg/l, y las de menor contenido fueron las muestras de mar en las que no se detectó el elemento.

La concentración de Li (Figura 3.22) en las muestras de agua de mar y costeras presenta un aumento hacia la bahía, pues en las muestras costeras A04 y A05 se encontró 3,97 mg/l y 19,53 mg/l, respectivamente. Una tendencia similar pero no tan evidente se observó en las muestras de río, donde hay una disminución de Li desde la cabecera hasta la desembocadura con valores cercanos a los 200 mg/l al oeste de A11, y a 400 mg/l al este. Así, el promedio de las muestras de río es de 315,58 mg/l de Li, la concentración mínima corresponde a la muestra A11, al este de El Salado, con 110,42 mg/l, y la máxima a A13.

La muestra del salar, resultó en 412,85 mg/l de Li, manteniendo la tendencia al de las muestras de río donde las mayores concentraciones están hacia la cordillera de Los

Andes. La muestra de agua subterránea presenta la menor concentración de Li detectable (0,18 mg/l).

Las concentraciones naturales de Li varían entre 0,001 y 0,5 mg/l, a veces hasta 1 mg/l, pudiendo llegar a 10 mg/l en algunas salmueras (Custodio y Llamas, 2001). Por lo tanto, solo la muestra de agua subterránea y las de agua de mar contienen Li dentro del rango natural de su tipo de agua. La concentración del elemento en las otras muestras está por sobre el rango natural.

Las dos principales fuentes naturales de Li son las salmueras y aguas salinas que producen la sal soluble cloruro de litio, y el mineral duro espodumena, un silicato de litio y aluminio (Tahil, 2007). Los salares pre-andinos, entre ellos el salar de Pedernales, presentan costras salinas bien desarrolladas saturadas en cloruro de sodio, y además, presenta contenidos interesantes de litio dados por su evolución natural (Comisión Nacional del Litio, 2014). Este hecho explicaría los altos contenidos de Li en las muestras de la cuenca del río Salado, y de las muestras costeras que presentan influencia de aguas continentales.

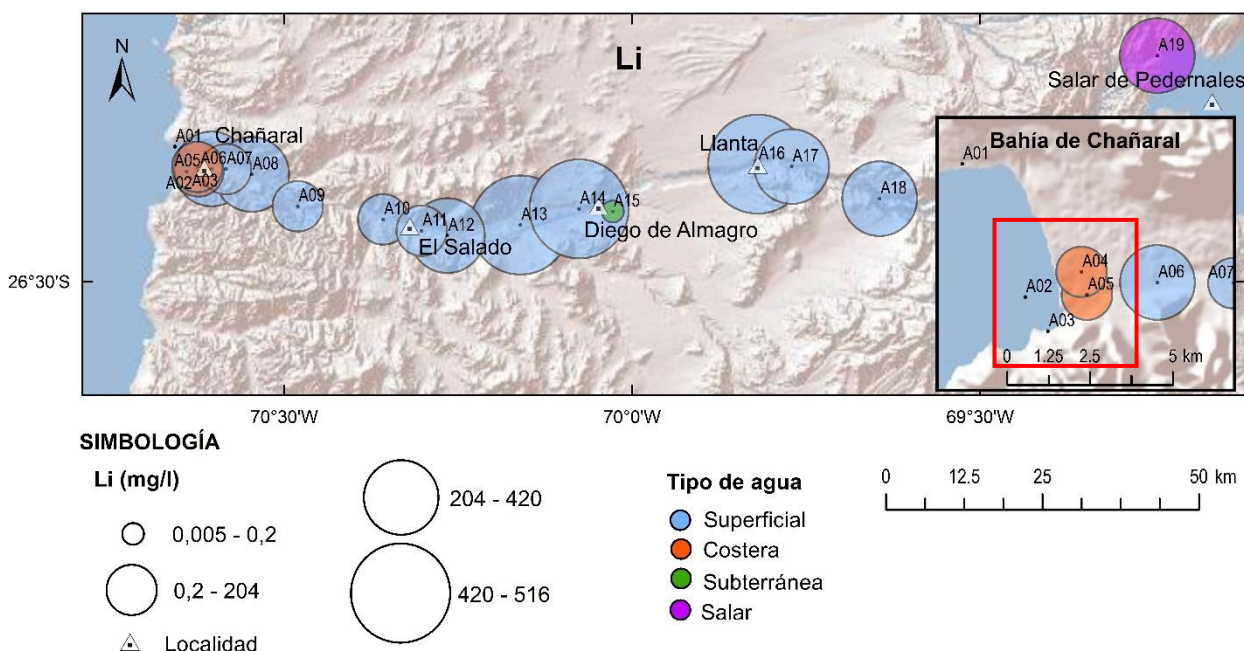


Figura 3.22 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Li en mg/l. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.3 As

El As se concentra en las muestras de agua en un promedio de 1.177 ppb, dentro de las que, la de mayor contenido del elemento es la del salar de Pedernales A19, con 7.776 ppb, y la de menor, la de agua subterránea A15, con 0,3 ppb (Figura 3.23).

La media de As en las muestras de río es de 1.210 ppb, valor ligeramente mayor al promedio total, en las que, la de menor concentración es A11, al este de El Salado,

con 150 ppb y la de mayor, es la más oriental (A18) con 2.155 ppb. Se observa una disminución progresiva en la concentración de As en las muestras de río, desde la muestra del salar de Pedernales (A19) hasta A09, ubicada entre Chañaral y El Salado, exceptuando la muestra A11, que tiene un valor dos órdenes de magnitud menor a las ubicadas al este de ella (Figura 3.23).

Las tres muestras de río más cercanas a su desembocadura, presentan concentraciones cercanas a los 60 ppb, mientras que las tres más orientales promedian 2.080 ppb. Las muestras de agua de mar y costera, por su parte, presentan menos As que las de río, y varían entre 4 ppb en la marina A02 y 59 ppb en la costera A05, con un promedio de 20 ppb. Se observa que las aguas costeras contienen más As que las marinas, lo que se adjudica a la mezcla con agua continental.

La muestra de agua subterránea, por otro lado, tiene una concentración mucho menor a todas las otras, llegando a tener cuatro órdenes de magnitud menos a la muestra del salar de Pedernales.

El As está ampliamente distribuido en aguas dulces superficiales, y las concentraciones en ríos y lagos son generalmente inferiores a 10 ppb, aunque algunas muestras locales pueden llegar hasta 5.000 ppb cerca de fuentes antropogénicas. Los niveles de As en aguas subterráneas son de 1 a 2 ppb, excepto en áreas con rocas volcánicas y depósitos minerales de sulfuros en los que pueden alcanzar hasta 3.000 ppb (WHO, 2001.a). Así, la única muestra de agua subterránea analizada está bajo el promedio de aguas subterráneas naturales, mientras que las muestras de aguas superficiales, la de salar y costeras, tiene As en niveles superiores a lo esperado bajo influencia natural, por lo que su alto valor se acerca al indicado como aguas cerca de fuentes antropogénicas. Esta misma cifra es superada por la muestra del salar de Pedernales.

Se ha estimado que alrededor de un tercio del flujo atmosférico de As es de origen natural. La actividad volcánica es la fuente natural más importante de este elemento, seguida de la volatilización a baja temperatura (WHO, 2001.a); además, influye la presencia de rocas volcánicas y la disolución de depósitos salinos (Aguirre, 2003). En la cordillera de los Andes, el As está asociado con el volcanismo y la actividad hidrotermal (Fernández-Turiel *et al.*, 2005). La extracción y fundición de metales no ferrosos y la utilización de combustibles fósiles son los principales procesos industriales que contribuyen a la contaminación antropogénica del aire, el agua y el suelo con As. También, el empleo de plaguicidas ha dejado contaminadas zonas agrícolas, así como el uso de As en la conservación de madera (WHO, 2001.a). Particularmente, la industria del cobre utiliza una técnica de obtención de cobre altamente contaminante pues emite material particulado y As en sus etapas (Sancha, 1998).

Por tanto, el contenido elevado de As en las muestras analizada, probablemente, se debe tanto a la naturaleza de las rocas volcánicas y la disolución del salar de Pedernales (depósito salino), como de la actividad minera asociada al cobre (metal no ferroso) que se desarrolla en la región.

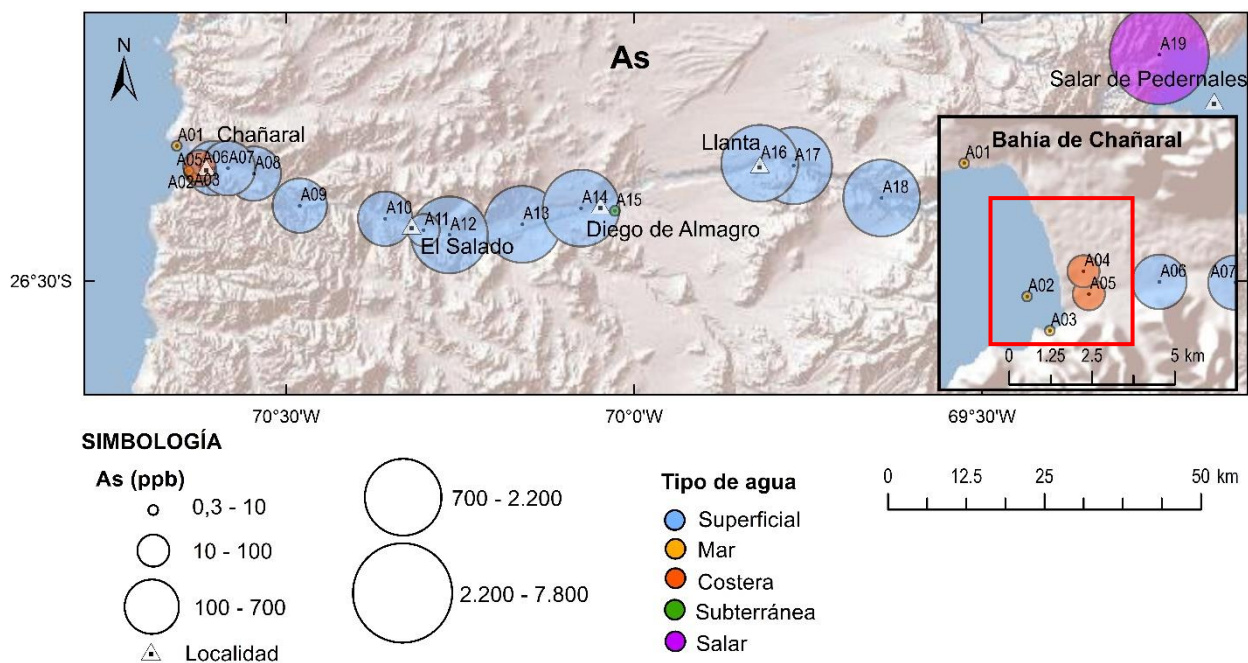


Figura 3.23 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de As en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.4 Mn

El promedio de contenido de Mn es de 721 ppb, donde la máxima concentración obtenida fue en A07, la segunda muestra de agua de río más cercana a la costa, con 2.120 ppb, mientras que, en las muestras de agua de mar, no se detectó el elemento (Figura 3.24).

En las muestras de mar y costeras se encontró un promedio de 228,5 ppb de Mn, valor bajo la media total considerando que solo las aguas costeras presentaron concentraciones detectables: 510,8 ppb y 631,8 ppb en las muestras A04 y A05, respectivamente, siendo las más cercanas al poblado de Chañaral con influencia de aguas continentales. Todas las muestras de río presentan concentración de Mn detectable, con una tendencia a su aumento desde la cabecera del río hacia su desembocadura. El promedio de estas muestras es de 1.038,4 ppb, el valor máximo se encontró en A07, y el mínimo en A18, la muestra más oriental, con 65,4 ppb.

En tanto, la muestra del salar de Pedernales (A19) prosigue esa tendencia a la disminución de las muestras de río, pues contiene 35,4 ppb de Mn, mientras que la muestra de agua subterránea (A15) tiene 59,6 ppb. Ambos valores se encuentran por debajo del promedio de Mn del total de muestras.

El Mn tiene un comportamiento similar al Fe en cuanto a que puede formar complejos orgánicos estables (Custodio y Llamas, 2001). La concentración de manganeso disuelto en aguas naturales que son libres de actividad antropogénica pueden variar desde 10 a 10.000 ppb. Sin embargo, las concentraciones de Mn en aguas superficiales naturales raramente exceden los 1.000 ppb, y usualmente son menores a

200 ppb (WHO, 2006). De las muestras analizadas, aquellas localizadas entre Chañaral y Diego de Almagro contienen Mn en valores superiores a lo naturalmente esperado, es decir, más de 1.000 ppb, mientras que el resto de las muestras lo contienen dentro del rango definido.

Naturalmente, la principal fuente de este elemento son las rocas corticales, además de incendios forestales, vegetación y actividad volcánica. Unas importantes fuentes de Mn disuelto son los ambientes anaeróbicos donde ocurre la reducción de óxidos de manganeso particulados, la directa reducción de óxidos de manganeso en ambientes aeróbicos, la meteorización natural de minerales que contienen Mn, y ambientes acidificados. Además, las principales fuentes antropogénicas del elemento incluyen las descargas de aguas residuales, minería y procesamiento de minerales, emisiones de aleación y producción de acero e hierro, consumo de combustibles fósiles, y en menor medida, emisiones de la combustión de aditivos para combustibles (WHO, 2004).

Por lo anterior, se infiere que las concentraciones que superan 1.000 ppb de Mn deben su alto valor a actividades mineras y procesamiento de minerales desarrollados en los alrededores de la quebrada de El Salado y a la descarga de aguas residuales, como la que se originó después del aluvión de marzo del 2015 en la entrada poniente de Diego de Almagro producto de una rotura en la infraestructura.

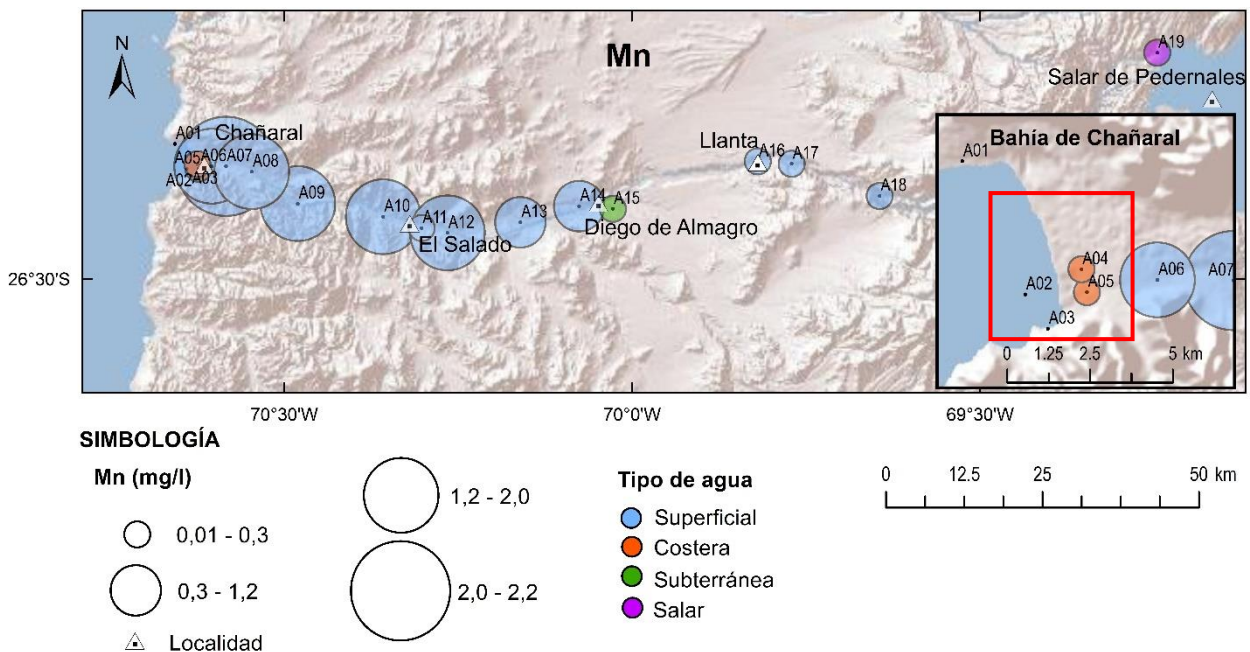


Figura 3.24 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mn en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.5 Cu

En dos muestras de agua de mar no se detectó Cu (<0,5 ppb en A01 y A02), pero sí en A03 con 5,8 ppb. La muestra de agua costera A04 contiene 229,9 ppb, siendo la

que posee la concentración de Cu más alta entre todas (Figura 3.25). Del total de muestras, se encontró una concentración promedio de Cu de 43,8 ppb, mientras que la media de las muestras de mar y costeras es de 58,8 ppb, mayor al promedio total.

En las muestras de río, el Cu se concentró desde la muestra A10 hacia el este, a excepción de la muestra A11 que, al igual que las cuatro muestras de río más cercanas a la costa, no tienen cobre detectable (<0,5 ppb). Las contienen Cu, varían entre 17,1 ppb en A18, la muestra más oriental, y 195,8 ppb en A12, ubicada al este de El Salado, con un promedio de todas las muestras de río de 42,8 ppb. Además, se detectó Cu en la muestra del salar de Pedernales, en una concentración de 10,6 ppb, valor menor a la media total.

En zonas no contaminadas, en el agua marina el Cu se encuentra concentraciones de 0,15 ppb, y en el agua dulce de 1 a 200 ppb (WHO, 1998.b). Las 2 muestras de mar analizadas en este estudio más alejadas de la costa cumplen con los valores comunes, pero A03 junto con las costeras contienen más Cu del común. Las muestras superficiales y la de salar, por su parte, tienen Cu en concentraciones que caen dentro del rango especificado para aguas dulces, mientras que la muestra de agua subterránea está por debajo del rango.

Las fuentes naturales de exposición al cobre son el polvo arrastrado por el viento, los volcanes, la vegetación en descomposición, los incendios forestales y la dispersión marina. Entre las emisiones antropogénicas destacan los hornos de fusión, las fundiciones de hierro, las centrales eléctricas y fuentes de combustión como los incineradores municipales. Pero, la liberación del cobre en el agua se produce como consecuencia de la exposición natural a la intemperie del suelo y los vertidos de industrias y plantas de depuración de aguas residuales (WHO, 1998.b). Dado esta última acotación, la alta concentración de Cu de la muestra marina más cercanas a la costa y las costeras se debe a la interacción de agua de mar con los sedimentos antiguos de los socavones costeros que exponen vertidos de desechos mineros de hace décadas.

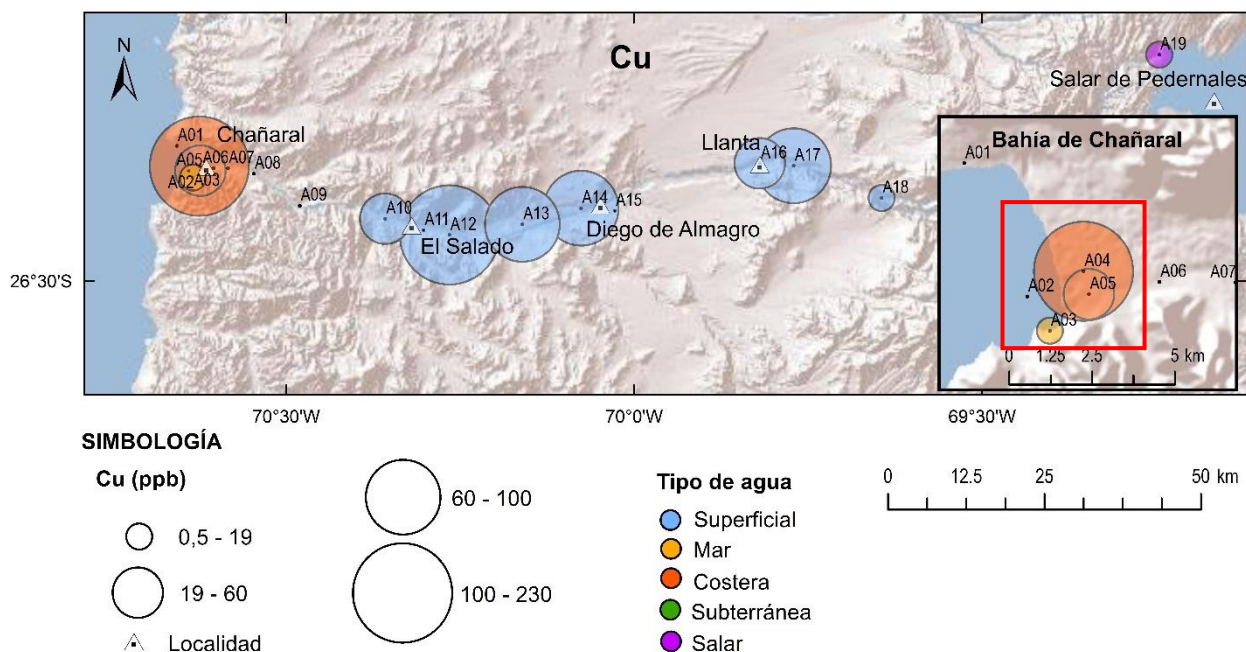


Figura 3.25 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Cu en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.6 Ba

En general, las concentraciones de Ba encontradas fueron bajas, incluso imperceptibles en las muestras de agua de mar (<0,25 ppb). El total de muestras de agua promedia 123 ppb, donde la de mayor concentración es A06, la muestra de río ubicada más al este. Todas las muestras de río presentan valores similares con un promedio de 190 ppb, con la menor concentración en A11, ubicada al este de El Salado, con 64 ppb. Se observa una tendencia no muy marcada, de aumento de concentración de Ba de este a oeste en las muestras de río.

Las muestras costeras, A04 y A05, presentan 21 y 28 ppb de Ba, respectivamente, pero el promedio, considerando también las muestras de mar, es de 10 ppb, claramente menor a la media total. Esta diferencia entre aguas marinas y costeras se debe a la mezcla con agua dulce en las muestras extraídas de los socavones.

Por su parte, la muestra del salar de Pedernales es la que tiene la menor concentración de todas las muestras con concentraciones de Ba detectables, con 12,4 ppb, más aún que la de agua subterránea, la que posee 19,4 ppb. (Figura 3.26).

Las concentraciones de Ba en la naturaleza son muy variables y dependen de la geología local, el tratamiento del agua y su dureza (NAS, 1977). Se han medido concentraciones de hasta 7-15 mg/l en agua dulce, y de 6 mg/l en agua de mar (Schroeder *et al.*, 1972), mientras que en varias aguas superficiales de EE.UU. el Ba oscila entre 43 y 57 mg/l (Schroeder, 1970; Bradford, 1971). En consideración con lo anterior, todas las muestras analizadas contienen Ba en concentraciones bastante menores a los casos de los autores mencionados.

En la naturaleza, el Ba aparece en forma combinada en minerales como la barita (sulfato de bario) y la whiterita (carbonato de bario). También se halla en pequeñas cantidades en rocas ígneas, feldespatos y micas, y puede encontrarse en combustibles fósiles. Las fuentes antropogénicas del Ba son fundamentalmente industriales. Las emisiones pueden deberse a la minería, el refinado o el tratamiento de minerales de Ba y a la fabricación de productos de bario (WHO, 1990). Para el caso en estudio, la presencia de Ba en bajas concentraciones se debe a fuentes naturales.

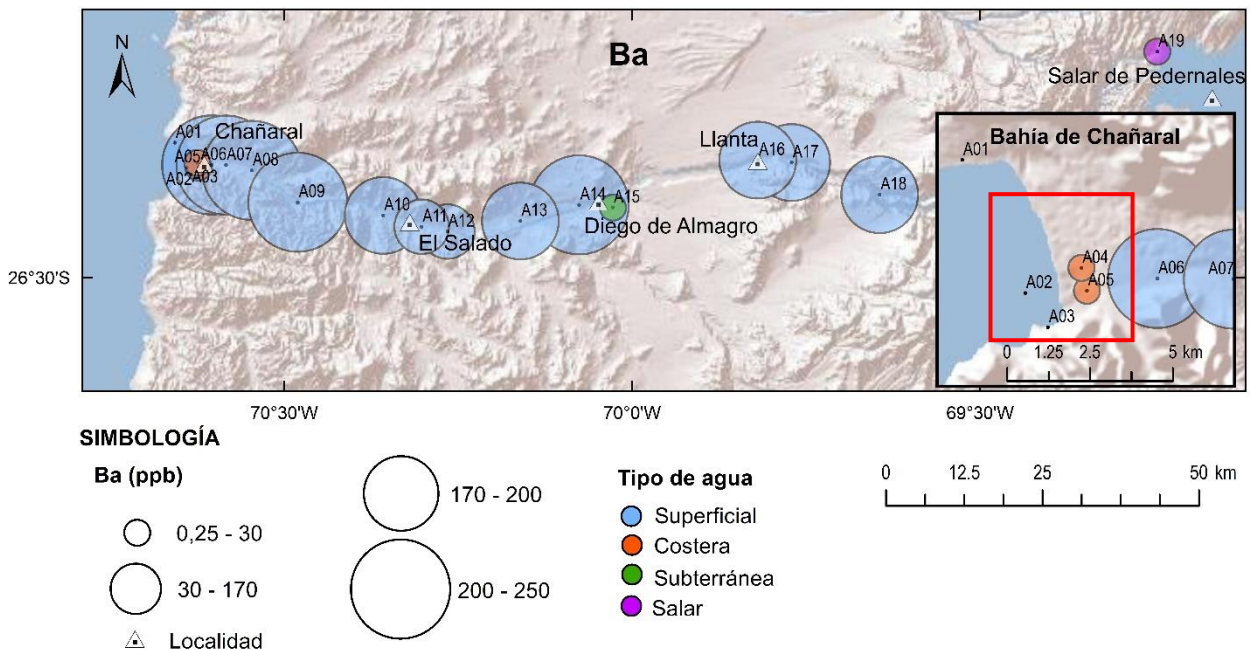


Figura 3.26 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Ba en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.7 Mo

El contenido medio de Mo en las muestras analizadas es de 227,4 ppb. En tres muestras la concentración no fue detectable, y el máximo valor fue 613,8 ppb en la muestra de salar (Figura 3.27).

Las muestras de agua marina tienen una concentración de Mo bajo el límite de detección (<0,3 ppb), mientras que las costeras (A04 y A05) tienen 16,4 ppb y 32,2 ppb, respectivamente. Este aumento de concentración en las muestras costeras se debe a la mezcla de aguas continentales provenientes del río Salado.

Por otro lado, las muestras de río presentan concentraciones más altas que las de mar y costeras, con una disminución del Mo desde la cabecera del río hacia la desembocadura del mismo. La concentración más baja está en la muestra A11, al este de El Salado con 41,8 ppb, y la máxima en A14, al oeste de Diego de Almagro, con 514,8 ppb, aunque la concentración del salar es mayor.

La muestra de agua subterránea, contiene 24,8 ppb de Mo, valor similar a las muestras de agua de mar y menor a la media general.

Algunas muestras de agua superficial de cuencas de río en EE.UU. presentan concentraciones que van de 2 a 1.500 ppb, con un promedio de 60 ppb (Kopp y Kroner, 1967; National Academy of Sciences, 1977). Los niveles en agua subterránea varían desde indetectable hasta 270 ppb en otra investigación en ese país (Kehoe *et al.*, 1944). Por lo tanto, las muestras de este estudio contienen Mo en concentraciones que caen en el rango de aguas continentales.

El Mo tiene la particularidad de que en condiciones alcalinas es móvil y se utiliza para la exploración de mineralización de cobre-oro en ambientes áridos (Salminen, 2005). Por ello, la concentración encontrada en las muestras de este estudio se adjudica a la mineralización existente de Cu en las cercanías de la quebrada del río Salado.

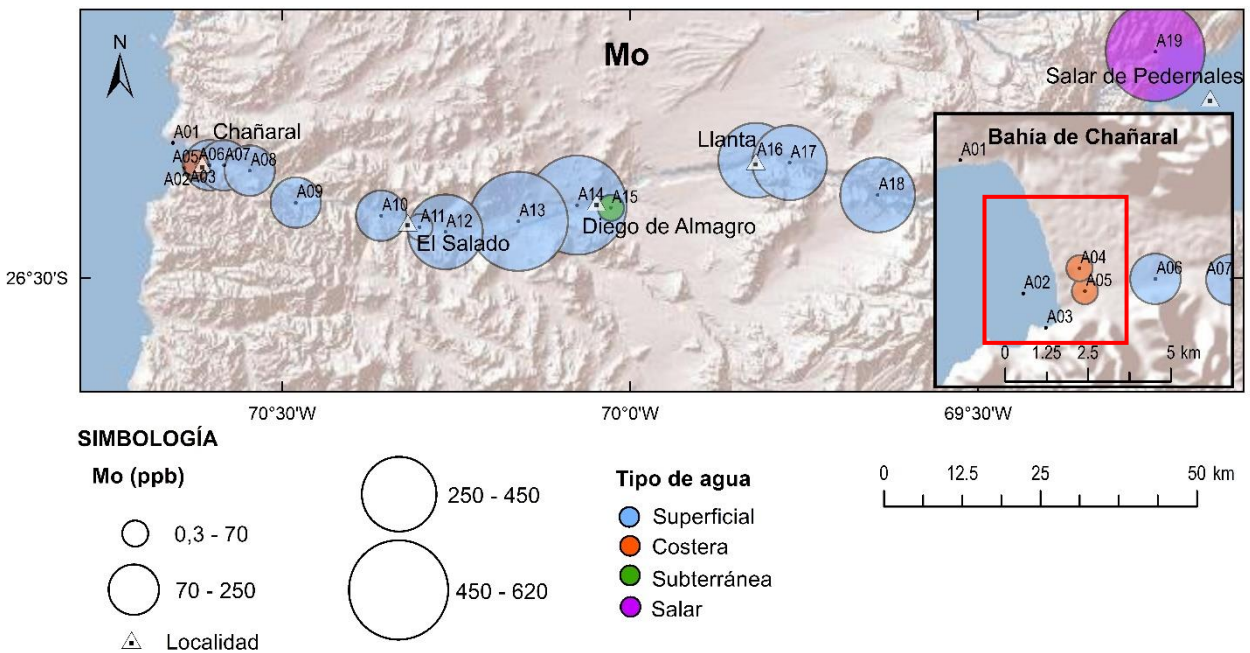


Figura 3.27 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mo en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.

3.1.4.8 Se

En la Figura 3.28 se observa la distribución de Se. En las muestras de agua el promedio es 91 ppb. En todas ellas se detectó Se, y las mayores concentraciones se dan en las muestras de agua de mar y costeras que, en promedio, tienen 205 ppb, más que la media total. La muestra más alejada de la costa posee la mayor concentración de todas las muestras analizadas. Dada la mezcla con aguas continentales de las muestras costeras, tienen valores inferiores de Se que las marinas. Las muestras de río, por otra parte, tienen concentraciones sin tendencia aparente de Se, con un promedio de 52,4 ppb, valor menor a la media total, y se encuentran en un rango de 16 ppb en A09, tomada

entre Chañaral y Diego de Almagro, y 86,2 ppb en A08, al oeste de la muestra anterior, más cercana a Chañaral.

La muestra del salar de Pedernales contiene 73 ppb, y la de agua subterránea tiene la menor concentración de todas, con solo 1,6 ppb de Se. Ambas cifras se encuentran por debajo de la media total.

Bajo condiciones naturales, la concentración de Se en el agua oscila de unas 0,1 a 3 ppb (Ermakov y Kovalskij, 1974; WHO, 1986). Una de las concentraciones naturales más alta reportada es 9.000 ppb, mientras que casi todos los demás valores están por debajo de 500 ppb (WHO, 1986). Las aguas superficiales parecen ser mucho menos propensas a contener niveles excesivos de Se que las aguas subterráneas (WHO, 1986). En este caso, la única muestra analizada que contiene Se dentro del rango entregado por Ermakov y Kovalskij (1974) es la de agua subterránea. El resto de las muestras tienen concentraciones levemente mayores, pero inferiores al límite que contiene la mayoría de los valores expresados por WHO (1986).

La distribución del Se parece ser desigual sobre la superficie de la tierra, y depende de proceso geofísicos, biológicos e industriales. Las fuentes industriales de Se provienen del refinado del cobre, pues durante este proceso y la purificación del Se puede existir cierta pérdida del elemento en el medio ambiente. Otras fuentes son la producción de vidrio y de equipos electrónicos o ciertos metales (WHO, 1986). Por tanto, las concentraciones mayores encontradas en las muestras de agua se deben principalmente a los procesos de refinado del cobre relacionado a la minería del mismo metal.

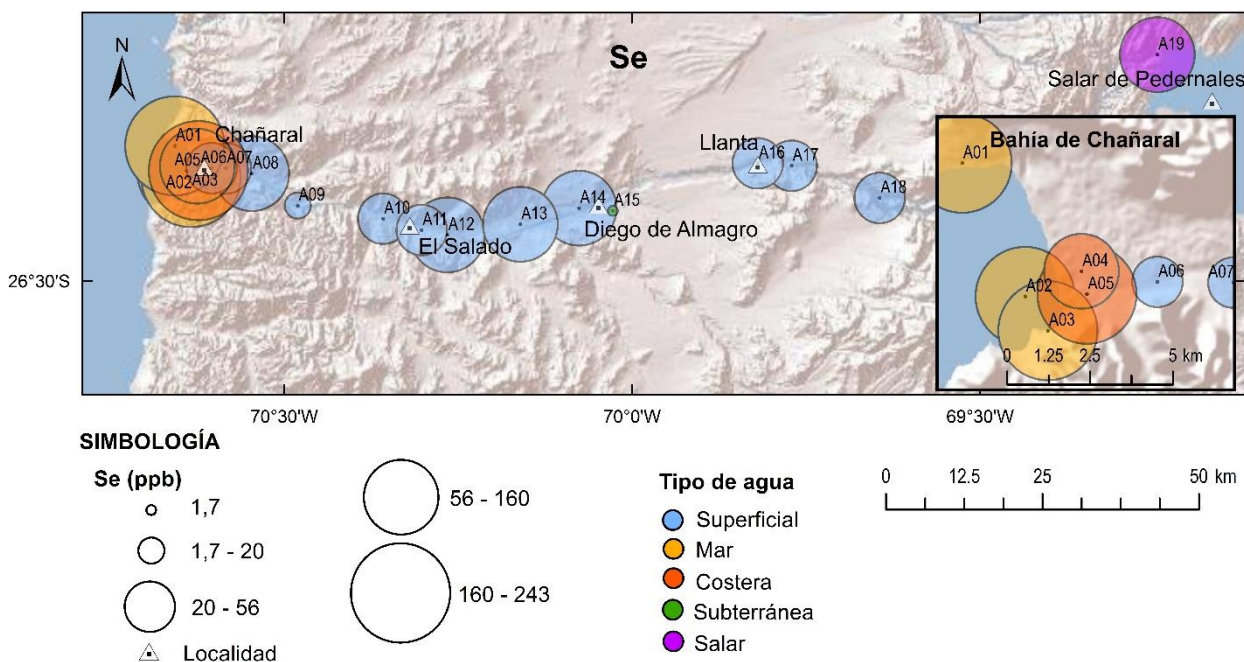


Figura 3.28 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Se en ppb.

3.1.4.9 V

El V (Figura 3.29) se encuentra en concentraciones menores al límite de detección en todas las muestras de agua de mar y costera, en la única muestra de agua subterránea y en A11, del río Salado (<0,2 ppb). El promedio total es 31 ppb.

Todas las otras muestras de río contienen V en concentraciones que varían de 12,6 mg/l en A09, tomada entre El Salado y Diego de Almagro, a 90 mg/l en A17, la segunda muestra más oriental, con una tendencia a disminuir desde la cabecera hacia el oeste y un promedio de 41 ppb, por sobre la media total. La muestra de agua de salar, tiene la mayor concentración de V (98,6 ppb).

La mayor parte de las aguas superficiales dulces contienen menos de 3 ppb de V; se han notificado niveles más altos, hasta 700 ppb. Los datos sobre los niveles de V en aguas superficiales próximas a actividades industriales son escasos; la mayoría de los informes parecen indicar niveles aproximadamente iguales a los naturales más elevados. Las concentraciones en el agua marina oscilan entre 1 y 3 ppb (WHO, 2001.b). Las muestras de agua de mar contienen V por bajo el rango definido, al igual la muestra de agua subterránea, mientras que las muestras superficiales y la del salar presentan V en mayores concentraciones, pero aún dentro de los niveles altos determinados por WHO (2001.b).

Las fuentes naturales de V, por orden de importancia, son los polvos continentales, los volcanes, el rocío del mar, los incendios forestales y los procesos biogénicos (Nriagu, 1990). Con diferencia, la fuente más importante de contaminación ambiental con V es la combustión de petróleo, seguida por la combustión de carbón (WHO, 2001.b).

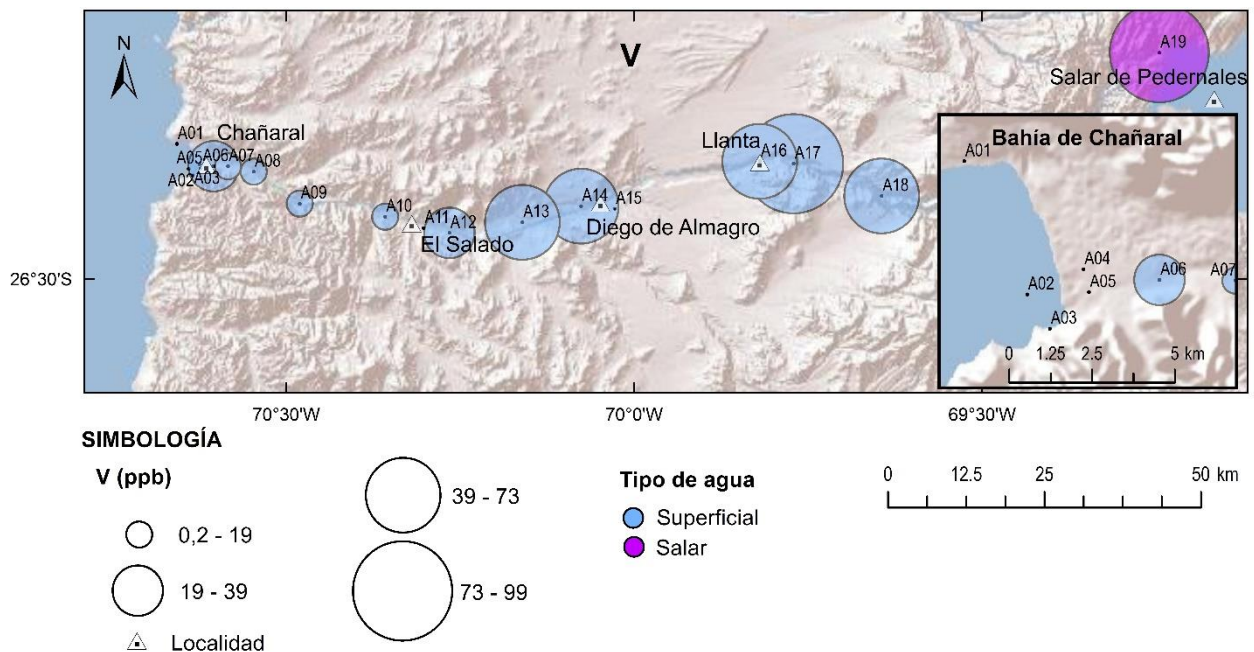


Figura 3.29 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de V en ppb.

3.1.4.10 Fe

El Fe (Figura 3.30) se encuentra en concentraciones bajas en las muestras estudiadas. Las muestras de agua de mar, las costeras y las tres muestras de río más cercanas a su desembocadura no poseen Fe detectable, además de la A10 (<10 ppb). El resto de las muestras de río tienen una concentración que varía de 20 ppb en A14, al oeste de Diego de Almagro, a 110 ppb en A12, al este de El Salado, y tienen, en promedio, 39 ppb de Fe (incluyendo las que no se detectó el metal).

La muestra de agua subterránea (A15) posee 20 ppb, valor bajo el promedio total, mientras que la de agua de salar (A19) contiene 130 ppb, la mayor concentración de Fe detectada.

La química del Fe es relativamente compleja pues puede existir en dos estados de valencia como Fe^{+2} y Fe^{+3} , y su estabilidad depende del pH, Eh y composición de la solución (Custodio y Llamas, 2001). La concentración media de Fe en aguas de ríos es de 700 ppb, y en aguas subterráneas anaeróbicas (con Fe^{+2}) las concentraciones suelen ser de 500 a 10.000 ppb, pero a veces pueden llegar a 50.000 ppb (WHO, 2003). La concentración de Fe en agua marina es muy baja, desde 0,0028 ppb a 0,1117 ppb (Achterberg, *et al.*, 2001). Por tanto, todas las muestras analizadas contienen al metal en concentraciones dentro del rango definido para su tipo de agua.

La solubilidad del Fe está influenciada por condiciones redox, pues es mucho más soluble en ácidos fuertes o condiciones reductoras, por lo que se encuentra en condiciones más altas en aguas subterráneas en reducción. También es soluble en el drenaje ácido de minas. Las fuentes antropogénicas de hierro incluyen la industria del acero, las aguas residuales y el polvo de la minería del hierro (Reimann y de Caritat, 1998). El sulfato de hierro también se utiliza como fertilizante y herbicida (Reimann *et al.*, 2003).

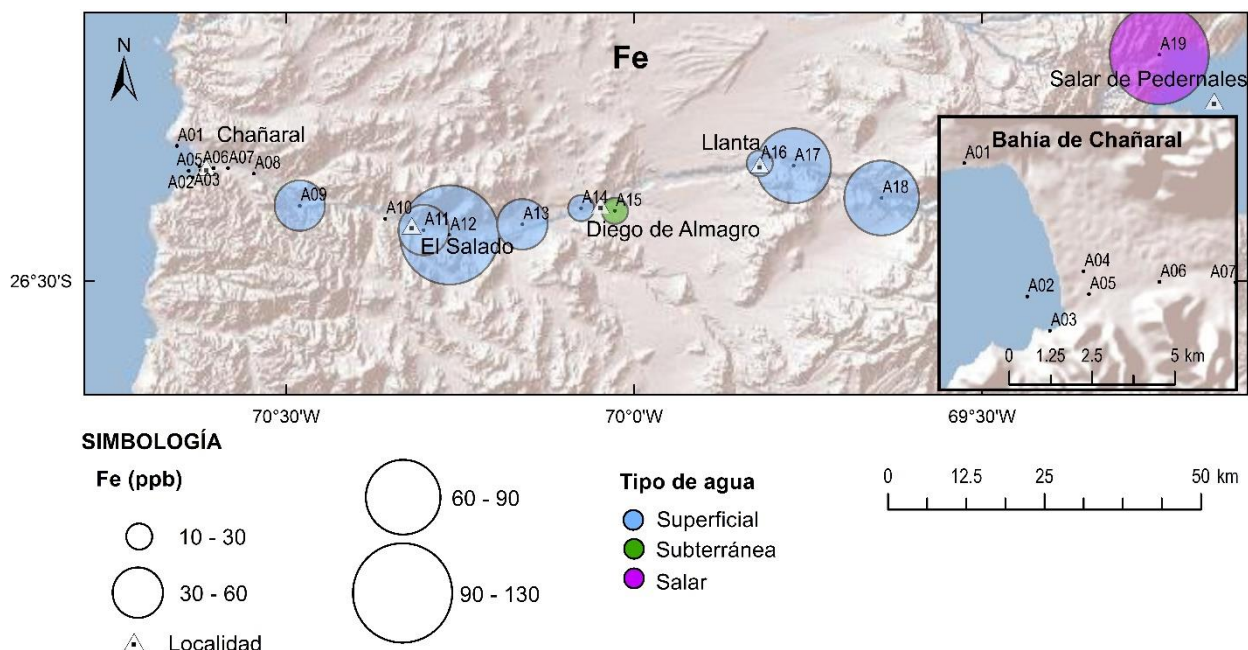


Figura 3.30 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Fe en ppb.

3.1.4.11 Al

El Al (Figura 3.31) se encuentra concentrado en un total de cinco muestras de agua, dentro de las cuales tres son de río, A10, A11 y A12, con 70, 40 y 150 ppb, respectivamente, siendo la A12 la de mayor concentración; una es la del salar de Pedernales, A19 con el menor contenido de todas, con 10 ppb; y, la última, es la correspondiente al agua subterránea, A15, que contiene 25 ppb. Todas las otras muestras de río, las muestras de agua de mar y las costeras, no contienen Al detectable (<10 ppb). En promedio, considerando el total de muestras analizadas, se encontró 16 ppb de Al, y la media de las muestras de río es de 22 ppb. No existe una tendencia aparente en ningún tipo de agua, pero se observa en la Figura 3.31 que las muestras de río que contienen aluminio Al se concentran alrededor de la localidad de El Salado.

En general, el Al es muy difícil de poner en solución y queda fuertemente retenido en las arcillas. Solo existe en cantidades importantes como Al^{+3} en aguas muy ácidas o como $Al_2O_4^{-2}$ o $Al_2O_4H^{-}$ en aguas básicas, en cuyo caso puede producir alguna alcalinidad. Su concentración en aguas varía entre 5 y 30 ppb, pudiendo llegar muy extraordinariamente a 100.000 ppb en aguas muy ácidas (Custodio y Llamas, 2001). Por lo tanto, las muestras que contienen Al en concentraciones detectables no superan el rango natural que entrega la bibliografía, por lo que su presencia se debe a procesos naturales.

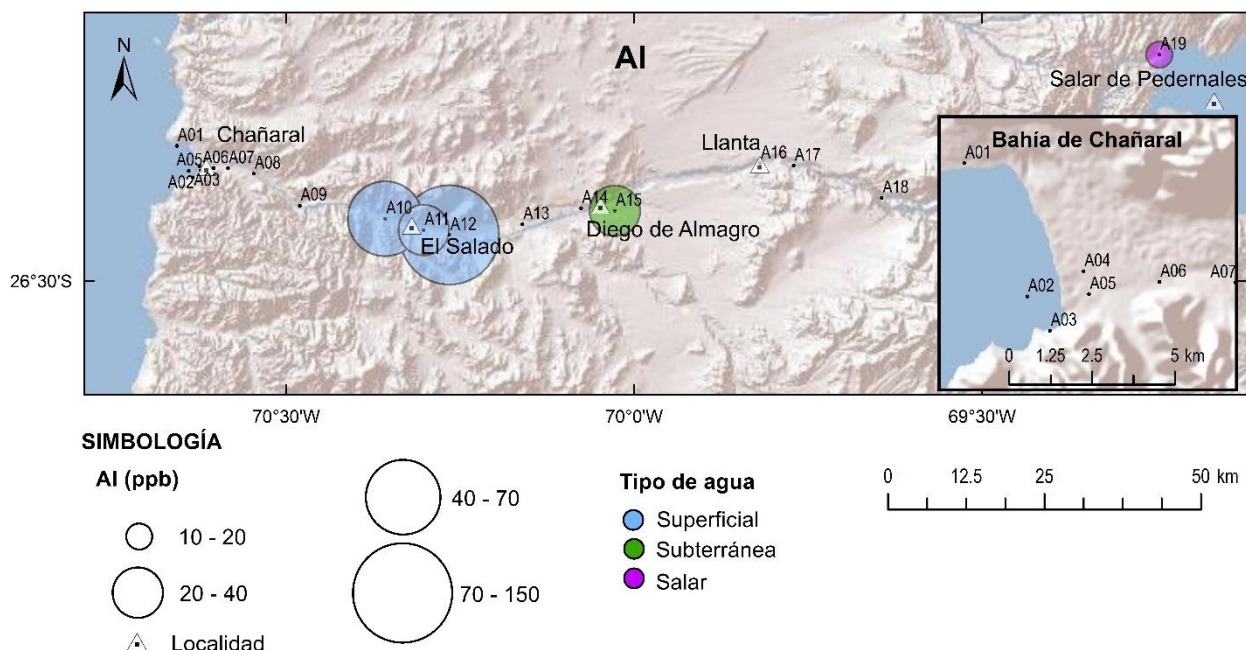


Figura 3.31 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Al en ppb.

3.1.4.12 Co, Ni, Pb y Zn

Los elementos Co, Ni y Pb se detectaron solo en una muestra de agua, y el Zn en dos, por lo que su distribución no fue representada en un mapa de la zona de estudio.

El caso del Co no se detectó en 18 de las 19 muestras de agua (<0,1 ppb), siendo la muestra de agua subterránea A15 la que presenta 0,3 ppb de Co. WHO (2006) indica que las concentraciones de Co en aguas superficiales y freáticas son bajas, inferiores a 1 ppb en zonas despobladas y de 1 a 100 ppb en zonas pobladas, pudiendo alcanzar valores mucho más elevados en zonas mineras y agrícolas. En el agua marina la concentración media de Co es menor a 1 ppb. Así, todas las muestras analizadas contienen Co en niveles menores a los valores naturales.

Son fuentes naturales del Co el polvo arrastrado por el viento, el agua marina pulverizada, los volcanes, los incendios forestales y las emisiones biogénicas. Entre las fuentes antropogénicas cabe mencionar la quema de combustibles fósiles, los fangos de alcantarillado, los fertilizantes y la industria del Co.

El Ni, al igual que el Co, solo se detectó en la muestra de agua subterránea (A15) con 2,65 ppb. Las otras muestras, poseen una concentración de Ni menor al límite de detección (<0,5 ppb). El Ni es un metal ampliamente distribuido. En el agua natural, los niveles oscilan entre 2 y 100 ppb en aguas dulces, y de 0,2 a 0,7 ppb en agua de mar (WHO, 1991). Por tanto, la muestra de agua subterránea contiene al elemento en una concentración que cae dentro del rango natural de aguas dulces; además, las otras muestras con Ni bajo el límite de detección también estarían en el rango del respectivo tipo de agua.

Este elemento ingresa a la hidrósfera desde la atmósfera, por la escorrentía superficial, por la descarga de residuos industriales y municipales, también, tras la erosión natural de suelos y rocas (WHO, 1991).

Se detectaron 23 ppb de Pb en la muestra superficial A12 ubicada al este de El Salado. El resto de las muestras, tanto las superficiales como la subterránea, poseen una concentración menor al límite de detección del instrumento (<5 ppb).

Análisis realizados de aguas subterráneas muestran que las concentraciones de Pb varían de 1 a 60 ppb (Kehoe *et al.*, 1944; Bagchi *et al.*, 1940). Livingstone (1963) estimó que el promedio global de Pb contenido en lagos y ríos es de 1 a 10 ppb. También, se ha encontrado que la concentración de Pb en agua de mar es menor que en aguas dulces, estimando un rango de 0,03 a 0,4 ppb (Tatsumoto y Patterson, 1963; Chow, 1968). Por tanto, todas las muestras analizadas coinciden con los valores definidos por los autores anteriormente mencionados.

La contribución de fuentes naturales de Pb a las concentraciones de plomo en el medio ambiente es pequeña. La minería, fundición y refinado, así como la fabricación de productos que contienen Pb pueden dar lugar a emisiones del elemento. Las fundiciones de minerales de Pb crean problemas de contaminación en áreas locales (WHO, 1977). Sin embargo, este no es el caso de la zona de estudio, lo que explicaría la baja concentración de este elemento en todas las muestras.

Solo dos muestras presentan una concentración de Zn detectable: la muestra de agua de mar ubicada más al norte (A01) con 0,09 mg/l, y la muestra de agua subterránea con 47,5 ppb. El resto de las muestras contienen Zn en concentraciones menores al límite de detección (<10 ppb). El Zn se encuentra naturalmente en una concentración de 0,1-50 ppb en el agua dulce y 0,002-0,1 ppb en el agua marina. En aguas con contaminación de origen antropogénico, se ha medido hasta 4 mg/l (WHO, 2001.c). Así, la muestra de agua subterránea está dentro del rango natural, y la muestra de agua de mar está levemente por sobre los niveles estipulados, lo que podría indicar algún tipo de aporte antropogénico.

La mayoría de las rocas y muchos minerales contienen Zn en cantidades variables, siendo la esfalerita el mineral más importante desde el punto de vista comercial. La fuente natural más importante de Zn en el agua procede de la erosión, y las principales fuentes antropogénicas son la extracción, las instalaciones de producción de Zn, la producción de hierro y acero, la corrosión de estructuras galvanizadas, la combustión del carbón, entre otras (WHO, 2001.c).

3.1.5 Resumen

3.1.5.1 Agua marina y costera

Las muestras de agua de mar y costeras tienen menor concentración de Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y SiO_2 en relación a las muestras superficiales. Tienen menos Mg^{+2} y SO_4^{-2} que el agua de río, pero no existe una gran diferencia. Por otro lado, en las muestras de agua de mar y costeras, el Br^- se presenta en mayor concentración que cualquier otro tipo de

muestra, mientras que el NO_3^- tienen concentraciones menores al límite de detección. Todos los elementos mayores tienden a aumentar su concentración en las dos muestras tomadas en los socavones (A04 y A05) por la influencia continental (Figura 3.32).

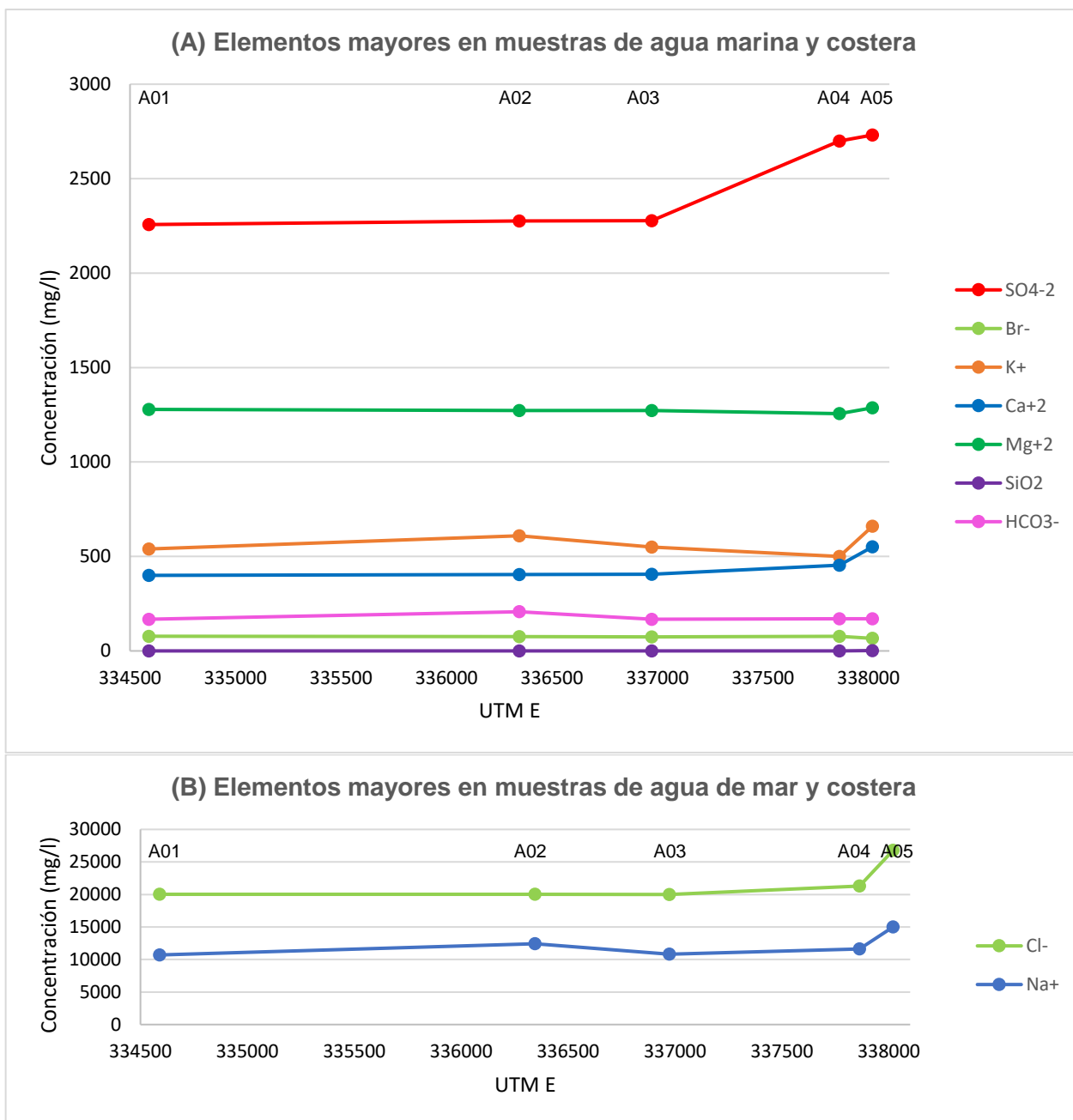


Figura 3.32 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de agua marina y costera. (A) Elementos con concentraciones menores a 3000 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 10.000 y 30.000 mg/l.

En la Figura 3.33 se observan las similitudes y diferencias entre los elementos traza estudiados en las muestras de agua marina y costera. Aquellos que se encuentran en mayor concentración son el B y el Li, seguidos por el Mn y Se. En menor cantidad se encuentran el Cu, Zn, As, Ba y Mo. Un grupo de elementos compuesto por Ba, Li, Mn y Mo, está ausente en las muestras marinas y presente en las costeras. Estos elementos,

junto con el As y el B, tiene una tendencia de aumento de concentración desde el mar hacia la costa, pauta que no es detectada para el Cu, Se y Zn. El Cu presenta un *peak* de concentración máxima en la muestra A04, la costera del socavón sur mientras que el Se, en la misma muestra, tiene un valle de concentración mínima, con una tendencia de disminución de oeste a este, al igual que el Zn que se concentra en la muestra más alejada de la costa, A01.

El Al, Co, Fe, Ni, Pb y V, que se encontraron en otro tipo de muestra, no se concentraron en las muestras de mar y costeras.

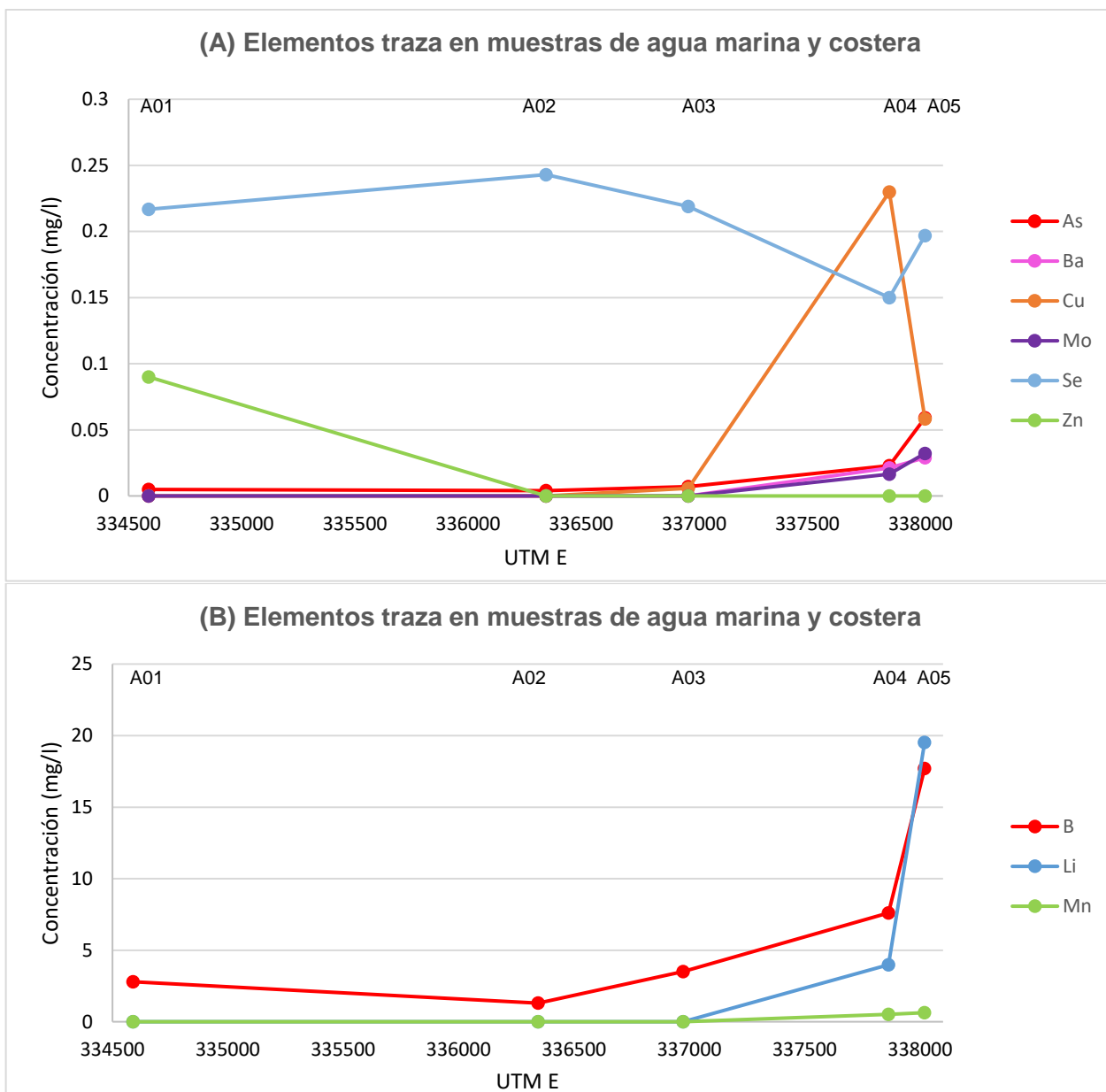


Figura 3.33 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de agua marina y costera. (A) Elementos con concentraciones menores a 0,25 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 20 mg/l.

3.1.5.2 Agua superficial y de salar

Las muestras del río Salado presentan muy altas concentraciones de Cl^- y Na^+ , altas de SO_4^{-2} , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y HCO_3^- , y muy bajas de Br^- , NO_3^- y SiO_2 , todos con valores que aumentan, a grandes rasgos, hacia la cabecera del río, excepto la concentración de SiO_2 que tiende a disminuir desde la costa hacia la cordillera (Figura 3.34).

El Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , y Mg^{+2} presentan un quiebre abrupto entre A10, A11 y A12, al disminuir su concentración desde A10 a A11, para luego aumentar drásticamente en A12, como se puede observar en la Figura 3.34. Hacia el este del quiebre, las muestras tienen concentraciones similares mientras que hacia el oeste del quiebre, ocurre lo mismo, pero con valores mucho mayores. La SiO_2 tiene un comportamiento similar, solo que en vez de disminuir su concentración en A11, este aumenta en dicha muestra, siguiendo un patrón contrario a todos los otros elementos. La muestra A11 se tomó inmediatamente antes de El Salado, y su apariencia física era diferente al resto de las muestras de río, pues en ese afluente el agua era notoriamente más cristalina y provenía desde el sureste para converger en el caudal principal del río Salado.

En el caso del Br^- y el NO_3^- , en las muestras de río, también existe un quiebre abrupto (Figura 3.34) que aumenta desde concentraciones no detectables a valores que superan los 14 mg/l, pero esta vez al pasar de A13 a A14, hacia el este. En las muestras de A13 hacia el oeste no se detectó Br^- y NO_3^- mientras que hacia el este de A13, las concentraciones son de 16,85 mg/l de Br^- y 23,58 mg/l de NO_3^- en promedio.

La muestra del salar de Pedernales tiene concentraciones de Cl^- , SO_4^{-2} , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y SiO_2 muy similares a las de la muestra de río más cercana (A18) que se encuentra a 45,9 km hacia el suroeste. Las concentraciones de Br^- y NO_3^- son iguales a los valores al oeste del quiebre detectado en esos aniones (<0,1 mg/l). Tiene la mayor concentración de HCO_3^- de todas las muestras (Figura 3.34).

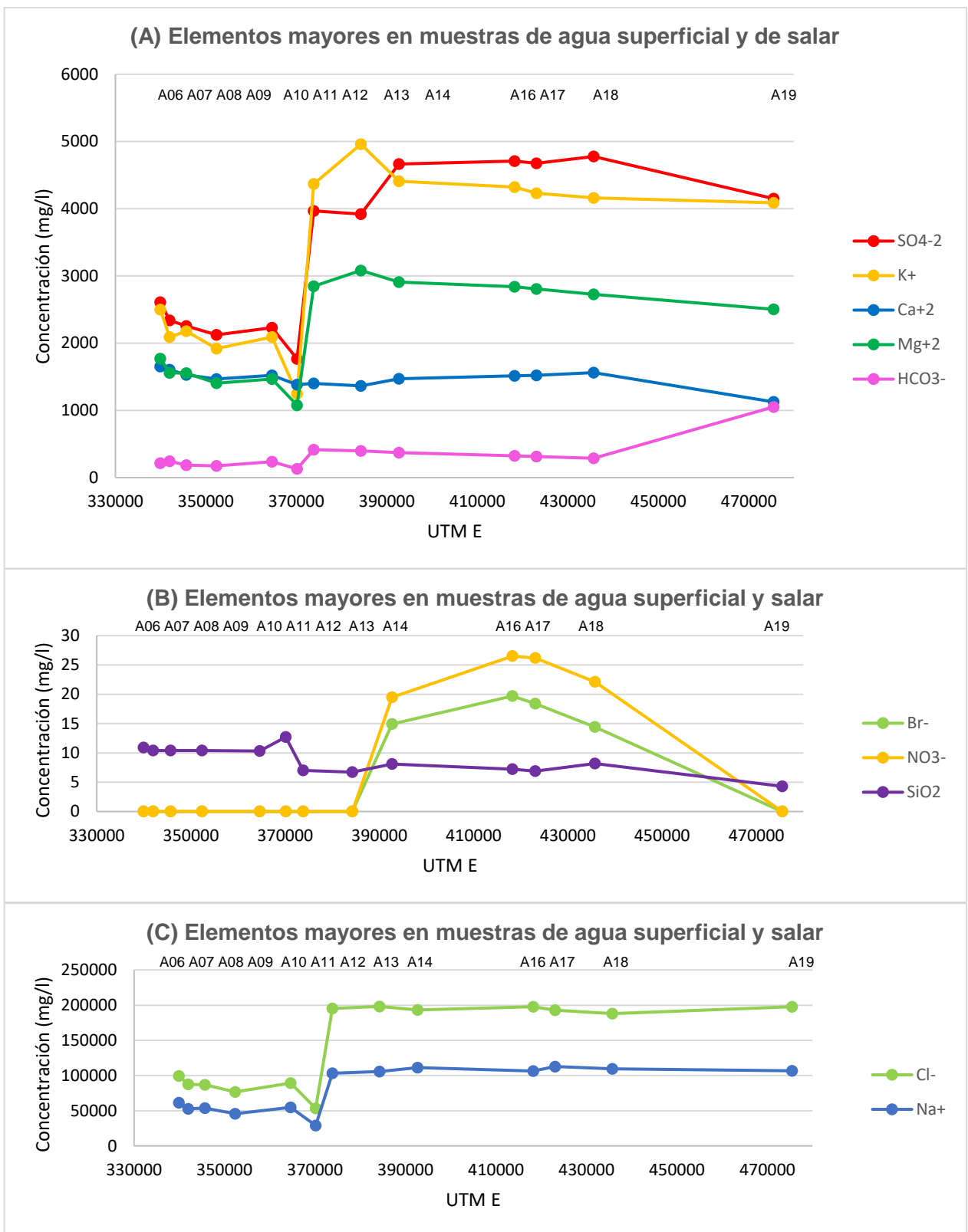


Figura 3.34 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de río y salar. (A) Elementos con concentraciones menores a 5.000 mg/l. (B) Elementos con concentraciones menores a 30 mg/l. (C) Elementos con concentraciones menores a 200.000 mg/l.

En las muestras del río Salado (Figura 3.35), se detectó Al, Fe, Pb y V, elementos traza que no se hallaron en muestras de mar, pero no se encontró Zn, elemento presente en una muestra de mar. Los elementos traza que tienen mayor concentración son el Li y B. Con dos órdenes de magnitud menos, les siguen el As y Mn. Los menos concentrados son el Mo, Ba, Cu, Fe, Se, V, Al y Pb.

En un grupo considerable de elementos se observa una tendencia al aumento de concentración desde la desembocadura del río Salado hacia su cabecera. En particular, dicho comportamiento se detecta en el As, Cu, Fe, Li, Mo y V. Lo contrario ocurre con el Ba y Mn, cuya concentración va disminuyendo hacia la cordillera de Los Andes. Otros elementos, como el Al, B, Pb y Se, no presentan una clara relación espacial y no es posible determinar una tendencia. Los valores se mantienen a lo largo de todo el recorrido del río.

Muchos elementos traza tienen en común que sus concentraciones tienen un cambio brusco en la muestra A11. En la mayoría de ellos, los valores disminuyen drásticamente en dicha muestra, lo que se evidencia por el valle pronunciado de la Figura 3.35, cerca de los 370000E, en el B, Li, As, Mn, Al, Ba, Cu, Fe, Mo y V, a diferencia del Pb y Se, en cuyas curvas no se observa el quiebre. Particularmente, en el Cu y el Mo, la disminución en concentración de la muestra A11 es seguida por un aumento drástico en A12, hacia el este. Tal como se explicó en la discusión de los elementos mayores, la A11 corresponde a una muestra de agua de río notoriamente más cristalina al resto, proveniente de un afluente de sureste a noroeste, que se une al caudal principal.

Otra peculiaridad observada, pero menos general y no tan notoria, es lo que ocurre en A17, en la cual el V, Fe, Ba, Cu, Se y B tienen un aumento en su concentración en relación a las muestras vecinas, algunos más marcados que otros.

La muestra A19 de agua del salar de Pedernales, por lo general, se adhiere a la tendencia de las curvas de los elementos traza (Figura 3.35). Esto ocurre con el B, Li, Mn, V, Se, Fe, Cu, Pb y Zn, mientras que los otros elementos muestran una variación a su comportamiento. El Mo y el B aumentan drásticamente su concentración en la muestra de salar con respecto a las muestras de río que le anteceden, superándolas notoriamente. El Ba, por su parte, disminuye su concentración en la misma muestra de forma clara, con un valor mucho menor al de todas las muestras de río.

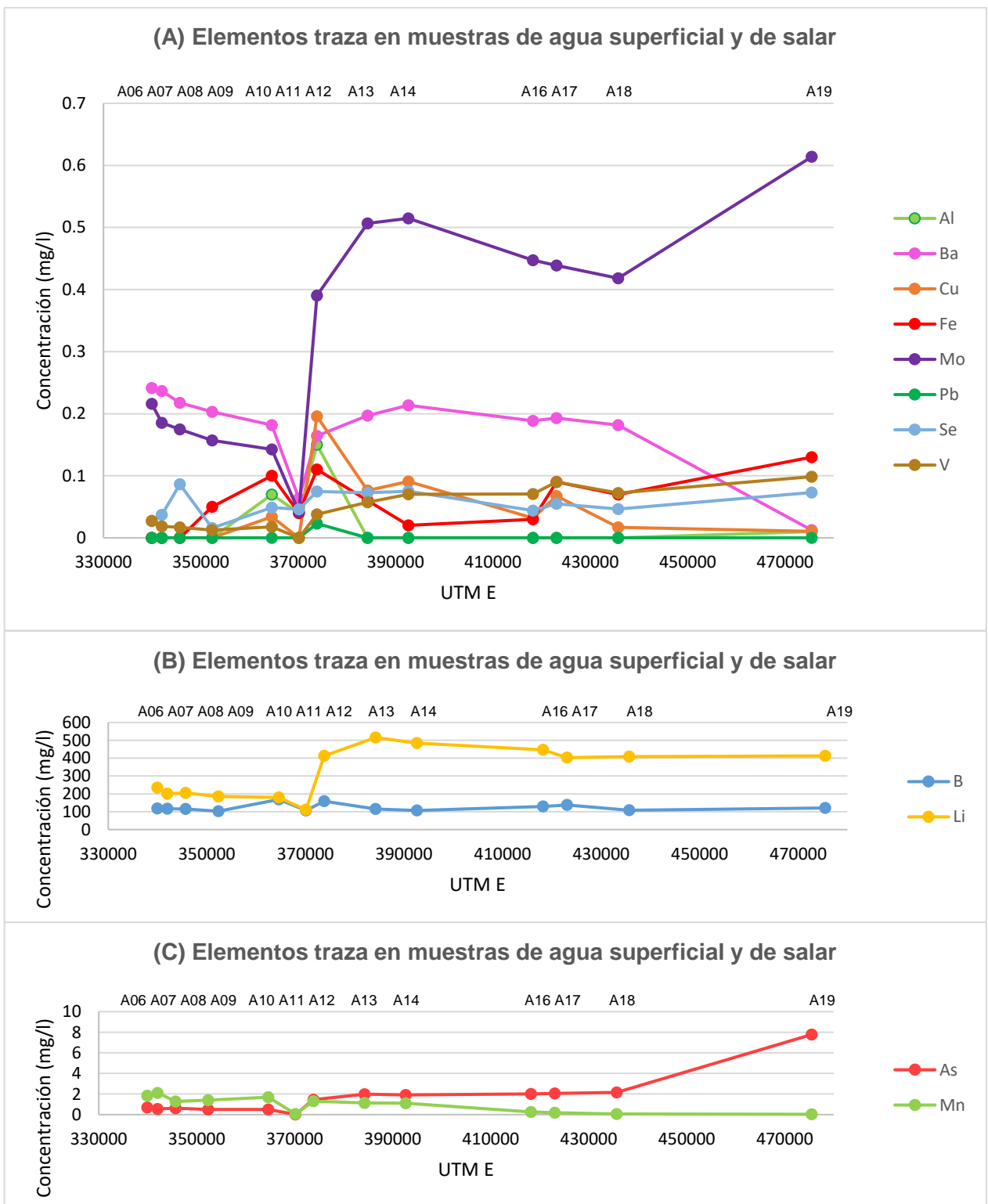


Figura 3.35 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de río y salar. (A) Elementos con concentraciones menores a 0,7 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 100 y 600 mg/l. (C) Elementos con concentraciones menores a 10 mg/l.

3.1.5.3 Agua subterránea

La muestra que presenta menor concentración en todos los elementos es la de agua subterránea A15 que tiene tres órdenes de magnitud menos que la concentración en muestras de río de Cl^- , Na^+ , K^+ y Mg^{+2} , y un orden en el contenido de SO_4^{-2} , HCO_3^- , Ca^{+2} y SiO_2 . Además, el Br^- y NO_3^- se encuentran bajo el límite de detección.

El agua subterránea analizada tiene concentraciones menores de As, Ba, B, Fe, Li, Mn, Mo y Se con respecto a las otras muestras de agua, de hasta tres órdenes de magnitud menos. Tres elementos no fueron detectados por el instrumento: Cu, Pb y V. Sin embargo, ciertos elementos se concentraron más que en el resto de las muestras, como es el caso del Al, que supera a todas las muestras de mar, a la de salar y a nueve de río. Son casos particulares los del Co, Ni y Zn, pues estos se encontraron en concentraciones detectables en la muestra de agua subterránea, no así en las otras muestras de agua, siendo este hecho interpretable como una probable contribución geogénica.

3.1.6 Otros análisis

3.1.6.1 Análisis multivariante

Con el fin de determinar el grado de asociación lineal existente entre elementos químicos, se generó una matriz de correlación que incluye a los elementos mayores y a los traza principales (B, Li, As, Mn, Cu, Ba, Mo, Se, V y Fe). La Tabla 3.7 detalla el coeficiente de correlación para cada par de elementos, destacándose en rojo los que tienen una muy alta correlación, en amarillo los de alta correlación y en verde los de media correlación.

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.

| | Cl^- | SO_4^{-2} | Na^+ | K^+ | Ca^{+2} | Mg^{+2} | B | Li | Mo | V | Fe | NO_3^- | HCO_3^- | As | SiO_2 | Mn | Cu | Ba | Br | Se | |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|-------|----------------|-------|------|-------|------|------|--|
| Cl^- | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SO_4^{-2} | 0,89 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na^+ | 1,00 | 0,89 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K^+ | 0,99 | 0,88 | 0,99 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca^{+2} | 0,71 | 0,48 | 0,75 | 0,74 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg^{+2} | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,95 | 0,62 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | 0,77 | 0,50 | 0,79 | 0,78 | 0,94 | 0,64 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | 0,99 | 0,85 | 0,99 | 0,99 | 0,74 | 0,93 | 0,78 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Mo | 0,97 | 0,87 | 0,97 | 0,96 | 0,63 | 0,90 | 0,69 | 0,97 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| V | 0,93 | 0,89 | 0,93 | 0,90 | 0,56 | 0,86 | 0,61 | 0,90 | 0,96 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0,66 | 0,49 | 0,65 | 0,63 | 0,42 | 0,53 | 0,66 | 0,61 | 0,65 | 0,64 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| NO_3^- | 0,61 | 0,75 | 0,63 | 0,58 | 0,38 | 0,61 | 0,32 | 0,58 | 0,56 | 0,69 | 0,19 | 1,00 | | | | | | | | | |
| HCO_3^- | 0,65 | 0,58 | 0,63 | 0,61 | 0,25 | 0,58 | 0,41 | 0,60 | 0,75 | 0,74 | 0,67 | 0,11 | 1,00 | | | | | | | | |
| As | 0,69 | 0,62 | 0,68 | 0,65 | 0,30 | 0,59 | 0,43 | 0,65 | 0,80 | 0,82 | 0,68 | 0,25 | 0,97 | 1,00 | | | | | | | |
| SiO_2 | 0,44 | 0,14 | 0,48 | 0,47 | 0,92 | 0,30 | 0,83 | 0,49 | 0,35 | 0,26 | 0,28 | 0,16 | 0,03 | 0,08 | 1,00 | | | | | | |
| Mn | 0,15 | -0,08 | 0,18 | 0,21 | 0,59 | 0,12 | 0,53 | 0,22 | 0,11 | -0,07 | -0,01 | -0,26 | -0,08 | -0,16 | 0,61 | 1,00 | | | | | |
| Cu | 0,22 | 0,35 | 0,19 | 0,22 | -0,06 | 0,32 | 0,06 | 0,19 | 0,17 | 0,10 | 0,19 | 0,06 | 0,09 | 0,00 | -0,20 | 0,10 | 1,00 | | | | |
| Ba | 0,60 | 0,38 | 0,64 | 0,64 | 0,90 | 0,53 | 0,79 | 0,66 | 0,51 | 0,42 | 0,18 | 0,38 | 0,00 | 0,05 | 0,81 | 0,73 | 0,00 | 1,00 | | | |
| Br | -0,55 | -0,14 | -0,56 | -0,56 | -0,76 | -0,29 | -0,80 | -0,61 | -0,54 | -0,43 | -0,52 | -0,09 | -0,29 | -0,36 | -0,80 | -0,50 | 0,17 | -0,68 | 1,00 | | |
| Se | -0,48 | -0,14 | -0,50 | -0,48 | -0,70 | -0,21 | -0,70 | -0,53 | -0,47 | -0,41 | -0,42 | -0,26 | -0,14 | -0,26 | -0,73 | -0,42 | 0,09 | -0,67 | 0,92 | 1,00 | |

El análisis que entrega la correlación entre los elementos muestra que existe un grupo que presenta la mayor correlación, que incluye principalmente áreas rojas, con algunas amarillas y verdes. Este grupo (MA1) está compuesto por Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , B, Li, Mo y V, y a todos aquellos se les asocia el salar de Pedernales como fuente principal.

Los elementos Fe, As, y HCO_3^- presentan una alta correlación entre sí y con la mayoría de los componentes del grupo MA1, excepto el Ca^{+2} y B por lo que sus concentraciones se pueden asociar al mismo origen natural del salar, además de otro factor que haga que su valor de correlación sea menor. Se cree que esta situación se debe al aporte de metales producto de actividades mineras. El NO_3^- también tiene una alta correlación con el grupo MA1, con las mismas excepciones, pero la correlación con Fe, As y HCO_3^- es baja. Por lo tanto, el NO_3^- debería provenir del salar, así como también de otra fuente que se atribuye a los desechos orgánicos humanos (estiércol).

El SiO_2 tiene una muy alta correlación con los elementos Ca^{+2} , Ba y B, y solo una media correlación con Na^+ , K^+ y Li. La mayoría de esos elementos pertenece al grupo MA1, por lo que se deduce que parte de la concentración de SiO_2 provendría en cierta medida del salar, además de fuentes naturales como la meteorización de rocas silíceas.

Los elementos Se y Br- presentaron una muy alta correlación, pero ambos tienen una baja correlación con todos los otros. Por esto, es poco factible determinar un origen en común.

3.1.6.2 Movilidad iónica

A modo de discusión se procedió a comparar los resultados obtenidos con el diagrama binario que muestra la solubilidad de los elementos mediante el potencial iónico (IP). El gráfico de la Figura 3.36 relaciona la carga iónica (Z) con el radio iónico (r), donde el cociente de ambos valores entrega el potencial iónico (Z/r). La razón Z/r permite diferenciar el gráfico en tres zonas principales: potencial iónico bajo ($\text{IP} < 3$), intermedio ($\text{IP} = 3-12$) y alto ($\text{IP} > 12$). En el primer caso (Grupo 1) se encuentran los cationes solubles, dentro de los que se destacan el Na, K, Ca, Li, Ba, Sr, Fe, Mn y Mg. En el segundo caso (Grupo 2), están los cationes hidrolizados insolubles como el Si, Al, Fe, Mn, Mg y tierras raras. Finalmente, en el tercer caso (Grupo 3) están los aniones complejos solubles como el B, P y S.

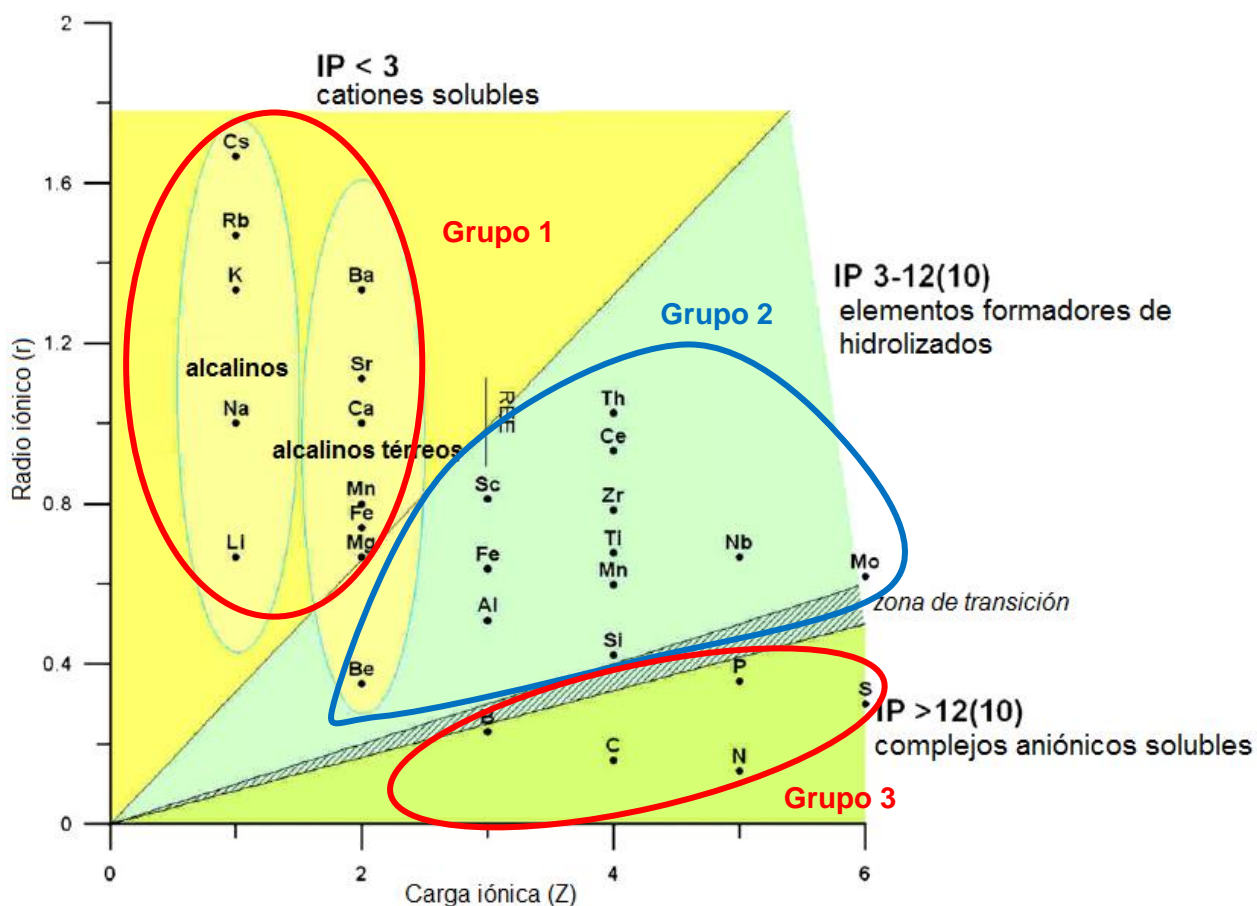


Figura 3.36 Clasificación de elementos de acuerdo a su potencial iónico (IP). Extraído de Bugge *et al.* (2011).

Es de esperar que los elementos que componen el primer y tercer grupo, es decir, los cationes solubles y los aniones complejos solubles, se encuentren en mayor concentración en las muestras de agua. En efecto, de forma general, se cumple lo anterior. Por el contrario, algunos de los elementos del segundo grupo, es decir, cationes hidrolizados insolubles como el Mn, Mg y V, se encontraron en altas concentraciones en la mayor parte de las muestras de agua, lo que no se ve reflejado en el gráfico de la Figura 3.36. El Al y Fe, que se encuentran en el mismo grupo, efectivamente se hallaron en pocas muestras de agua dado su carácter insoluble.

3.1.7 Normativa chilena

3.1.7.1 Introducción

El Instituto Nacional de Normalización (INN) es el organismo que tiene a su cargo el estudio y preparación de las normas técnicas de agua a nivel nacional. La Norma Chilena corresponde a la norma nacional que ha sido estudiada de acuerdo al procedimiento descrito en NCh1 y aprobada por el Consejo del INN (NCh1, 2010).

El estudio de la calidad de las muestras de agua, en base a la concentración de los elementos en ellas encontrados, fue basado en las normas chilenas oficiales NCh1333 y NCh409/1 las que se describen, brevemente, a continuación.

La Norma Chilena Oficial NCh1333 (1978, modificada en 1987) se titula 'Requisitos de calidad del agua para diferentes usos' y fija un criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado. Estos criterios tienen por objeto proteger y preservar la calidad de las aguas de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen. En este caso, se utilizaron los requisitos del agua para riego, y se considera que las muestras recogidas pudieron ser contaminadas con residuos mineros.

La Norma Chilena Oficial NCh409/1 (2005) se titula 'Agua potable - Parte 1 - Requisitos' y establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional y proveniente de cualquier servicio de abastecimiento. Además, como se declara en la norma NCh1333, el agua para la bebida de animales debe cumplir con la norma NCh409. Es por esto que, se utiliza esta norma a modo de comparación en caso de que las aguas estudiadas sean consumidas por seres humanos y/o animales.

3.1.7.2 Valores límite para parámetros fisicoquímicos

De todos los parámetros fisicoquímicos, solo el pH presenta valores límite en las normas. Todas las muestras de aguas superficiales tienen un pH dentro del rango indicado en ellas. Por el contrario, la única muestra de agua subterránea presenta un pH mayor al límite superior dado por la norma NCh409 de agua potable siendo levemente más básica que lo deseable; sin embargo, la norma NCh1333 del agua de riego es menos estricta con respecto al pH por lo que esta muestra cae dentro del rango permitido (Figura 3.37).

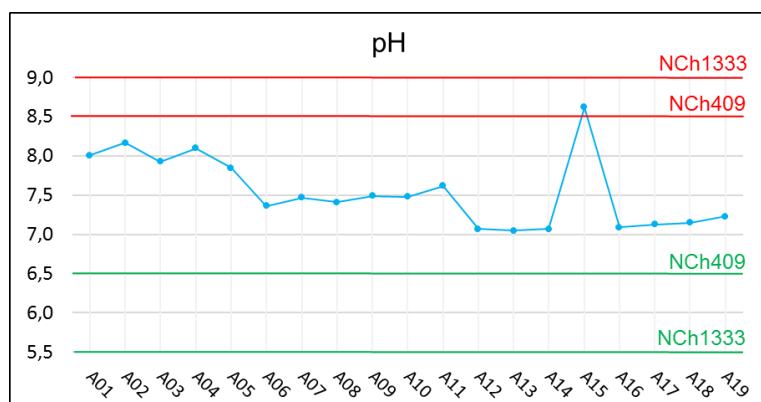


Figura 3.37 Valores de pH de las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales.

La temperatura, la conductividad eléctrica y el Eh no son considerados en las normas chilenas. Existe un límite máximo para los sólidos disueltos totales (TDS, *total dissolved solids*) en la NCh409 de agua potable; por esto, se calculó el TDS de las aguas.

Los sólidos disueltos totales miden la masa de todas las sustancias disueltas en un litro de agua, y se relaciona directamente a la CE en mS/cm mediante la expresión:

$$\text{TDS} = K * \text{CE}$$

donde *K* corresponde a un factor lineal, el que Walton (1989) detalla para cada tipo de agua (Tabla 3.9). Es así como cada muestra de agua tiene un valor de TDS asociado, de acuerdo al factor *K* que le corresponde (Tabla 3.8).

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.

| Muestra | CE (mS/cm) | TDS (mg/l) |
|---------|------------|------------|
| A01 | 58,6 | 41.020 |
| A02 | 58,9 | 41.230 |
| A03 | 57,9 | 40.530 |
| A04 | 60,9 | 45.675 |
| A05 | 75,5 | 55.875 |
| A06 | 215,6 | 161.700 |
| A07 | 195,6 | 146.700 |
| A08 | 195,1 | 146.325 |
| A09 | 180,1 | 135.075 |
| A10 | 197,8 | 140.850 |
| A11 | 137,5 | 103.125 |
| A15 | 2,003 | 1.101,65 |

Tabla 3.9 Valores típicos de conductividad eléctrica (CE) en aguas naturales y factor K de conversión a TDS. Modificado de Walton (1989).

| Tipo de agua | CE aproximada (mS/cm) a 25°C | Factor K |
|-----------------|------------------------------|----------|
| Agua ultra pura | 0,00005-0,0005 | 0,50 |
| Agua destilada | 0,001-0,01 | 0,50 |
| Agua de lluvia | 0,005-0,05 | - |
| Agua potable | 0,05-1 | 0,55 |
| Agua salobre | 2-20 | - |
| Agua salina | 20-40 | - |
| Agua de mar | 40-60 | 0,70 |
| Salmuera | 60+ | 0,75 |

De esta forma se puede hacer una comparación con el límite máximo definido por la norma de agua potable, que es de 1.500 mg/l. Como es de esperar, todas las muestras, excepto la de agua subterránea, presentan un TDS mayor al definido en la norma, superándolo en uno a dos órdenes de magnitud, y probablemente mucho más en aquellas muestras con una CE que supera lo medible por el instrumento. La muestra subterránea, por otro lado, tiene un TDS de 1.101,65 (factor $K=0,55$), por lo que aprobaría la norma en esta condición.

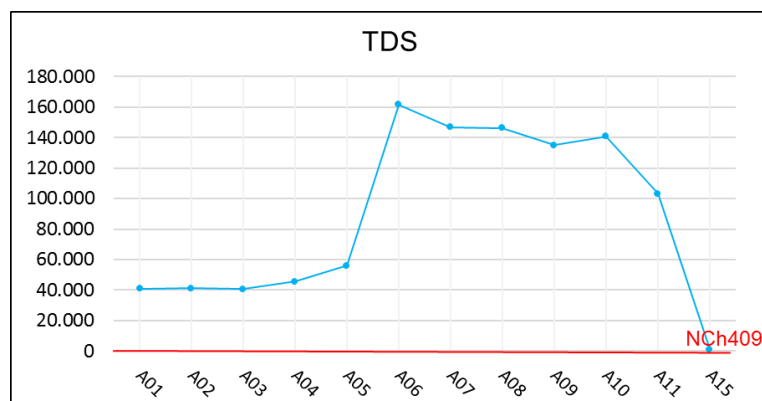


Figura 3.38 Valores de TDS en las muestras de agua con los valores de referencia de la norma nacional para agua potable.

3.1.7.3 Valores límite para en elementos mayores

En cuanto a los elementos mayores, las especificaciones son más variadas en las normas chilenas (Figura 3.39). No existen límites máximos en las normas chilenas con respecto al Br^- y al HCO_3^- .

Tanto el Cl^- como el SO_4^{2-} se encuentran en concentraciones mayores a las estipuladas como máximas en las normas chilenas que se consideran en este estudio, en todas las muestras superficiales, de mar, costeras y de salar (Figura 3.39). Para aguas de riego, el límite es 200 mg/l de Cl^- y 250 mg/l de SO_4^{2-} , y para agua potable, 400 mg/l de Cl^- y 500 mg/l de SO_4^{2-} . Estos valores se superan por hasta tres órdenes de magnitud en las muestras más orientales y cercanas al salar de Pedernales. La muestra de agua subterránea, por otro lado, presenta una concentración de Cl^- menor a las normas (174 mg/l de Cl^-), pero la del SO_4^{2-} mayor a ellas (793 mg/l de SO_4^{2-}).

Las normas para agua potable indica que la concentración máxima de NO_3^- es de 50 mg/l, valor que supera en cerca del doble a la mayor concentración encontrada. Por lo tanto, todas las muestras contienen NO_3^- en valores que se encuentran bajo el límite para agua potable (Figura 3.39).

La norma NCh409, con respecto al agua potable, indica un límite máximo de Mg^{+2} de 125 mg/l, por lo cual todas las muestras de agua superficial se encuentran sobrepasando ese valor. Solo la muestra de agua subterránea (A15) tiene una concentración de Mg^{+2} menor a la norma (Figura 3.39).

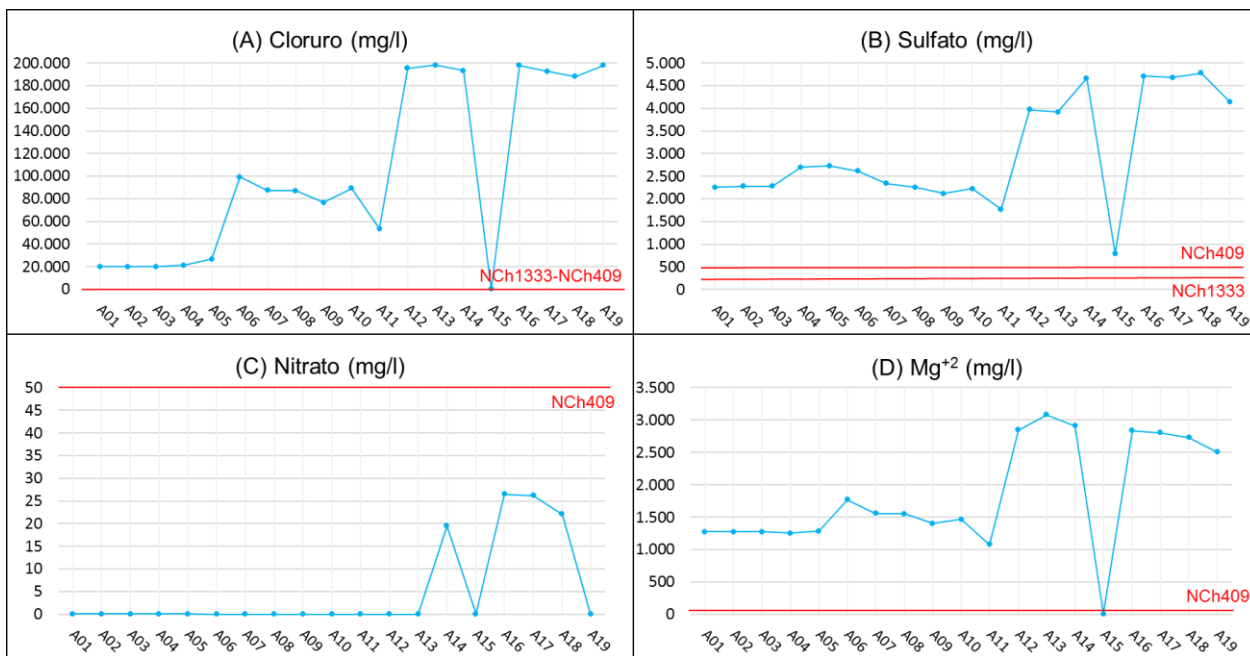


Figura 3.39 Concentración en mg/l de (A) Cl⁻, (B) SO₄²⁻, (C) NO₃⁻ y (D) Mg²⁺ en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales.

Los cationes Na⁺, K⁺ y Ca²⁺, no han sido especificados en las normas chilenas en cuanto al máximo permitido. No obstante, existe una relación entre ellos, incluyendo el Mg²⁺, mediante el denominado sodio porcentual (Na%). Se define en la NCh1333 como la relación entre la concentración del ion sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio, expresadas en miliequivalentes por litro, de acuerdo a la expresión siguiente:

$$Na\% = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} * 100$$

Las concentraciones de dichos iones en miliequivalentes de cada muestra se detallan en la Tabla 3.10, junto con el Na% correspondiente.

Tabla 3.10 Concentración de sodio, potasio, calcio y magnesio en meq/l y sodio porcentual.

| Muestra | Na ⁺ (meq/l) | K ⁺ (meq/l) | Ca ⁺² (meq/l) | Mg ⁺² (meq/l) | Na% |
|---------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| A01 | 465,42 | 13,81 | 19,96 | 105,16 | 77,01 |
| A02 | 539,37 | 15,60 | 20,16 | 104,75 | 79,33 |
| A03 | 469,77 | 14,07 | 20,26 | 104,75 | 77,16 |
| A04 | 504,57 | 12,79 | 22,66 | 103,35 | 78,43 |
| A05 | 652,46 | 16,88 | 27,50 | 105,90 | 81,28 |
| A06 | 2.662,05 | 63,94 | 82,44 | 145,65 | 90,11 |
| A07 | 2.287,97 | 53,46 | 80,14 | 128,37 | 89,73 |
| A08 | 2.331,47 | 55,76 | 76,35 | 127,87 | 89,97 |
| A09 | 1.992,19 | 49,11 | 73,31 | 115,53 | 89,33 |
| A10 | 2.383,67 | 53,46 | 75,90 | 120,63 | 90,51 |
| A11 | 1.261,43 | 31,97 | 68,97 | 88,71 | 86,93 |
| A12 | 4.488,95 | 111,77 | 69,96 | 234,36 | 91,52 |
| A13 | 4.593,35 | 126,86 | 68,12 | 253,61 | 91,10 |
| A14 | 4.836,93 | 112,79 | 73,46 | 239,46 | 91,91 |
| A15 | 9,61 | 0,22 | 10,53 | 0,54 | 45,98 |
| A16 | 4.628,15 | 110,49 | 75,50 | 233,53 | 91,69 |
| A17 | 4.906,53 | 108,19 | 75,95 | 230,90 | 92,20 |
| A18 | 4.767,34 | 106,40 | 77,95 | 224,48 | 92,10 |
| A19 | 4.645,54 | 104,61 | 56,24 | 206,05 | 92,68 |

De acuerdo al límite definido por la norma de agua de riego (35%), todas las muestras analizadas se encuentran por sobre la relación del contenido de Na% permitido, como se observa en la Figura 3.40.

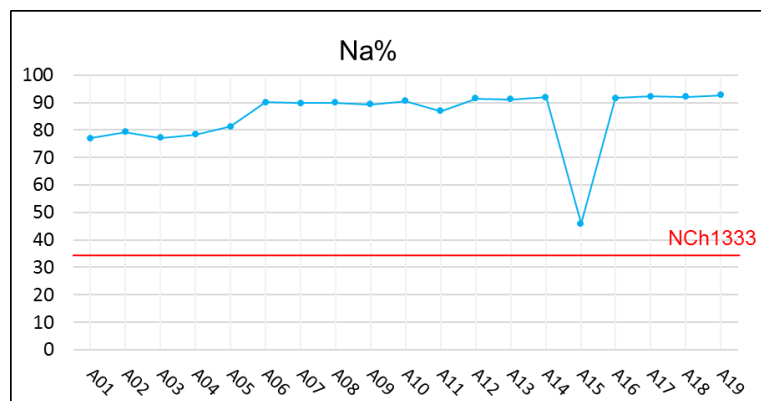


Figura 3.40 Valor de Na% en las muestras de agua con el valor de referencia de la norma nacional para agua de riego (NCh1333).

3.1.7.4 Valores límite para elementos traza

Un elemento nocivo para la salud humana es el As, lo cual se refleja en las normas chilenas pues ambas presentan un valor límite para su concentración. La que se refiere al agua de riego (NCh1333) la define en 0,1 mg/l. Un poco más exigente es la norma para el agua potable (NCh409) con un límite de 0,01 mg/l de As. Considerando esto, las muestras que superan las normas chilenas son la del salar de Pedernales y las de agua de río, desde A06 a A18, a excepción de A11, que se observan por sobre las líneas rojas horizontales en la Figura 3.41 La concentración de As en la muestra de salar se escapa de la escala vertical debido a su alta concentración. Son tres muestras las que solo superan la norma NCh409, una del río Salado (A11) y las costeras (A04 y A05). Así, la muestra de agua subterránea y las de agua de mar tienen concentraciones de As menores a los límites máximos de las normas chilenas.

Existe una limitante con respecto al B solo en la norma para el agua de riego, NCh1333 (Figura 3.41), indicando que el máximo permitido es de 0,75 mg/l. De acuerdo a eso, todas las muestras superficiales, de agua de mar, de costa, de río y del salar de Pedernales, estarían superando la norma, por uno y dos órdenes de magnitud en las muestras de mar y costeras, y por tres órdenes en las de río y de salar. Solo la muestra de agua subterránea alcanza a mantenerse en la norma permitida por una leve diferencia de 0,15 mg/l.

La norma NCh1333 determina el límite de Cu para agua de riego en 0,2 mg/l, y la NCh409 en 2 mg/l. Teniendo en consideración lo anterior, ninguna muestra sobrepasa la norma de agua potable, y solo una supera la de agua de riego: la muestra A04 de agua costera extraída en un socavón directamente adyacente a la costa de Chañaral (Figura 3.41).

Solo la norma de agua de riego define un límite máximo permitido de concentración de Li, fijado en 2,5 mg/l. Por lo tanto, todas las muestras de agua en las que se detectó Li, exceptuando la de agua subterránea, tienen una concentración por sobre la permitida y en valores de hasta dos órdenes de magnitud mayor (Figura 3.41).

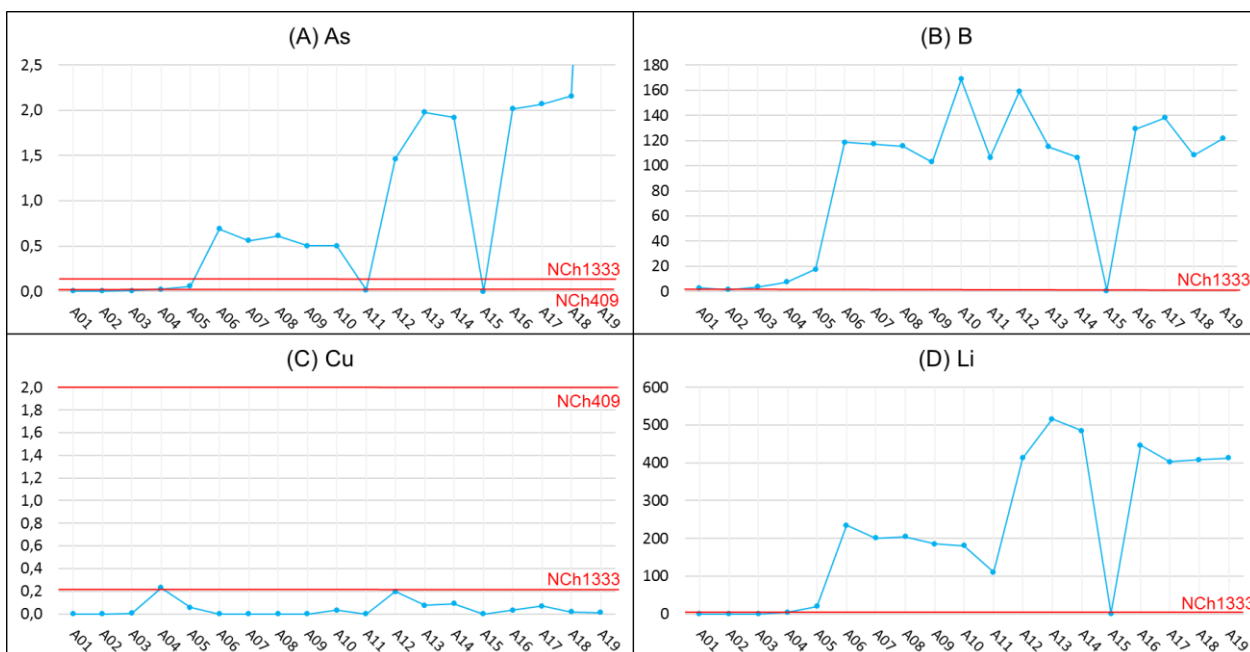


Figura 3.41 Concentración en mg/l de (A) As, (B) B, (C) Cu y (D) Li en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales.

De acuerdo a las normas chilenas, el Mn en el agua de riego no debe superar los 0,2 mg/l, y en el agua potable, los 0,1 mg/l. En la Figura 3.42, las muestras bordean los valores antes mencionados. Las dos muestras de agua costera, junto con nueve muestras de río, de A06 a A16 excepto A11, sobrepasan las normas NCh1333 y NCh409. La muestra de río A17 solo sobrepasa el límite de la norma de agua potable. En consecuencia, las muestras de río sin Mn detectable, las de río A11 y A18, la de agua subterránea y la del salar, están por debajo del límite máximo de todas las normas en consideración.

Solo la norma de agua de riego (NCh1333) se refiere a las concentraciones de Mo con 0,01 mg/l como límite máximo. En la Figura 3.42, se destacan las muestras que sobrepasan dicho valor, que son todas aquellas en las que se detectó el elemento.

A excepción de la de agua subterránea y A09 de agua de río, todas las muestras analizadas contienen Se de forma que sobrepasan las dos normas consideradas. La norma de agua de riego define el límite máximo en 0,02 mg/l, mientras que la norma de agua potable indica un máximo de 0,01 mg/l de Se. No obstante, la muestra A09 sobrepasa los 0,01 mg/l, por lo cual no estaría cumpliendo la norma NCh409, como se observa en la Figura 3.42.

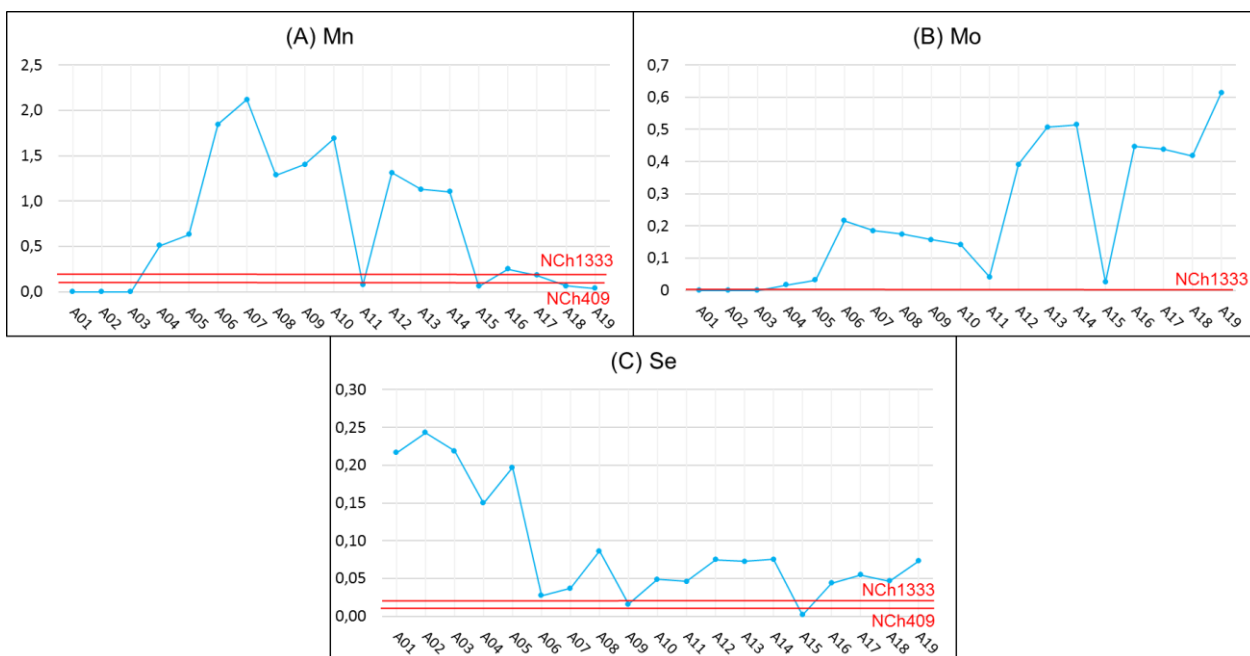


Figura 3.42 Concentración en mg/l de (A) Mn, (B) Mo y (C) Se en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales.

Los otros elementos que fueron detectados en las muestras de agua y que presentan valores de referencia en la normativa chilena, no presentan concentraciones que superen las normas. Estos elementos son el Al, Ba, Co, Fe, Ni, Pb, V y Zn. Los límites para agua de riego (según NCh1333) y de agua potable (según NCh409) se detallan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Valores de referencia para elementos que no superan las normas chilenas.

| Elemento | NCh1333 (mg/l) | NCh409 (mg/l) |
|----------|----------------|---------------|
| Al | 5 | - |
| Ba | 4 | - |
| Co | 0,05 | - |
| Fe | 5 | 0,3 |
| Ni | 0,2 | 0,5 |
| Pb | 5 | 0,05 |
| V | 0,1 | - |
| Zn | 2 | 3 |

3.1.8 Trabajo previo

Tapia y Verdejo (2015) realizaron un estudio de la concentración de ocho elementos (As, Cd, Cu, Li, Pb, Sb, U y Zn) en las aguas del río Salado, y la compararon con valores y regulaciones de recomendación de agua internacional. Se tomaron 25 muestras de agua, cuya localización es la de la Figura 3.43, además de algunas de sedimentos para análisis mediante imágenes SEM.

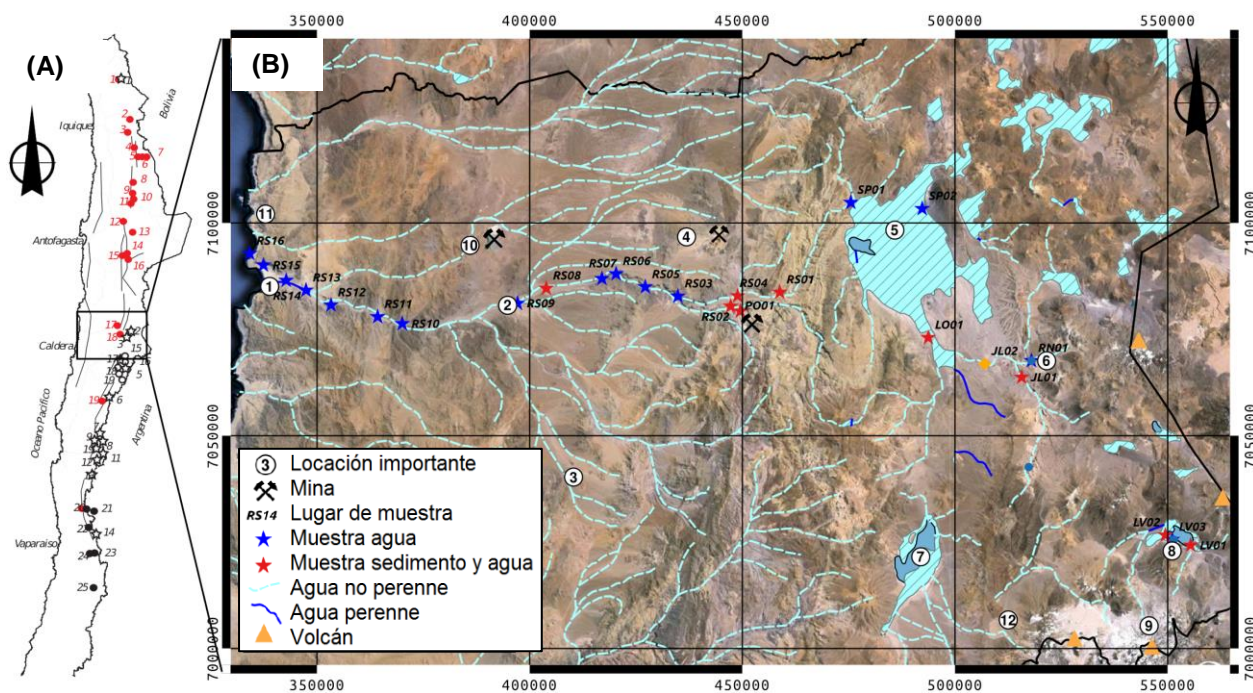


Figura 3.43 (A) Fajas metalogénicas y ubicación de zona de estudio. (B) Lugares de muestras y locaciones importante: 1 Bahía de Chañaral; 2 Diego de Almagro; 3 Inca de Oro; 4 El Salvador; 5 Salar de Pedernales; 6 Aguas termales Río Negro; 7 Salar de Maricunga; 8 Salar y aguas termales Laguna Verde; 10 Pampa Austral; 11 Parque Nacional Pan de Azúcar; 12 Parque Nacional Nevado Tres Cruces. Tomado de Tapia y Verdejo (2015).

Los elementos visualmente comparables entre el trabajo de Tapia y Verdejo (2015) y el presente estudio son el As, Cu, Li y Pb, lo que deja fuera al Cd, Sb, U y Zn ya que, en las muestras obtenidas después del aluvión, a diferencia de las previas al evento, la concentración de dichos elementos está bajo el límite de detección. Esto implica que existió una dilución de Cd, Sb, U y Zn en el caudal del río posteriormente al aluvión, y que el aporte de concentración de esos elementos, producto del material arrastrado durante la catástrofe no es relevante.

En la Figura 3.44 se observan gráficos de dispersión para los elementos traza que son posibles de comparar, As, Cu, Li y Pb con una serie de datos perteneciente al estudio de Tapia y Verdejo (2015), en amarillo, y otra serie de datos del trabajo actual, en celeste. A modo de comparación, se generaron los gráficos correspondientes a los otros elementos del trabajo de Tapia y Verdejo (2015), y se muestran en la Figura 3.45. El muestreo previo al aluvión se acotó a la zona de estudio, y se consideraron solo las muestras continentales superficiales extraídas después del aluvión.

El As (Figura 3.44) presente en las muestras de agua posteriores al aluvión, está en concentraciones mayores a las muestras previas al mismo, a lo largo de todo el caudal del río Salado. Lo mismo ocurre con las concentraciones de Li (Figura 3.44), donde la diferencia de valores es mayor a la del As, superando los 400 mg/l cerca de los 400000E. En ambos casos, la tendencia de concentraciones se mantiene similar antes y después del aluvión. La relación pre y post aluvión se puede asociar a un flujo más concentrado debido al aporte de material rico en As y Li, probablemente de los sedimentos químicos naturales propios del salar de Pedernales que se encuentran cercanos al río Salado.

El Cu, por otro lado, tiene un comportamiento más errático en las dos series de datos de la Figura 3.44. Sin embargo, se logra observar que después del aluvión se presentó un aumento general de la concentración de Cu a partir de los 360000E, momento antes del cual la concentración se mantiene menor al momento previo al aluvión. Esta situación se puede relacionar a los trabajos de minería de extracción de Cu que se desarrollan en la hoya hidrográfica del río Salado, principalmente a los depósitos de relave localizados en los sitios por donde fluyó el aluvión, arrastrando material de desperdicios. La baja en concentración de cobre en las cercanías a la costa, puede implicar dos casos: que el Cu transportado por el flujo fue depositado, o que los afluentes que llegan al caudal principal del río Salado son mayores en esa zona, haciendo del flujo uno más diluido, disminuyendo la concentración de Cu.

Por el contrario, el Pb (Figura 3.44) se encontró menos concentrado en las muestras de río posteriores al aluvión, prácticamente ausente, a excepción de una sola muestra que supera la concentración de cualquier otra previa al evento.

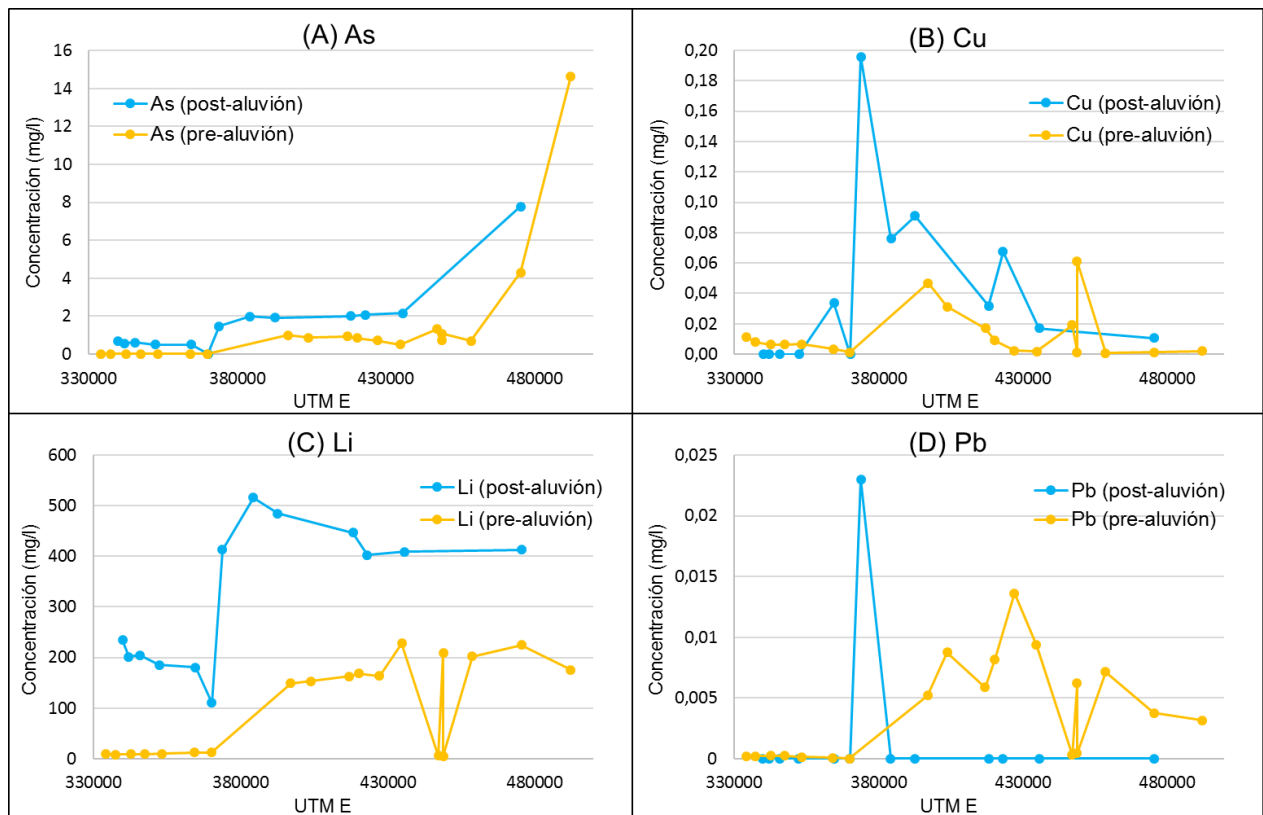


Figura 3.44 Gráficos comparativos de concentración de (A) As, (B) Cu, (C) Li y (D) Pb en relación a su ubicación espacial este-oeste. En celeste, datos de muestras de agua después del aluvión, y en amarillo, datos previos al evento, extraídos de Tapia y Verdejo (2015).

Otros elementos como el U, Zn, Cd y Sb (Figura 3.45), presentan una disminución drástica de su concentración después del aluvión, llegando a no ser detectados en ninguna muestra mientras que, antes del acontecimiento, todos esos elementos se encontraron concentrados en todas las muestras analizadas. Contrariamente al primer grupo de elementos, la dilución del flujo fue tal que disminuyó la concentración del U, Zn,

Cd y Sb, y el aporte de ellos fue bajo en relación al total de material lo que permitió la no detección de su concentración en ninguna muestra.

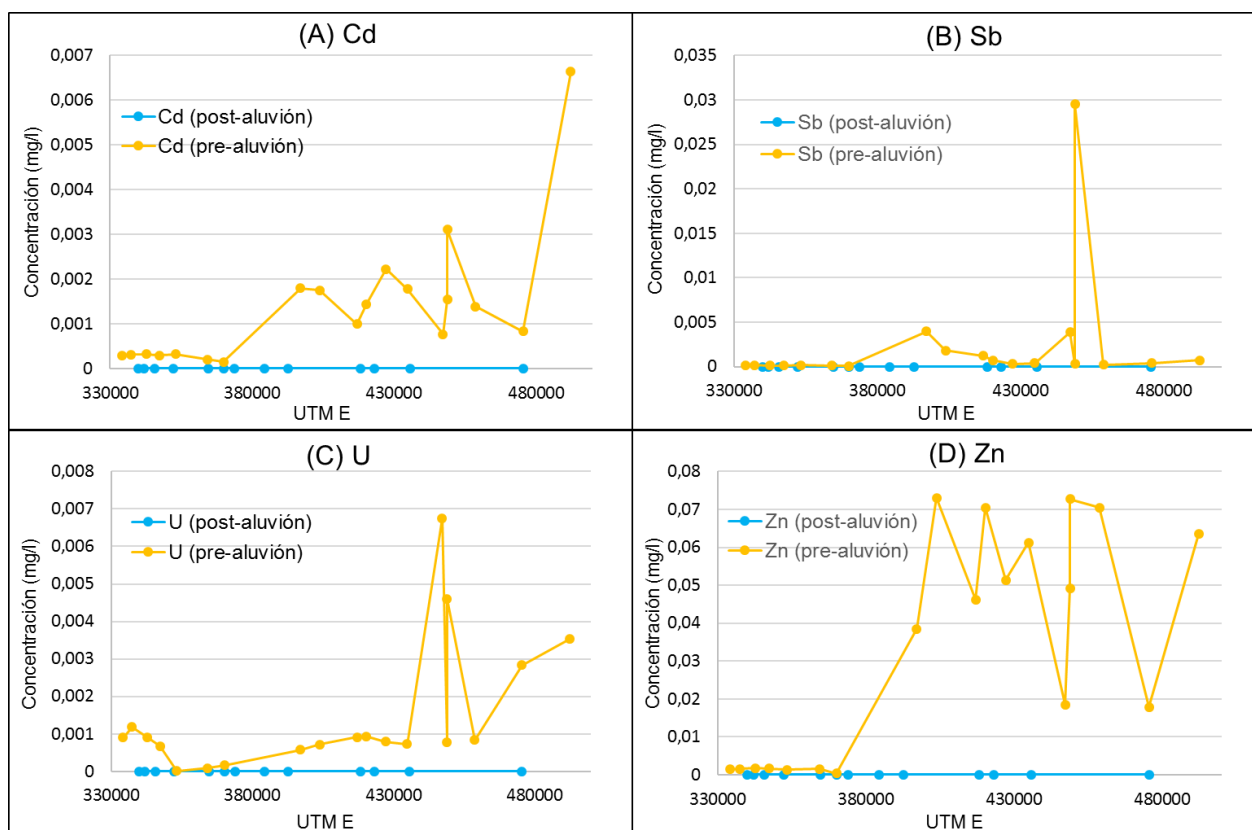


Figura 3.45 Gráficos comparativos de concentración de (A) Cd, (B) Sb, (C) U y (D) Zn en relación a su ubicación espacial este-oeste. En celeste, datos de muestras de agua después del aluvión, y, en amarillo, datos previos al evento, extraídos de Tapia y Verdejo (2015).

3.2 Geoquímica de sedimentos

Los sedimentos analizados en este trabajo fueron tomados de lugares estratégicos que permitan un estudio comparativo representativo. Comprenden muestras de la cuenca del río Salado, desde su cabecera en el salar de Pedernales, hasta su desembocadura en la playa de Chañaral, e incluye, principalmente, sedimento activo del río.

El presente subcapítulo en primer lugar, el análisis de sedimentos relacionados al aluvión de marzo de 2015, de la cuenca del río Salado además de sedimento del salar, arena de playa y restos de un relave minero; y, en segundo lugar, sedimentos de una columna estratigráfica representativa de la bahía de Chañaral.

3.2.1 Sedimentos del aluvión

Los sedimentos analizados en este apartado corresponden a 11 muestras de sedimento activo del río Salado a lo largo de su cuenca, siete de sedimento depositado por el aluvión de marzo de 2015, dos muestras tomadas en el salar de Pedernales, en la cabecera del río Salado, una muestra de arena de playa sobre la cual sobreyacen

sedimentos del aluvión, en la costa de Chañaral, y una muestra de relave minero (Tabla 3.12). Las dos últimas muestras mencionadas, fueron extraídas y analizadas con el fin de realizar una comparación entre su geoquímica, que no tiene influencia del aluvión, y el resto de las muestras afectadas directamente por dicha catástrofe. Por otro lado, de las siete muestras del aluvión, tres de ellas fueron tomadas en una quebrada ubicada al sur de la quebrada del río Salado, denominada quebrada de la Angostura (Godoy y Lara, 2005) la que converge en dirección noroeste en las cercanías de Diego de Almagro, directamente a su oeste, mientras que el resto de las muestras fueron tomadas en la costa de Chañaral (Figura 3.46).

Tabla 3.12 Simbología, tipo de sedimento y color asociado a cada muestra.

| Muestra | Tipo de sedimento | Color |
|----------------|--------------------------|--------------|
| S01 | Aluvión | Red |
| S02 | Arena | Yellow |
| S03 | Aluvión | Red |
| S04 | Aluvión | Red |
| S05 | Aluvión | Red |
| S06 | Activo de río | Blue |
| S07 | Activo de río | Blue |
| S08 | Activo de río | Blue |
| S09 | Activo de río | Blue |
| S10 | Activo de río | Blue |
| S11 | Activo de río | Blue |
| S12 | Activo de río | Blue |
| S13 | Activo de río | Blue |
| S14 | Activo de río | Blue |
| S15 | Relave | Green |
| S16 | Aluvión | Red |
| S17 | Aluvión | Red |
| S18 | Aluvión | Red |
| S19 | Activo de río | Blue |
| S20 | Activo de río | Blue |
| S21 | Salar | Magenta |
| S22 | Salar | Magenta |

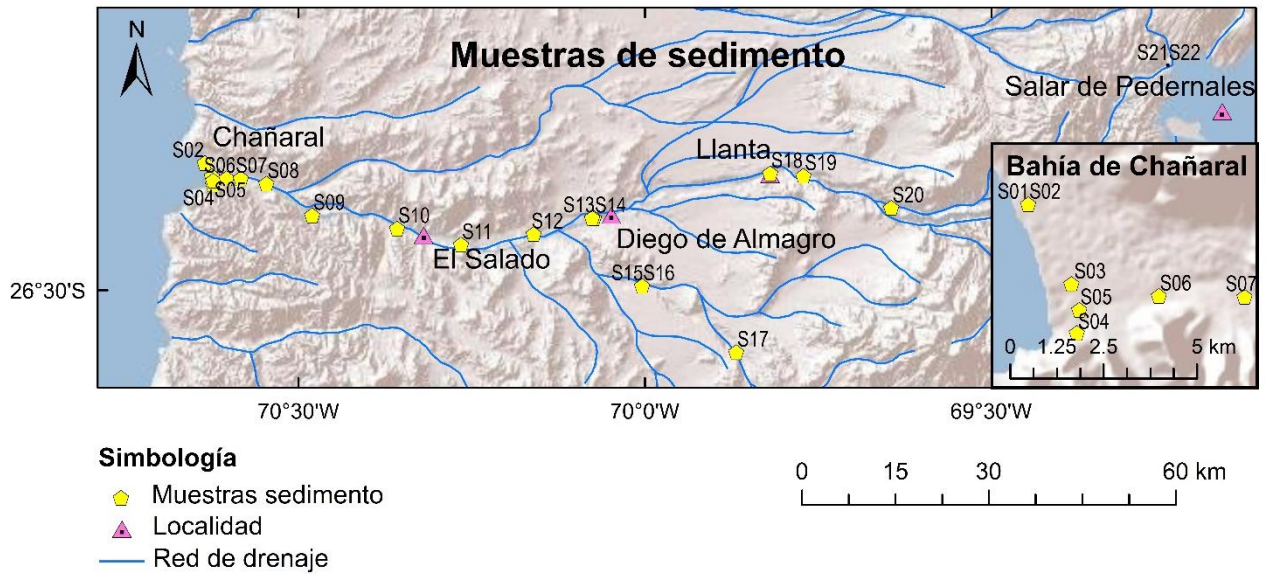


Figura 3.46 Ubicación de los puntos de toma de muestras de sedimento.

3.2.1.1 Elementos mayores

Los elementos mayores son aquellos cuya concentración en roca o sedimento es mayor a 1% en peso. Considerando lo anterior, los elementos de este grupo son Si, Al, Fe, Ca, Mg, K y Cl, cuyas concentraciones se detallan en la Tabla 3.13. Para cada uno de ellos, se confeccionó un mapa con la distribución de muestras y su respectiva concentración en porcentaje en peso (desde la Figura 3.47 a la Figura 3.53).

Tabla 3.13 Concentración de elementos mayores en muestras de sedimento, en % en peso.

| Muestra | Si | Al | Fe | Ca | Mg | K | Cl |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| S01 | 50,205 | 22,208 | 6,307 | 7,606 | 5,262 | 3,873 | 2,375 |
| S02 | 64,259 | 20,454 | 3,255 | 1,170 | - | 6,566 | - |
| S03 | 46,670 | 19,546 | 6,955 | 5,181 | 6,417 | 3,757 | 8,988 |
| S04 | 51,878 | 21,802 | 5,166 | 9,604 | 4,377 | 2,921 | 2,631 |
| S05 | 49,730 | 20,784 | 11,719 | 8,495 | - | 3,529 | 3,152 |
| S06 | 44,215 | 19,463 | 6,640 | 10,110 | 6,048 | 3,698 | 8,369 |
| S07 | 43,020 | 17,591 | 5,921 | 18,719 | 5,252 | 3,600 | 3,867 |
| S08 | 43,598 | 17,034 | 7,606 | 19,161 | - | 3,920 | 6,798 |
| S09 | 45,539 | 16,871 | 7,066 | 22,099 | - | 3,473 | 3,570 |
| S10 | 46,948 | 18,662 | 5,816 | 15,096 | 5,245 | 3,365 | 2,790 |
| S11 | 43,361 | 16,669 | 6,613 | 19,267 | - | 3,879 | 8,097 |
| S12 | 38,321 | 13,931 | 5,427 | 19,272 | - | 4,252 | 15,463 |
| S13 | 48,942 | 16,983 | 8,011 | 15,202 | - | 3,844 | 3,697 |
| S14 | 46,247 | 21,874 | 15,359 | 0,252 | - | 3,864 | - |
| S15 | 51,198 | 20,244 | 7,318 | 4,628 | 6,690 | 4,004 | 3,685 |
| S16 | 53,527 | 23,092 | 6,676 | 4,964 | 6,482 | 3,771 | - |
| S17 | 52,489 | 20,701 | 11,556 | 4,376 | 4,819 | 3,662 | - |
| S18 | 45,820 | 15,327 | 6,997 | 25,065 | - | 3,466 | - |
| S19 | 39,101 | 14,330 | 10,019 | 19,918 | - | 3,164 | 9,589 |
| S20 | 41,713 | 13,129 | 5,612 | 24,795 | - | 2,527 | 9,773 |
| S21 | 39,063 | 17,168 | 5,566 | 10,994 | 6,183 | 4,510 | 15,037 |
| S22 | 40,758 | 17,095 | 6,097 | 16,695 | 5,753 | 4,567 | 6,452 |

3.2.1.1.1 Si

Como es de esperar, el elemento con mayor concentración en todas las muestras es el Si, pues varía desde 38,3% en S12, sedimento de río activo hasta 64,3% en S02, de arena de playa, mientras que la media es de 46,7% (Figura 3.47). En promedio, las muestras de sedimento activo, presentan un 43,7% de Si, y la máxima concentración en este grupo se encuentra en S13 con 48,9%, al oeste de Diego de Almagro. Inmediatamente al poniente de esa muestra, se tomó S12 con la menor concentración de Si. La variación de este elemento en sedimento activo no es muy grande, y no se observa una tendencia clara en las muestras analizadas. Por otra parte, los sedimentos del aluvión presentan concentraciones entre 46,7% en S03, en el centro de la costa de Chañaral, y 53,5% en S16, en la quebrada de la Angostura, que converge en el río Salado cerca de Diego de Almagro. Existe una leve diferencia en las concentraciones de la quebrada con respecto a la costa, pues las primeras coinciden con las tres muestras que tienen valores mayores de Si.

Las dos muestras de sedimento del salar de Pedernales tienen una concentración de Si muy similar: 39,1 y 40,8%, valores relativamente menores en relación a todas las muestras analizadas. La muestra de relave, cercana a Diego de Almagro, tiene 46,2% en peso, cercano al promedio del total de muestras. La muestra de arena, como se

mencionó, tiene la mayor concentración de Si con 64,3%, supera en 14% en peso a la muestra de sedimento del aluvión que la sobreyace (50,2%) de Si (Figura 3.47).

Es el elemento más abundante en el suelo, promediando un 54%, pero en algunos suelos su contenido es mucho más alto, presentándose también como silicatos amorfos (Kabata-Pendias, 2011). Suelos urbanos promedian 0,2% de Si, y su concentración oscila entre 0,12% y 1,10%, pero en una laterita de Australia, se encontró un promedio de 38,3% de Si, en un rango de 7,7% a 44,4%. Datos de sedimento activo de Alemania indican un promedio de 29,8% en un rango de 5,1% y 38,8% de Si, mientras que sedimento de planicies de inundación de Noruega contienen desde 10,8% a 38,5% de Si (Reimann y de Caritat, 1998). Por su parte, McLennan y Murray (1999) indican que la concentración promedio de Si en sedimento es de 30%, en lodo 29,9%, en partículas de río 28,9% y en arcilla pelágica 25%. Así, la gran parte de las muestras en estudio contienen Si dentro de los rangos esperados, y algunas sobrepasan los valores que entrega la bibliografía.

El Si, especialmente en combinación con el oxígeno, es el componente no metálico básico de todas las rocas. Es el segundo más abundante en la litósfera y comprende el 25,7% de la corteza terrestre. Ocurre principalmente con SiO₂, siendo el componente básico de todos los silicatos (Kabata-Pendias, 2011). Generalmente, las fuentes naturales son más importantes que las antropogénicas (Reimann y de Caritat, 1998). Por tanto, las altas concentraciones de Si en las muestras analizadas solo se pueden atribuir a las fuentes naturales como la deposición de material silicatado disuelto que proveniente de los distintos tipos de rocas de la zona de estudio, en especial en las muestras de aluvión y la de arena.

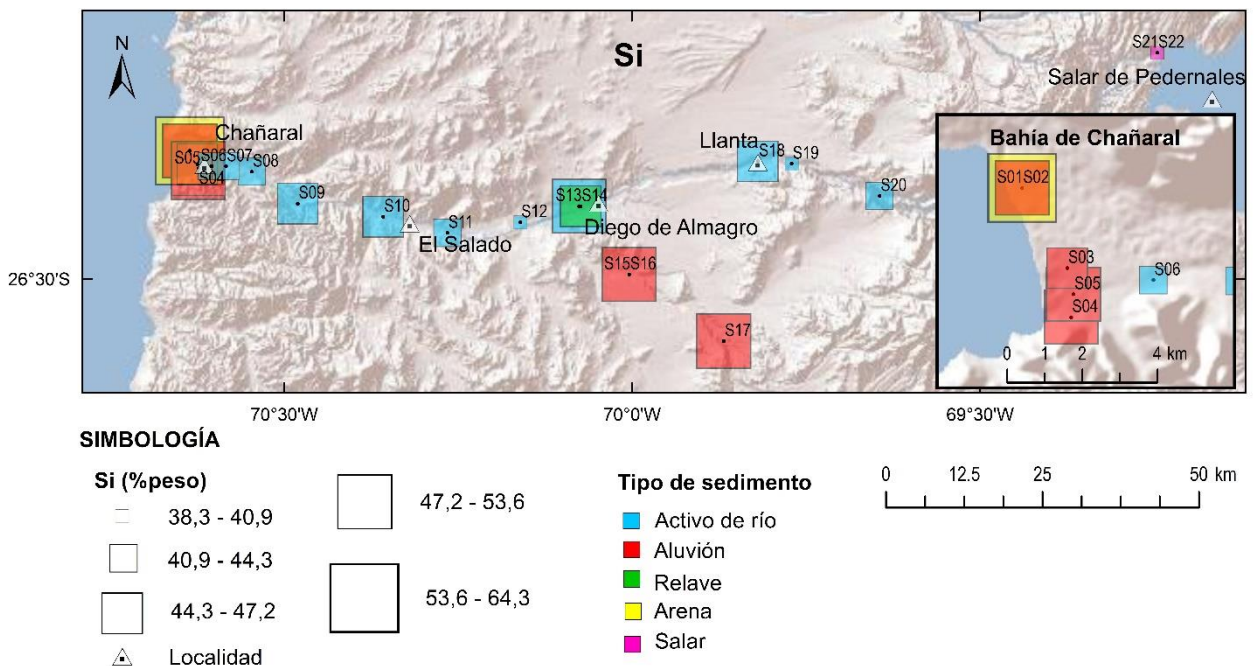


Figura 3.47 Concentración gráfica relativa de Si con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.1.2 Al

El promedio de concentración de Al es de 18,4% en peso en el total de muestras, donde el mínimo valor se obtuvo en S12, sedimento activo al oeste de Diego de Almagro con 13,1%, y el máximo en S16, sedimento de aluvión en la quebrada de la Angostura con 23,1% (Figura 3.48). Los sedimentos activos tienen Al con una tendencia al aumento desde la muestra más este hasta la desembocadura del río Salado, con un promedio de 16,4%. El máximo valor es alcanzado en la S06, en Chañaral, con 19,5%, y el mínimo en S20, la más oriental, con 13,1%. Dichas concentraciones de Al son superadas en las muestras de aluvión, las que varían entre 19,5% y 23,1%, en la S03 en la costa, y S16 en la quebrada de la Angostura, respectivamente; sin embargo, no se observa una tendencia en las concentraciones, y tienen una media de 21,2% en peso.

Por su parte, las muestras S21 y S22 del salar presentan concentraciones de Al muy parecidas, ambas bordeando los 17,1% en peso, encontrándose bajo el promedio del total de muestras y de sedimento de aluvión, pero sobre la media de sedimentos activos. La muestra de relave (S14) tiene una de las concentraciones más elevadas de Al, con 21,9%. Mientras que la muestra de arena (S02) concentra 20,5% en peso de Al, siendo levemente menor a la muestra de aluvión asociada, la cual posee 22,2% en peso.

El Al se particiona del agua al sedimento y a la materia particulada, especialmente en pH cercano a neutro. Las concentraciones medias de Al varían entre 20.000 y 80.000 ppm, es decir, entre 2 y 8% en peso (Subramanian *et al.*, 1988; Fileman *et al.*, 1991; Benninger y Wells, 1993). En suelo, el Al es uno de los elementos más abundantes con concentraciones que varían ampliamente, entre 0,07 y 10% en peso (WHO, 1997). Así, dadas las referencias mencionadas, todas las muestras de sedimento que fueron analizadas presentaron mayor concentración de Al que el promedio bibliográfico.

En los suelos promedio, el Al se libera en solución para el transporte a corrientes después de la acidificación. La fase sólida se produce en la estructura de minerales, en sitios inter-capas de minerales arcillosos expansivos y en minerales mal ordenados de composición variable (WHO, 1997). Por tanto, el alto contenido de Al en las muestras se debe a causas naturales, por la composición mineralógica de los sedimentos arrastrados por naturalmente en la cuenca del río Salado.

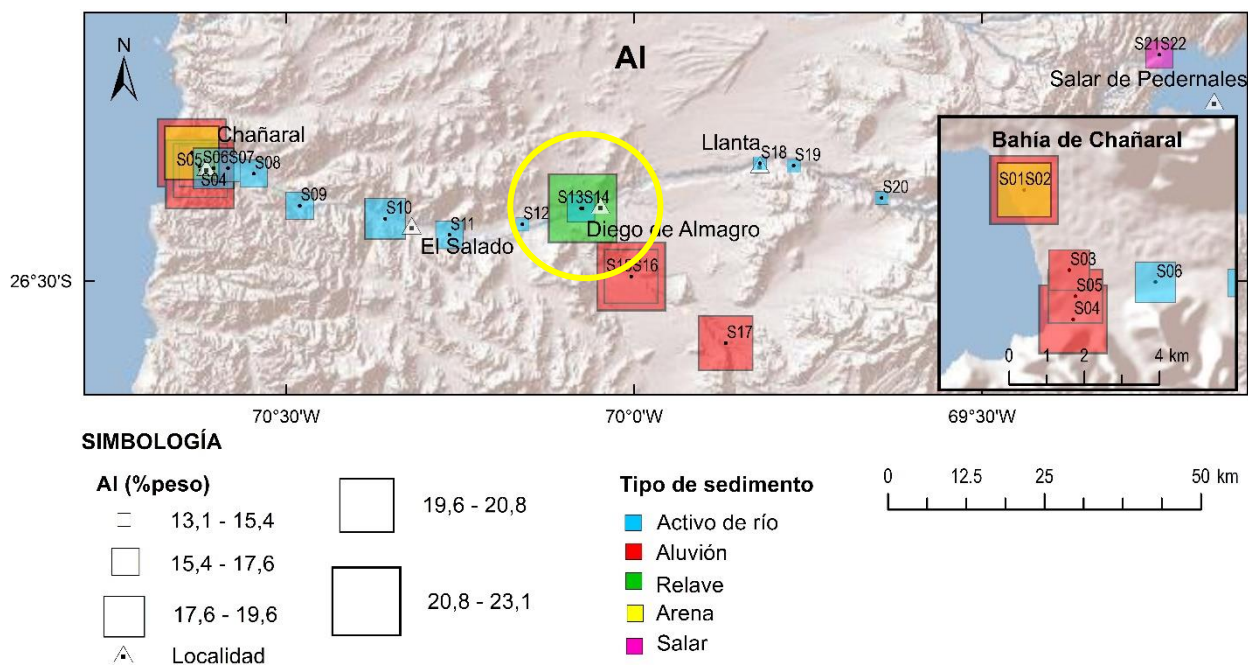


Figura 3.48 Concentración gráfica relativa de Al con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14).

3.2.1.1.3 Fe

En promedio, el Fe se encuentra presente en las muestras de sedimento en una concentración de 7,35% en peso. La muestra de arena posee la menor concentración, con 3,26%, mientras que la de relave tiene la mayor con 15,36%, que se alejan notablemente de los valores de los otros tipos de muestras (Figura 3.49). Las muestras de sedimento activo promedian 6,88% y se encuentran en un rango de 5,42% y 10,02% en las muestras S12, al oeste de Diego de Almagro, y S19, al este de Llanta, sin una distribución particular de concentración a lo largo de la quebrada del Salado. Las muestras del aluvión presentan la mínima y máxima concentración de Fe en la costa de Chañaral, en las muestras S04 y S05, respectivamente, con 5,17% y 11,72% en peso, mientras que el promedio de este grupo es de 7,96%.

La muestra de arena, que posee la menor concentración de Fe, contiene 3% menos que la muestra de aluvión que la sobrepasa, la cual presenta un 6,31% en peso. La muestra de relave, que posee la mayor concentración, excede en un 3,60% a la de concentración inmediatamente menor (S05) correspondiente a sedimento de aluvión. Por otro lado, las dos muestras de salar se diferencian levemente en la concentración de Fe, pues S21 contiene 5,57% mientras que S22, 6,10%, encontrándose ambas bajo el promedio del total de muestras.

La abundancia de Fe en suelos es de 3,5%, y es probable que se incremente en suelos arcillosos y algunos suelos orgánicos (Kabata-Pendias, 2011). El promedio de Fe en sedimentos es de 4% y en partículas de río, de 4,8%, según McLennan y Murray (1999). Reimann y de Caritat (1998) entregan rangos de concentración de Fe en

sedimentos activos desde 0,2% y 42,8% y de sedimento de planicie de inundación de 0,09% a 19,56%. Por lo tanto, la mayor parte de las muestras supera el promedio de Fe en suelos y sedimentos, pero se encuentran dentro de los rangos de los estudios de Reimann y de Caritat (1998).

La geoquímica de Fe es muy compleja en el ambiente terrestre y está determinada por el estado de oxidación en respuesta a condiciones fisicoquímicas. La oxidación y las condiciones alcalinas promueven la precipitación del Fe, mientras que las condiciones reductoras y ácidas promueven la movilización de los compuestos de Fe. Los minerales de Fe son principalmente óxidos férricos (hematita) u óxido férrico hidratado (goethita) y varios minerales dimorfos como los que se encuentran comúnmente en suelos. Importantes depósitos minerales de Fe también pueden estar compuestos de otros minerales como siderita, pirita e ilmenita (Kabata-Pendias, 2011). Los altos contenidos de Fe, en su mayoría, están relacionados a anomalías por mineralización polimetálica. Las fuentes antropogénicas de hierro incluyen la industria del acero, las aguas residuales y el polvo de la minería del hierro (Reimann y de Caritat, 1998). El sulfato de hierro también se utiliza como fertilizante y herbicida (Reimann *et al.*, 2003). Así, dada la concentración de Fe en las muestras en estudio, se desprende que, si bien, se encuentran dentro del rango que entrega la bibliografía, los altos valores se deben a la mineralización polimetálica existente en el sector cordillerano de la zona de estudio.

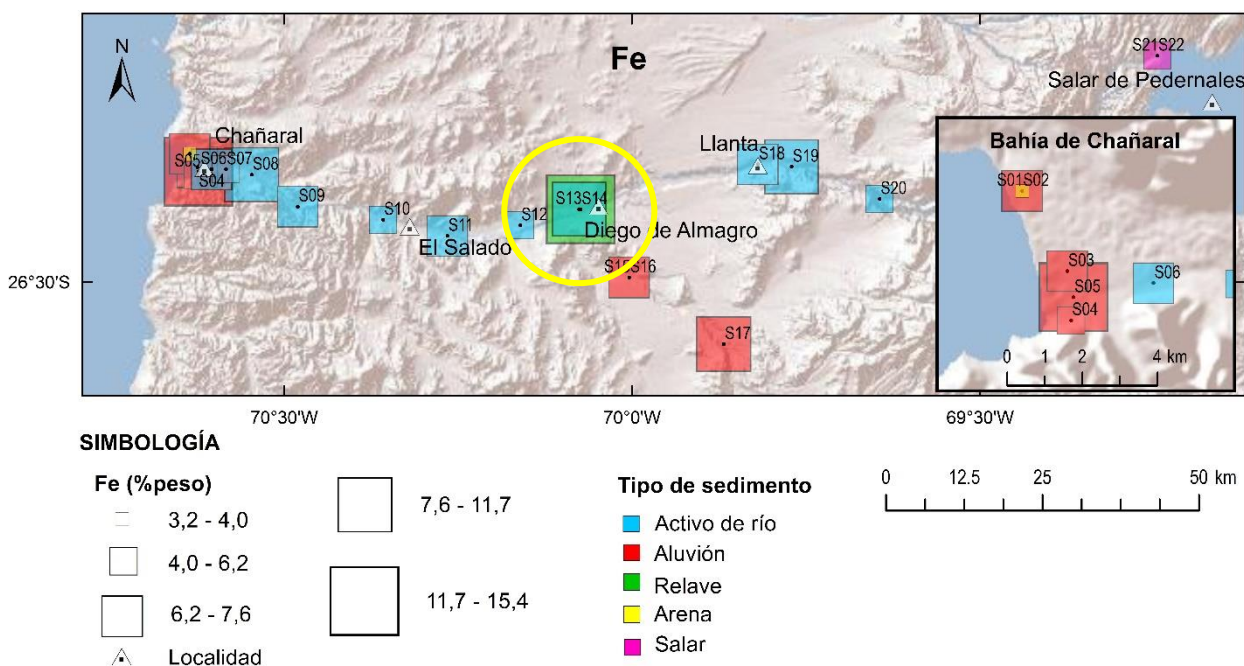


Figura 3.49 Concentración gráfica relativa de Fe con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14).

3.2.1.1.4 Ca

El Ca se encuentra concentrado en todas las muestras analizadas, con un promedio de 12,85% en peso, siendo el mínimo 0,25% correspondiente a la muestra de

relave (S14) y el máximo 25,07% que corresponde a S18, sedimento activo situado en las cercanías de Llanta (Figura 3.50). Existe una marcada diferencia en la concentración de Ca en los distintos tipos de sedimento analizados, ya que los sedimentos activos de río tienen 18,97% en promedio de Ca, mientras que los sedimentos del aluvión presentan una media de 6,41%, cerca de un tercio del promedio de sedimentos activos. Más marcada aún es la diferencia entre las muestras de arena y relave, pues estas no superan el 1,20%.

La muestra de sedimento activo con menor concentración de Ca es S06 con 10,11%, y la con mayor concentración es S18, en Llanta. En este tipo de sedimento, todas las muestras tienen una concentración de Ca elevada, a excepción de S06, por lo que no se puede determinar una tendencia. En los sedimentos de aluvión, el mínimo se alcanzó en S17, al sur de la quebrada de la Angostura, y el máximo en S04, en la costa de Chañaral. En este caso, los sedimentos de aluvión cercanos localizados en la bahía tienen concentraciones mayores que aquellas de la quebrada de la Angostura, pues alcanzan casi el doble de su porcentaje en peso.

Las muestras del salar presentan concentraciones de Ca similares al extremo inferior de las de sedimento activo, y se diferencian entre sí en algo menos que 7%: una presenta 10,99%, y la otra 16,70%. Las dos muestras con menor concentración son la de arena con 1,17% y la de relave con 0,25%. Así, la relación entre la muestra de arena con la de aluvión situada sobre ella es bastante notoria, pues esta última presenta 7,61% en peso de Ca, superando a la de arena en más de 6%.

De acuerdo a los datos entregados por McLennan y Murray (1999), el contenido de Ca en sedimentos es de 6,4%, en promedio, y el de partículas de ríos, 2,2%. Reimann y de Caritat (1998) indican que la media de Ca en suelos es de 1,4%, en sedimento activo oscila entre 0,5% y 42,3%, y en sedimento de planicie entre 0,4% y 9,8%. Por lo tanto, el promedio encontrado en las muestras analizadas es mayor al promedio de sedimentos y suelos de la bibliografía, pero los valores de concentración de Ca están dentro de los rangos tanto de sedimento activo como de planicie de inundación.

El Ca es un componente relativamente común de varios minerales del suelo. (Kabata-Pendias, 2011). La caliza y la dolomita son sedimentos carbonatados que constituyen una fuente importante de Ca, reflejada en los altos niveles de Ca registrados en la mayoría de las rocas sedimentarias. Abundan los minerales como la calcita y dolomita, además de sulfatos como el yeso y anhídrita que pueden ser importantes en areniscas y evaporitas. La plagioclasa es el huésped principal del Ca en algunos sedimentos detríticos. En cuanto a fuentes antropogénica, Reimann y de Caritat (1998) indican que estas son mucho menos importantes que las fuentes geogénicas. Por tanto, las altas concentraciones de Ca encontradas en las muestras de sedimento se deben a las litologías de la zona de estudio como también de los depósitos evaporíticos del salar de Pedernales que aportan elementos de minerales como el yeso y la anhídrita a la corriente del río Salado.

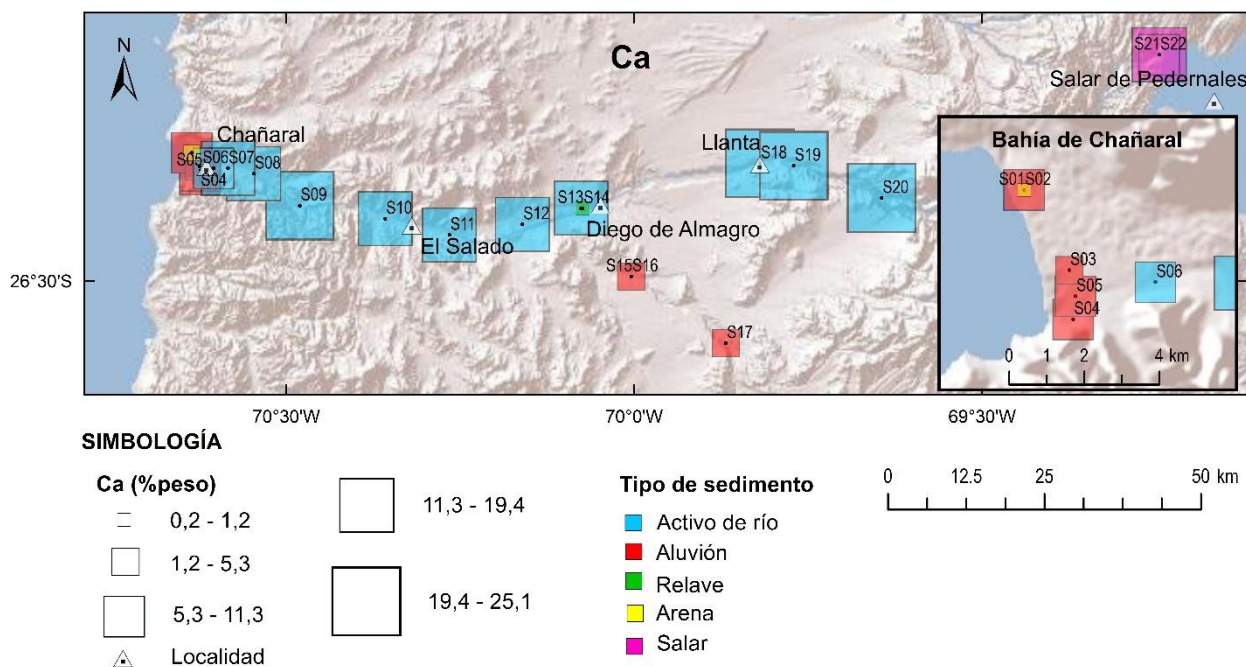


Figura 3.50 Concentración gráfica relativa de Ca con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.1.5 Mg

El caso del Mg es particular debido a que en la mitad de las muestras analizadas no fue encontrado, incluyendo a la muestra de arena, la de relave, una de aluvión y ocho de las once de sedimento activo (Figura 3.51) En promedio, contabilizando las muestras con ausencia de Mg, se encontró un 2,84% en peso, mientras que la media de las muestras con Mg presente es de 5,68%, dentro de las que S04, sedimento del aluvión ubicada en Chañaral, tiene la concentración menor con 4,38%, y la muestra S15, también del aluvión pero localizada en la quebrada de la Angostura, es la de mayor, con 6,69%.

Las muestras de sedimento activo que presentan Mg son dos ubicadas en la desembocadura del río, con 5,25% (S07) y 6,05% (S06) y una localizada al oeste de El Salado, con 5,24% (S10), por lo que se deduce una tendencia al aumento relativamente brusco de Mg en dirección oeste. Por otra parte, las muestras del salar presentaron porcentajes poco diferenciados, 6,18% y 5,75% en S21 y S22, respectivamente. Los sedimentos de aluvión presentan concentraciones de Mg similares entre sí, donde los valores máximo y mínimo coinciden con el máximo y mínimo del total de muestras. En ellos, no se detectó una tendencia en aumento o disminución de Mg.

Dada la ausencia de Mg en la muestra de arena, es clara la diferencia entre esta y el sedimento de aluvión que la sobreyace, siendo su concentración de 5,26% en peso.

La concentración promedio de Mg en sedimentos es de 1,85% y en partículas de río, 1,20% (McLennan y Murray, 1999). En suelos, el promedio mundial es de 0,90%, en sedimento activo de 1,12%, y en sedimento de planicie, 1,44%, pero el rango en que oscila el contenido de Mg en Europa, en sedimento activo, está entre 0,07% y 20,84%, y

el de sedimento de planicie, varía entre 0,01% y 9,77% (Reimann y de Caritat, 1998). Dados estos datos, las muestras analizadas contienen Mg en un promedio superior al entregado por la bibliografía, valor que es aumentado por las altas concentraciones halladas en algunas muestras puntuales. Sin embargo, todos los valores de Mg encontrados están dentro de los rangos que indican Reimann y de Caritat (1998).

Custodio y Llamas (2001) detallan que el ion Mg^{+2} tiene propiedades similares al ion Ca^{+2} pero más soluble y levemente más difícil de precipitar. Es un componente principal de muchos grupos minerales incluyendo silicatos, carbonatos, sulfatos, fosfatos y boratos. Es un componente principal de minerales arcillosos por lo que la lutita contiene mayores concentraciones que la arenisca. Los valores altos de Mg indican presencia de rocas máficas o ultramáficas o rocas calcáreas (Wedepohl, 1978). Además, puede provenir del lavado de rocas evaporíticas magnésicas como carnalita y kieserita (Custodio y Llamas, 2001). Las fuentes antrópicas del Mg incluyen los fertilizantes y el encalado (Reimann y de Caritat, 1998). En el caso de estudio, se infiere que la concentración elevada que se encontró en algunas muestras, principalmente en las de aluvión, se deben al arrastre y posterior deposición de material rico en Mg proveniente del salar de Pedernales, lo que explicaría también el alto contenido encontrado en el salar. Además, como el Mg es difícil de precipitar, no se halló en las muestras superficiales excepto en las más costeras.

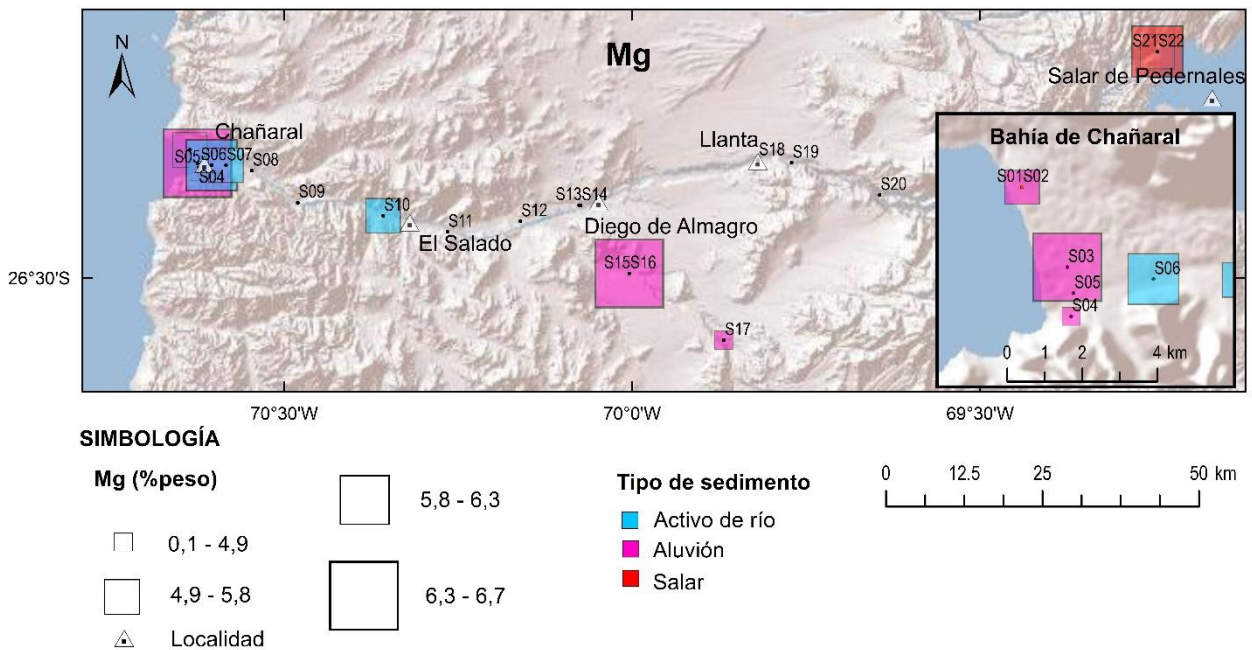


Figura 3.51 Concentración gráfica relativa de Mg con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.1.6 K

La muestra S20 presenta la menor concentración de K con 2,53%, correspondiente a la de sedimento activo más oriental, mientras que la de mayor concentración es la muestra de arena (S02) con 6,57% (Figura 3.52). La media es de

3,83% en peso de K en el total de las muestras. Los sedimentos activos presentan variaciones leves en su concentración de K, variando entre 2,53% en S20 y 4,25% en S12, con una media de 3,56%, y se observa una tendencia, no tan evidente, al aumento de K de este a oeste. Por su parte, los sedimentos de aluvión presentan concentraciones en un rango desde 2,92% en S04, en la costa de Chañaral, hasta 4% en S15, en la quebrada de la Angostura; sin embargo, no se aprecia un aumento o disminución de K direccionado.

Sin considerar la muestra de arena, los sedimentos de salar presentan las mayores concentraciones de K con 4,51% en S21 y 4,57% en S22, mientras que la muestra de relave tiene una concentración promedio de 3,86%. La muestra de arena, al tener la concentración mayor (6,57%), supera al sedimento de aluvión que se le asocia en cerca de 3%, pues presenta 3,87% en peso de K.

McLennan y Murray (1999) indican que el promedio de K en sedimento es de 2,35% y en partículas de río, 2%. Reimann y de Caritat (1998) entregan valores de contenido de K en países europeos; el promedio de sedimento activo está entre 1,63 y 2,31%, y la concentración de K varía entre 0,08 y 7,72%. Los sedimentos de planicie de inundación promedian entre 0,14 y 1,8%, con un rango de 0,025 a 4,33%. Además, la media de K en suelos del mundo es de 1,40%. Por lo tanto, las muestras en estudio presentan un promedio de K mayor al de la bibliografía, pero la concentración del total de muestras oscila dentro de los rangos esperados.

El K tiene una muy alta solubilidad y es difícil de precipitar, pero es absorbido por las arcillas en formación. Es un constituyente importante de muchos minerales formadores de roca y proviene principalmente de la meteorización de rocas con ortoclasa y otros silicatos como micas y arcillas (Custodio y Llamas, 2001). Valores elevados de K indican la presencia de rocas félsicas, especialmente intrusivas caolinizadas (Wedepohl, 1978). Puede existir un pequeño aporte de contaminación industrial, minera y agrícola, pero la principal fuente antropogénica son los fertilizantes. Sin embargo, las fuentes naturales se consideran mucho más importantes en el medio ambiente que las antropogénicas (Reimann y de Caritat, 1998). Es por esto que se considera que la proveniencia principal del K en las muestras de sedimento son las rocas principalmente intrusivas con minerales con alto contenido en K. Podría también deberse a la disolución de KCl en el salar de Pedernales, pero es altamente soluble y difícil de precipitar.

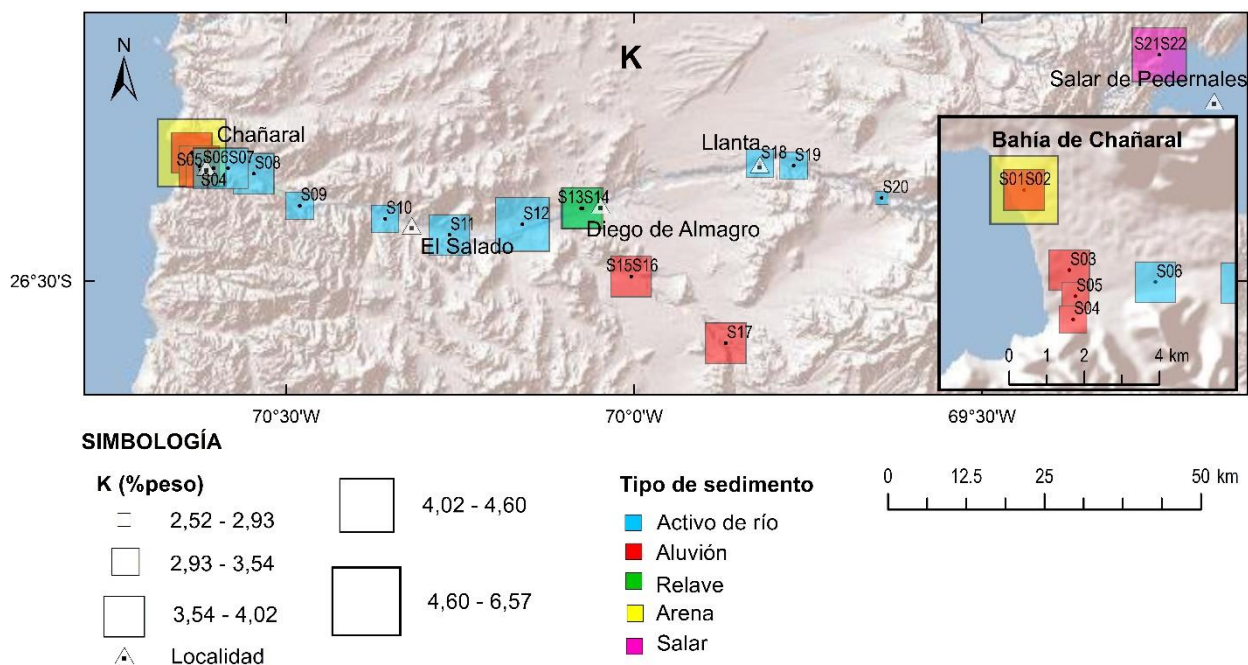


Figura 3.52 Concentración gráfica relativa de K con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.1.7 CI

El CI, por lo general, no es considerado como un elemento mayor dado que, en rocas y sedimentos, no se encuentra en altas concentraciones. Sin embargo, en este trabajo se incorporó al grupo de elementos mayores debido a que su concentración en 17 de 22 muestras está por sobre el 2% en peso, las cuales presentan distintos grados de humedad, lo que permitiría la presencia de CI.

Del total de muestras, se calculó que el promedio de CI es de 5,20% en peso. No considerando las muestras en las cuales no se detectó CI, la media aumenta a 6,73%, donde el menor valor lo obtuvo la muestra de aluvión en la bahía de Chañaral (S01) con 2,36%, y el mayor valor, la de sedimento activo de río S12 también ubicada en la costa, con 15,46% (Figura 3.53). Por una parte, los sedimentos activos promedian un 6,55%, con el mínimo valor en S18, la muestra más oriental, con una concentración tal que no fue detectada por el instrumento de medición. Y por otra, los sedimentos del aluvión, presentan una media de 2,98% en peso de CI, donde la muestra con mayor contenido, es S03, en la costa, con 8,99%, y aquellas con menor concentración son S16 y S17, ambas en la quebrada de la Angostura, en las cuales tampoco se logró detectar concentración alguna de CI.

Una de las muestras de sedimento del salar (S21) presenta contenido de CI relativamente alto, con 15,04% en peso, mientras que la otra muestra del mismo tipo (S22) tiene una concentración más cercana al promedio, con 6,45%. En las muestras de arena y de relave no se detectó la presencia de CI, por lo cual es evidente que la muestra de sedimento ubicada en la parte superior de la muestra de arena supera a esta última en concentración de CI, pues presenta un 2,36% en peso.

La concentración promedio mundial de Cl en suelos es de 0,03%, y en sedimentos de Europa, 0,016% (Reimann y de Caritat, 1998). Todas las muestras en las que se encontró Cl exceden notablemente los valores de la bibliografía, en especial las muestras de sedimento activo del río Salado y las extraídas en el salar de Pedernales.

Generalmente, el Cl procede del lavado de terrenos de origen marino, aguas congénitas y fósiles. Los minerales que contienen Cl en rocas ígneas incluyen la sodalita y el apatito, pero la meteorización de rocas genera un aporte pequeño de Cl (Custodio y Llamas, 2001). Localmente, la presencia de rocas evaporíticas ricas en halita elevan las concentraciones de Cl en aguas, y dado el carácter conservativo del Cl, este no forma complejos a menos que su concentración sea extremadamente alta (Wedepohl, 1978). La composición del salar de Pedernales comprende costras de halita y yeso, lo que genera altas concentraciones de Cl en las aguas que fluyen desde ahí hasta la desembocadura del río Salado. Esto provoca la precipitación de compuestos de Cl, lo que explicaría el alto contenido en los sedimentos extraídos en la cuenca del río.

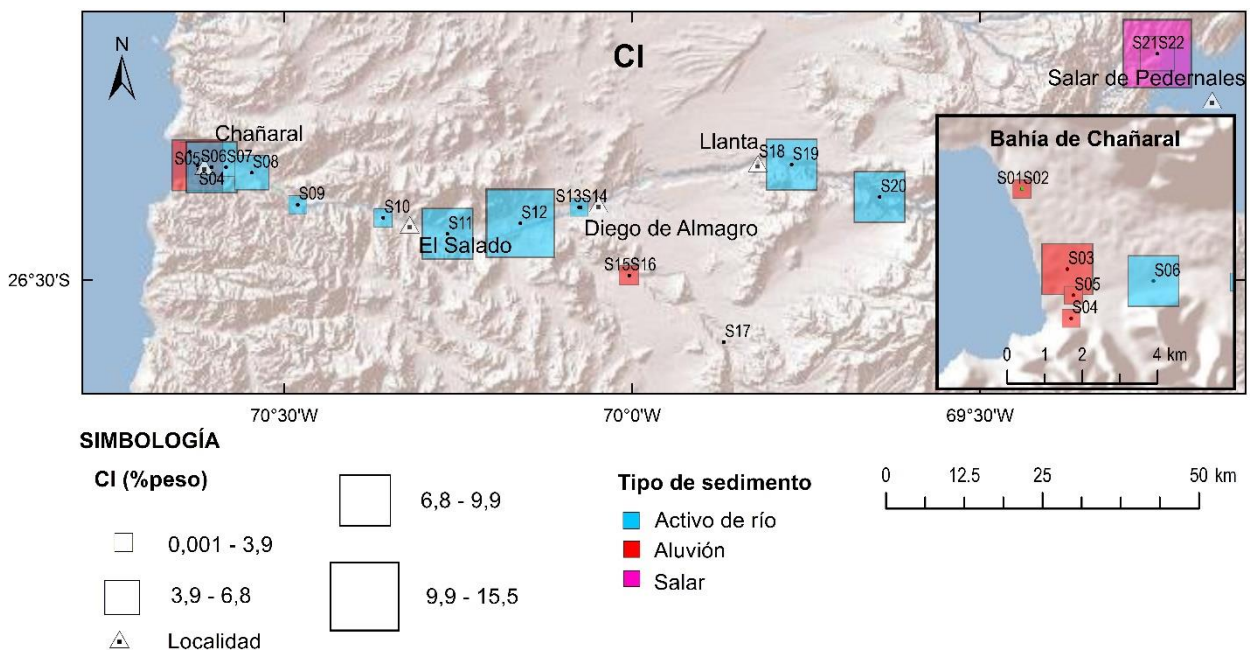


Figura 3.53 Concentración gráfica relativa de Cl con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2 Elementos traza

En este trabajo, los elementos traza se consideraron como aquellos en que su concentración se halla por debajo del 1% en peso. Así, los elementos detectados en esa concentración (Tabla 3.14) son S, Ti, Ba, Mn, Cu, Zr, Sr, Rb, Zn, Co, Mo, P, Y, y As, siendo los cinco últimos elementos mencionados detectados solo en una, dos o tres muestras (Anexo B).

Tabla 3.14 Concentración de elementos traza en muestras de sedimento.

| Muestra | S (%) | Ti (%) | Ba (%) | Mn (%) | Cu (%) | Zr (ppm) | Sr (ppm) | Rb (ppm) | Zn (ppm) |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|
| S01 | 0,843 | 0,544 | 0,299 | 0,158 | 0,209 | 330 | 450 | 130 | 190 |
| S02 | 2,731 | 0,570 | 0,569 | - | 0,127 | 190 | 1.500 | 180 | - |
| S03 | 1,187 | 0,394 | 0,437 | 0,223 | 0,056 | 280 | 1.150 | 160 | 300 |
| S04 | 0,597 | 0,480 | 0,165 | 0,120 | 0,173 | - | 550 | 130 | 180 |
| S05 | 0,814 | 0,779 | 0,620 | 0,210 | 0,065 | - | 580 | 210 | 240 |
| S06 | 0,295 | 0,441 | 0,453 | 0,124 | 0,073 | - | 430 | 150 | 140 |
| S07 | 0,179 | 0,778 | - | 0,125 | 0,031 | 280 | 700 | 160 | 160 |
| S08 | 0,254 | 0,706 | 0,520 | 0,167 | 0,078 | 310 | 750 | 220 | 230 |
| S09 | 0,276 | 0,822 | - | 0,158 | - | 250 | 690 | 160 | 160 |
| S10 | 0,722 | 0,811 | 0,216 | 0,115 | 0,108 | - | 730 | 170 | 160 |
| S11 | 0,953 | 0,879 | - | 0,135 | 0,044 | 260 | 470 | 150 | 170 |
| S12 | 2,428 | 0,683 | - | 0,111 | - | 240 | 710 | 160 | - |
| S13 | 1,505 | 0,863 | 0,535 | 0,200 | 0,084 | - | 880 | 230 | 210 |
| S14 | 10,144 | 0,672 | 0,257 | 0,018 | 0,351 | 260 | 1.060 | - | - |
| S15 | 1,020 | 0,705 | 0,170 | 0,157 | - | 730 | 490 | 270 | 230 |
| S16 | - | 0,732 | 0,483 | 0,132 | - | 530 | 500 | 200 | 180 |
| S17 | 0,585 | 0,726 | 0,750 | 0,168 | - | 340 | 950 | 220 | 190 |
| S18 | 2,103 | 0,982 | - | 0,128 | - | - | 940 | 180 | - |
| S19 | 1,821 | 0,766 | 0,932 | 0,124 | 0,040 | 840 | 930 | 200 | - |
| S20 | 0,989 | 0,935 | 0,264 | 0,069 | - | 800 | 960 | 190 | - |
| S21 | 0,317 | 0,519 | 0,361 | 0,129 | 0,045 | 200 | 470 | 190 | 200 |
| S22 | 1,267 | 0,624 | 0,400 | 0,159 | - | 240 | 710 | 190 | 180 |

Al igual que para los elementos mayores, se realizaron mapas donde se observa la concentración relativa de cada elemento para los distintos tipos de sedimento (Figura 3.54 hasta Figura 3.58). La concentración de S, Ti, Ba, Mn y Cu se muestra en % en peso, mientras que, para los otros elementos restantes, se detalló su contenido en ppm.

3.2.1.2.1 S

El S se encuentra en un promedio de 1,41% en peso en el total de las muestras. De ellas, S16 tiene la menor concentración que corresponde a sedimento de aluvión localizado en la quebrada de la Angostura, en la que no se detectó S. Por el contrario, aquella muestra con mayor contenido de S es el sedimento de relave (S14) con 10,14%. Este valor supera en un poco menos de cinco veces a la muestra que la antecede en concentración de S (S02, arena de playa) con 2,73% (Figura 3.55 Figura 3.54).

Los sedimentos activos de río tienen una media de 1,05% de S, donde el mínimo valor se obtiene en S07, tomada en la bahía de Chañaral con 0,18%, y el máximo valor se encuentra en S12, entre El Salado y Diego de Almagro, con 2,43% de S. En este caso, se observa que el contenido de S disminuye en el mismo sentido del caudal del río Salado. Por otro lado, los sedimentos de aluvión promedian 0,72% en peso de S, con el

mínimo en la muestra S16, con ausencia de este elemento, y el máximo en S03, en la costa de Chañaral. No existe, acá, una diferencia notoria en la concentración de S entre las muestras costeras y las de la quebrada de la Angostura.

Las dos muestras de salar presentan concentraciones levemente distintas entre sí, pues S21 contiene 0,32% y S22, 1,27% en peso, ambas por debajo del promedio de concentración de S. Por otro lado, aquella muestra con mayor contenido de la población de muestras es la de relave, seguida por la de arena de playa, ambas por sobre el promedio. Por esto, se extrae que la arena posee mayor contenido a la muestra de aluvión que la sobreyace, ya que, esta última posee 0,84% en comparación a los 2,73% de la muestra de arena.

Reimann y de Caritat (1998) indican algunos valores de concentración de S en suelos y sedimentos. El promedio en suelos a nivel mundial es de 0,08%; en suelos para la agricultura es de hasta 0,04% y algunos alcanzan un 1,08%; y suelos urbanos contienen S entre 0,004% y 0,480%, con un promedio de 0,047%. Además, sedimentos de Noruega contienen entre 0,01% y 0,71%, con una media de 0,04%. Teniendo esto en consideración, las muestras analizadas contienen, en su mayoría, más S de lo estipulado por la bibliografía, en especial las muestras superficiales orientales, las de aluvión y de relave.

A pesar de que existe el sulfuro nativo, la mayoría del S en la Tierra está presente como sulfuros de metales, yeso, anhídrita y sulfatos disueltos. Las rocas ultramáficas y máficas contienen concentraciones más altas de S que las intermedias y félsicas; las rocas carbonatadas y la arenisca comúnmente tienen <1% de S, y las rocas sedimentarias ricas en compuestos orgánicos como la lutita negra y el carbón tienden a tener las mayores concentraciones de S (7% y 3%, respectivamente), aunque depósitos de evaporitas que contienen yeso y anhídrita, generalmente contienen 20% de S (Wedepohl, 1978). Emisiones antropogénicas de S son el resultado del consumo de combustibles fósiles y fundición de sulfuros de mena (Berner y Berner, 1996). Por lo tanto, las altas concentraciones de S encontradas en la zona de estudio se pueden deber a la composición de las litologías de la zona, destacando la presencia de evaporitas en el salar de Pedernales, además de la influencia antropogénica por las operaciones de minería y fundición que utilizan sulfatos y ácido sulfúrico, que se ven reflejadas en las muestras de aluvión y de relave por el posible arrastre de desechos mineros.

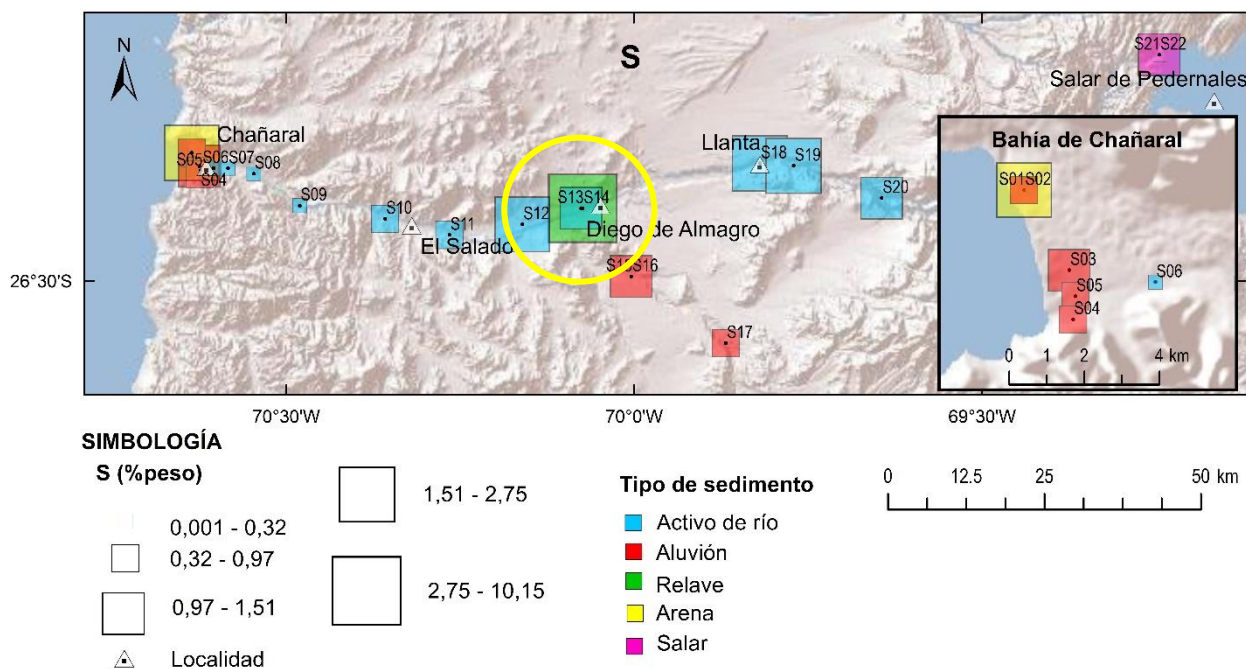


Figura 3.54 Concentración gráfica relativa de S, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14).

3.2.1.2.2 Ti

En el total de muestras, el promedio de Ti es de 0,70% donde la menor concentración se encuentra en S03, sedimento de aluvión localizado en Chañaral, y el mayor contenido en S18, sedimento activo de los alrededores de Llanta (Figura 3.55). La media de concentración de Ti en las muestras de sedimento activo es de 0,79%, con una tendencia a disminuir el Ti de este a oeste. El máximo contenido lo tiene S18, y el mínimo, S06, en la bahía de Chañaral. Por otra parte, los sedimentos de aluvión promedian 0,62%, porcentaje menor a la media de sedimentos activos, donde la muestra con menor concentración es S03 con 0,39%, y aquella con mayor Ti es S05 con 0,78%, ambas ubicadas en la desembocadura del río Salado. A pesar de ello, las muestras de la quebrada de la Angostura tienen concentraciones de Ti relativamente mayores a las de Chañaral.

Las muestras del salar poseen concentraciones de Ti menores al promedio, pues S21 tiene 0,52% y S22, 0,62%. Lo mismo ocurre con las muestras de arena y de relave, las cuales contienen 0,57% y 0,67% de Ti, respectivamente. Así, la arena posee un contenido de Ti muy similar a la muestra de aluvión a la cual se le asocia, pues esta última contiene 0,54% en peso.

La distribución geográfica de los niveles de Ti varía considerablemente de acuerdo a condiciones tales como la meteorización, las consecuencias del consumo de combustibles fósiles y la incineración de basura. Los suelos arenosos contienen menos titanio que los suelos arcillosos pesados. Según una extensa revisión de Vinogradov (1959) de valores de Ti en suelos de diversas partes del mundo, la concentración media

parece ser menor a 0,5% en peso. Sin embargo, algunos suelos contienen dióxido de titanio a una concentración aproximada de 1 a 10% en peso. Por su parte, los suelos cercanos a las plantas de energía e incineración y descargas industriales pueden estar enriquecidos con metales pesados como el Ti (WHO, 1982). Por tanto, las muestras que se analizaron contienen al metal dentro de los rangos entregados en otros estudios.

El Ti se encuentra, generalmente, en forma de minerales estables como ilmenita, rutilo y algunos aluminosilicatos presentes en rocas básicas (WHO, 1982). La presencia de este elemento en las muestras de sedimento analizadas se debe a fuentes naturales, dada la litología de la zona de estudio.

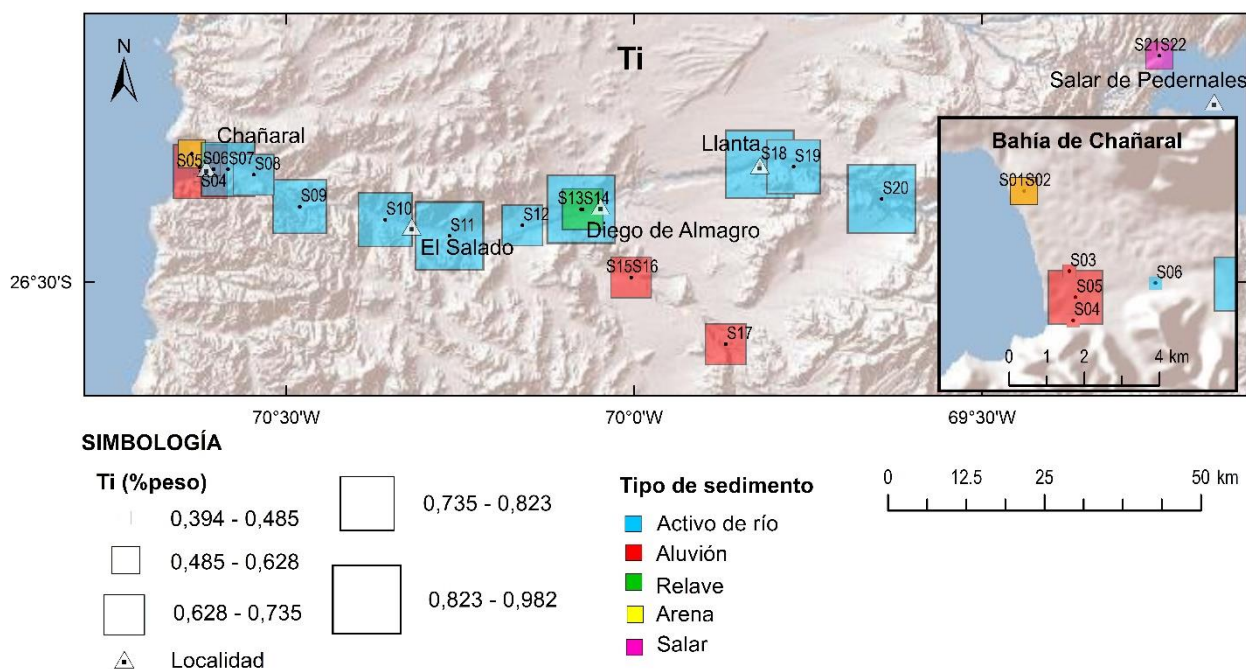


Figura 3.55 Concentración gráfica relativa de Ti, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.3 Ba

El contenido de Ba en todas las muestras de sedimento, en promedio, es de 0,34% en peso, incluyendo cinco muestras de sedimento activo en las que no se detectó la presencia de este elemento (Figura 3.56). Al contrario, la muestra con mayor concentración de Ba es S19, sedimento activo ubicado al este de Llanta, con 0,93%. El promedio de Ba para este mismo tipo de sedimento es de 0,27%, dadas las muestras sin contenido del elemento. Por su parte, la media de los sedimentos de aluvión es de 0,42%, donde el mínimo contenido lo posee la muestra S04, con 0,17%, localizada en la costa, mientras que S17 tiene el máximo valor, con 0,75%, ubicada en la quebrada de la Angostura. En ninguno de los tipos de sedimentos estudiados se encontró una tendencia en la concentración de Ba.

Las muestras del salar de Pedernales tienen concentraciones de Ba similares y mayores al promedio del total: 0,36% en S21 y 0,40% en S22. La muestra de relave tiene

0,26% en peso de Ba, valor menor a la media total, y la muestra de arena de playa posee 0,57%, por sobre el promedio total.

Las mediciones de Ba en los sedimentos del río Iowa, EE.UU., entregaron un rango de 0,05-0,3% (Tsai *et al.*, 1978), lo que sugiere que el Ba en el agua se elimina por precipitación y sedimentación (WHO, 1990). Además, se considera que el nivel de Ba en suelos varía de 0,01 a 0,30%, con un promedio de 0,05% (Brooks, 1978). Así, las muestras analizadas en este estudio contienen Ba en mayores cantidades a las descritas en la bibliografía.

Los minerales de Ba que abundan en la naturaleza son la barita (sulfato de Ba) y witherita (carbonato de Ba). La barita se presenta ampliamente en formaciones sedimentarias como nódulos residuales que resultan del desgaste de sedimentos que contienen el mineral, y en capas junto con fluorita, sulfuros metálicos y otros minerales. La witherita se encuentra en vetas y se asocia a menudo con sulfuro de plomo. Las fuentes antropogénicas son asociadas a la industria de minerales de Ba y la fabricación de productos de Ba (WHO, 1990). Por tanto, la fuente de Ba a la cual se le asocia las muestras de este estudio es natural, dada la geología de la zona.

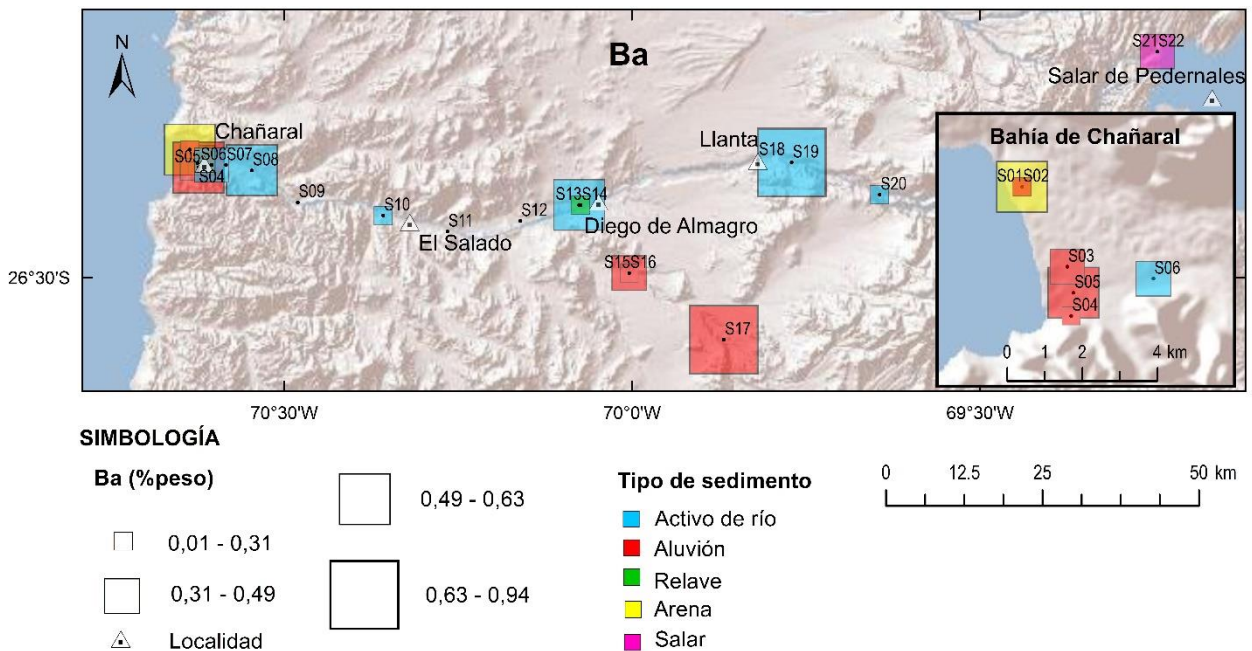


Figura 3.56 Concentración gráfica relativa de Ba, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.4 Mn

El Mn está presente en 21 de las 22 muestras de sedimento: en la muestra de arena (S02) no se detectó el elemento. El promedio de contenido de Mn es de 0,133%, y el máximo valor lo posee la muestra de sedimento de aluvión S03, localizada en la bahía de Chañaral (Figura 3.57). Los sedimentos activos de río promedian 0,132% en peso de Mn, muy similar al promedio del total de muestras, dentro de las que S20 posee la mínima

concentración con 0,07%, aquella localizada más al oriente, y S13 tiene el máximo contenido con 0,20%, ubicada a 3 km al oeste de Diego de Almagro. Los sedimentos de aluvión, por su parte, promedian 0,17% de Mn, más que el promedio total, entre los cuales el menor contenido lo tiene S04 con 0,12%, y el mayor, S03 con 0,22%, ambas ubicadas en la costa de la zona de Chañaral. Tanto en los sedimentos activos como en los sedimentos de aluvión no se logró apreciar una tendencia de aumento o disminución en el contenido de este elemento.

Los sedimentos de salar contienen 0,13% y 0,16% en las muestras S21 y S22, respectivamente, valores similares entre sí y cercanos al promedio del total de muestras. La muestra de relave es la segunda con menor contenido de Mn con 0,02% mientras que la muestra de arena (S02), al no poseer Mn medible por el instrumento, está bajo el contenido de la muestra de aluvión a la cual se le asocia espacialmente, que posee 0,16% en peso.

WHO (2004) indica que las concentraciones de Mn en los sedimentos de los ríos iban de 0,04 a 0,67% en peso seco; los sedimentos de un lago urbano con aporte de zonas industriales y residenciales, así como polvo de los vertederos de unas antiguas minas transportadas por el viento, contenían concentraciones de 1,34%. Se ha notificado que las concentraciones de Mn en sedimentos del lecho fangoso de la zona de oscilación de mareas están entre 0,01 a 0,1% en peso, mientras que sedimentos superficiales del mar Báltico contenían concentraciones medias de 0,35-0,90% en peso, que se asociaron a concreciones de ferromanganeso y a la carga fluvial. Por su parte, los niveles naturales de Mn total en el suelo oscilan entre <0,0001 y 0,4% con valores medio de 0,03-0,06%.

Así, los valores encontrados en las muestras del presente estudio, están dentro de los rangos entregados por WHO (2004), sin el aporte necesario de residuos y polvo de zonas industriales y residenciales.

La reserva principal de Mn en el suelo procede de fuentes de la corteza, pero existen otras como la deposición atmosférica directa, el lavado y lixiviación de superficies vegetales, la diseminación o excreción de material como hojas, materiales muertos de origen vegetal y animal, y los excrementos de animales. Las principales fuentes antropogénicas de Mn son las descargas de aguas residuales, minería y procesamiento de minerales, emisiones de aleación y producción de acero e hierro, consumo de combustibles fósiles, y en menor medida, emisiones de la combustión de aditivos para combustibles (WHO, 2004). Por lo tanto, las fuentes de Mn de las muestras analizadas son naturales, principalmente, por las rocas corticales de la zona de estudio, pero también se puede asociar a las actividades mineras que se desarrollan en los alrededores de la quebrada del río Salado, así como descargas de aguas residuales que entregan material disuelto y que puede precipitar.

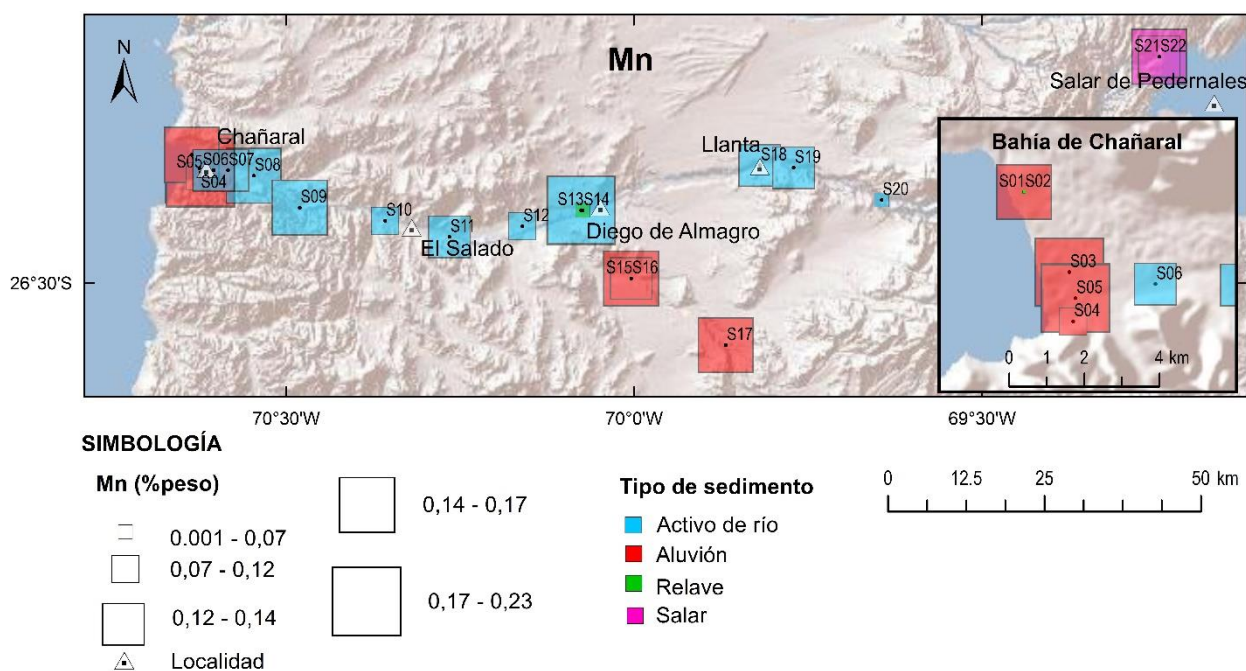


Figura 3.57 Concentración gráfica relativa de Mn, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.5 Cu

El contenido de Cu en la población de muestras promedia 0,067% en peso, dentro de las cuales existen ocho en las que no se detectó: una de sedimento del salar, tres de aluvión y cuatro de sedimento activo. Al contrario, la muestra con el máximo contenido de Cu es la de relave (S14) con 0,351% en peso, considerablemente mayor al promedio total y a todas las otras muestras analizadas (Figura 3.58).

Las muestras de sedimento activo entregan un promedio de 0,042% en peso de Cu, valor que se encuentra por debajo de la media total. Aquellas que presentan el menor contenido del elemento son S09, entre Chañaral y El Salado, S12, entre El Salado y Diego de Almagro, y S20, la más oriental al este de Llanta, en las cuales no detectó Cu. No obstante, S10 contiene un 0,108%, siendo una de las muestras con mayor concentración. En particular para este tipo de sedimento, no se determina una tendencia al aumento o disminución en el contenido de Cu. No así en las muestras de aluvión, pues se observa una clara diferencia en la concentración de los sedimentos de la quebrada de la Angostura, en las que no se detectó el elemento, y las muestras costeras, todas con contenido de Cu, con una tendencia a aumentarla de sur a norte. En promedio, los sedimentos de este tipo poseen 0,072% en peso, levemente más que el promedio total, y la muestra con el mayor contenido es S01, aquella ubicada más al norte en la zona costera, con 0,209%. Esta misma muestra se relaciona con la de arena, pues se ubica directamente encima de ella, y posee casi el doble de concentración de Cu que la arena, ya que esta última contiene 0,127%, valor no menos importante considerando que el promedio total está cerca de la mitad.

Las muestras de salar tienen concentraciones de Cu diferentes entre sí, pues en S22 no se detectó mientras que en S21 se encontró 0,045% en peso, ambos valores por debajo del promedio total. Por su parte, la muestra de relave contiene más Cu que el resto, lo que es razonable dada sus características de deposición y su proveniencia de actividades mineras asociadas a la extracción del metal.

Gran parte del cobre vertido en el agua está en forma particulada y tiende a sedimentarse, precipitar o adsorberse en materia orgánica, hierro hidratado, óxidos de manganeso y arcilla en el sedimento o el cuerpo de agua (WHO, 1998.b). La concentración media de Cu en suelo no contaminado es de 0,003% en peso, y varía entre 0,0002 y 0,025% en peso (Bowen, 1985), lo que significa que las muestras de sedimento analizadas contienen, en su mayoría, más del Cu promedio en suelos.

La liberación más importante de Cu se produce hacia la tierra; sus fuentes principales son las operaciones de extracción, la agricultura, los residuos sólidos y los fangos procedentes de las actividades de tratamiento. Sin embargo, el desplazamiento primordial del Cu a la tierra se produce a partir de las escorias de las minas de cobre y los fangos cloacales (WHO, 1998.b). Esta sería la razón por la cual la concentración de Cu en las muestras de este trabajo es tan alta con respecto a un suelo no contaminado.

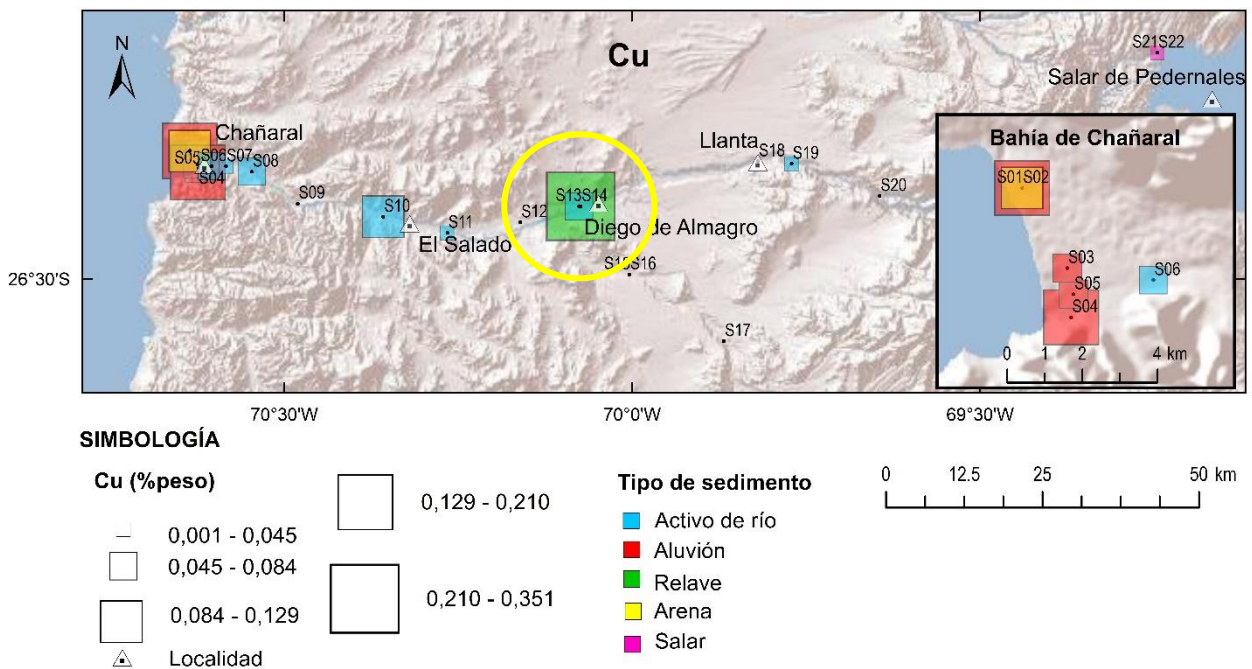


Figura 3.58 Concentración gráfica relativa de Cu, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14).

3.2.1.2.6 Zr

La población de muestras promedia 280 ppm de Zr, dentro de la cual la muestra de sedimento activo S19, ubicada a 4 km al este de Llanta, contiene el máximo valor con 840 ppm, mientras que el mínimo lo poseen seis muestras donde dicho elemento no fue

detectado (Figura 3.59). De esas muestras, dos corresponden a sedimento de aluvión, y cuatro a sedimento activo.

Las muestras de sedimento activo presentan una tendencia no muy marcada a la disminución en la concentración de Zr de este a oeste, siguiendo el curso del río Salado, pues las dos muestras con mayor contenido son las que se localizan más al oriente: S19, con 840 ppm seguida por S20, con 800 ppm. Por otra parte, las muestras en las que no se detectó Zr son la S06, la más occidental, S10 al oeste de El Salado, S13 al oeste de Diego de Almagro y S18 en las cercanías de Llanta. En promedio, este tipo de sedimento posee 270 ppm de Zr, cifra ligeramente menor al promedio del total de muestras.

Los sedimentos de aluvión, por otra parte, presentan una marcada diferencia de acuerdo a su ubicación, pues las muestras de la quebrada de la Angostura contienen más Zr en relación a las muestras ubicadas en la costa de Chañaral. Aquella con mayor contenido del elemento es S15, en la quebrada al sur de Diego de Almagro, y las con menor contenido, son S04 y S05, localizadas en Chañaral, pues en ambas no fue detectado Zr. La media de este tipo de sedimento es de 320 ppm, siendo mayor al promedio de la población de muestras.

Las muestras del salar de Pedernales contienen 200 (S21) y 240 ppm (S22) encontrándose bajo el promedio total. La muestra de relave posee 260 ppm de Zr y la de arena, 190 ppm, ambas por debajo de la media total. En relación a la muestra de sedimento de aluvión que sobreyace la arena de playa analizada, esta última contiene menos Zr, dado que la muestra de aluvión S01 tiene 330 ppm del elemento.

Las cantidades más bajas de Zr en suelos promedian 140 ppm, y oscilan entre 70 y 200 ppm, mientras que las concentraciones más altas, tienen una media de 310 ppm (Kabata-Pendias, 2011). Los sedimentos activos de varios países de Europa contienen entre 30 y 2.600 ppm (Reimann y de Caritat, 1998). Por lo tanto, la mayoría de las muestras analizadas contienen Zr en una concentración dentro del rango de suelos, y todas dentro de los valores de sedimento.

Las fuentes naturales de Zr se consideran más importantes que las antropogénicas (Reimann y de Caritat, 1998). El Zr forma varios minerales, incluyendo el circón (silicato de Zr) y, el más raro, badeleyita (óxido de Zr). Puede sustituir al Ti en ilmenita y rutilo, y también está presente a niveles traza en clinopiroxeno, anfíbol, mica y granate. Rocas ígneas félsicas generalmente se enriquecen en Zr con respecto a las máficas, especialmente intrusivas (Watson, 1979). Está relacionado a minerales pesados detríticos como el circonio y esfeno en sedimentos (Nicholls y Loring, 1962). La concentración de Zr en greywacka es típicamente mayor que en arenisca, pizarra y caliza (McLennan y Murray, 1999). Por su parte, las fuentes antropogénicas de Zn incluyen precipitación nuclear y polvo de cerámicas y vidrios (Reimann y de Caritat, 1998). Así, las concentraciones algo elevadas de Zr en las muestras analizadas se deben a las características litológicas de la zona de estudio, dada la abundancia de rocas félsicas intrusivas.

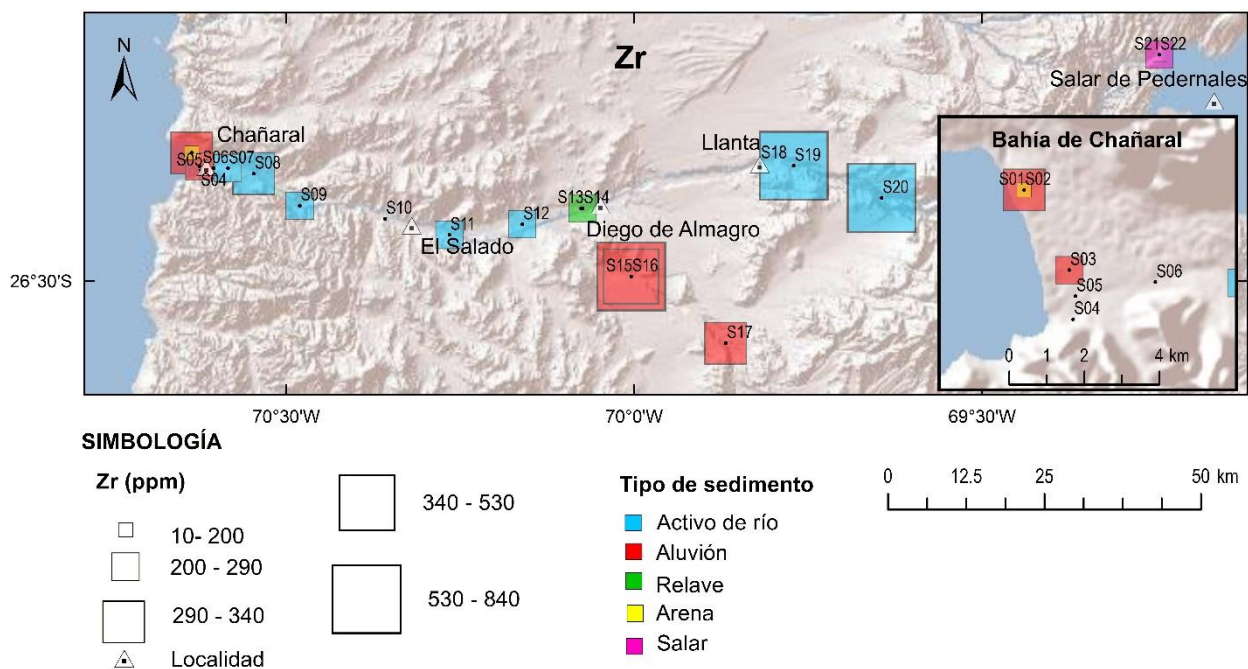


Figura 3.59 Concentración gráfica relativa de Zr, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.7 Sr

La media de contenido de Sr en el total de las muestras de sedimento es de 750 ppm. La concentración mínima se obtuvo en la muestra de sedimento activo S06 con 430 ppm y la concentración máxima la posee S02, arena de playa, con 1.500 ppm (Figura 3.60). Las muestras de sedimento activo promedian 740 ppm de Sr, valor muy similar a la media total. La muestra con menor contenido es S06 y, la de mayor, es S20, ubicada más al oriente de la zona de estudio, con 960 ppm. Existe una clara tendencia a disminuir la concentración de Sr en los sedimentos activos, en sentido oeste de acuerdo al caudal del río Salado. Sin embargo, en las muestras de sedimento del aluvión no se observa tal tendencia, pues los valores de contenido de Sr son variados en las dos zonas estudiadas: quebrada de la Angostura y costa de Chañaral. Este grupo promedia 670 ppm, cifra que está por debajo del promedio total, y posee su mínimo contenido en S01 y, su máximo, en S03, ambas ubicadas en la costa de Chañaral.

Las muestras S21 y S22, sedimentos pertenecientes al salar de Pedernales, contienen 470 y 710 ppm de Sr, ambas por debajo de la media total, pero con concentraciones relativamente distanciadas entre sí. Por otro lado, la muestra de relave contiene uno de los mayores contenidos de este elemento, con 1.060 ppm. La muestra de arena supera por más del triple a aquella con menor concentración de todas, pues alcanza el 1.500 ppm y también a la muestra de aluvión que la sobrepasa en la costa de Chañaral, la segunda con el menor contenido de Sr del total, que contiene solo 450 ppm.

Las concentraciones medias de Sr en la corteza terrestre, la corteza superior expuesta y los suelos son de 370, 340 y 240 ppm, respectivamente (USEPA, 1995; Capo *et al.*, 1998; ATSDR, 2004). La concentración media de Sr en suelos europeos es de 95

ppm y varía de 6 a 2.010 ppm, mientras que, en sedimentos, el promedio es de 126 ppm, con un rango de 31 a 1.352 ppm (Salminem, 2005). Se han notificado niveles medios de Sr de hasta 225 ppm para sedimentos de ríos contaminados por viejas explotaciones mineras en Escocia (Davidson *et al.*, 2005). Así, todas las muestras analizadas contienen Sr en valores dentro de los rangos de suelos y sedimentos europeos, pero más cercanos a la cota superior de los mismos.

En la corteza terrestre se encuentra fundamentalmente como celestita (sulfato de Sr) o estroncianita (carbonato de Sr). El Sr se puede liberar en el aire, principalmente como óxido que se transforma con rapidez en hidróxido o carbonato y vuelve al suelo por deposición. Los procesos naturales que liberan Sr son la meteorización de rocas, arrastre de partículas y espuma marina (mostrando niveles mayores de Sr en sedimentos costeros), pero también puede liberarse como resultado de las actividades humanas como la molienda y procesamiento de compuestos de Sr, combustión de carbón y uso de fertilizantes fosfatados (WHO, 2010). Además, el Sr tiene una movilidad moderada en suelos y sedimentos, pues se adsorbe moderadamente a óxidos metálicos y a la superficie de arcillas y otros minerales (Hayes y Traina, 1998; Sahai *et al.*, 2000). Por tanto, las muestras que se estudian presentan concentraciones de Sr que se asocian a fuentes naturales, como también a cierta contaminación proveniente de la actividad minera. Las muestras costeras presentaron altos contenidos del metal por influencia de la espuma marina, en especial la muestra de arena.

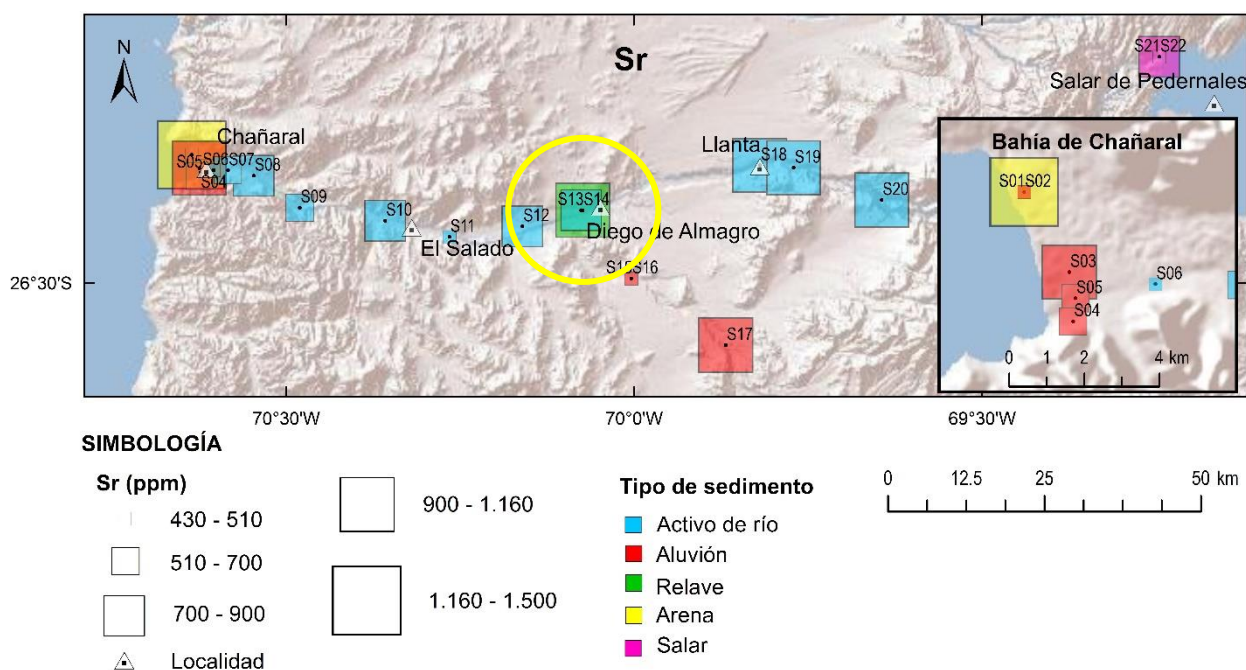


Figura 3.60 Concentración gráfica relativa de Sr, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14).

3.2.1.2.8 Rb

El promedio de Rb en el total de muestras es de 180 ppm. De todas ellas, la menor concentración se encuentra en la muestra de relave (S14) en la que no se detectó dicho elemento, mientras que la mayor concentración se halla en S15, sedimento de aluvión ubicado en la quebrada de la Angostura, al sur de Diego de Almagro (Figura 3.61). Las muestras de sedimento activo promedian 180 ppm, valor que coincide con la media total, donde S06 y S11 contienen Rb en menor concentración, con 150 ppm y se localizan en Chañaral y al este de El Salado, respectivamente; por su parte, S13, ubicada al oeste de Diego de Almagro, contiene la mayor concentración, con 230 ppm. No se observa una tendencia a aumentar ni disminuir el Rb en este tipo de muestras, pero en los sedimentos de aluvión se observa una diferencia entre las muestras costeras y las de la quebrada de la Angostura, pues en Chañaral la concentración del elemento es menor en relación a las muestras de la quebrada. En este grupo de muestras, la media de contenido de Rb es de 190 ppm, levemente mayor al promedio total, en las que S01, ubicada en la zona costera, tiene el mínimo valor con 130 ppm, y S17, en la quebrada de la Angostura al sur de Diego de Almagro, posee el máximo con 270 ppm.

Las concentraciones de las dos muestras de salar son coincidentes, ya que ambas contienen 190 ppm de Rb, encontrándose levemente más ricas en este elemento que el promedio del total de muestras. La muestra de relave no contiene Rb detectable y la muestra de arena contiene 180 ppm, igual al valor promedio, pero mayor al sedimento de aluvión al que se le asocia, el que posee 130 ppm.

Los valores promedios mundiales de Rb en suelos varían entre 18 y 116 ppm (Kabata-Pendias, 2011) mientras que, en sedimentos activos de algunos países europeos, la concentración de Rb varía entre 4 y 597 ppm (Reimann y de Caritat, 1998). Considerando estos valores, la concentración del elemento en las muestras del presente estudio están dentro del rango de sedimentos activos, pero algunas muestras superan al límite superior del rango de suelos.

El Rb no forma minerales por sí mismo, pero está presente en varios minerales comunes en los que sustituye al potasio, como la muscovita y, en menor medida, el feldespato potásico, lepidolita y carnalita. En otros, como la polucita, sustituye al Cs. Por eso, es probable que se concentre más bien en rocas ígneas ácidas y en rocas sedimentarias arcillosas. En suelos, el comportamiento del Rb se controla principalmente por la adsorción de minerales arcillosos y materia orgánica (Kabata-Pendias, 2011). Se asocia a depósitos de Sn tipo greisen (Pokorny, 1975), y se encuentra enriquecido en la mayoría de las zonas de mineral de depósitos de pórfidos de Cu (Armbrust *et al.*, 1977). Por tanto, la presencia de Rb en la zona de estudio se debe mayormente a procesos naturales de erosión de rocas ricas en minerales que contienen Rb, además de tratarse de un sector con importante mineralización metálica en pórfidos cupríferos.

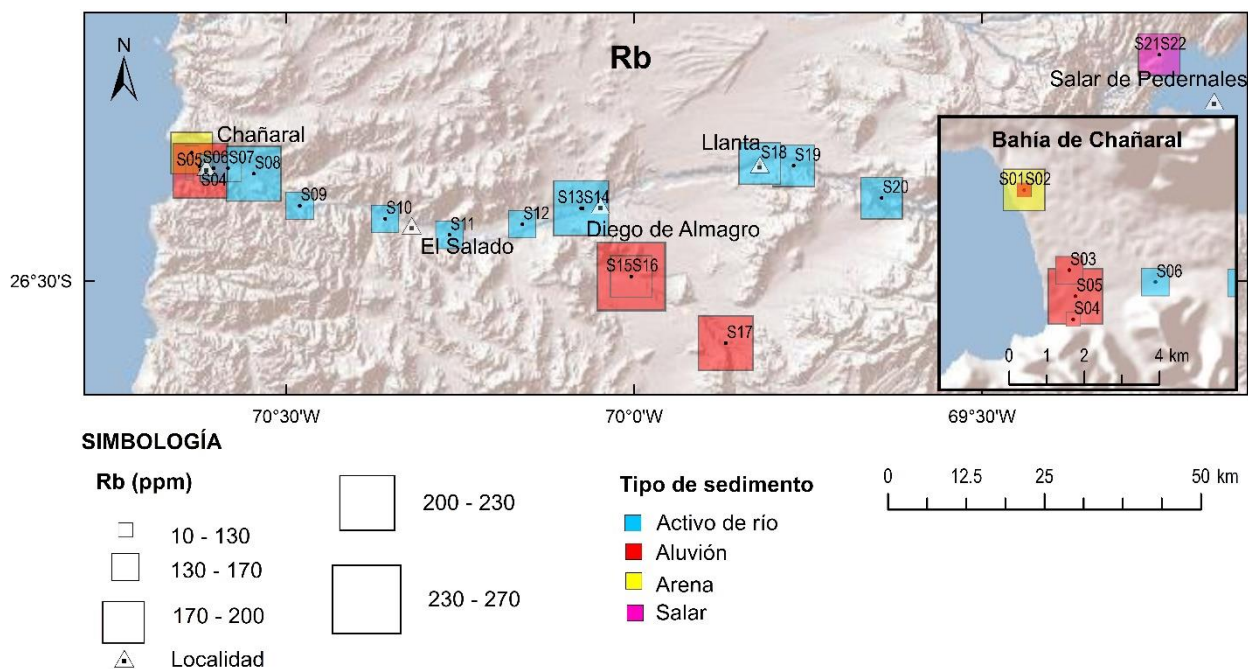


Figura 3.61 Concentración gráfica relativa de Rb, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.9 Zn

El contenido de Zn en todas las muestras entrega un promedio de 140 ppm. En seis no se detectó este elemento: en la muestra de relave, la de arena y cuatro muestras de sedimento activo de río. Por el contrario, S03, sedimento de aluvión ubicado en la costa de Chañaral, contiene 300 ppm siendo la de mayor concentración (Figura 3.62).

Las muestras de sedimento activo promedian 110 ppm de Zn, menos que la media total, considerando las cuatro que no lo poseen en cantidades detectables: S12, entre El Salado y Diego de Almagro, y S18, S19 y S20, las tres más orientales en el cauce del río Salado, desde Llanta hacia el este. Por el contrario, la muestra con mayor Zn es S08, con 230 ppm, ubicada a 7 km al este de Chañaral, aproximadamente. Dado lo anterior, se observa una tendencia a aumentar la concentración de Zn de este a oeste a favor de la dirección y sentido del caudal del río Salado. No obstante, las muestras de aluvión no presentan una correlación en el contenido de este elemento, pues los valores entregados son variados entre sí con respecto a la ubicación de las muestras. Estas promedian 220 ppm, valor que se encuentra sobre el promedio total, de las cuales S04 y S16, una ubicada en la costa y otra en la quebrada de la Angostura, poseen el menor contenido con 180 ppm, mientras que S05, de la zona costera, es la que tiene la mayor concentración con 240 ppm.

Como se mencionó, las muestras de relave y de arena no contienen Zn en concentraciones detectables. Así, la muestra de aluvión que sobreyace a la de arena contiene más del elemento, llegando a los 190 ppm. Por su parte, las muestras de salar S21 y S22 contienen 200 y 180 ppm, respectivamente, muy similares entre sí y por sobre el promedio del total de muestras.

Las concentraciones de Zn en los sedimentos del suelo dependen en gran medida de influencias geológicas y antropogénicas locales, de manera que son muy variables. Naturalmente, se encuentran entre 10 y 300 ppm en el suelo y hasta 100 ppm en sedimentos. En muestras con contaminación antropogénica se obtienen concentraciones de Zn de hasta 35.000 ppm en el suelo (WHO, 2001.c). Así, el contenido de Zn que se encontró en las muestras analizadas, está dentro del rango de suelos, y sobrepasa en su mayoría el de sedimentos, en especial en las muestras de aluvi6n.

Como consecuencia de la adsorci6n de sustancias orgánicas y otros minerales inorgánicos, el Zn es precipitado de las aguas y, por lo tanto, enriquecido en sedimentos (Malle, 1992). Niveles superiores a los entregados anteriormente, se pueden atribuir a la presencia natural de minerales con concentraciones elevadas de zinc, por ejemplo, producto de erosi6n de minerales con contenido de Zn; a fuentes antropogénicas, por ejemplo, la extracci6n e instalaciones de producci6n de Zn, producci6n de hierro y acero, corrosi6n de estructuras galvanizadas y combusti6n de carb6n; o a procesos abi6ticos y bi6ticos (WHO, 2001.c). En este caso, la fuente a la que se atribuye el contenido de Zn en las muestras es natural, dada la variedad mineral6gica de la zona de estudio, que incluye anomalías de metales que han llevado al desarrollo de la minería.

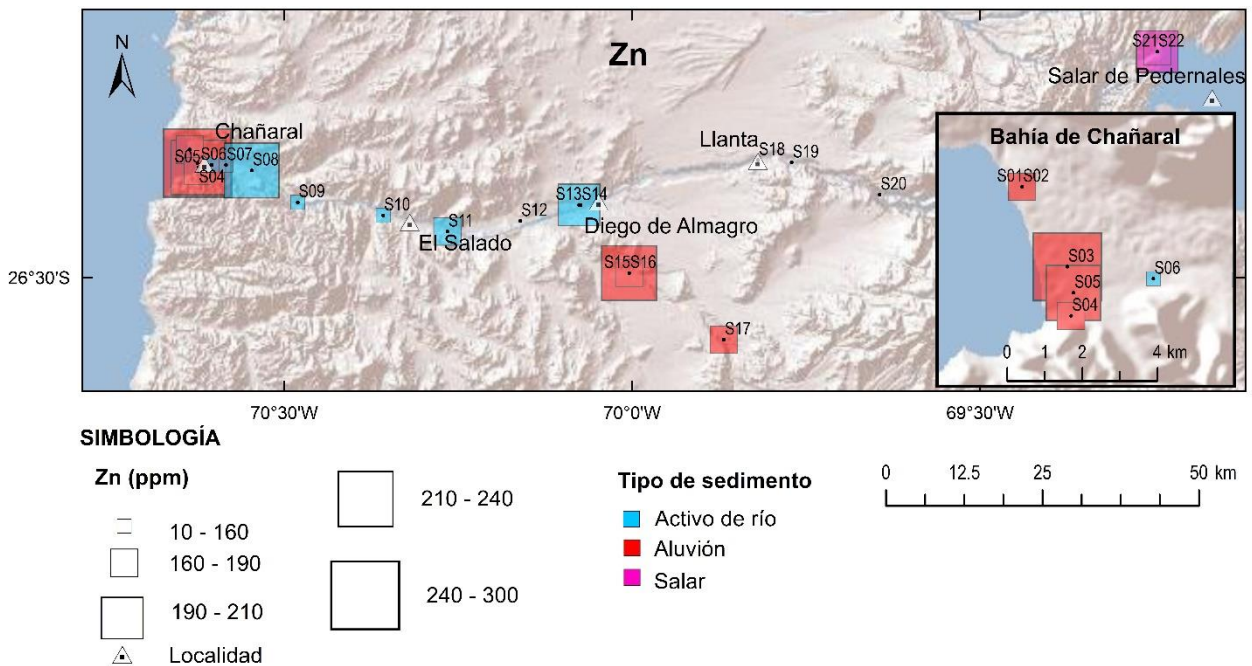


Figura 3.62 Concentraci6n gráfica relativa de Zn, en ppm, con la distribuci6n espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras.

3.2.1.2.10 Co, Mo, P, Y y As

Estos cinco elementos traza se obtuvieron puntualmente en una o dos muestras analizadas.

El Co se encuentra presente solo en la muestra de arena con 790 ppm. Ademá, la misma muestra contiene 350 ppm de Mo, elemento que también se concentra en la

muestra de relave, con 1.110 ppm, lo cual responde a lo esperado considerando que el Mo es un metal secundario que se extrae de la minería asociada al Cu como la que se desarrolla en los alrededores de la zona de estudio. Por su parte, el P se encuentra con un 7.850 ppm en S07, sedimento activo ubicado al este de Chañaral, y en S14, relave, con 6.370 ppm. El Y se halla en S15, sedimento de aluvión que se extrajo de la quebrada de la Angostura al sur de Chañaral, con 90 ppm, y el As está presente en la muestra de relave, con 820 ppm.

3.2.1.3 Resumen

3.2.1.3.1 Sedimentos activos y de salar

La Figura 3.63 y la Figura 3.64 entregan la variación en la concentración de los elementos hallados en las muestras de sedimento activo y de salar, a lo largo de la cuenca del río Salado, representada por la ubicación geográfica según la coordenada UTM este. En la Figura 3.63 se observa la variación de los elementos mayores, y en la Figura 3.64, de los elementos traza. En todas ellas se observa una distribución sin tendencia aparente en la concentración de los elementos, llegando algunas a ser sumamente aleatorias como el Cu, por lo que hacer un estudio acabado y más detallado de cada uno de los elementos se presenta como una tarea difícil y sin resultados concluyentes.

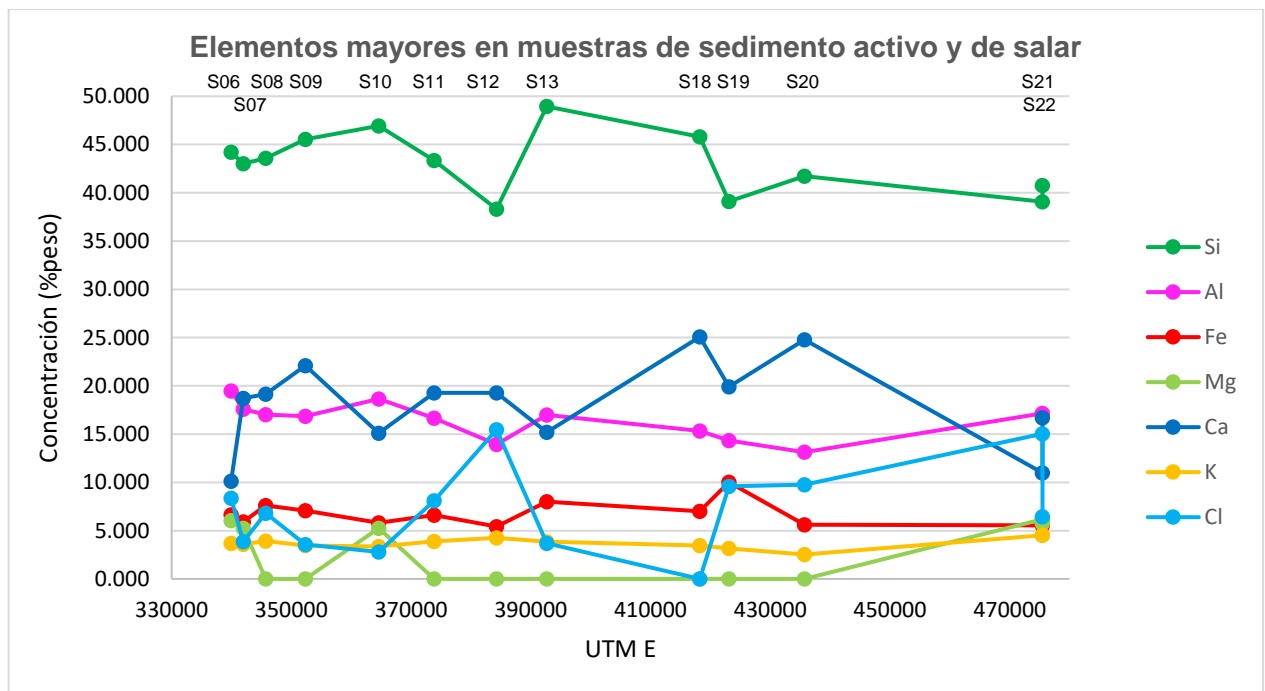


Figura 3.63 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de sedimento activo y de salar.

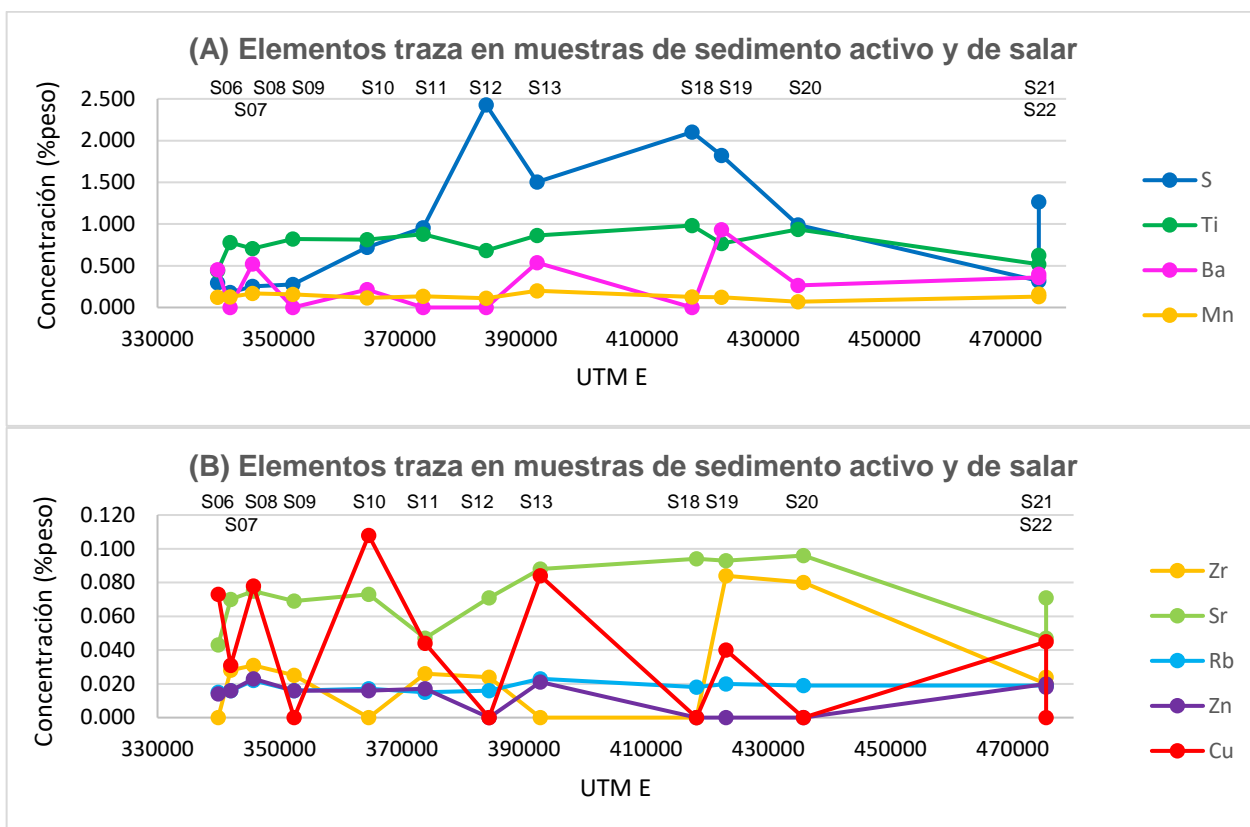


Figura 3.64 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de sedimento activo y de salar. (A) Elementos traza con concentraciones menores a 2,5% en peso. (B) Elementos traza con concentraciones menores a 0,12% en peso.

3.2.1.3.2 Sedimentos de aluvión

Por su parte, los sedimentos de aluvión se distribuyen en dos zonas particulares: en la bahía de Chañaral y en la quebrada de la Angostura, lugares que se encuentran distanciados por 64 y 80 km en línea recta, por lo que solo se procedió a hacer una comparación por zona.

Los elementos que se presentan en concentraciones similares en los dos sectores con muestras de sedimento de aluvión son el Al, Fe, K, Ba, Mn, Sr y Zn, además de aquellos que no fueron detectados en ninguna de las dos zonas, como el Co, Mo, P y As. Por otra parte, aquellos elementos que aumentaron su concentración en su transcurso desde la quebrada de la Angostura hacia Chañaral, son el Ca, Cl y S, pues en la bahía se encontraron valores mayores, además del Cu que pasó de estar ausente en la quebrada de la Angostura a presentarse con valores entre 0,065 y 0,209% en peso en la bahía de Chañaral. Los otros elementos que se hallaron en los sedimentos de aluvión son el Si, Mg, Ti, Zn, Zr y Rb, que están en concentraciones menores en las muestras de Chañaral con respecto a las de la quebrada de la Angostura. También se halló Y pero en solo una muestra de aluvión tomada en la quebrada de la Angostura.

3.2.1.3.3 Relave

La muestra de relave presentó concentraciones de elementos que se mantienen dentro del rango de contenido de todas las muestras. Este es el caso del Si, Al y K, de los elementos mayores y de los elementos traza Ti, Ba y Zr.

Por otra parte, un conjunto de elementos se concentró en valores menores al obtenido en los otros tipos de muestras. En él se hallan los elementos mayores Mg, Ca y Cl, y los elementos menores Mn, Rb y Zn, de los cuales solo el Ca y el Mn fueron detectados por el instrumento, mientras que los otros elementos estaban por debajo del límite de detección.

El último grupo de elementos que se pudo diferenciar está compuesto por el Fe, S, Sr, Cu, Mn, P y As, y tienen en común hallarse en concentraciones mayores al resto de las muestras. En particular, los elementos Fe, S, Cu, Mo y P en la muestra de relave tienen la mayor concentración de todas las muestras. Los elementos Mo y P tienen la particularidad de encontrarse solo en esta muestra y en una más del total de muestras. Si bien, el mayor contenido de Sr de todas las muestras no está en la muestra de relave, esta es la tercera con mayor contenido. El As, por su parte se concentró de forma detectable solo en esta muestra.

3.2.1.4 Otros análisis

3.2.1.4.1 Análisis multivariante

Con el fin de determinar el grado de asociación lineal existente entre elementos químicos, se generó una matriz de correlación que incluye a los elementos mayores y a los traza principales (S, Ti, Ba, Mn, Cu, Zr, Sr, Rb y Zn). La Tabla 3.15 detalla el coeficiente de correlación para cada par de elementos, destacándose en rojo los que tienen una muy alta correlación, en amarillo los de alta correlación y en verde los de media correlación.

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.

| | Si | Al | Fe | Ca | Mg | K | Cl | S | Ti | Ba | Mn | Cu | Zr | Sr | Rb | Zn |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Si | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | 0,70 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | -0,06 | 0,23 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0,66 | -0,87 | -0,28 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 0,08 | 0,48 | -0,24 | -0,42 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| K | 0,43 | 0,20 | -0,28 | -0,42 | 0,00 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| Cl | -0,74 | -0,63 | -0,28 | 0,39 | -0,01 | -0,06 | 1,00 | | | | | | | | | |
| S | 0,03 | 0,13 | 0,58 | -0,32 | -0,37 | 0,17 | -0,21 | 1,00 | | | | | | | | |
| Ti | -0,16 | -0,50 | 0,17 | 0,61 | -0,56 | -0,34 | -0,20 | 0,00 | 1,00 | | | | | | | |
| Ba | 0,22 | 0,19 | 0,35 | -0,36 | 0,02 | 0,14 | -0,06 | -0,05 | -0,22 | 1,00 | | | | | | |
| Mn | -0,18 | 0,02 | 0,09 | 0,12 | 0,27 | -0,33 | 0,12 | -0,56 | -0,03 | 0,15 | 1,00 | | | | | |
| Cu | 0,26 | 0,51 | 0,37 | -0,49 | -0,10 | 0,10 | -0,33 | 0,68 | -0,34 | 0,03 | -0,41 | 1,00 | | | | |
| Zr | -0,16 | -0,22 | 0,07 | 0,07 | 0,02 | -0,18 | 0,19 | -0,01 | 0,17 | 0,22 | -0,13 | -0,27 | 1,00 | | | |
| Sr | 0,33 | -0,13 | 0,10 | -0,13 | -0,41 | 0,36 | -0,22 | 0,45 | 0,06 | 0,29 | -0,40 | 0,16 | 0,07 | 1,00 | | |
| Rb | 0,09 | -0,23 | -0,28 | 0,19 | 0,13 | 0,05 | 0,11 | -0,70 | 0,24 | 0,33 | 0,50 | -0,75 | 0,25 | -0,11 | 1,00 | |
| Zn | 0,11 | 0,42 | -0,02 | -0,27 | 0,55 | -0,09 | -0,03 | -0,52 | -0,32 | 0,11 | 0,79 | -0,13 | -0,21 | -0,45 | 0,35 | 1,00 |

Son pocos los pares de elementos que presentan una correlación positiva, y todavía menos los que tienen una correlación suficiente que se pueda destacar. Esto justifica que es difícil determinar un origen en común para grupos de elementos. Solo el par Zn-Mn presentó una muy alta correlación, que se puede asociar a que su origen es similar, tanto por la meteorización de rocas como la mineralización metálica natural existente en la zona.

Los elementos Si y Al tienen una alta correlación asociada a que son los más abundantes en sedimentos. Se encontraron elementos que también tienen alta correlación probablemente debida al aporte de los depósitos de relave y de la mineralización metálica. Este es el caso de S-Fe, Cu-S y Cu-Al. Otros pares con alta correlación son Ti-Ca, Rb-Mn y Zn-Mg. Los que tienen una media correlación son Mg-Al y Sr-S.

3.2.1.4.2 Movilidad iónica

A modo de discusión se procedió a comparar los resultados obtenidos con el diagrama binario que muestra la solubilidad de los elementos mostrado en la Figura 3.36 de la sección 3.1 *Geoquímica de aguas*. El gráfico entrega el potencial iónico mediante la relación entre carga iónica y radio iónico ($IP=Z/r$), y diferencia tres zonas principales: potencial iónico bajo ($IP<3$), intermedio ($IP=3-12$) y alto ($IP>12$). En el primer caso (Grupo 1) se encuentran los cationes solubles, dentro de los que se destacan el Na, K, Ca, Li, Ba, Sr, Fe, Mn y Mg. En el segundo caso (Grupo 2), están los cationes hidrolizados insolubles como el Mn, Si, Al, Fe, Mn, Mg y tierras raras. Finalmente, en el tercer caso (Grupo 3) están los aniones complejos solubles como el B, P y S.

Es de esperar que los elementos del segundo grupo, es decir, cationes hidrolizados insolubles, se encuentren en mayor concentración en las muestras de sedimento. En efecto, el Si, Al, Fe, Mg y Mn presentan altas concentraciones en los sedimentos de la cuenca del río Salado y, de forma general, los elementos de los otros

grupos de iones solubles, se encontraron en concentraciones menores, en pocas muestras, o ausentes. Hay algunas excepciones como el K y Ca, cuyo contenido es alto dado el contexto geológico de la zona de estudio con la influencia del salar de Pedernales.

3.2.1.5 Normativa internacional

3.2.1.5.1 Introducción

En Chile, el desarrollo de normas o valores de referencia en suelo se encuentra aún pendiente, con algunos avances como el mostrado en la región de Arica, en donde se desarrolló un Plan de Intervención que define un límite máximo para el plomo en 400 mg/kg y para el arsénico en 20 mg/kg (Gobierno Regional Arica y Parinacota, 2009). Sin embargo, estos datos no son suficientes para llevar a cabo un estudio completo de la presencia de elementos químicos y metales en concentraciones anómalas que impliquen riesgo ambiental o de salud humana. Es por ello que se recurrió a las investigaciones internacionales.

Muchos países han determinado valores de referencia para suelos con el fin de identificar sitios contaminados y remediar el daño. No obstante, los estándares propuestos difieren ampliamente entre distintas naciones. Provoost *et al.* (2006) estudiaron los rangos de referencia para suelos industriales de 10 países: Gran Bretaña, Francia, Holanda, Bélgica, Alemania, Suiza, Noruega, Suecia, Estados Unidos y Canadá (Figura 3.65).

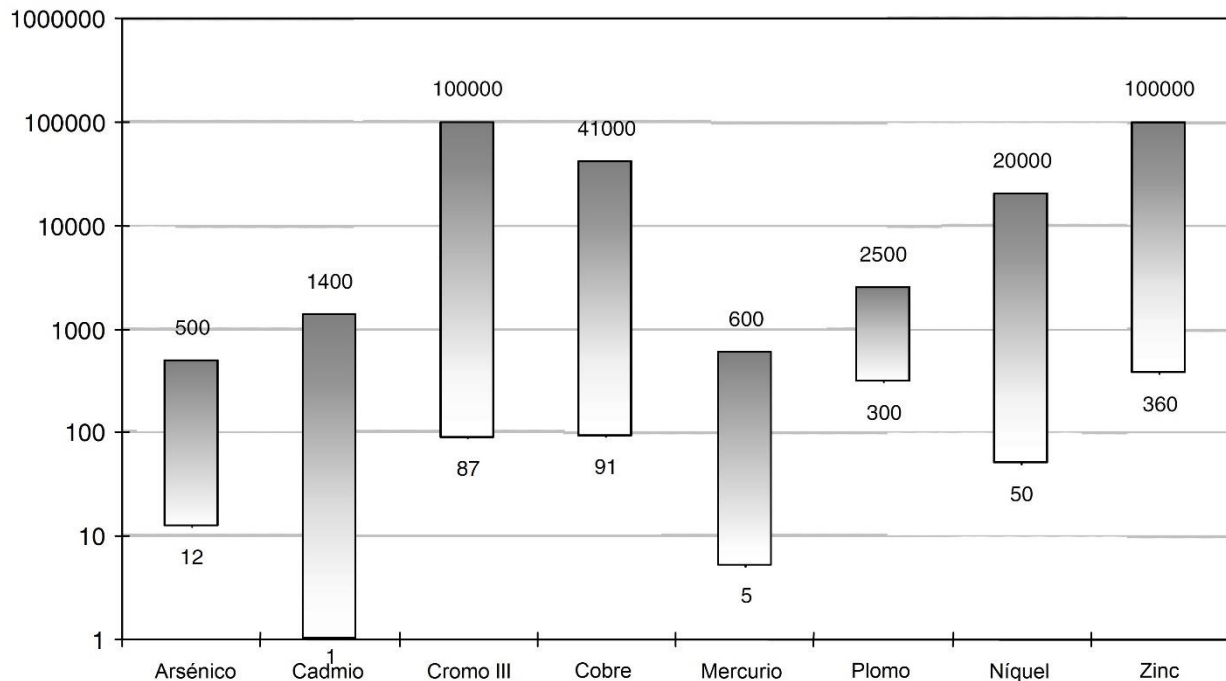


Figura 3.65 Variación (mínimo y máximo) de valores de referencia para suelos industriales de ocho elementos en diez países (Provoost *et al.*, 2006).

Para el presente estudio se utilizó, de forma comparativa, los valores de referencia de calidad de suelo de Canadá (CCME, 2007) y Brasil (CONAMA, 2009), que se muestran en la Tabla 3.16. Los estándares de Canadá fueron escogidos por su amplia utilización en otros estudios asociados a calidad del medio ambiente, por ser uno de los países con mayor restricción en cuanto a niveles de concentración de metales y por definirse con el fin de protección de receptores ecológicos en el medio ambiente y para la protección de la salud humana. Por su parte, Brasil entrega datos que representan una realidad latinoamericana cercana a Chile y, además, han sido utilizados por autoridades chilenas, como en el Reporte anual del Plan de Salud de polimetales de Arica y Parinacota, generado por SEREMI en el año 2011 (SEREMI MINSAL, 2011).

Los estándares canadienses de calidad de suelos hacen una diferencia en el tipo de suelo que se está estudiando: agrícola, residencial o parques, comercial e industrial, por lo tanto, para cada elemento existen cuatro valores de referencia asociados. La única excepción es el azufre, el cual sólo presenta límites permitidos para suelo agrícola. De la misma forma, la norma de Brasil trata con tres tipos diferentes de suelo: agrícola, residencial e industrial, teniendo tres valores de referencias asociados a cada elemento.

Los tipos de suelo se clasifican de acuerdo a su uso en (CCME, 2007):

- Agrícola: donde la actividad primaria es la agricultura o el cuidado de ganado, e incluye tierra agrícola que proporciona un hábitat para vida silvestre residente y transitoria, además de flora nativa y granjas.
- Residencial/parques: donde la actividad primaria es la residencial o recreacional. Parque se define como la zona de contención entre las áreas de residencia y campamento, y excluye las tierras silvestres como parques nacionales o provinciales.
- Comercial: donde la actividad principal es comercial (por ejemplo, centros comerciales), no residencial o de fábrica, y no incluye zonas de cultivo de alimentos.
- Industrial: donde la actividad principal consiste en la producción, fabricación o construcción de bienes, y el acceso público a la propiedad es restringido.

En el análisis de los sedimentos, se encontraron 21 elementos presentes, de los cuales solo seis se detallan en los estándares de calidad de suelo de Canadá y Brasil: As, Ba, Co, Cu, Mo y Zn, mientras que el azufre presenta un solo valor de referencia en la norma de Canadá para suelos agrícolas (Tabla 3.16).

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).

| País | Uso de suelo | Concentración (ppm) | | | | | | |
|--------|-------------------------|---------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | As | Ba | Co | Cu | Mo | S | Zn |
| Canadá | Agrícola | 12 | 750 | 40 | 63 | 5 | 500 | 200 |
| | Residencial/ Parques | 12 | 500 | 50 | 63 | 10 | ND | 200 |
| | Comercial | 12 | 2.000 | 300 | 91 | 40 | ND | 360 |
| | Industrial | 12 | 2.000 | 300 | 91 | 40 | ND | 360 |
| Brasil | Agrícola | 35 | 300 | 35 | 200 | 50 | ND | 450 |
| | Residencial | 55 | 500 | 65 | 400 | 100 | ND | 1.000 |
| | Industrial | 150 | 750 | 90 | 600 | 120 | ND | 2.000 |

3.2.1.5.2 Comparación de estándares con resultados

Considerando que, en todas o en la mayor parte de las muestras de sedimento se detectó la presencia de Ba, Cu, S y Zn (Figura 3.66), se realizaron gráficos de dispersión con la concentración de esos elementos, en los que se agregaron líneas horizontales que indican los límites máximos para los distintos tipos de suelo según las recomendaciones de Canadá y Brasil, en ppm (Tabla 3.16). Por otra parte, el As, Co y Mo solo se detectaron en una o dos muestras de sedimento, por lo que se consideró ineficiente realizar una representación gráfica.

Para el caso del Ba existen cuatro valores de referencia diferentes que se observan en la Figura 3.66. Aquel menos restrictivo es el de Canadá para suelos comerciales e industriales correspondiente a 2.000 ppm. Bajo ese valor se encuentran las muestras S04 y S15, ambas sedimento de aluvión, y claramente, todas muestras sin contenido de bario, S07, S09, S11, S12 y S18; solo estas están bajo el límite recomendado, mientras que las 15 muestras restantes superan el valor de referencia, incluyendo la muestra de arena, de relave, las dos del salar, cinco de aluvión y seis de sedimento activo.

Los otros tres valores de referencia para el Ba son más estrictos: 750 ppm para suelo agrícola de Canadá y suelo industrial para Brasil; 500 ppm para suelo residencial de Canadá y Brasil; y 300 ppm para suelo agrícola de Brasil. Superando estos valores se encuentran las dos únicas muestras con contenido de bario pero que no están bajo la restricción de suelo comercial e industrial de Canadá (2.000 ppm): S04 y S15.

En términos simples, todas aquellas muestras de sedimento con Ba en concentraciones detectables se encuentran por sobre alguna de las restricciones entregadas por Canadá y Brasil.

Los valores de referencia para el Cu son más restrictivos en Canadá que el Brasil. Sin contabilizar las ocho muestras de sedimento en que no se detectó el elemento, se observa que, para suelo industrial con un límite brasileño es de 600 ppm, solo cinco muestras tienen una concentración menor a dicho límite, S03, S07, S11, S19 y S21, una de sedimento de aluvión, uno de salar y tres de sedimento activo (Figura 3.66). De ellas,

solo una se mantiene en los valores recomendados, pero para suelo residencial de Brasil: S07, sedimento activo, mientras que, para suelos agrícolas del mismo país, solamente se encuentran cumpliendo los estándares las muestras que no contienen Cu en concentraciones detectables (S09, S12, S15, S16, S17, S18, S20 y S22).

Si bien, los valores de referencia de Canadá para calidad de suelos son más estrictos a los de Brasil, al aplicarlos se observa que ocurre lo mismo que para suelos agrícolas brasileños, es decir, todas aquellas muestras de sedimento que contienen cobre en valores detectables no cumplen con los estándares canadienses para ningún tipo de suelo (para suelo agrícola y residencial es de 63 ppm, y para suelo comercial e industrial, 91 ppm). En este grupo se incluyen la muestra de arena de playa, la de relave, una del salar de Pedernales, cuatro de sedimento de aluvión y siete de sedimento activo.

El S, particularmente, solo tiene un valor de referencia documentado en Canadá referido a suelo agrícola, y se define en 500 ppm. Considerando que solo una muestra no contiene azufre en concentraciones detectables (S16) todas las otras muestras lo poseen en valores que superan el estándar canadiense, hasta en más de 200 veces su valor, como es el caso de la muestra de sedimento de relave. En este grupo se incluyen la muestra de arena, las de salar, las de sedimento activo, seis de siete de sedimento de aluvión y, por supuesto, la de relave (Figura 3.66).

En el caso del Zn, al igual que en los anteriores, los estándares brasileños son menos restrictivos que los canadienses. En la Figura 3.66 solo se observan los límites de Canadá, dado que los de Brasil están por sobre el rango de concentraciones mostrado en el gráfico (450 ppm para suelo agrícola, 1000 ppm para suelo residencial y 2000 ppm para suelo industrial). Por lo tanto, todas las muestras analizadas cumplen con no sobrepasar el límite brasileño en la concentración de Zn, independiente del tipo de suelo.

Por su parte, los valores de referencia canadienses para suelos comerciales e industriales son de 360 ppm, lo que indica que todas las muestras están bajo este límite. No así para suelos agrícolas y residenciales, donde el estándar es de 200 ppm, por lo que cinco muestras están por sobre este valor: S03, S05, S08, S13 y S15, que corresponden a tres muestras de sedimento activo y dos de aluvión. Además, la muestra de salar S21 se encuentra precisamente en el límite, 200 ppm, por lo que también se consideró parte del grupo de muestras que no cumple con estos estándares de Canadá.

Por lo tanto, las muestras de sedimento con concentraciones de Zn medibles y que se encuentran bajo todos los estándares internacionales son: S01, S04, S06, S07, S09, S10, S11, S13, S16, S17 y S22. Además, no hay que dejar de considerar aquellas que contienen cobre bajo el límite de detección del instrumento de medición: S02, S12, S14, S18, S19 y S20. En total son 16 muestras que incluyen la muestra de arena, la de relave, una de salar, cuatro de aluvión y nueve de sedimento activo.

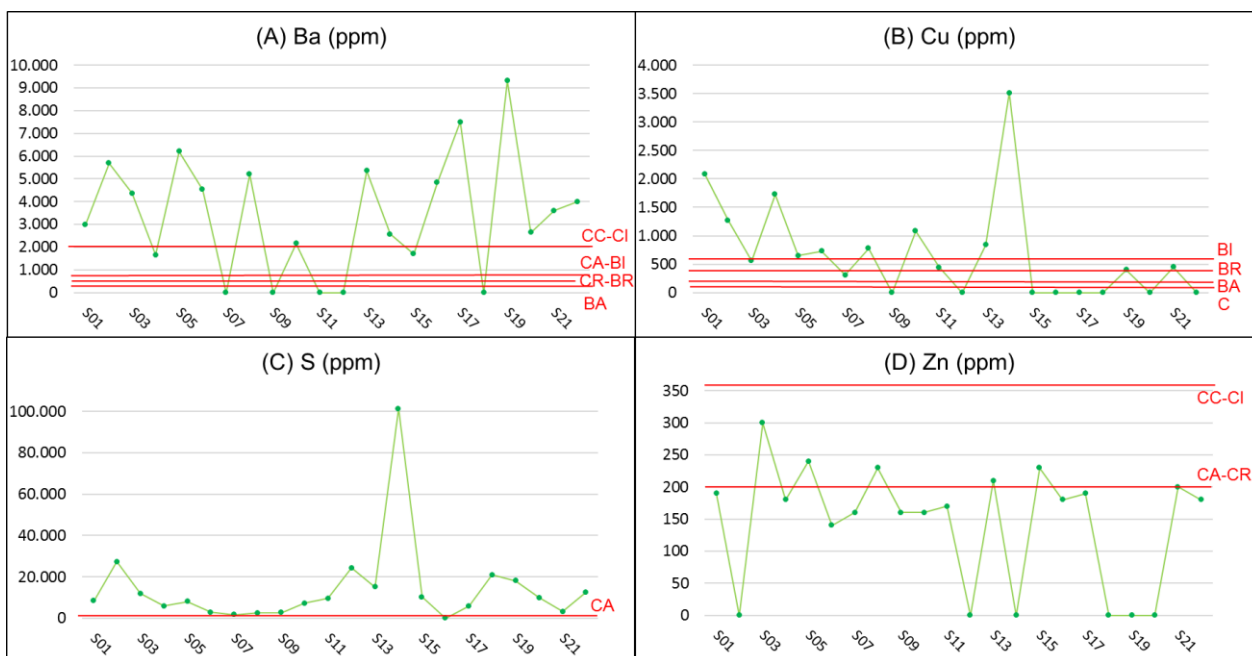


Figura 3.66 Concentración en ppm de (A) Ba, (B) Cu, (C) S y (D) Zn en las muestras de sedimento de aluvión con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial; BA: Brasil, suelo agrícola; BR: Brasil, suelo residencial; BI: Brasil, suelo industrial.

En tanto, el As, Co y Mo se hallaron en dos muestras analizadas: S14, sedimento de relave, y S02, arena de playa (Figura 3.67). El As se concentró en 820 ppm en la muestra de relave, valor que supera a todos los valores de referencia de Canadá y Brasil, considerando que el suelo menos permisivo es el industrial de Brasil, con 150 ppm y los más restrictivos son todos los considerados en los estándares canadienses, con 12 ppm. El Co se encontró en 790 ppm en la muestra de arena superando, también, todos los estándares internacionales, pues estos varían de 35 ppm, en suelo agrícola de Brasil, y 300 ppm en suelo comercial e industrial de Canadá. Por otro lado, el Mo se halló en ambas muestras, con 1.110 ppm en la de relave y 350 ppm en la de arena, ambos valores mayores a cualquier estándar en consideración, ya que el mínimo valor de referencia establecido es el de suelo agrícola de Canadá con 5 ppm, y el máximo es de suelo industrial de Brasil, con 120 ppm.

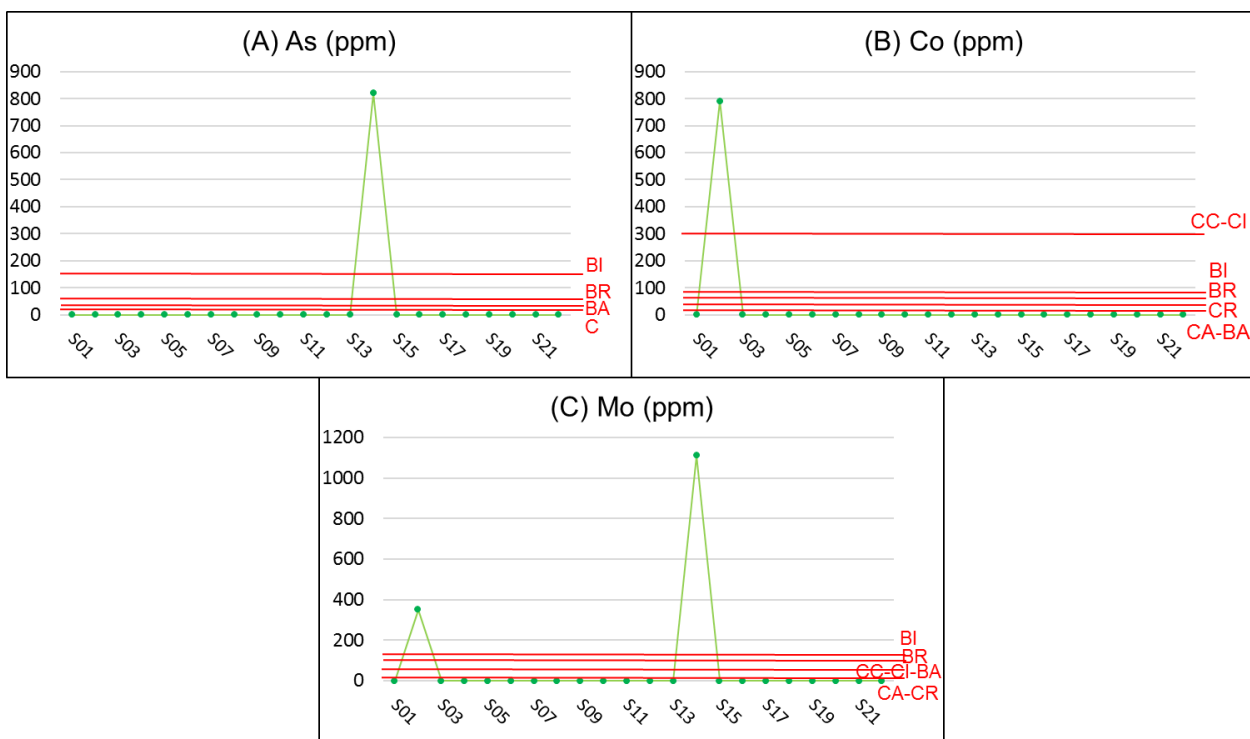


Figura 3.67 Concentración en ppm de (A) As, (B) Co y (C) Mo en las muestras de sedimento de relave (S14) y de arena (S02) con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial; BA: Brasil, suelo agrícola; BR: Brasil, suelo residencial; BI: Brasil, suelo industrial.

En resumen, no existe ninguna muestra de sedimento cuyas concentraciones de los elementos analizados estén bajo los estándares internacionales de Brasil y Canadá, y que, por lo tanto, no signifiquen riesgos para el medio ambiente y la salud humana.

3.2.2 Columna estratigráfica

3.2.2.1 Descripción de columna estratigráfica

Un efecto directo del aluvión fueron los socavones localizados en la bahía de Chañaral que dejaron expuestos los distintos niveles sedimentarios que componen la desembocadura del río Salado permitiendo, así, analizar sus características geológicas y su composición química.

La columna estratigráfica estudiada se ubica al sur de la ciudad de Chañaral (26°20'45"S 70°37'23"W), mide 224 cm en total, y consiste de 10 capas bien definidas, enumeradas desde C01, en la base de la columna, hasta C11 en el techo de la misma. En general, está compuesta de arena fina, blanquecina a parda, destacándose una capa de 8 cm de espesor de color gris verdoso en la mitad superior de la columna. En la Figura 3.68 se observa una fotografía *in situ* de las capas que componen la columna estratigráfica, y la representación de la misma, mientras que una descripción más detallada de las capas de la columna se muestra en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Descripción sedimentológica de las capas pertenecientes a la columna estratigráfica estudiada, ordenadas de techo (C11) a base (C01).

| Muestra | Espesor [cm] | Descripción |
|---------|--------------|---|
| C11 | 50 | Depósito de arena de grano medio a muy fino, con clastos subredondeados a subangulosos y gradación inversa. |
| C10 | 2 | Depósito de color negro y grano fino consolidado. |
| C09 | 10 | Depósito de limo, color pardo rojizo con lentes negras. |
| C08 | 8 | Depósito de color gris verdoso, de arena fina a arcilla, con nivel amarillo irregular en el techo. |
| C07 | 15 | Depósito de arena fina y limo, color pardo. Presenta gradación inversa. |
| C06 | 5 | Depósito de arena blanquecina a amarilla con un límite inferior acanalado. |
| C05 | 35 | Depósito de color pardo rojizo de arena fina a limo con lentes negras. |
| C04 | 8 | Depósito de limo con base irregular, de color pardo. |
| C03 | 4 | Depósito de arena amarilla sobre una capa muy delgada de finos (0,5 cm). |
| C02 | 52 | Depósito de arena amarilla con laminación cruzada incipiente. |
| C01 | 35 | Depósito de arena blanquecina con laminación cruzada incipiente. |

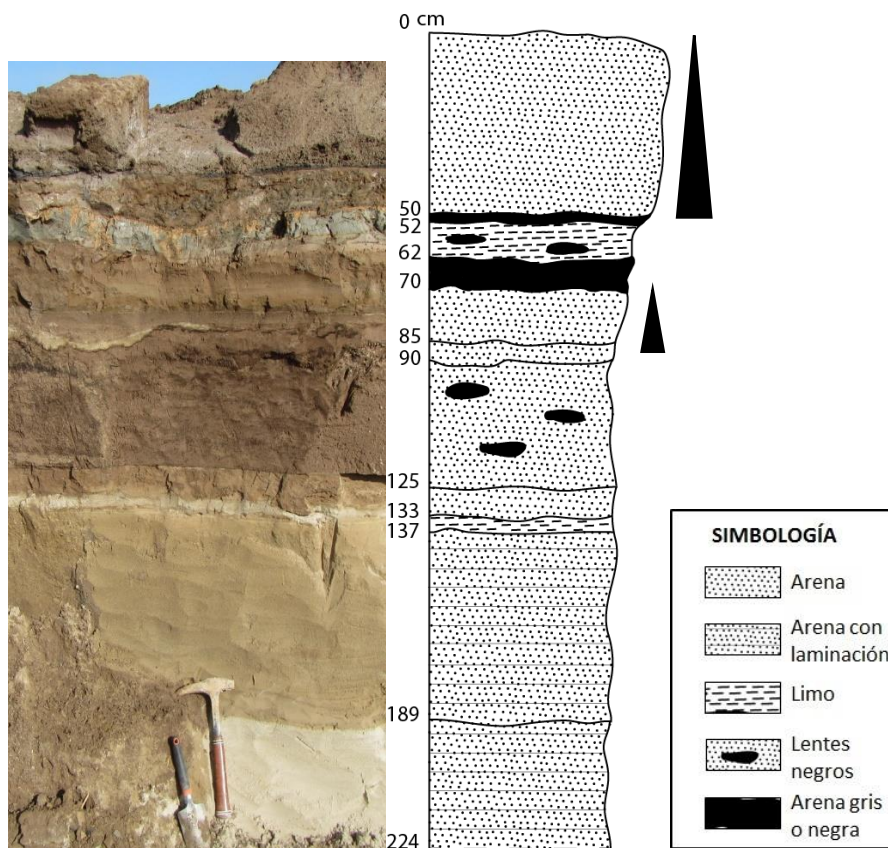


Figura 3.68 A la izquierda, fotografía real de la columna estratigráfica. A la derecha, representación de la columna estratigráfica.

De las capas de la columna estratigráfica, se reconoce el nivel C11 como parte del depósito del aluvión acontecido en marzo de 2015, dadas sus características similares a los depósitos encontrados a lo largo del cauce natural del río Salado, y su ubicación estratigráfica. Por otra parte, el nivel C08 tiene las características propias de un depósito de relave, dado su color verdoso que indica la presencia de minerales de óxidos de cobre.

3.2.2.2 Composición columna estratigráfica

Los resultados del análisis a los niveles estratigráficos se detallan en la Tabla 3.18 con concentraciones en porcentaje en peso. Con los datos obtenidos, se realizaron gráficos de dispersión para cada elemento químico analizado, donde se contrasta la concentración en porcentaje en peso del elemento con la profundidad en la columna estratigráfica (desde la Figura 3.69 a la Figura 3.72).

Tabla 3.18 Resultados de concentración en porcentaje en peso de elementos mayores en sedimentos de la columna estratigráfica.

| Muestra | Si | Al | K | Fe | Mg | Ca | Cl |
|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| C11 | 47,281 | 19,741 | 2,859 | 7,565 | 5,434 | 9,739 | 5,152 |
| C10 | 40,176 | 17,364 | 3,342 | 4,938 | 7,975 | 6,317 | 12,677 |
| C09 | 48,283 | 25,048 | 4,944 | 7,226 | 4,851 | 3,595 | 3,173 |
| C08 | 51,698 | 29,992 | 5,329 | 4,343 | - | 1,033 | 2,783 |
| C07 | 55,540 | 21,101 | 4,251 | 6,567 | - | 4,351 | 5,098 |
| C06 | 56,577 | 21,717 | 4,633 | 4,992 | - | 3,202 | 3,557 |
| C05 | 53,911 | 20,593 | 3,749 | 7,677 | - | 6,888 | 3,101 |
| C04 | 60,533 | 22,498 | 5,320 | 4,602 | - | 5,045 | - |
| C03 | 68,477 | 15,350 | 5,672 | 3,310 | - | 3,547 | 1,738 |
| C02 | 66,838 | 17,548 | 5,925 | 3,146 | - | 5,571 | - |
| C01 | 69,639 | 15,197 | 7,509 | 3,442 | - | 3,042 | - |

Tabla 3.19 Resultados de concentración de elementos traza en sedimentos de la columna estratigráfica.

| Muestra | S (%) | Ti (%) | Ba (%) | Mn (%) | Cu (%) | Sr (ppm) | Zr (ppm) | Rb (ppm) | Zn (ppm) | Mo (ppm) | Otro (ppm) |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| C11 | 0,736 | 0,465 | 0,829 | - | - | 740 | - | 110 | 310 | - | |
| C10 | 5,911 | 0,553 | 0,226 | 0,142 | 0,221 | 1.000 | - | 100 | 480 | - | |
| C09 | 1,092 | 0,716 | 0,687 | 0,080 | 0,188 | 560 | - | 200 | 280 | 100 | Y: 50 |
| C08 | 3,079 | 0,817 | 0,395 | - | 0,413 | 620 | 180 | 140 | 110 | 140 | |
| C07 | 1,064 | 0,764 | 0,684 | 0,114 | 0,313 | 650 | 340 | 160 | 220 | 160 | |
| C06 | 2,717 | 1,192 | 0,672 | 0,161 | 0,444 | 1.090 | - | 180 | - | 100 | |
| C05 | 1,889 | 1,002 | 0,311 | 0,524 | 0,205 | 690 | 270 | 210 | 170 | 170 | |
| C04 | 0,389 | 0,722 | 0,341 | 0,076 | 0,343 | 600 | 330 | 170 | 210 | - | |
| C03 | 0,236 | 0,565 | 0,382 | 0,079 | 0,395 | 650 | 260 | 180 | 190 | - | As: 1.230 |
| C02 | - | 0,351 | - | 0,099 | 0,379 | 780 | - | 290 | 200 | - | Os: 170 |
| C01 | - | 0,651 | - | 0,060 | 0,330 | 650 | - | 220 | 170 | - | Ge: 250 |

Como es de esperar, dado el contexto geológico de la región, los sedimentos están formados, principalmente, por Si y Al, que representan entre el 60 y más del 90% de la composición química total de las muestras.

Se observan variaciones en las concentraciones, en función de la profundidad, suponiendo que con ésta va aumentando también la edad de los depósitos. Sin embargo, no todos los elementos presentan variaciones similares, por lo que se separaron en grupos de acuerdo a su comportamiento con respecto a la profundidad. Si bien, en ningún caso se encontró una tendencia lineal y simple, se intentó agrupar de acuerdo a una aproximación general del gráfico.

Elementos como el Si, K, Cu y Rb tienden a incrementar su porcentaje en peso a medida que se desciende en la columna estratigráfica (Figura 3.69). El Si es el elemento con mayor concentración en todas las muestras estudiadas, con valores que van desde los 40,176% en la capa C10 a 69,639% en la capa basal (C01), mientras que el K se encuentra un orden de magnitud menor al Si, desde 2,859% en la capa más superficial (C11) a 7,509% en la basal (C01). En todas las capas se encuentra concentrado el Cu excepto en C11, la más superficial; y en la C06 alcanza la mayor concentración con 0,444%. El Rb está presente en menor concentración que el Cu, alcanzando su máximo valor en la capa C02, en la base de la columna con 290 ppm, y su mínimo en el nivel C11, cerca del techo de la misma con 100 ppm.

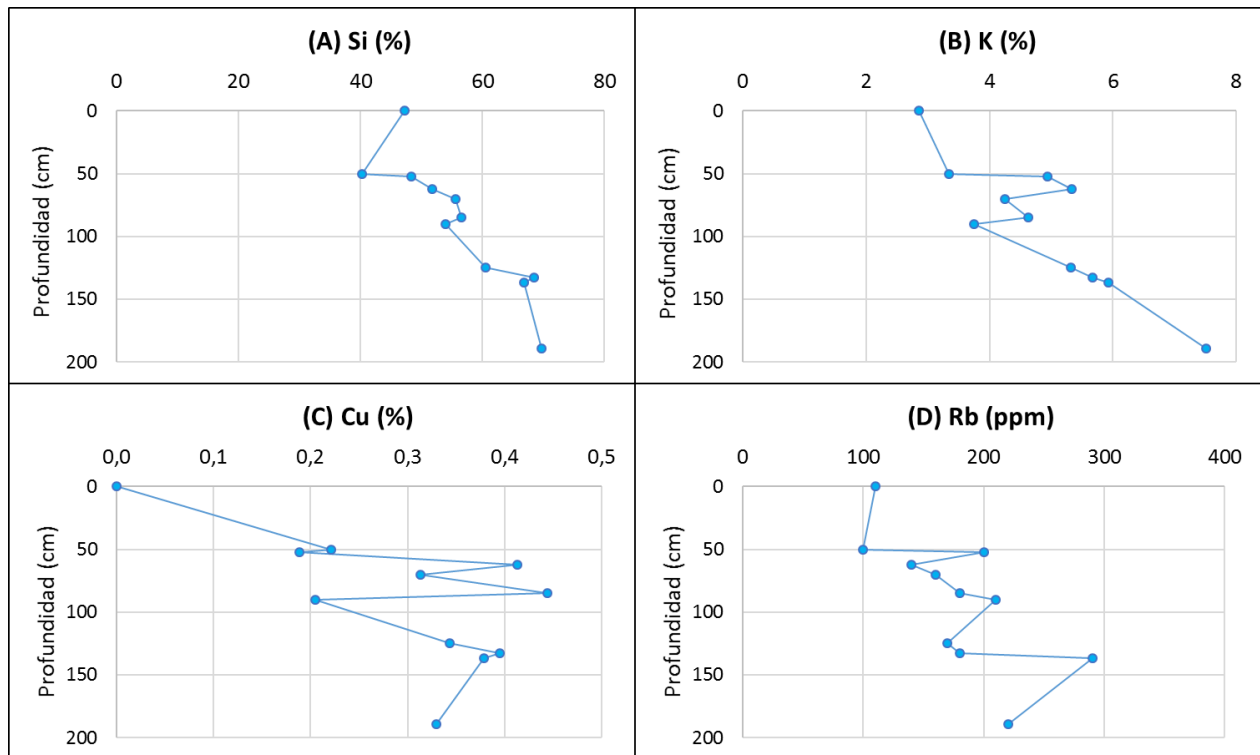


Figura 3.69 Gráficos de dispersión de elementos con tendencia a aumentar su concentración en peso de techo a base. (A) Si. (B) K. (C) Cu. (D) Rb.

Lo contrario ocurre con los elementos Al, Fe, Ca, Cl, S, Ba y Zn, que disminuyen su porcentaje en peso al descender en profundidad en la columna (Figura 3.70). De este grupo, el Al es el elemento con mayor concentración en todas las capas, con 15,197% en el nivel base (C01), su menor valor, y alcanzando su máximo, 29,992%, en la C08. El Fe, Ca y Cl se presentan con un orden de magnitud menor al Al. C05 es la que tiene más contenido en Fe, con 7,677%, y C02 posee menos Fe, 3,146%, mientras que el Ca se concentra más en el nivel superficial C11 con 9,739%, y se presenta en menor cantidad en C08, con 1,033%. Por otro lado, el Cl tiene una concentración mucho mayor en la capa C10, 12,677% que, en el resto de los niveles, y no se detectó en tres de las cuatro capas basales. Tanto el Ba como el S se ausentan en las dos capas más profundas de la columna, y se presentan en mayor concentración en C11 y C10, con 0,829% y 5,911%, respectivamente. Finalmente, el Zn se concentró en todos los niveles excepto C06, y alcanzó 480 ppm en C10.

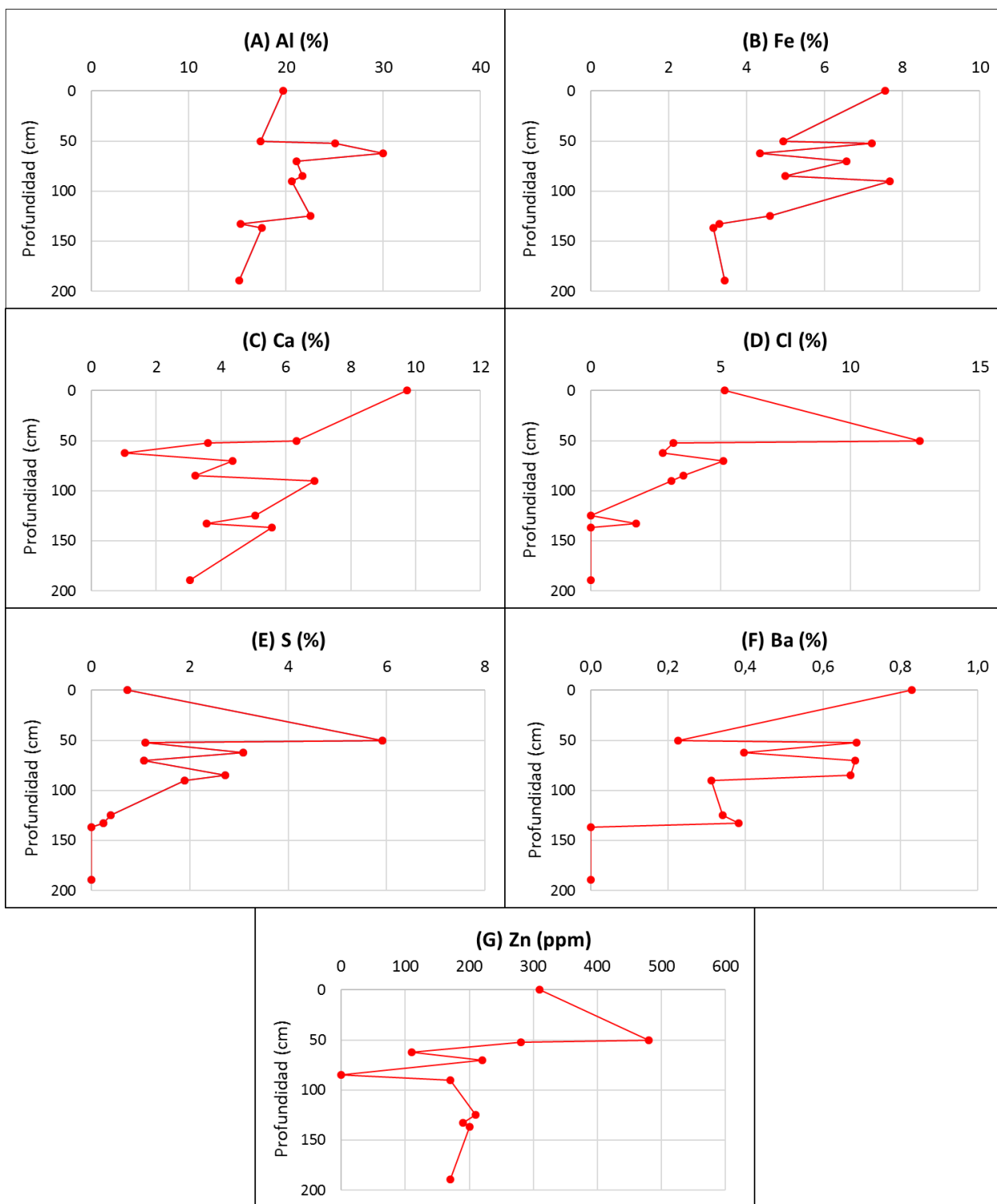


Figura 3.70 Gráficos de dispersión de elementos con tendencia a disminuir su concentración en peso de techo a base. (A) Al. (B) Fe. (C) Ca. (D) Cl. (E) S. (F) Ba. (G) Zn.

Casos particulares son los del Mg, Ti, Sr, Mn, Zr y Mo, pues no se detecta ningún patrón específico (Figura 3.71). El Mg se encuentra presente en las tres capas más someras de la columna estratigráfica, entre 4,851% y 7,975%, mientras que el resto de

las capas más profundas no se detectó. El Ti se encuentra en todos los niveles, mostrando un aumento en su concentración seguido por una disminución de la misma, de techo a base. Su máximo valor es de 1,192% en C06, y su mínimo es 0,351% en C02. El Sr presenta una iteración de aumentos y bajas de concentración a lo largo de la columna estratigráfica, alcanzado su máximo en la capa C06 con 1090 ppm, y el mínimo en C09 con 560 ppm. El Mn también presenta una iteración como la del Sr, ausentándose en C11 y C08 y alcanzando su máxima concentración en C05 con 0,524%. El Zr está ausente en las tres capas más superficiales, en las dos más profundas y una intermedia (C06), y se encuentra en concentraciones entre los 180 ppm en la C08 y 340 ppm en C07. Finalmente, el Mo se comporta muy similar al Zr, pues se ausenta en los dos niveles más someros y en los cuatro más profundos, y se encuentra en bajas concentraciones en el resto de ellos: de 100 ppm en C06 y C09, a 170 ppm en C05.

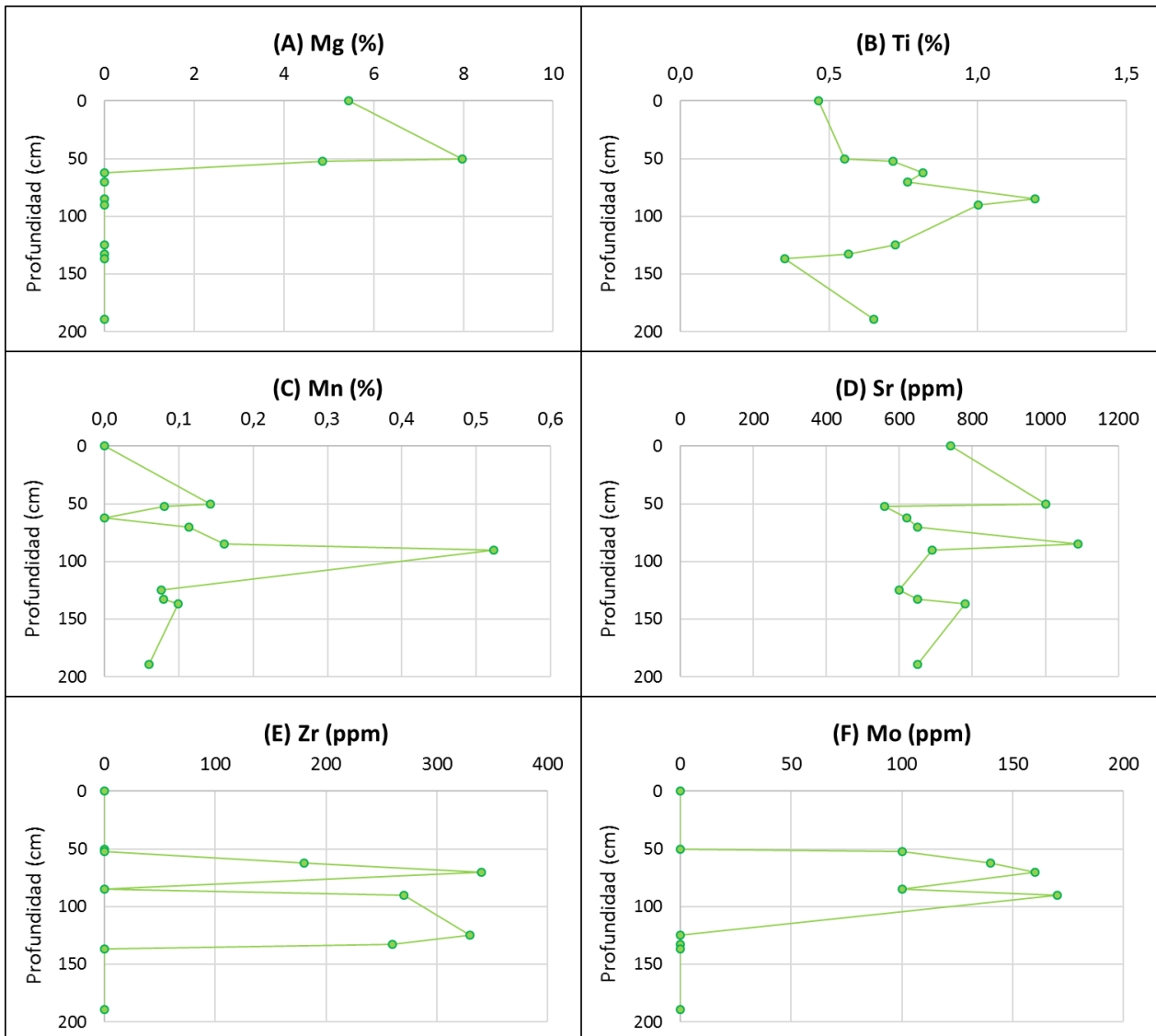


Figura 3.71 Gráficos de dispersión de elementos sin un patrón específico en su concentración en peso con respecto a la profundidad. (A) Mg. (B) Ti. (C) Mn. (D) Sr. (E) Zr. (F) Mo.

Otros, como el Ge, Os, Y y As, se detectaron en forma puntual en alguna capa estratigráfica (Figura 3.72). El Y se halló en el nivel C09 (50 ppm) mientras que los otros nombrados se concentran en las capas más profundas: el As en la C03, el Os en C02 y el Ge en C01. En particular, el As, que podría significar una importancia ambiental, solo se encuentra presente en una capa de 5 cm de espesor, con 1.230 en peso, en la base de la columna. Además, se debe recalcar la ausencia de Pb en todas las muestras analizadas pertenecientes a la columna estratigráfica.

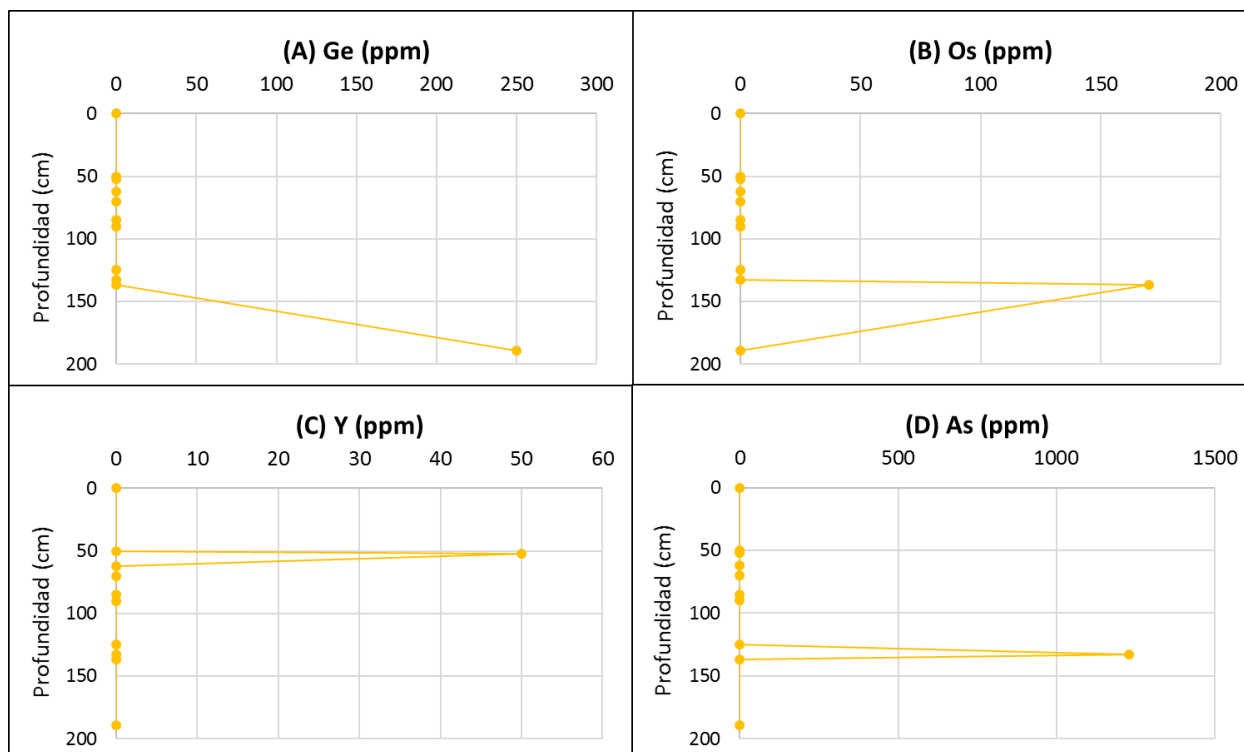


Figura 3.72 Gráficos de dispersión de elementos cuya concentración se detecta en un solo nivel de la columna estratigráfica. (A) Ge. (B) Os. (C) Y. (D) As.

3.2.2.3 Geoquímica de capa superior

El nivel más somero de la columna estratigráfica, C11, se relacionó al evento de aluvión acontecido el marzo del 2015. Es por esto que se considera relevante hacer un estudio más acabado de su composición química, por medio de la concentración encontrada de los elementos que se muestran en la Tabla 3.18 y su comparación con los resultados obtenidos en el análisis de sedimentos de aluvión de la costa de Chañaral (Tabla 3.20).

En la Figura 3.73 se observa la ubicación de la columna estratigráfica, en amarillo, con respecto a las muestras tomadas de sedimento de aluvión, en rojo. La muestra más cercana a la columna es la S04, que corresponde a sedimento de aluvión depositado dentro de una casa particular en la zona sur de Chañaral. Sin embargo, dado el contexto de deposición, la muestra más superficial de la columna estratigráfica, C11, se asocia a la muestra de sedimento de aluvión S05, por ser la más cercana y encontrarse a un nivel

de elevación similar, además de la S03, pues las dos últimas fueron tomadas directamente de socavones que limitan con el mar. Por su parte, la muestra S01 se extrajo a 2 km al norte de la columna estratigráfica.



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.

La Tabla 3.20 entrega los datos obtenidos a partir del análisis de las muestras de sedimento más costeras, junto con el nivel más somero de la columna estratigráfica. Se observa que la mayoría de los elementos encontrados en la muestra C11 se concentran en cantidades similares al resto de las muestras de aluvión, hallándose dentro del rango de valores, pues esto ocurre con el Si, Al, Fe, Mg, Cl, S, Ti, Zr y Sr. Otros elementos como el Ca, Ba y Zn están levemente elevados en este nivel estratigráfico, con respecto a los sedimentos de aluvión, mientras que el K y Rb están en concentraciones ligeramente

menores. Un caso particular es el del Cu, dado que este elemento se encuentra ausente en la capa C11, pero sí se halló en cantidades detectables en los otros sedimentos de aluvión, alcanzando 0,209% en peso en la muestra S01.

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.

| Elementos (%) | Muestra | | | | |
|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | C11 | S01 | S03 | S04 | S05 |
| Si | 47,281 | 50,205 | 46,670 | 51,878 | 49,730 |
| Al | 19,741 | 22,208 | 19,546 | 21,802 | 20,784 |
| Fe | 7,565 | 6,307 | 6,955 | 5,166 | 11,719 |
| Mg | 5,434 | 5,262 | 6,417 | 4,377 | - |
| Ca | 9,739 | 7,606 | 5,181 | 9,604 | 8,495 |
| K | 2,859 | 3,873 | 3,757 | 2,921 | 3,529 |
| Cl | 5,152 | 2,375 | 8,988 | 2,631 | 3,152 |
| S | 0,736 | 0,843 | 1,187 | 0,597 | 0,814 |
| Ti | 0,465 | 0,544 | 0,394 | 0,480 | 0,779 |
| Ba | 0,829 | 0,299 | 0,437 | 0,165 | 0,620 |
| Mn | - | 0,158 | 0,223 | 0,120 | 0,210 |
| Zr | - | 0,033 | 0,028 | - | - |
| Sr | 0,074 | 0,045 | 0,115 | 0,055 | 0,058 |
| Rb | 0,011 | 0,013 | 0,016 | 0,013 | 0,021 |
| Zn | 0,031 | 0,019 | 0,030 | 0,018 | 0,024 |
| Cu | - | 0,209 | 0,056 | 0,173 | 0,065 |

En relación a datos entregados por otros autores en cuanto a la concentración de elementos químicos en sedimentos, se realizó una comparación simple de la capa superior que corresponde a sedimento de aluvión. El detalle del contenido de elementos mayores en suelos y sedimentos se encuentra en la sección 3.2.1.1 *Elementos mayores* y el de elementos traza, en 3.2.1.2 *Elementos traza*.

La concentración de Si en la muestra C11 es de 47,281%, valor que supera cualquier rango entregado en la bibliografía, donde el máximo contenido fue en una muestra de sedimento en Australia con 44,38%, y supera el promedio de sedimento, 30% (McLennan y Murray, 1999). Se asemeja a lo que ocurre con las otras muestras de sedimento activo de la costa de Chañaral, pues también superan los rangos entregados. En cuanto al Al, se encontró en la C11 un 19,741%, superando las concentraciones medias de 2 a 8% en sedimento, y de 0,07 a 10% en suelo, al igual que todas las otras muestras analizadas en la cuenca del río Salado.

El Fe, por su parte, se concentró en un 7,565%, superando el promedio del elemento en sedimentos (4%) y en partículas de río (4,8%), pero se halla dentro del rango de sedimento activo (0,2 a 42,8%) y sedimento de planicie de inundación (1,089 a 19,56%), situación que ocurre también con la mayor parte de los sedimentos analizados. La concentración de Ca hallada fue de 9,739%, valor que sobrepasa los promedios entregados, 6,4% en sedimentos y 2,2% en partículas de río, pero que cae dentro de los rangos para sedimento activo (0,48 a 42,34%) y de planicie de inundación (0,41 a 9,8%).

El contenido de Mg en la muestra superficial de la columna es de 5,434% encontrándose dentro de los rangos de sedimento activo y de planicie de inundación, 0,07 a 20,84%, pero bajo los promedios de sedimento, 1,85%, y de partículas de río, 1,2%, al igual que la gran parte de las muestras con concentraciones detectables de Mg. El K encontrado fue de 2,859%, relativamente menor al hallado en las otras muestras, pero que se encuentra más cercano a los promedios determinados en los antecedentes revisados: 2,35% de sedimento, 2% de partículas de río, y dentro de los rangos de sedimento activo (0,08 a 7,72%) y planicie de inundación (0,025 a 4,33%).

El Cl, al igual que en resto de las muestras, se encuentra con una concentración tan alta que se considera como parte de los elementos mayores, con un 5,152%. Así, supera los promedios mundiales de Cl en suelos, 0,03% y en sedimentos, 0,0155%. Por su parte, el S contiene 0,736%, encontrándose por sobre el promedio de suelos, 0,08% y de sedimentos en Noruega, 0,04%, al igual que la gran mayoría de las muestras analizadas. El Ti se halló en un 0,465%, valor cercano a la concentración media de suelos, 0,5%. El Ba se concentró en un 0,829%, superando el promedio del elemento en suelos, 0,05% y el rango de sedimentos del río Iowa en EE.UU. (0,045 a 0,3%). Lo mismo ocurre con el resto de las muestras de la zona de estudio.

La concentración de Sr en la muestra C11 es de 0,074%, encontrándose dentro de los rangos de suelos y sedimentos: 0,0006 a 0,201% y 0,0031 a 0,1352%, respectivamente, de la misma forma que las otras muestras analizadas. El Rb se halló en un 0,011%, cayendo dentro del rango de promedios mundiales de suelos, 0,0018 a 0,0116%, y del rango de sedimentos activos en algunos países europeos, 0,0004 a 0,0597%. El contenido de Zn es de 0,031%, superando levemente el intervalo de peso seco en suelo, 0,001 a 0,03%, y más aún el límite de peso seco en sedimentos. Esto ocurre también en la mayoría de las muestras estudiadas, en especial en las otras muestras de aluvión.

3.2.2.4 Normativa internacional

3.2.2.4.1 Introducción

Los valores de referencia que se utilizaron a modo de comparación con la concentración de elementos químicos en las muestras de sedimento de la columna estratigráfica son los mismos que fueron considerados para los sedimentos de aluvión, que se detallan en la sección de normativa internacional de sedimentos de aluvión, *3.2.1.5 Normativa internacional*. Los estándares de Canadá y Brasil se muestran en la Tabla 3.16 de dicha sección del informe.

3.2.2.4.2 Comparación de estándares con resultados

Para la realización de la comparación con los estándares internacionales, se procedió a crear gráficos de dispersión de la concentración de Ba, Cu, Mo, S y Zn (Figura 3.74). En ellos, se agregaron líneas horizontales que representan los valores de referencia internacionales de acuerdo a los tipos de suelos considerados en las recomendaciones de Canadá y Brasil. En tanto, el As solo se detectó en una muestra de

la columna estratigráfica, por lo que no se realizó un gráfico para dicho elemento, mientras que el Co, que fue detectado en una muestra de sedimento y se consideró en los estándares internacionales, no se concentró en valores detectables en ninguna muestra de la columna estratigráfica.

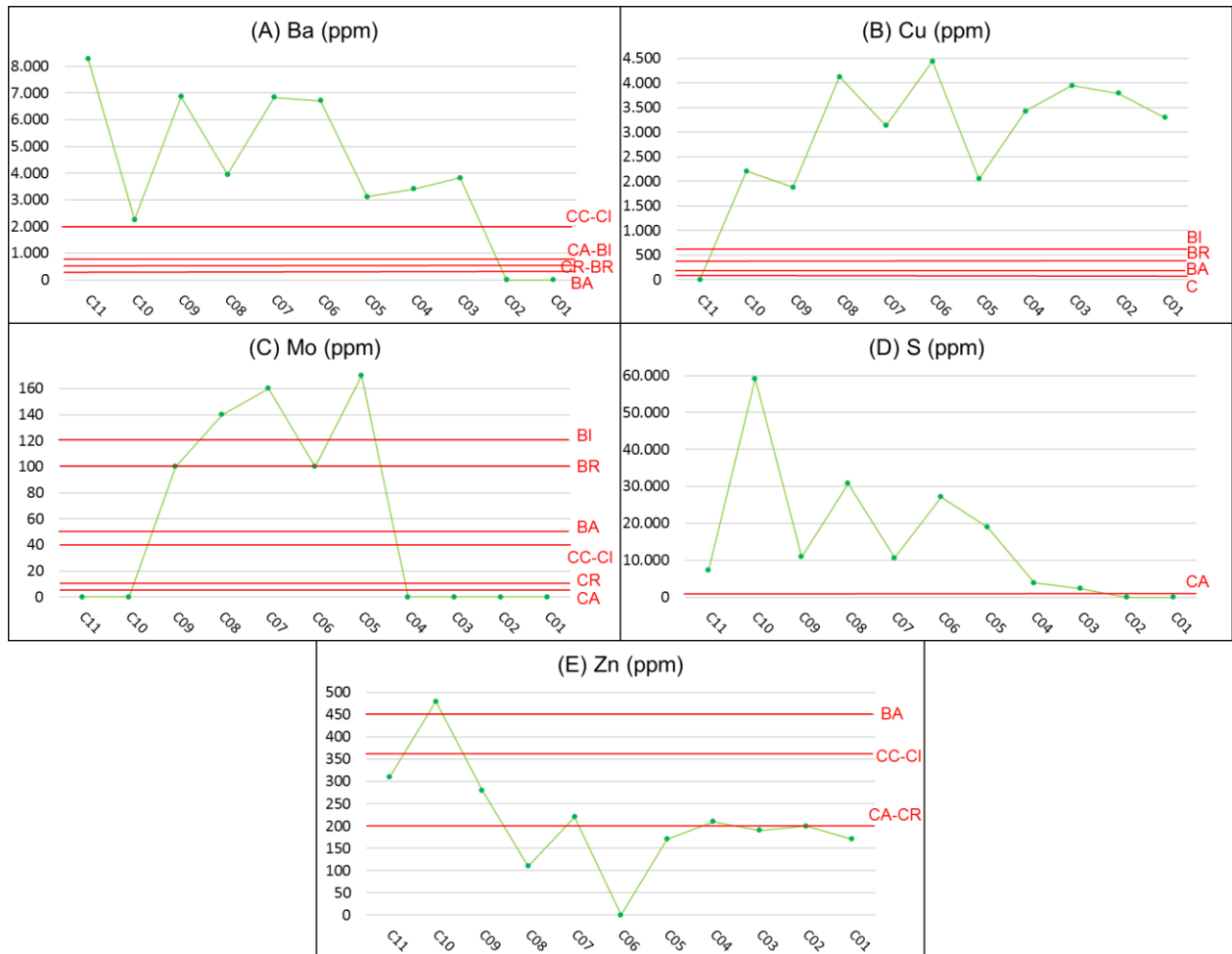


Figura 3.74 Concentración en ppm de (A) Ba, (B) Cu, (C) Mo, (D) S y (E) Zn en las muestras de sedimento de la columna estratigráfica con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial;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

El Ba presenta distintos valores de referencia dependiendo del país en cuestión y el tipo de suelo. El límite más permisivo es el entregado por Canadá para suelo comercial e industrial, con 2.000 ppm, seguido por suelo agrícola canadiense y suelo industrial brasileño con 750 ppm, luego por suelo residencial de Canadá y Brasil con 500 ppm, y finalmente, el más restrictivo es el suelo agrícola de Brasil con 300 ppm (Figura 3.74). Sin embargo, todas las muestras de la columna estratigráfica en las cuales se detectó el elemento tienen concentraciones por sobre los valores de referencia de ambos países, englobando a las nueve muestras de sedimentos más someras. Las muestras C02 y C01, las más profundas, por no contener Ba en concentraciones detectables por el instrumento de medición, son las únicas que no sobrepasan los límites recomendados.

El Cu se halló en diez de once muestras de la columna estratigráfica, las cuales se encuentran por sobre el límite establecido por Canadá y Brasil para los distintos tipos de suelo, alcanzando ocho veces el valor de referencia más permisivo, y 80 veces el más restrictivo (Figura 3.74). Los estándares para el contenido de Cu en Brasil son: 600 ppm para suelo industrial, 400 ppm para suelo residencial y 200 ppm para suelo agrícola; mientras que, en Canadá, estos son: 91 ppm para suelo comercial e industrial y 63 ppm para suelo agrícola y residencial.

Por lo tanto, la única muestra libre de las restricciones canadienses y brasileñas en cuanto a la concentración de Cu en suelos es la C11, la muestra más somera de la columna estratigráfica.

Para el caso del Mo, los valores de referencia influyen de forma más variada que el Ba y Cu, dependiendo del tipo de suelo y del país originario de estos valores (Figura 3.74). El estándar menos restrictivo es el correspondiente a suelo industrial de acuerdo a Brasil, con 120 ppm, límite que sobrepasan tres muestras de la columna estratigráfica: C05, C07 y C08, quedando libre esta restricción las ocho muestras restantes. Le sigue el estándar para suelo residencial del mismo país que corresponde a 100 ppm de Mo, valor que coincide con el contenido del metal en las muestras C06 y C09, por lo que, se prefirió sobrevalorar esas concentraciones y determinar que esas muestras se encuentran por sobre el límite.

Los otros valores de referencia: 50 ppm para suelo agrícola en Brasil, 40 ppm para suelo comercial e industrial en Canadá, 10 ppm para suelo residencial canadiense y 5 ppm para suelo agrícola en el mismo país, se encuentran bajo las cinco muestras que contienen Mo en concentraciones detectables. Por lo tanto, las muestras C05, C06, C07, C08 y C09, localizadas en la zona central de la columna estratigráfica, superan los límites recomendados por Brasil y Canadá para todo tipo de suelo, y solo las muestras sin Mo detectable, C01, C02, C03 y C04, las cuatro más profundas, y C10 y C11, las dos más superficiales, quedan fuera de los estándares internacionales.

El único valor de referencia de S detallado en las normas internacionales es la de suelo agrícola de Canadá, que define el límite en 500 ppm. En la (Figura 3.74) se observa que todas las muestras con concentraciones de S detectables están por sobre es estándar canadiense, variando entre 4 a más de 118 veces su valor. Por tanto, las nueve muestras de sedimento más someras de la columna estratigráfica superan el límite canadiense, mientras que las dos más profundas, C01 y C03, son las únicas que no contienen S detectable y están bajo el estándar internacional de suelo agrícola.

Las concentraciones de Zn en las muestras de sedimento de la columna estratigráfica están en un rango más cercano a los estándares internacionales (Figura 3.74). El valor de referencia menos restrictivo es el de Brasil indicado a suelo residencial e industrial, 1.000 ppm y 2.000 ppm, respectivamente, que, por temas de escala del eje vertical, no se muestran en la Figura 3.74. A ellos le sigue el estándar para suelo agrícola del mismo país, con 450 ppm, luego el valor de referencia para suelo comercial e industrial de Canadá con 360 ppm. A ambos valores lo supera la muestra C10, la segunda más somera, con 480 ppm de Zn. Finalmente, en Canadá se establece en límite para

suelo agrícola y residencial en 200 ppm, lo que deja a las muestras C02, C04, C07, C09 y C11 por sobre dicho valor, además de las anteriormente mencionadas.

Así, las muestras que se encuentran sobrepasando los valores de referencia internacionales son: C02, C04, C07, C09, C10 y C11, incluyendo a las tres muestras más superficiales. Por su parte, las muestras C01, C03, C05, C06 y C08 contienen Zn en concentraciones que no superan los límites de Canadá y Brasil, considerando también que la muestra C06 no presenta el metal en concentraciones detectables.

4 CONCLUSIONES

El fin del presente trabajo es determinar las concentraciones químicas en aguas y sedimentos posteriores al aluvión de marzo de 2015 en la cuenca del río Salado. Para esto se analizaron 19 muestras de agua y 22 de sedimento en la cuenca del río, y 11 niveles de sedimento de la columna estratigráfica.

En las muestras de agua, la diferencia en concentración de elementos entre las aguas marinas y costeras se deben a la mezcla de agua de mar y continental que se produjo en la zona de los socavones en Chañaral. Esto explicaría la tendencia al aumento de concentración desde el mar hacia la costa de todos los elementos mayores (a excepción del NO_3^- y Br^-) y de los elementos traza As, B, Ba, Cu, Li, Mn y Mo, y la tendencia a la disminución del Se.

La minería asociada al Cu generó depósitos antiguos en la bahía de Chañaral que fueron expuestos en socavones costeros. Las muestras de agua tomadas en esa zona presentaron alta concentración de Cu y Se probablemente por la interacción de agua de mar con los sedimentos de relave.

La muestra del salar de Pedernales tiene concentraciones de los elementos mayores y trazas muy similares a las de las muestras de río cercanas, excepto el Br^- y NO_3^- que no se detectaron, y el Ba cuya concentración es menor. Por lo tanto, las aguas del salar de Pedernales son geoquímicamente similares a las aguas superficiales, mostrando que la influencia en la composición de las aguas de la cuenca del salar de Pedernales en la del río Salado es de gran relevancia.

La muestra de agua subterránea presenta menor concentración en todos los elementos mayores y en la mayor parte de los elementos trazas. No obstante, el agua subterránea presenta concentraciones elevadas de Al, Co, Ni y Zn respecto al resto de las muestras analizadas, considerando que los tres últimos elementos fueron detectados solo en esta muestra. Este hecho es interpretable como una probable contribución geogénica al quimismo de las aguas subterráneas de la zona de estudio.

La muestra A11, muestra de río tomada en un afluente del río Salado, presenta una clara diferencia en la turbiedad y química con respecto al resto de las muestras de río. La concentración de la mayoría de los elementos mayores (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , y Mg^{+2}) y todos los elementos trazas, menos el SiO_2 , Pb y Se, presentan concentraciones menores a las muestras del río Salado. A partir de A11, río arriba, los contenidos de esos elementos son mayores, especialmente de Cu y Mo.

Se encontraron tres grupos en cuanto a la tendencia de concentración de los elementos químicos en las muestras de río. El primer grupo, a grandes rasgos, tiende a disminuir la concentración de los elementos mayores Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ y Mg^{+2} , y los traza As, Li, Mo y V desde la cabecera hacia la desembocadura del río Salado. El segundo, es el caso del SiO_2 , Ba y Mn, que presentan la pauta contraria, que se adjudica a la meteorización de rocas silíceas (aporte de SiO_2 y Ba) y a la minería del Cu (aporte de Mn). El tercero, es el de los elementos mayores Ca^{+2} , HCO_3^- , Br^- y NO_3^- , y los traza Al, B, Fe, Cu y Se que no presentaron una tendencia determinada.

La alta concentración de los elementos mayores Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} , y de elementos traza, en especial B y Li, se atribuye a la disolución de costras evaporíticas, principalmente, de halita y yeso, y secundariamente, cloruros, boratos, sulfatos y carbonatos, del salar de Pedernales. Se conoce que la cuenca del salar está conectada a la del río Salado, y producto de las fuertes precipitaciones que se registraron en marzo de 2015, el aporte hacia la cuenca del río fue enorme por el volumen de agua vertido, aumentando el caudal del río y la movilización de elementos químicos. Esto explicaría la disminución de concentración desde el salar hacia la costa de la mayoría de los elementos.

La concentración de NO_3^- de las muestras en las que se detectó promedia 23,58 mg/l, valor que supera el contenido común de aguas superficiales, pero su origen no está bien definido, aunque es probable que provenga de las roturas de alcantarillado. Se puede asociar, en parte, a esta misma fuente la concentración de Mn, B, Fe hallada en las muestras de agua. La concentración de As en las muestras superficiales (que promedia 1.177 ppb) es elevada y probablemente se debe a la meteorización de rocas volcánicas, la disolución de minerales del salar de Pedernales, como también puede deberse a la industria del cobre que emite As en sus etapas de obtención.

Una fuente antropogénica que se puede considerar relevante de algunos elementos químicos en aguas y sedimentos es el desarrollo de la actividad minera asociada al Cu, lo que incluye los relaves depositados en la cuenca del río Salado. En las aguas, se puede considerar una fuente importante de As, Mo, Cu, Fe, Se y Mn. Otras fuentes antrópicas son descartadas tales como las industrias de fabricación de distintos artefactos, combustión, desarrollo agrícola, entre otros.

La comparación de los resultados obtenidos con las normas chilenas que regulan las concentraciones de los elementos químicos para agua de riego y agua potable muestra que la calidad de las aguas no permitiría su uso para riego ni para consumo. La muestra de agua subterránea es la única que se acerca más a un agua de calidad para esos fines, pero se debe considerar un tratamiento para la disminución de SO_4^{2-} para agua potable, además de considerar el Na% para su uso como agua de riego.

La comparación con datos previos al aluvión (Tapia y Verdejo, 2015) indica que, luego del evento, existió un aumento en la concentración de Li y As asociado al aporte de la disolución de evaporitas del salar de Pedernales, y de Cu debido a la interacción con depósitos de relave localizados en la cuenca del río Salado. Curiosamente, la concentración de los elementos U, Zn, Cd y Sb en las muestras post-aluvionales, son menores a las pre-aluvionales.

Las muestras de sedimento activo junto con las del salar no presentan una distribución ordenada en la concentración de los elementos químicos. Los sedimentos de aluvión de la bahía de Chañaral contienen más Ca, Cl, S y Cu que los de la quebrada de la Angostura, probablemente por el aporte de los relaves en el transcurso del río Salado, y menos Si, Mg, Ti, Zn, Zr y Rb posiblemente por la ausencia de fuentes de relave con contenido de esos elementos. La muestra de relave (S14) presentó mayor contenido de Fe, S, Cu, Mo, P y As que el resto de las muestras, pudiendo representar una fuente de estos elementos al caudal del río. La muestra de arena de playa se tomó para compararla

con el depósito del aluvión. Se encontró que el sedimento aluvional contiene más Al, Fe, Ca, Mg, Cl, Mn, Cu, Zr y Zn, y que la muestra de arena presenta mayores concentraciones de K, S, Ba, Sr, Rb, Co y Mo.

Por la litología de la zona de estudio se piensa que el Si, Al, K, Ba, Zr, Zn, Ca y Ti, pueden estar presentes por la meteorización y la interacción del agua con estas rocas y por la presencia de los depósitos evaporíticos del salar de Pedernales. Por su parte, el Mn, Sr y Rb, son de origen natural y además de la mineralización metálica y la minería asociada al Cu. Aquellos elementos cuya fuente es mayormente producto de desechos mineros puede que sean el Fe, Cu y S, dada la alta concentración hallada en la muestra de relave. Mientras que, los elementos provenientes de los depósitos evaporíticos de la cuenca del salar de Pedernales son el Cl, Ca, K y Mg.

Al no existir una regulación nacional para los suelos y sedimentos, se tomaron como referencia los estándares para calidad de suelo de Brasil y Canadá. La comparación de estos valores con los resultados obtenidos indica que ninguna de las muestras de sedimento analizadas se encuentra apta para desarrollar actividades agrícolas, industriales, residenciales y comerciales, siendo catalogadas como un riesgo para el medio ambiente y la salud humana. En particular, las concentraciones de As, Ba, Co, Cu, Mo, S y Zn exceden los valores límites fijados en las normas mencionadas. Lo que puede deberse a concentraciones naturales o a la minería del Cu que se desarrolla en la zona de estudio.

Las capas de la columna estratigráfica contienen a los elementos químicos sin un patrón absoluto, pero en algunos de ellos se encontró, de forma general, una tendencia al aumento, y en otras, a la disminución de concentración de techo a base. El primer grupo está compuesto por el Si, K, Cu y Rb, y el segundo por Al, Fe, Ca, Cl, S, Ba y Zn. En otros elementos (Mg, Ti, Sr, Mn, Zr y Mo) no se detectó un patrón específico. El caso del As es particular, pues solo se encontró en una capa a 130 cm de profundidad, cerca de la base de la columna. La variación composicional en los distintos niveles de la columna estratigráfica puede explicarse por las diferentes fuentes de origen de las capas, entre las que se encuentran los desechos mineros depositados históricamente y bajo diferentes tecnologías de tratamiento de relaves.

Se determinó que el nivel superior de la columna estratigráfica corresponde a sedimento de aluvión. La comparación de este sedimento aluvional con las otras muestras aluvionales más cercanas (S03 y S05) indica que todos los elementos analizados se encuentran en concentraciones similares, y el Cu está en menor concentración en la capa superior de la columna que las muestras vecinas.

La comparación de los resultados de la columna estratigráfica con los valores límite entregados por los estándares internacionales de calidad de suelo (Brasil y Canadá) indica que ningún nivel de la columna estratigráfica cumple con los estándares, por lo cual no pueden ser utilizados para uso agrícola, comercial, industrial ni residenciales.

5 BIBLIOGRAFÍA

Achterberg, E., Holland, T., Bowie, A., Mantoure, R.F., Worsfold, P., 2001. Determination of iron in seawater. Review. *Analytics Chimica Acta* 442, p. 1-14.

Aguirre, I., 2003. Consideraciones sobre la hidrogeología del área del Llano de la Vega Helada, III Región, Chile. X Congreso Geológico Chileno 2003.

Arabasz, W.J., 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama Fault Zone in Northern Chile. PhD Thesis, Calif. Inst. Technol., Pasadena, CA. 264 p.

Armbrust, G., Arias, J., 1977. Rubidium as a guide to ore in Chilean porphyry copper deposits. *Economic Geology* 72(6), p. 1086-1100.

Arriagada, C., Roperch, P., Mpodozis, C., Fernández, R., 2006. Paleomagnetism and tectonics of the southern Atacama Desert region (25-28°S), Northern Chile. *Tectonics* 25, TC1008.

ATSDR, 2004. Toxicological profile for strontium. Atlanta, GA, United States Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

Bagchi, R., Ganguly, H., Sirdar, J., 1940. Lead in food. *Ind. J. med. Res.*, 28, p. 441-445.

Benninger, L.K. y Wells, J.T., 1993. Sources of sediment to the Neuse River estuary, North Carolina. *Mar Chem*, 43, p. 137-156.

Berner, E. y Berner, R., 1996. *Global Environment*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 376 p.

Bradford, G.R., 1971. Trace elements in the water resources of California. *Hilgardia*, 41(3), p. 45-53.

Brooks, R., 1978. Pollution through trace elements. En: Brckris JOM, ed. *Environmental chemistry*. New York, Plenum Press, p. 429-476.

Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., Markovic, S., 2011. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International* 240, p. 12-21.

Capo, R., Stewart, B., Chadwick, O., 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82, p. 197-225.

Castro, C., Marquardt, R., Zúñiga, A., 2010. Peligros naturales en geositos de interés patrimonial en la costa sur de Atacama. *Revista de Geografía Norte Grande*, Vol. 45, p. 21-39.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2007. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables. Updated September, 2007.

Chong, G., Pueyo, J., Demergasso, C., 2000. Los yacimientos de boratos de Chile. *Revista Geológica Chile* V.27.

Chow, T., 1968. Isotope analysis of seawater by mass spectrometry. *J. Water Pollution Control Fed.*, 40, p. 399-411.

Contreras, J.P., Ramírez, C., Garrido, N., Núñez, G., 2015. Caracterización hídrica y geológica de los aluviones del 25 y 26 de marzo de 2015 en la cuenca del Río El Salado, Región de Atacama, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno. SIM 12.

Cornejo, P., Mpodozis, C., Ramírez, C., Tomlinson, A., 1993. Estudio geológico de la región de El Salvador y Potrerillos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile, Informe registrado IR 93-1. 358 p.

Cornejo, P., Matthews, S., Mpodozis, C., Rivera, O., Riquelme, R., 2013. Carta El Salvador, Región de Atacama. Mapa Geológico, Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile.

Comisión Nacional del Litio, 2014. Litio: Una fuente de energía, una oportunidad para Chile. Informe final. Ministerio de Minería, Gobierno de Chile.

CONAMA (Conselho Nacional Do Meio Ambiente), 2013. Resolution No 420 of December 28, 2009. Provides guiding values and criteria of soil quality for the presence of chemicals and establishes guidelines for environmental management of areas contaminated by these substances as a result of anthropogenic activities. Brasilia.

Custodio, E., 1965. Notas sobre hidroquímica. Comisaría de aguas de Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona.

Custodio, E., Llamas, M. R., 2001. Hidrología subterránea. Tomo I. Segunda edición corregida. Ediciones Omega.

Davidson, C., Gibson, M., Hamilton, E., MacGillivray, B., Reglinski, J., Rezabal, E., 2005. The long-term environmental behavior of strontium and barium released from former mine workings in the granites of the Sunart region of Scotland, UK. *Chemosphere*, 58, p. 793-798.

Davis, S., Whittemore, D., Fabryka-Martin, J., 1998. Uses of Chloride/Bromide Ratios in Studies of Potable Water. *Ground Water*. V. 26, N°2, p. 338-350.

Dold, B., 2006. Element flows associated with marine shore mine tailings deposits. *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, p. 752-758.

DS46, 2003. Decreto Supremo. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

Ericksen, G.E., Salas, R., 1990. Geology and resources of salars in the Central Andes. En: Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, Vol. 11, p. 165-172.

Ermakov, V., Kovalskij, V., 1974. The biological importance of selenium. Moscow, Nauka Publishing House, p. 298.

Fernández-Turiel, J.L., Galindo, G., Parada, M.A., Gimeno, D., García-Vallés, M., Saavedra, J., 2005. Estado actual del conocimiento sobre el arsénico en el agua de Argentina y Chile: origen, movilidad y tratamiento. IV Congreso Hidrogeológico Argentino, p. 1-22.

Fileman, C.F., Althaus, M., Law, R.J., Haslam, I., 1991. Dissolved and particulate trace metals in surface waters over the Dogger Bank, Central North Sea. Mar Pollut Bull, 22(5), p. 241-244.

Fuenzalida, H., 1967. Clima de Chile. Geografía Económica de Chile, texto refundido, Capítulo IV, CORFO, p. 98-152. Santiago.

Gajardo, A., 2014. Potencial de litio en salares del norte de Chile. SERNAGEOMIN.

Gelcich, S., 1998. Metalogénesis de los cuadrángulos El Salado y Quebrada Guamanga, Cordillera de la Costa, III Región. Memoria de Título y Tesis de Magíster (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 112 p., 3 mapas.

Gerritse, R.G., George, R., 1988. The role of soil organic matter in the geochemical cycling of chloride and bromide. Journal of Hydrology 101 (1-4), p. 83-95.

Gobierno Regional Arica y Parinacota. 2009. Programa maestro de intervención zonas con presencia de polimetales en Arica. Gobierno de Chile.

Godoy, E., Lara, L., 1998. Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Mapas Geológicos 5-6, Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile.

Godoy, E., Lara, L., 2005. Hoja Salvador Occidental, Región de Atacama. Mapa Geológico, Escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile.

Hauser, A., 1997. Aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta. Santiago: SERNAGEOMIN, boletín N°49.

Hayes, K. y Traina, S., 1998. Metal ion speciation and its significance in ecosystem health. En: Soil chemistry and ecosystem health. Madison, WI, Soil Science Society of America, p. 46-83 (Special Publication No. 52).

Kabata-Pendias, A., 2011. Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York. 534 p.

Kehoe, R., Cholak, J., Largent, E., 1944. The concentrations of certain trace metals in drinking water. Journal of the American Water Works Association, 36, p. 637-644.

Kopp, J., Kroner, R., 1967. Trace metals in waters of the United States. A five-year summary of trace metals in rivers and lakes of the United States. Cincinnati, OH, United States Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration.

Livingstone, D., 1963. Data of geochemistry. Sixth Edition. Chapter of chemical composition of rivers and lakes. US Geol. Survey Prof. Paper 440.

Malle, K., 1992. Zinc in the environment. Acta Hydrochim Hydrobiol, 20, p. 196-204.

McLennan, S. y Murray, R., 1999. Geochemistry of sediments. En: Encyclopedia of Geochemistry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 282-292.

Merten, G., Riquelme, J., Borges, A., 2001. Manejo de microcuencas: la manera inteligente de conservar el suelo y las aguas. En: Manejo de microcuencas y prácticas conservacionistas de suelo y agua. Chillán-Chile, p.137-157.

Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S., Tittler, A., 1995. La Franja de Maricunga: Síntesis de la evolución del frente volcánico oligoceno-mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. Revista Geológica de Chile 22, 273-314.

Mpodozis, C., Clavero, J., 2002. Tertiary tectonic evolution of the southwestern edge of the Puna Plateau: Cordillera Claudio Gay (26°-27°S). Fifth International Symposium on Andean Geodynamics, Toulouse, France, IRD ed. p. 445-448. Extended abstracts.

Nalpas, T., Dabard, M. P., Ruffer, G., Vernon, A., Mpodozis, C., Loi, A., Hérail, G., 2008. Sedimentation and preservation of the Miocene Atacama Gravels in the Pedernales-Chañaral Area, Northern Chile: Climatic or tectonic control? Tectonophysics 459, p. 161-173.

NAS, 1977. Drinking water and health. Washington, DC, National Academy of Sciences, Printing and Publication Office.

National Academy of Sciences, 1977. Drinking water and health. Washington, DC, p. 279-285.

NCh1, 2010. Normas Chilenas NCh - Definiciones y procedimiento para su estudio y mantención. Proyecto de norma en consulta pública.

NCh1333, 1978. Norma Chilena Oficial. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Modificada en 1987.

NCh409/1, 2005. Norma Chilena Oficial. Agua potable – Parte 1 – Requisitos. Of2005.

- Nicholls, G.D., y Loring, D., 1962. The geochemistry of some British Carboniferous sediments. *Geochim, et Cosmochim. Acta*, Vol. 26, p. 181-233.
- Niemeyer, H., 1980. Hoyas hidrográficas de Chile: Tercera región. Dirección General de Aguas, Centro de Información Recursos Hídricos.
- Nriagu, J., 1990. Global metal pollution: Poisoning the biosphere. *Environment*, 32, p. 7-11.
- Pokorny, J., 1975. Geochemical prospecting for ores in the Bohemian massif, Czechoslovakia. *Vancouver Symposium Volume*, p. 77-83.
- Provoost, J., Cornelis, C., Swartjes, F., 2006. Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: why do they differ? *J Soils Sediments* 6 (3), p. 173 – 181.
- Reimann, C., de Caritat, P., 1998. *Chemical Elements in the Environment. Factsheets for Geochemist and Environmental Scientist*. Berlin, Germany, Springer-Verlag. 404 p.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérial, G., Darrozes, J., Charrier, R., 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics* 361, p. 255-275.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C., 1999. *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones – Chile*. Vol. IV: Estudio de cuencas de la III Región. S.I.T. N°51.
- Sahai, N., Carroll, S., Roberts, S, O'Day, P., 2000. X-ray absorption spectroscopy of strontium(II) coordination: II. Sorption and precipitation at kaolinite, amorphous silica, and goethite surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 222, p. 198-212.
- Salminen, R., 2005. *Geochemical Atlas of Europe. Part I-Background Information, Methodology and Maps*. Espoo, Geological Survey of Finland, Forum of the European Geological Surveys Directors, 525 p.
- Sancha, A.M., 1998. Estudio de caso: Contaminación por arsénico en el norte de Chile y su impacto en el ecosistema y la salud humana. *Gran minería y medio ambiente*.
- Schroeder, H.A., 1970. Barium. Washington, DC, American Petroleum Institute (Air Quality Monograph No. 70-12).
- Schroeder, H.A., Tipton, I.H., Nason, A.P., 1972. Trace metals in man: strontium and barium. *Journal of chronic diseases*, 25, p. 291-517.
- SEREMI MINSAL (Secretaría Regional Ministerio de Salud), 2011. Reporte anual actividades 2011. Plan de salud de polimetales SEREMI de salud de Arica y Parinacota, Chile.

SERNAGEOMIN, 2015. Catastro nacional de depósitos de relave. Depósitos activos y no activos. Departamento de Depósitos de Relaves, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Subramanian, V., Jha, P.K., Van Grieken, R., 1988. Heavy metals in the Ganges estuary. *Mar Pollut Bull*, 19(6), p. 290-293.

Tahil, W., 2007. The trouble with Lithium. Implications of future PHEV production for lithium demand. Meridian International Research.

Tatsumoto, M., Patterson, C., 1963. The concentration of common lead in seawater. *Earth Sci. Meteorics*, p. 74-89.

Thiele, R., Pincheira, M., 1987. Tectónica transpresiva y movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile* 31, p. 77-94.

Tomlinson A.J., Mpodozis, C., Cornejo, P., Ramírez, C., 1993. Structural geology of the Sierra Castillo-Agua Amarga Fault System, Precordillera of Chile, El Salvador-Potrerillos. *Second ISAG*, Oxford (UK), p. 259-262.

Tomlinson, A.J., Cornejo, P., Mpodozis, C., 1999. Hoja Potrerillos, Región de Atacama. *Mapas Geológicos* 14, Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile.

Tsai, F., Buchanan, E.B. Jr., Drake, L., 1978. The analysis of sediments from the Iowa River. *The science of the total environment*, 9, p. 277-285.

USEPA, 1995. Determination of background concentrations of inorganics in soils and sediments at hazardous waste sites. Washington, DC, United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response (EPA 540/S-96/500).

Varnero, M.T., 2006. Bacterias en ambiente terrestre. En: *Biodiversidad de Chile*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), p. 389-391.

Vinogradov, A.P., 1959. The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils, 2nd edition, New York, Consultants Bureau, p. 95-209.

Walton, N., 1989. Electrical conductivity and total dissolved solids - What is their precise relationship? *Desalination*, 62, p. 275-292.

Watson, E., 1979. Zircon saturation in felsic liquids: experimental results and application to trace element geochemistry. *Contrib. Mineral. Petrol.* 70, p. 407-419.

Wedepohl, K.H., 1978. *Handbook of geochemistry*. Springer Verlag, Berlín.

WHO, 1977. Lead. Environmental Health Criteria 3. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1982. Titanium. Environmental Health Criteria 24. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1986. Selenium. Environmental Health Criteria 58. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1988. Vanadium. Environmental Health Criteria 81. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1990. Barium. Environmental Health Criteria 107. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1991. Nickel. Environmental Health Criteria 108. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1997. Aluminium. Environmental Health Criteria 194. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1998.a. Boron. Environmental Health Criteria 204. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 1998.b. Copper. Environmental Health Criteria 200. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 2001.a. Arsenic and arsenic compounds. Environmental Health Criteria 224. Second edition.

WHO, 2001.b. Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds. Concise International Chemical Assessment Document 29.

WHO, 2001.c. Zinc. Environmental Health Criteria 221. International Programme on Chemical Safety.

WHO, 2003. Iron in drinking water. Background document for development of *Who Guidelines for Drinking-water Quality*.

WHO, 2004. Manganese and its compounds: Environmental aspects. Concise International Chemical Assessment Document 63.

WHO, 2006. Cobalt and inorganic cobalt compounds. Concise International Chemical Assessment Document 69.

WHO, 2009. Bromide in drinking water. Background document for development of *Who Guidelines for Drinking-water Quality*.

WHO, 2010. Strontium and strontium compounds. Concise International Chemical Assessment Document 77.

6 ANEXOS

ANEXO A

Resultados obtenidos de los análisis de las muestras de agua.

| | | A01 | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 |
|-----------------------------------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Parámetros físico-químicos | | | | | | | | |
| pH | - | 8,01 | 8,17 | 7,93 | 8,1 | 7,85 | 7,36 | 7,47 |
| T° | °C | 17,9 | 15 | 18,1 | 21 | 18,7 | 24 | 21,5 |
| C,E, | mS/cm | 58,6 | 58,9 | 57,9 | 60,9 | 74,5 | 215,6 | 195,6 |
| Eh | mV | 203,7 | 233,8 | 196,7 | 200,6 | 198,7 | 239,8 | 238,3 |
| Elementos mayores | | | | | | | | |
| Cl ⁻ | mg/l | 20006 | 20032 | 19993 | 21274 | 26771 | 99435 | 87447 |
| SO ₄ ⁻² | mg/l | 2257 | 2276 | 2277 | 2699 | 2731 | 2611 | 2339 |
| NO ₃ ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Br ⁻ | mg/l | 77,7 | 75,9 | 75 | 77,6 | 66,4 | <0,1 | <0,1 |
| F ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l | 167,75 | 207,4 | 167,75 | 170,8 | 170,8 | 216,55 | 244 |
| Na ⁺ | mg/l | 10700 | 12400 | 10800 | 11600 | 15000 | 61200 | 52600 |
| K ⁺ | mg/l | 540 | 610 | 550 | 500 | 660 | 2500 | 2090 |
| Ca ⁺² | mg/l | 400 | 404 | 406 | 454 | 551 | 1652 | 1606 |
| Mg ⁺² | mg/l | 1278 | 1273 | 1273 | 1256 | 1287 | 1770 | 1560 |
| SiO ₂ | mg/l | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 2 | 10,9 | 10,4 |
| Elementos traza | | | | | | | | |
| Al | mg/l | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Sb | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| As | mg/l | 0,005 | 0,004 | 0,007 | 0,023 | 0,059 | 0,69 | 0,561 |
| Ba | mg/l | <0,00025 | <0,00025 | <0,00025 | 0,0211 | 0,0289 | 0,2412 | 0,2365 |
| Be | mg/l | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 |
| B | mg/l | 2,8 | 1,3 | 3,5 | 7,6 | 17,7 | 118,4 | 117,2 |
| Cd | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Ce | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Co | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Cu | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | 0,0058 | 0,2299 | 0,0582 | <0,0005 | <0,0005 |
| Cr | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Sc | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Sn | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ga | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ge | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Fe | mg/l | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Ho | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| La | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Li | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 3,973 | 19,527 | 234,472 | 201,141 |
| Mn | mg/l | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | 0,5108 | 0,6318 | 1,843 | 2,12 |
| Mo | mg/l | <0,0003 | <0,0003 | <0,0003 | 0,0164 | 0,0322 | 0,2158 | 0,1852 |
| Ni | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ag | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Pb | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Se | mg/l | 0,2167 | 0,243 | 0,219 | 0,15 | 0,1969 | 0,0272 | 0,0371 |
| Tl | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Th | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ti | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| U | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| V | mg/l | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | 0,0273 | 0,0185 |
| W | mg/l | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Zn | mg/l | 0,09 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |

| | | A08 | A09 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 |
|-----------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parámetros físico-químicos | | | | | | | | |
| pH | - | 7,41 | 7,49 | 7,48 | 7,62 | 7,07 | 7,05 | 7,07 |
| T° | °C | 16,6 | 16,6 | 17,1 | 21,2 | 21,1 | 23,4 | 19,9 |
| C,E, | mS/cm | 195,1 | 180,1 | 197,8 | 137,5 | FDR | FDR | FDR |
| Eh | mV | 247,5 | 245,7 | 220,8 | 234,4 | 258,9 | 259 | SD |
| Elementos mayores | | | | | | | | |
| Cl ⁻ | mg/l | 86996 | 76629 | 89141 | 53385 | 195399 | 198128 | 193139 |
| SO ₄ ⁻² | mg/l | 2254 | 2123 | 2229 | 1766 | 3969 | 3921 | 4665 |
| NO ₃ ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 19,5 |
| Br ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 14,9 |
| F ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l | 186,05 | 176,9 | 237,9 | 131,15 | 417,85 | 396,5 | 372,1 |
| Na ⁺ | mg/l | 53600 | 45800 | 54800 | 29000 | 103200 | 105600 | 111200 |
| K ⁺ | mg/l | 2180 | 1920 | 2090 | 1250 | 4370 | 4960 | 4410 |
| Ca ⁺² | mg/l | 1530 | 1469 | 1521 | 1382 | 1402 | 1365 | 1472 |
| Mg ⁺² | mg/l | 1554 | 1404 | 1466 | 1078 | 2848 | 3082 | 2910 |
| SiO ₂ | mg/l | 10,4 | 10,4 | 10,3 | 12,7 | 7 | 6,7 | 8,1 |
| Elementos traza | | | | | | | | |
| Al | mg/l | <0,01 | <0,01 | 0,07 | 0,04 | 0,15 | <0,01 | <0,01 |
| Sb | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| As | mg/l | 0,614 | 0,502 | 0,504 | 0,015 | 1,462 | 1,979 | 1,922 |
| Ba | mg/l | 0,2176 | 0,2029 | 0,1816 | 0,0635 | 0,1644 | 0,1971 | 0,2134 |
| Be | mg/l | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 |
| B | mg/l | 115,4 | 103 | 168,8 | 106,4 | 158,8 | 115 | 106,6 |
| Cd | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Ce | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Co | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Cu | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | 0,0338 | <0,0005 | 0,1958 | 0,0761 | 0,091 |
| Cr | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Sc | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Sn | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ga | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ge | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Fe | mg/l | <0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,04 | 0,11 | 0,06 | 0,02 |
| Ho | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| La | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Li | mg/l | 204,863 | 184,9 | 180,319 | 110,421 | 412,912 | 515,748 | 484,784 |
| Mn | mg/l | 1,2857 | 1,402 | 1,6885 | 0,0741 | 1,3138 | 1,1304 | 1,104 |
| Mo | mg/l | 0,1746 | 0,157 | 0,1425 | 0,0418 | 0,3905 | 0,5066 | 0,5148 |
| Ni | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ag | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | 0,0064 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Pb | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,023 | <0,005 | <0,005 |
| Se | mg/l | 0,0862 | 0,0158 | 0,0488 | 0,0461 | 0,0747 | 0,0727 | 0,0752 |
| Tl | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Th | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ti | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| U | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| V | mg/l | 0,0171 | 0,0126 | 0,0179 | <0,0002 | 0,0378 | 0,0574 | 0,0703 |
| W | mg/l | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Zn | mg/l | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |

| | | A15 | A16 | A17 | A18 | A19 |
|-----------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parámetros físico-químicos | | | | | | |
| pH | - | 8,62 | 7,09 | 7,13 | 7,15 | 7,23 |
| T° | °C | 22,6 | 21,5 | 24,9 | 21,1 | 8,2 |
| C,E, | mS/cm | 2,003 | FDR | FDR | FDR | FDR |
| Eh | mV | 155,4 | 256,1 | SD | 234,7 | SD |
| Elementos mayores | | | | | | |
| Cl ⁻ | mg/l | 174 | 197705 | 192730 | 187942 | 197716 |
| SO ₄ ⁻² | mg/l | 793 | 4710 | 4676 | 4777 | 4149 |
| NO ₃ ⁻ | mg/l | <0,1 | 26,5 | 26,2 | 22,1 | <0,1 |
| Br ⁻ | mg/l | <0,1 | 19,7 | 18,4 | 14,4 | <0,1 |
| F ⁻ | mg/l | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l | 76,25 | 323,3 | 314,15 | 286,7 | 1052,25 |
| Na ⁺ | mg/l | 221 | 106400 | 112800 | 109600 | 106800 |
| K ⁺ | mg/l | 8,68 | 4320 | 4230 | 4160 | 4090 |
| Ca ⁺² | mg/l | 211 | 1513 | 1522 | 1562 | 1127 |
| Mg ⁺² | mg/l | 6,59 | 2838 | 2806 | 2728 | 2504 |
| SiO ₂ | mg/l | 1,1 | 7,2 | 6,9 | 8,2 | 4,3 |
| Elementos traza | | | | | | |
| Al | mg/l | 0,02 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 0,01 |
| Sb | mg/l | - | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| As | mg/l | 0,0003 | 2,016 | 2,069 | 2,155 | 7,776 |
| Ba | mg/l | 0,0194 | 0,1884 | 0,193 | 0,1817 | 0,0124 |
| Be | mg/l | <0,004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 |
| B | mg/l | 0,63 | 129,2 | 138 | 108,4 | 121,6 |
| Cd | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Ce | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Co | mg/l | 0,00027 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Cu | mg/l | <0,0005 | 0,0318 | 0,0675 | 0,0171 | 0,0106 |
| Cr | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Sc | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Sn | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ga | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ge | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Fe | mg/l | 0,01774 | 0,03 | 0,09 | 0,07 | 0,13 |
| Ho | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| La | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Li | mg/l | 0,178 | 446,379 | 402,408 | 408,588 | 412,848 |
| Mn | mg/l | 0,0596 | 0,2503 | 0,1836 | 0,0654 | 0,0354 |
| Mo | mg/l | 0,0248 | 0,4472 | 0,4387 | 0,418 | 0,6138 |
| Ni | mg/l | 0,00265 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Ag | mg/l | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Pb | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Se | mg/l | 0,0017 | 0,0439 | 0,0547 | 0,0465 | 0,073 |
| Tl | mg/l | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Th | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ti | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,006 |
| U | mg/l | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| V | mg/l | <0,0002 | 0,0706 | 0,09 | 0,0722 | 0,0986 |
| W | mg/l | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Zn | mg/l | 0,04754 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |

ANEXO B

Resultados obtenidos de los análisis de las muestras de sedimento.

| | | S01 | S02 | S03 | S04 | S05 | S06 | S07 | S08 |
|--------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Elementos mayores | | | | | | | | | |
| Si | %wt | 50,205 | 64,259 | 46,67 | 51,878 | 49,73 | 44,215 | 43,02 | 43,598 |
| Al | %wt | 22,208 | 20,454 | 19,546 | 21,802 | 20,784 | 19,463 | 17,591 | 17,034 |
| Fe | %wt | 6,307 | 3,255 | 6,955 | 5,166 | 11,719 | 6,64 | 5,921 | 7,606 |
| Ca | %wt | 7,606 | 1,17 | 5,181 | 9,604 | 8,495 | 10,11 | 18,719 | 19,161 |
| Mg | %wt | 5,262 | 0 | 6,417 | 4,377 | 0 | 6,048 | 5,252 | 0 |
| K | %wt | 3,873 | 6,566 | 3,757 | 2,921 | 3,529 | 3,698 | 3,6 | 3,92 |
| Cl | %wt | 2,375 | 0 | 8,988 | 2,631 | 3,152 | 8,369 | 3,867 | 6,798 |
| Elementos traza | | | | | | | | | |
| S | %wt | 0,843 | 2,731 | 1,187 | 0,597 | 0,814 | 0,295 | 0,179 | 0,254 |
| Ti | %wt | 0,544 | 0,57 | 0,394 | 0,48 | 0,779 | 0,441 | 0,778 | 0,706 |
| Ba | %wt | 0,299 | 0,569 | 0,437 | 0,165 | 0,62 | 0,453 | 0 | 0,52 |
| Mn | %wt | 0,158 | 0 | 0,223 | 0,12 | 0,21 | 0,124 | 0,125 | 0,167 |
| Zr | %wt | 0,033 | 0,019 | 0,028 | 0 | 0 | 0 | 0,028 | 0,031 |
| Sr | %wt | 0,045 | 0,15 | 0,115 | 0,055 | 0,058 | 0,043 | 0,07 | 0,075 |
| Rb | %wt | 0,013 | 0,018 | 0,016 | 0,013 | 0,021 | 0,015 | 0,016 | 0,022 |
| Zn | %wt | 0,019 | 0 | 0,03 | 0,018 | 0,024 | 0,014 | 0,016 | 0,023 |
| Cu | %wt | 0,209 | 0,127 | 0,056 | 0,173 | 0,065 | 0,073 | 0,031 | 0,078 |
| Co | %wt | 0 | 0,079 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mo | %wt | 0 | 0,035 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,785 | 0 |
| Y | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,007 |
| As | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | S09 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 |
|--------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Elementos mayores | | | | | | | | | |
| Si | %wt | 45,539 | 46,948 | 43,361 | 38,321 | 48,942 | 46,247 | 51,198 | 53,527 |
| Al | %wt | 16,871 | 18,662 | 16,669 | 13,931 | 16,983 | 21,874 | 20,244 | 23,092 |
| Fe | %wt | 7,066 | 5,816 | 6,613 | 5,427 | 8,011 | 15,359 | 7,318 | 6,676 |
| Ca | %wt | 22,099 | 15,096 | 19,267 | 19,272 | 15,202 | 0,252 | 4,628 | 4,964 |
| Mg | %wt | 0 | 5,245 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,69 | 6,482 |
| K | %wt | 3,473 | 3,365 | 3,879 | 4,252 | 3,844 | 3,864 | 4,004 | 3,771 |
| Cl | %wt | 3,57 | 2,79 | 8,097 | 15,463 | 3,697 | 0 | 3,685 | 0 |
| Elementos traza | | | | | | | | | |
| S | %wt | 0,276 | 0,722 | 0,953 | 2,428 | 1,505 | 10,144 | 1,02 | 0 |
| Ti | %wt | 0,822 | 0,811 | 0,879 | 0,683 | 0,863 | 0,672 | 0,705 | 0,732 |
| Ba | %wt | 0 | 0,216 | 0 | 0 | 0,535 | 0,257 | 0,17 | 0,483 |
| Mn | %wt | 0,158 | 0,115 | 0,135 | 0,111 | 0,2 | 0,018 | 0,157 | 0,132 |
| Zr | %wt | 0,025 | 0 | 0,026 | 0,024 | 0 | 0,026 | 0,073 | 0,053 |
| Sr | %wt | 0,069 | 0,073 | 0,047 | 0,071 | 0,088 | 0,106 | 0,049 | 0,05 |
| Rb | %wt | 0,016 | 0,017 | 0,015 | 0,016 | 0,023 | 0 | 0,027 | 0,02 |
| Zn | %wt | 0,016 | 0,016 | 0,017 | 0 | 0,021 | 0 | 0,023 | 0,018 |
| Cu | %wt | 0 | 0,108 | 0,044 | 0 | 0,084 | 0,351 | 0 | 0 |
| Co | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mo | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,111 | 0 | 0 |
| P | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,637 | 0 | 0 |
| Y | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,009 | 0 |
| As | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,082 | 0 | 0 |

| | | S17 | S18 | S19 | S20 | S21 | S22 |
|--------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Elementos mayores | | | | | | | |
| Si | %wt | 52,489 | 45,82 | 39,101 | 41,713 | 39,063 | 40,758 |
| Al | %wt | 20,701 | 15,327 | 14,33 | 13,129 | 17,168 | 17,095 |
| Fe | %wt | 11,556 | 6,997 | 10,019 | 5,612 | 5,566 | 6,097 |
| Ca | %wt | 4,376 | 25,065 | 19,918 | 24,795 | 10,994 | 16,695 |
| Mg | %wt | 4,819 | 0 | 0 | 0 | 6,183 | 5,753 |
| K | %wt | 3,662 | 3,466 | 3,164 | 2,527 | 4,51 | 4,567 |
| Cl | %wt | 0 | 0 | 9,589 | 9,773 | 15,037 | 6,452 |
| Elementos traza | | | | | | | |
| S | %wt | 0,585 | 2,103 | 1,821 | 0,989 | 0,317 | 1,267 |
| Ti | %wt | 0,726 | 0,982 | 0,766 | 0,935 | 0,519 | 0,624 |
| Ba | %wt | 0,75 | 0 | 0,932 | 0,264 | 0,361 | 0,4 |
| Mn | %wt | 0,168 | 0,128 | 0,124 | 0,069 | 0,129 | 0,159 |
| Zr | %wt | 0,034 | 0 | 0,084 | 0,08 | 0,02 | 0,024 |
| Sr | %wt | 0,095 | 0,094 | 0,093 | 0,096 | 0,047 | 0,071 |
| Rb | %wt | 0,022 | 0,018 | 0,02 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |
| Zn | %wt | 0,019 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,018 |
| Cu | %wt | 0 | 0 | 0,04 | 0 | 0,045 | 0 |
| Co | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mo | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Y | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| As | %wt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |