

**CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA SUPERFICIAL
EN LOS HUMEDALES CAMPICHE Y MAITENES, COMUNA DE
PUCHUNCAVÍ, REGIÓN DE VALPARAISO, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

RODRIGO IGNACIO CABRERA SALINAS

PROFESOR GUÍA
FELIPE VÁSQUEZ BAEZA

PROFESOR CO-GUÍA
CAMILO SÁNCHEZ YÁÑEZ

INTEGRANTE DE LA COMISIÓN
JAVIERA MULET BUNDER

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN

En esta investigación se ha realizado la caracterización hidroquímica de tres cuerpos de agua superficial correspondientes al Humedal Campiche, Humedal Los Maitenes y Estero Puchuncaví, todos presentes en la comuna de Puchuncaví, V Región de Valparaíso, entre los $32^{\circ}44'S - 32^{\circ}47'S$ y $71^{\circ}29'W - 71^{\circ}26'W$, con la finalidad de conocer la calidad del agua presente en ellos.

Se extrajeron un total de 15 muestras de agua para conocer las concentraciones de aniones y cationes mayores (metales y metaloides) mediante ICP-MS y cromatografía iónica, para contrastarlas con los límites máximos de concentración permitidos en las normas chilenas para el agua potable (NCh 409) y de riego (NCh 1333), además de clasificar los tipos de agua acorde a un diagrama Piper.

Los resultados indican la presencia de aguas principalmente cloruradas sódicas, a excepción de aquellas ubicadas en las cercanías del Escorial de Codelco que presentan una concentración relativa de sulfato mayor. Además, se presentan muestras con concentraciones sobre los límites estipulados en las normas NCh 409 y NCh 1333 para el arsénico, cobre, molibdeno, sulfato, magnesio, boro, plomo, manganeso y/o cloruro, por lo que no cumplen con las normas mínimas de calidad para los estándares chilenos.

La zona cercana al complejo industrial ventanas es la que presenta las mayores concentraciones de elementos disueltos, y dada las características de sus emisiones y los vientos dominantes de la zona, podría influenciar en la calidad hidroquímica de las aguas al oeste de la zona de estudio. La cercanía que presenta el Humedal Campiche y la desembocadura del Estero Puchuncaví con el Océano Pacífico puede de igual manera tener una influencia en la calidad hidroquímica observada, sobre todo en las concentraciones de cloruro, potasio y sodio. A pesar de lo anteriormente mencionado, son necesarios estudios complementarios de mineralogía y sedimentos para comprender de una buena manera las principales causas de las concentraciones observadas de elementos disueltos.

DEDICATORIA

SOLO USO ACADÉMICO

¿A dónde?, ¿Dónde me lleva la vida?

El mambo de la botella, La Renga

AGRADECIMIENTOS

Nunca creí que por fin terminaría esta etapa de mi vida, y menos de la manera en que lo hizo, acompañado de mi familia y grandes amistades, que espero perduren con el pasar de los años.

Todo esto, lo que soy y probablemente lo que seré, se lo debo en gran medida a mis padres Iván y Milena, los cuales fueron los responsables de mi formación, entregándome una familia llena de amor que junto con mi hermano Cristóbal, son el pilar fundamental de mi vida. Al igual que ellos, el rol que cumplieron mis abuelos Gladys, Norma, Roberto y Rosauro en mi vida siempre lo atesorare en mi memoria.

El resto de mi familia ha sido igualmente un gran apoyo en los momentos altos y bajos por los que he pasado, aconsejándome en cada instancia y brindándome su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida. No los mencionare uno por uno, dado que son demasiados y creo que de contar y expresar todo el cariño que les tengo, necesitaría otras 100 páginas más dentro de este trabajo.

A mis amigos, Christopher, María-Ignacia y Francisco, que sin su apoyo desinteresado no sé dónde hubiese terminado esta (aún) corta historia de vida, brindándome no solo consejos o compañía, sino que ofreciéndome un amor y cariño tal cual de hermanos.

Ariel, Fabián y Felipe, esta travesía de 5 años en la Universidad Mayor no hubiese sido el mismo sin ustedes, sin esas eternas noches en la casa mía o de Fabián haciendo trabajos que nos dejaron al borde de la locura y esquizofrenia, acompañada de cervezas, risas y mucho stress, que a mi parecer, siempre termino con una recompensa personal para todos, independiente de los resultados académicos (Noches dignas de un best seller tipo Corazón Valiente).

A mis profesores, en especial a Ximena Prieto, Mauricio Valenzuela, Paula Larrondo, Camilo Sánchez, Javiera Mulet y Felipe Vasquez.

Índice de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Problemática.....	3
1.2	Hipótesis.....	4
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo principal.....	4
1.3.2	Objetivos secundarios.....	4
2.	Antecedentes	5
2.1	Humedales.....	5
2.2	Humedales en Chile.....	8
2.2.1	Humedales Chilenos de importancia internacional	10
2.3	Ubicación Zona de Estudio.....	12
2.4	Antecedentes de la zona de estudio	16
3.	Caracterización de la Zona de Estudio	31
3.1	Clima.....	31
3.2	Geomorfología	32

3.3	Hidrogeología.....	34
3.4	Marco Geológico.....	35
3.4.1	Estratigrafía.....	37
3.4.2	Unidades intrusivas.....	39
4.	Metodologías.....	42
4.1	Plan de muestreo.....	42
4.1.1	Obtención de muestras.....	46
4.2	Análisis de muestras.....	47
4.2.1	Análisis químico.....	47
4.2.2	Procesamiento y análisis de resultados.....	49
5.	Resultados.....	51
5.1	Resultados analíticos.....	51
5.2	Parámetros Físico – Químicos.....	53
5.2.1	Temperatura.....	53
5.2.2	pH.....	53
5.2.3	Potencial redox.....	55

5.2.4	Sólidos disueltos totales.....	57
5.2.5	Conductividad eléctrica.....	60
5.3	Clasificación de las aguas.....	62
5.4	Especies químicas disueltas.....	66
5.4.1	Arsénico.....	66
5.4.2	Cobre.....	70
5.4.3	Molibdeno.....	73
5.4.4	Manganeso.....	77
5.4.5	Sulfato.....	81
5.4.6	Cloruro.....	84
5.4.7	Magnesio.....	87
5.4.8	Boro.....	90
5.4.9	Plomo.....	93
5.4.10	Hierro.....	96
5.5	Análisis de componentes principales.....	99
6.	Discusiones.....	101

6.1	Calidad del agua de los humedales Campiche, Los Maitenes y Estero Puchuncaví.....	101
6.1.1	Factores que indican en la concentración de elementos disueltos	102
6.1.2	Ocurrencia de concentraciones elementales sobre la norma chilena	106
6.2	Adsorción de elementos	120
6.3	Variabilidad y correlación espacial.....	123
6.4	Comparación con estudios previos	124
6.5	Comparación con otros lugares afectados por contaminación industrial.....	125
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	127
8.	Bibliografía	130
9.	Anexos	139

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la comuna de la zona de estudio a una escala regional (polígono rojo). Imágenes extraídas de mapas base de ArcGis 10.5.	12
Figura 2. Ubicación del CIV, los humedales Campiche, Los Maitenes y poblados más cercanos a estos. Elaboración propia.	13
Figura 3. Nombres, rubros y ubicación de las empresas pertenecientes al complejo industrial ventanas. Extraído de Bergamini et al., 2018.	14
Figura 4. Zona de estudio en donde se destacan los principales cauces de agua presentes, la ubicación de los humedales Campiche, Los Maitenes y el CIV. Imagen extraída y modificada de Google Earth.	15
Figura 5. Correlación entre las concentraciones de cobre, plomo, zinc y cadmio. Extraído y modificado de González e Ite (1992).	21
Figura 6. Emisiones de SO ₂ de las empresas presentes en el CIV. Elaboración propia en base a datos de Cenma (2013).	25
Figura 7. Hidrografía presente en el humedal Campiche, Los Maitenes y parte del Estero Puchuncaví, además de las muestras extraídas en el estudio realizado por la PUCV y UPA, 2015.	27
Figura 8. Distribución temporal de las precipitaciones entre los años más (2017) y menos (2019) lluviosos en los últimos 10 años para la comuna de Puchuncaví. Elaboración propia en base a datos de la Dirección General de Aguas.	32
Figura 9. Mapa geomorfológico de la Región de Valparaíso. El polígono en rojo representa a la zona de estudio. Modificado de Börgel (1983).	33

Figura 10. Red hidrográfica y Acuífero Estero Puchuncaví presentes en la comuna de Puchuncaví. El polígono en rojo indica la zona de estudio.	35
Figura 11. Mapa Geológico de la zona de estudio donde se puede observar: Jmi2: Unidad Puerto Oscuro, Jmi4: Unidad Cavívolén, Ja: Formación Ajjal, Tc: Formación Confluencia, PQd: Sedimentos eólicos antiguos (paleodunas), Th: Formación Caleta Horcón, Qel: Sedimentos eólicos y litorales; depósitos de playa, Qtm: Terrazas de depósitos marinos, Qac: Sedimentos Aluviales y Coluviales. El sistema humedal Campiche – Maitenes está representado por el polígono incoloro con borde rojo, mientras que el estero Puchuncaví está representado con la línea de color azul. Extraído y modificado de Rivano et al. (1993).	36
Figura 12. Lugares seleccionados para la toma de muestras (Círculos rojos) en el Humedal Campiche (HC), Los Maitenes (HM) y Estero Puchuncaví (EP). Imagen extraída y modificada de Google Earth.	43
Figura 13. Distribución espacial de valores de pH en la zona de estudio. a) valores de pH para las muestras EP – 0 y EP – 2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.	54
Figura 14. Distribución espacial de valores de Eh en la zona de estudio. a) valores de Eh para las muestras EP – 0 y EP – 2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.	56
Figura 15. Distribución espacial de SDT en la zona de estudio. a) Concentraciones de SDT para las muestras EP-0 y EP-1, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.	59
Figura 16. Distribución espacial de CE en la zona de estudio. a) Concentraciones de CE para las muestras EP-0 y EP-2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) Resto de las muestras ubicadas al este del CIV.	61
Figura 17. Diagrama Piper en donde se ubican todas las muestras obtenidas en este estudio.	63

Figura 18. Diagramas de Stiff para cada muestra presente en la zona de estudio. En la imagen superior se observan los gráficos para las muestras EP-0 y EP-2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, mientras que en la imagen inferior se observan el resto de los gráficos, ubicados al este del CIV.....	65
Figura 19. Concentraciones de arsénico disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.	67
Figura 20. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1	68
Figura 21. Concentraciones de cobre disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.	71
Figura 22. Distribución espacial de las concentraciones de cobre disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1	72
Figura 23. Concentraciones de molibdeno disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea roja corresponde al límite estipulado en la NCh 1333.	75
Figura 24. Distribución espacial de las concentraciones de molibdeno disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1	76
Figura 25. Concentraciones de manganeso disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.	78
Figura 26. Distribución espacial de las concentraciones de manganeso disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1	79
Figura 27. Concentraciones de sulfato disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.	82

Figura 28. Distribución espacial de las concentraciones de sulfato (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....	83
Figura 29. Concentraciones de cloruro disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.	85
Figura 30. Distribución espacial de las concentraciones de cloruro (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....	86
Figura 31. Concentraciones de magnesio disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409.....	88
Figura 32. Distribución espacial de las concentraciones de magnesio disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....	89
Figura 33. Concentraciones de boro disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea roja corresponde al límite estipulado en la NCh 1333.....	91
Figura 34. Distribución espacial de las concentraciones de boro disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....	92
Figura 35. Concentraciones de plomo disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409.....	94
Figura 36. Distribución espacial de las concentraciones de plomo disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....	95
Figura 37. Concentraciones de hierro disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja al límite presente en la NCh 1333.....	97

- Figura 38.** Distribución espacial de las concentraciones de hierro disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.....98
- Figura 39.** Mapa de factores de variables para el análisis de componentes principales realizado. Se puede observar la presencia de 3 grupos, diferenciados entre sí por colores rojo (grupo 1), azul (grupo 2) y verde (grupo 3).....100
- Figura 40.** Cambios en la calidad hidroquímica en sentido este-oeste y las unidades geológicas PQd, Tc, Qel y Qac (estas últimas dos ubicadas bajo los polígonos realizados) definidas por Rivano (1996).
.....103
- Figura 41.** Ciclo del hierro y manganeso en lugares con alta actividad biológica, extraído y modificado de Konhauser (2007).114
- Figura 42.** Diagrama de estabilidad Eh-pH para el hierro en donde se plotean las concentraciones disueltas de este elemento obtenidas en las muestras de la zona de estudio. Las líneas rojas corresponden a un sistema Fe-O₂-H₂O con concentración baja que no permiten el dominio de complejos polinucleares, mientras que las negras asumen un pK_{sp} = 37.1 para Fe(OH)₃ amorfo y bicarbonato fijo en 10^{-2.7} mol/kg. Extraído y modificado de Langmuir (1997).116
- Figura 43.** Porcentaje de adsorción producto de Fe₂O₃*H₂O para el plomo y cobre a distintas concentraciones de metal total (MeT) en función de pH. Extraído y modificado de Benjamin & Leckie (1981).121
- Figura 44.** Porcentaje de adsorción de cobre (II) por ferrihidrita en una solución de 0.7 wt. % y 0,1 M NaNO₃ a 25°C, modificado de Moon & Peacock (2012).122

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuadro resumen con los principales servicios que los humedales prestan al ser humano. Extraído y modificado de Vivanco (2017).	5
Tabla 2. Clasificaciones primarias (Hidroperiodo) y Secundarias (Geomorfología). Extraído y modificado de Semeniuk & Semeniuk (1997).	8
Tabla 3. Resumen de los sitios Ramsar presentes en Chile, región en la que se encuentra y su superficie (WCS, 2019).	11
Tabla 4. Resumen de algunos estudios realizados en la comuna de Puchuncaví en aire, suelo, agua y plantas.	16
Tabla 5. Concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc presentes en muestras de suelo en sitios de la comuna de Puchuncaví. Los resultados (ppm) se contrastan con un “testigo” (suelos sin presencia de contaminación), cuya diferencia se expresa de manera porcentual. Extraído y modificado de Gonzáles y Bergqvist (1986).	18
Tabla 6. Emisiones de material particulado (a), azufre y anhídrido sulfuroso (b) que las empresas Fundición de Ventanas (ENAMI) y Termoeléctricas (CHILGENER) deben emitir durante los años 1993 a 1999, para cumplir con las normas de calidad de aire. Elaboración propia en base a DS N° 185/91.	19
Tabla 7. Formula química de las diferentes fases minerales presentes en el Escorial de Codelco. Extraído de Siegel & Siegel (1995).	22
Tabla 8. Algunos parámetros físico-químicos, metales disueltos (a) y en sedimentos (b) presentes en el Humedal Campiche. Extraído y modificado de Fernández (2011).	24
Tabla 9. Concentraciones de metales pesados en material particulado sedimentable presentes en diversos lugares de la comuna de Puchuncaví. Extraído de Cenma (2013).	26

Tabla 10. Parámetros obtenidos de las muestras E2 y E3 presentes en el estudio presentado por la PUCV y UPA en el 2015 y su comparación a la clasificación de la guía de criterios de calidad para normas secundarias de CONAMA (2004).....	28
Tabla 11. Concentraciones de diferentes elementos presentes en el Escorial de Codelco. Extraído de Carrasco, 2017.	29
Tabla 12. Precipitaciones (mm) por mes en la zona de estudio, desde el 2011 hasta el 2019. Datos extraídos de estación meteorológica “Laguna de Zapallar” mediante consulta con la Dirección General de Aguas.	31
Tabla 13. Coordenadas UTM 19H de las muestras obtenidas en este estudio.	42
Tabla 14. Tipo de envases, su volumen y el tipo de análisis a realizar en las muestras obtenidas. .	47
Tabla 15. Parámetros analizados en terreno y laboratorio (*: parámetros disueltos).	48
Tabla 16. Porcentaje de error de balance iónico para cada muestra presente en la zona de estudio.	49
Tabla 17. Elementos y/o compuestos sobre las Normas Chilenas 409 y 1333 para cada muestra obtenida.....	52
Tabla 18. Temperatura (°C) presente en cada muestra extraída.....	53
Tabla 19. pH presente en cada muestra extraída.....	53
Tabla 20. Potencial redox (mV) presente en cada muestra extraída en este estudio.	55
Tabla 21. Solidos disueltos totales (SDT) (mg/L) presentes en cada muestra extraída en este estudio.	57
Tabla 22. Conductividad eléctrica (μS/cm) presente en cada muestra extraída en este estudio.	60

Tabla 23. Concentración de cationes y aniones mayores obtenidos en este estudio.	62
Tabla 24. Concentración de arsénico disuelto (mg/L) presente en cada muestra	66
Tabla 25. Especies químicas más abundantes con presencia de arsénico en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	69
Tabla 26. Concentración de cobre disuelto (mg/L) presente en cada muestra.	70
Tabla 27. Especies químicas más abundantes con presencia de cobre en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	73
Tabla 28. Concentración de molibdeno disuelto (mg/L) presente en cada muestra.	74
Tabla 29. Especies químicas más abundantes con presencia de molibdeno en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	77
Tabla 30. Concentración de manganeso disuelto (mg/L) presente en cada muestra.	77
Tabla 31. Especies químicas más abundantes con presencia de manganeso en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	81
Tabla 32. Concentración de sulfato (mg/L) presente en cada muestra.	81
Tabla 33. Especies químicas más abundantes con presencia de sulfato en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	84
Tabla 34. Concentración de cloruro (mg/L) presente en cada muestra.	85
Tabla 35. Especie química más abundante de cloruro. Concentración expresada como molalidad. 87	
Tabla 36. Concentración de magnesio disuelto (mg/L) presente en cada muestra.	87

Tabla 37. Especies químicas más abundantes con presencia de magnesio en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.	90
Tabla 38. Concentración de boro disuelto (mg/L) presente en cada muestra. L.D. corresponde a “límite de detección, con un valor < 0,35 mg/L.	90
Tabla 39. Especies químicas más abundantes con presencia de boro en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.	93
Tabla 40. Concentración de plomo disuelto (mg/L) presente en cada muestra. L.D. corresponde a “límite de detección, con un valor < 0,0002 mg/L.	93
Tabla 41. Especies químicas más abundantes con presencia de plomo en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.	96
Tabla 42. Concentración de hierro disuelto (mg/L) presente en cada muestra.	96
Tabla 43. Especies químicas más abundantes con presencia de hierro en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.	99
Tabla 44. Concentraciones y valores máximos/mínimos de diferentes cationes, aniones y parámetros físico-químicos.	102
Tabla 45. Óxidos/hidróxidos de hierro con índice de saturación positivo acorde a modelo de PHREEQC.	120
Tabla 46. Grupos principales obtenidos mediante el análisis de componentes principales.	123
Tabla 47. Comparación entre diferentes parámetros físico-químicos y elementos obtenidos en este estudio (HM-1) con los obtenidos en UDPA y PUCV (2015).....	124
Tabla 48. Emisiones comunes de una planta termoeléctrica (Zuk et al., 2006).	125

Índice de Anexos

Anexo 1. Diferentes tablas con la ubicación de las muestras obtenidas, parámetros físico químicos y concentraciones de elementos y compuestos analizados.	139
Anexo 2. a) Concentraciones y valores de diferentes parámetros para las muestras obtenidas, destacando aquellos cationes y aniones que presentan concentraciones (mg/L) sobre las normas chilenas (Nch 409 y Nch 1333) existentes. Aquellas concentraciones con color verde cumplen todas las normas chilenas, las amarillas con al menos una mientras que las rojas con ninguna. b) Estadística básica de los parámetros anteriormente mencionados.	143
Anexo 3. Fases minerales que presentan índices de saturación positivos acorde a modelo hidroquímico de PHREEQC, separados por la ocurrencia de diferentes elementos en las muestras obtenidas en este estudio.	144

1. Introducción

De toda el agua disponible en el mundo el agua dulce representa el 2,5% del total, y de ese porcentaje, el 68.7% corresponde a glaciares, 0,8% permahielo, 30% agua subterránea y solamente el 0,4% a aguas superficiales (PNUMA, GEM, 2007). Gran parte de ese 0,4% de agua dulce presente en aguas superficiales se distribuye en lagos y ríos, dentro de los cuales se pueden encontrar los humedales, definidos como zonas en donde el agua superficial es abundante, independiente de su origen (antrópico o natural), corriente (estancada o en flujo) o salinidad (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2006). Los humedales representan un soporte fundamental de variados ecosistemas y actividades antrópicas, pudiendo considerarse en algunos casos como importantes reservas de agua dulce (Ramsar, 2013). Dentro de las principales amenazas que afectan a los humedales, se encuentran actividades antrópicas como la agricultura, el pastoreo y el desvío de cursos de agua, lo que ha propiciado la disminución de hasta un 71% en los humedales existentes en el mundo desde 1900 a la fecha (Davidson, 2014).

En el año 2015, Chile se posicionaba como el quinto país con mayor riqueza de agua dulce en el mundo (OECD, 2015), sin embargo, en los últimos años gran parte del territorio chileno ha sufrido periodos de sequías debido al cambio climático y al fenómeno ENOS (Oscilación del Sur) en su fase fría. (Escenarios hídricos 2030 Chile, 2018). Esto, sumado a la sobreexplotación del agua en algunos lugares como Copiapó (Montero, 2012) y Petorca (DGA, 2006), además de una precaria política ambiental histórica respecto a la protección de los recursos hídricos de Chile (González, 2018), ha resultado en un aumento de la vulnerabilidad de los cuerpos de agua dulce entre los que se incluyen particularmente los humedales.

Los problemas ambientales en Chile que afectan o han afectado directamente a un humedal son variados. El caso del Santuario Carlos Anwandter (Río Cruces) ubicado en las cercanías de Valdivia durante el 2004, en donde murieron entre 300 a 1000 animales, principalmente Cisnes de Cuello negro (*Cygnus melancoryphus*), además de Taguas (*Fulica spp*), Tagüitas

(*Gallinula spp*), Coipos (*Myocastor coypus*) y diferentes especies de peces debido a la desaparición de la planta acuática *Egeria densa*. Esta desaparición se ligó a la precipitación de aluminio y hierro en los sedimentos de este humedal producto de una adición de sulfato de aluminio en el cauce del Río Cruces, el cual cambio las condiciones hidroquímicas afectando la población de esta planta y generando una situación de escasez de alimentos, desatando la mortandad de estas especies producto de inanición (Marzio & Mcinnes, 2005).

El humedal Batuco es otro humedal impactado por actividades antrópicas, registrando diferentes problemas desde el año 2000 a la fecha, destacando dos eventos de contaminación: uno en el año 2005 en donde se observó la muerte de aproximadamente 600 ejemplares de aves producto de una cepa de botulismo aviar asociado a contaminación de aguas en la Laguna de Batuco, y en el año 2011 producto de un desvío de canales que aportaban agua a este humedal, lo que generó una sequía que acabó con un 90% de los peces presentes en la laguna (Fox, 2011).

Asimismo, actualmente existen en Chile humedales impactados por la acumulación de factores (contaminantes) asociados a actividades antrópicas, desarrolladas en las cuencas en la que estos se alojan. Un ejemplo de esto es el humedal del Lago Villarrica, el cual ha comenzado un proceso de eutrofización producto del aumento de fósforo y nitrógeno, los cuales tienen como origen principal la agricultura, piscicultura y tratamiento de aguas servidas, cuyas actividades vierten sus desechos a tributarios de este lago, o a veces directamente (Fundación red de nuevas ideas, 2018).

Existen otros humedales en zonas impactadas por una intensa actividad antrópica, entre ellos los humedales Campiche y Los Maitenes ubicados en la comuna de Puchuncaví. Esta comuna es una zona actualmente considerada “de sacrificio” dada la contaminación generada producto de la actividad industrial, donde destaca la presencia de termoeléctricas (AES Gener), una planta de fundición de cobre, plata y oro (CODELCO), terminales marítimos asociados a empresas energéticas (Gasmar, Copec, Enap) y químicas (Oxiquim), y una fábrica de cementos (Cementos Melón) (Cenma, 2013).

Las emisiones que estas empresas liberan a la atmósfera presentan elementos como cadmio, arsénico, plomo, cromo, níquel, zinc, manganeso, vanadio, molibdeno y cobre, además de dióxido de azufre (Cenma, 2013), que han generado efectos acumulados y eventos de emergencias ambientales desde su inauguración en 1958 a la fecha (principalmente asociadas a este último compuesto). Estas emergencias han implicado efectos adversos y malestar en los pobladores locales, quienes han sido testigos de la desaparición de la agricultura y ganadería en algunas zonas de la comuna (González y Bergovist, 1986), casos de intoxicación en personas (Contreras, 2014) y contaminación de recursos marítimos (Oceana Chile, 2019). A pesar de esto, los informes técnicos actuales no han abordado todos los posibles efectos que las actividades antrópicas han tenido sobre el ecosistema. Si bien existen estudios referentes a la concentración de elementos en el material particulado (Cenma, 2013) y el suelo (PGS, 2015), aún existe una brecha de información respecto a la caracterización de la calidad del agua superficial de estos humedales que permita un entendimiento más holístico del sistema y, de esta manera, la resolución de las interrogantes referentes a la concentración de elementos potencialmente nocivos en estos cuerpos de agua. Esto último es particularmente importante debido a la importancia que estos poseen para la biodiversidad en la zona ya que alberga un total de 50 especies de flora y 62 especies de vertebrados, encontrándose entre estas últimas especies en peligro de extinción (Fernández, 2011).

El objetivo principal de esta investigación es generar una caracterización preliminar de la calidad hidroquímica de los humedales Campiche y Los Maitenes.

1.1 Problemática

La constante degradación medioambiental que se ha registrado en el área de la comuna de Puchuncaví debido a la actividad industrial ha motivado el desarrollo de diversos estudios sociales y científicos, estos últimos enfocados principalmente en suelos y aire. Sin embargo, la calidad del agua superficial es en cierta medida desconocida, ya que existe solo un estudio de hidroquímica en el Humedal Los Maitenes, además de una estación de monitoreo de parámetros físico – químicos de la Dirección General de Aguas (DGA) en el pueblo de

Puchuncaví. Esta información disponible no es representativa para emitir conclusiones respecto a la calidad actual del agua en los humedales Campiche y Los Maitenes, debido a la lejanía que presentan las muestras de las principales zonas afectadas. Debido a esto, es necesario un estudio representativo y detallado sobre la calidad del agua en los humedales, incluyendo sus tributarios y descargas, con el objetivo de conocer la calidad hidroquímica del agua superficial en los humedales respecto a las normas ambientales chilenas.

1.2 Hipótesis

- La calidad del agua se verá afectada debido a la presencia de zonas enriquecidas en ciertos elementos en el suelo y aire cercanos a los Humedales Campiche y Los Maitenes.
- Las actividades antrópicas presentes en la zona de estudio podrían ser fuente de contaminación y degradación de la calidad hidroquímica en los humedales Campiche y Los Maitenes, donde la concentración de los elementos dependerá de la proximidad a las fuentes emisoras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

- Caracterizar la hidroquímica inorgánica de los humedales Campiche y Los Maitenes, incluyendo las concentraciones de elementos mayores, metales y no metales presentes en el agua.

1.3.2 Objetivos secundarios

- Contrastar los resultados obtenidos con las normas chilenas de agua potable (NCh 409) y agua de riego (NCh 1333).
- Caracterizar la hidroquímica de sectores alejados del Complejo Industrial Ventanas.

- Identificar posibles orígenes de los enriquecimientos de elementos observados.

2. Antecedentes

2.1 Humedales

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más importantes del mundo (Mitsch & Gosselink, 2000) y se caracterizan por ser zonas en donde la presencia del agua es abundante, permitiendo albergar una gran cantidad de biodiversidad (WCS, 2019). Poseen diversas funciones para el medio ambiente como la regularización del clima y el ciclo hidrológico, además de prestar importantes servicios para el ser humano (Tabla 1). Los tipos de humedales son variados y, en Chile, se pueden encontrar en lugares tan remotos como la Cordillera de los Andes, el Altiplano Boliviano y el Desierto de Atacama, así como también en poblados como el Lago Villarrica, Batuco o Puchuncaví.

Tabla 1. Cuadro resumen con los principales servicios que los humedales prestan al ser humano. Extraído y modificado de Vivanco (2017).

Suministro de servicios	Regulación de servicios	Servicios culturales
Productos obtenidos desde los ecosistemas	Beneficios obtenidos de los procesos de regulación de los ecosistemas	Beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas
Alimento, Agua potable, Combustible, Fibra vegetal, Bioquímicos, Recursos genéticos	Regulación del clima, Control de enfermedades, Regulación del agua, Polinización	Espirituales y religiosos, Recreación y turismo, Estético, Inspiracional, Educativo, Sentido de identidad, Patrimonio cultural
Servicios de soporte		
Servicios necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema		
Formación de suelos	Ciclado de nutrientes	Producción primaria

Existen muchos organismos, investigadores y agencias que han tratado de definir que es un humedal. La gran mayoría realiza una definición en base a la hidrología, el suelo y la biota, destacándose 3 autores:

- Ramsar, Irán, 1971: “Se considera como un humedal todas las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.”
- Cowardin *et al.*, 1978: “Los humedales son tierras de transición entre sistemas acuáticos y terrestres donde la columna de agua esta generalmente en o cerca de la superficie o la tierra está cubierta por aguas superficiales. Los humedales deben tener uno o más de los tres atributos siguientes: (1) al menos periódicamente, la tierra sostiene predominantemente hidrófitas, (2) el substrato es predominantemente tierra hídrica no drenada, y (3) el substrato no es suelo, y es saturado de agua o cubierto por agua superficial en algún momento durante la época de crecimiento de cada año”.
- *Federal Geographic Data Comitte* (FGDC), 2013: “Un área que es regularmente saturada por agua superficial o subterránea, y que se caracteriza por la prevalencia de vegetación que está adaptada a la vida en condiciones de suelos saturados (Ej., pantanos, turberas, marismas y estuarios)”.

Al igual que la definición de un humedal, existen diversos autores que tratan de clasificar los tipos de humedales existentes:

La *Ramsar Convention Secretariat* (2013) genera una división acorde a la ubicación y paisaje que poseen los humedales, otorgando una clasificación rápida para los 6 tipos diferentes de humedales descritos por esta convención, lo cuales se clasifican según sus características en:

- **Marinos:** Humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas, pastos marinos y arrecifes de coral.

- **Estuarinos:** Incluidos deltas, marismas de mareas y manglares.
- **Lacustres:** Humedales asociados a lagos.
- **Ribereños:** Humedales adyacentes a ríos y arroyos.
- **Palustres:** Pantanosos – marismas, pantanos y ciénagas.
- **Artificiales:** Estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales.

Cowardin *et al.*, 1978 proponen un sistema de clasificación en sistemas, sub-sistemas y clases; encontrándose 5 sistemas: Marinos, Estuarios, Ríos, Lacustres y Palustres, diferenciados de acorde a su química, biología, geomorfología e hidrología. Luego, cada sistema puede presentar distintos sub-sistemas, dependiendo de la ubicación y parámetros hidrológicos, y a su vez, cada sub-sistema puede desglosarse en clases, las cuales se clasifican dependiendo del tipo de vegetación dominante y el tipo de suelos. Las clases divergen en sub-clases, las cuales se separan en dominios, los que se dividen en modificadores. Estos últimos describen el régimen de aguas, pH y suelos.

Semeniuk & Semeniuk (1995) generan una clasificación basada en lo mencionado por la convención de Ramsar, pero añaden principios geomorfológicos e hidrológicos para reclasificar los humedales, con el objetivo de poseer mayor facilidad al momento de agrupar y reconocer humedales en todo el mundo. Los criterios geomorfológicos e hidrológicos generan las divisiones primarias y secundarias (Tabla 2), mientras que aquellos criterios definidos en la Convención de Ramsar para la separación de humedales son utilizados como una división terciaria.

Las clasificaciones primarias y secundarias generan un total de 13 tipos de humedales diferentes, mientras que las clasificaciones terciarias están enfocadas en caracterizar con un mayor detalle aquellas características específicas de cada uno de estos humedales, estas características son: tamaño, suelo, tipo de vegetación, salinidad, consistencia de salinidad y forma.

Tabla 2. Clasificaciones primarias (Hidroperíodo) y Secundarias (Geomorfología). Extraído y modificado de Semeniuk & Semeniuk (1997).

Hidroperíodo	Forma				
	Cuenca	Canal	Plano	Pendiente	Terreno alto
Inundación permanente	Lago	Río	-	-	-
Inundación de temporada	Sumidero	Arroyo	Planicie de inundación	-	-
Inundación intermitente	Playa	Cauce	Barlkarra	-	-
Sobresaturación de temporada	Represa	Canal	Paluplanicie	Palupendiente	Palumonte

Las clasificaciones primarias y secundarias generan un total de 13 tipos de humedales diferentes, mientras que las clasificaciones terciarias están enfocadas en caracterizar con un mayor detalle aquellas características específicas de cada uno de estos humedales, estas características son: tamaño, suelo, tipo de vegetación, salinidad, consistencia de salinidad y forma.

2.2 Humedales en Chile

La importancia que poseen los humedales en Chile no difiere de aquellas detectadas a lo largo de todo el mundo (Tabla 1), por lo que su estudio y comprensión son vitales para su preservación y protección. En las zonas hiperáridas a áridas en el norte de Chile, la presencia de zonas húmedas supone un lugar con abundante flora y fauna, además de permitir el desarrollo humano desde épocas precolombinas, como lo fue y sigue siendo el Salar de Atacama (WCS, 2019).

Al igual que en la zona norte de Chile, la presencia de humedales en la zona centro y sur son igual de importantes que aquellos ubicados en el desierto, siendo importantes reservas de la biosfera y del desarrollo humano.

En Chile existen alrededor de 40.000 humedales, presentándose casi todos los tipos de humedales definidos en la Convención de Ramsar (WCS, 2019) debido principalmente a las variaciones en la geografía y clima, con la excepción de los arrecifes de coral, humedales de tundra y kársticos. (Ministerio del Medio Ambiente, 2019)

Acorde a WCS (2019), los humedales presentes en Chile pueden separarse en cuatro grandes grupos:

- **Humedales Altoandinos:** Son aquellos humedales que se encuentran sobre los 3.000 metros de altura. Corresponden principalmente a lagunas, vegas, bofedales, salares, termas, ríos, glaciares y géiseres, entre otros. Una de las principales características de estos son sus ecosistemas microbianos, en donde se pueden encontrar principalmente cianobacterias y estromatolitos (entre muchos otros).
- **Humedales Costeros:** Son aquellos que se ubican a lo largo de la costa continental y las islas oceánicas, entre los que se incluyen las marismas, lagunas costeras, planicies mareales y estuarios.
- **Turberas:** Este tipo de humedal se restringe al sur de Chile, específicamente en la Patagonia, y se caracterizan por poseer grandes reservas de carbono, además de la ocurrencia del musgo del género "*Sphagnum*".
- **Hualves:** Corresponden a bosques nativos pantanosos, anegados de agua, con drenaje deficiente. Están formados por especies leñosas, mirtáceas nativas, como el temo, la pitra, el chequén y el tepu. Se ubican principalmente entre la cordillera de la costa y la precordillera en la zona sur de nuestro país.

2.2.1 Humedales Chilenos de importancia internacional

Actualmente existen 13 sitios Ramsar en Chile (Tabla 3), los cuales han sido seleccionados debido a la importancia que estos poseen para la supervivencia de aves migratorias y peces (WCS, 2019). Todos los humedales seleccionados representan reservas importantes para la naturaleza, albergando a una gran cantidad de especies endémicas y nativas, algunas de las cuales se encuentran en amenaza o peligro de extinción.

De los 13 sitios Ramsar existen 2 ubicados en la Región de Valparaíso, los cuales son:

- Humedal el Yali, ubicado en las cercanías de El Convento en Santo Domingo, cuenta con una superficie de 520 hectáreas y posee la denominación de “Reserva Nacional” desde mayo de 1996 mediante el DS N°41/1996. Es el Sitio Ramsar N° 878 y es parte de los 56 sitios estratégicos para la conservación de la biodiversidad.
- Parque Andino Jucal, ubicado en la cuenca del río Jucal con 13.796 hectáreas (representando $\frac{3}{4}$ partes de esta cuenca), posee 5 humedales importantes: Vega la Roca, Vegas la Paz, Vegas de Nacimiento, Cajón de Mardones: Vega las Mardones y el Cajón de Navarro: Vegas las Canchitas, lo que motivo su ingreso en el año 2010 a la Convención de Ramsar. La flora y fauna presente en este parque es casi en su totalidad nativa, además de la presencia de algunas endémicas.

Tabla 3. Resumen de los sitios Ramsar presentes en Chile, región en la que se encuentra y su superficie (WCS, 2019).

Humedal	Región	Superficie (Ha.)
Salar de Surire	Arica y Parinacota	15.858
Salar del Huasco	Tarapacá	6.000
Salar de Tara	Antofagasta	96.439
Salar de Pujsa	Antofagasta	17.398
Sistema Hidrológico de Soncor del Salar de Atacama	Antofagasta	67.133
Salar de Agua Caliente IV	Antofagasta	15.529
Complejo Lacustre Laguna del Negro Francisco y Laguna Santa Rosa	Atacama	62.460
Las Salinas de Huentelauquén	Coquimbo	2.722
Santuario de la naturaleza Laguna Conchalí	Coquimbo	34
Parque Andino Juncal	Valparaíso	13.796
Humedal el Yali	Valparaíso	520
Santuario de la naturaleza Carlos Arwandter	Los Ríos	4.877
Bahía Lomas	Magallanes y Antártica Chilena	58.946

2.3 Ubicación Zona de Estudio

La zona de estudio se ubica en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile. En ella, habitan 18.546 personas (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017), ubicadas en 19 localidades rurales y 3 centros urbanos, correspondientes a Ventanas, Campiche y Puchuncaví. Esta comuna presenta una superficie total de 301 km² y limita con las comunas de Zapallar hacia el norte, La Calera y Nogales hacia el este, Quinteros y Quillota hacia el Sur, mientras que hacia el oeste limita con el Océano Pacífico (Figura 1).

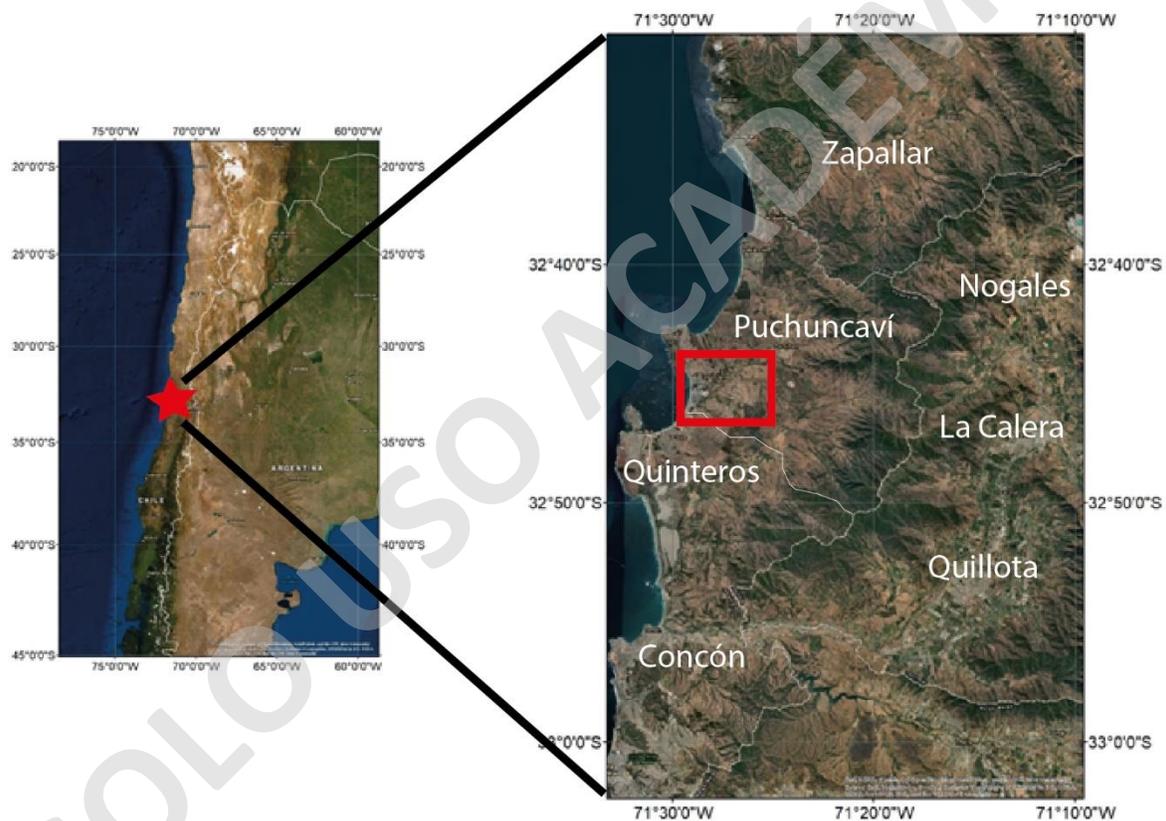


Figura 1. Ubicación de la comuna de la zona de estudio a una escala regional (polígono rojo). Imágenes extraídas de mapas base de ArcGis 10.5.

Las actividades económicas de la comuna se enfocan en la pesca artesanal, agricultura y ganadería de pequeña escala, el turismo y la industria. Esta última actividad tiene como

principal ubicación el Complejo Industrial Ventanas (CIV), llamado así por la cercanía con el centro urbano Ventanas (Figura 2).

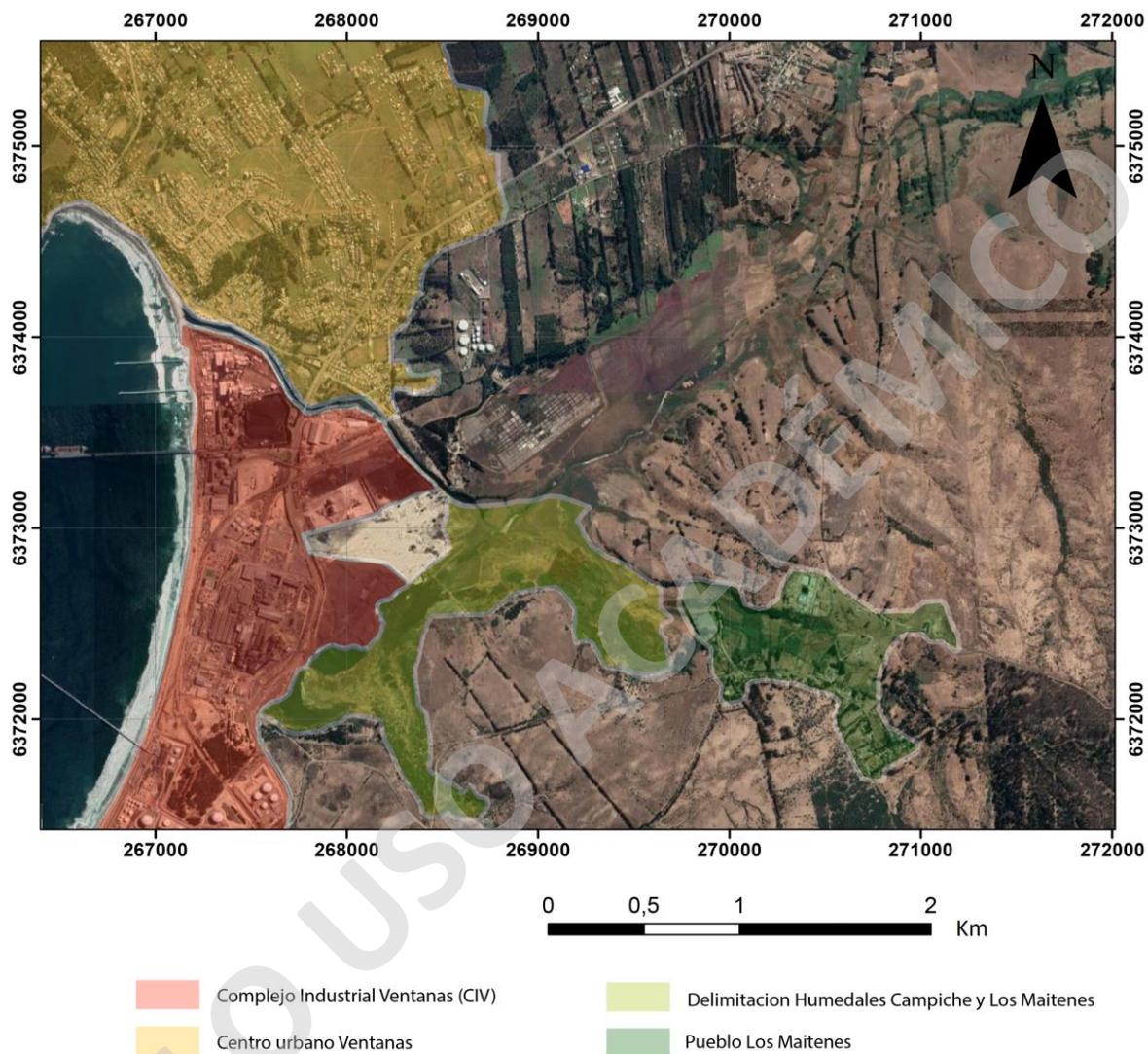


Figura 2. Ubicación del CIV, los humedales Campiche, Los Maitenes y poblados más cercanos a estos. Elaboración propia.

Dentro del complejo mencionado anteriormente existen 12 empresas, ligadas al área de la minería, química y energética (Figura 3).

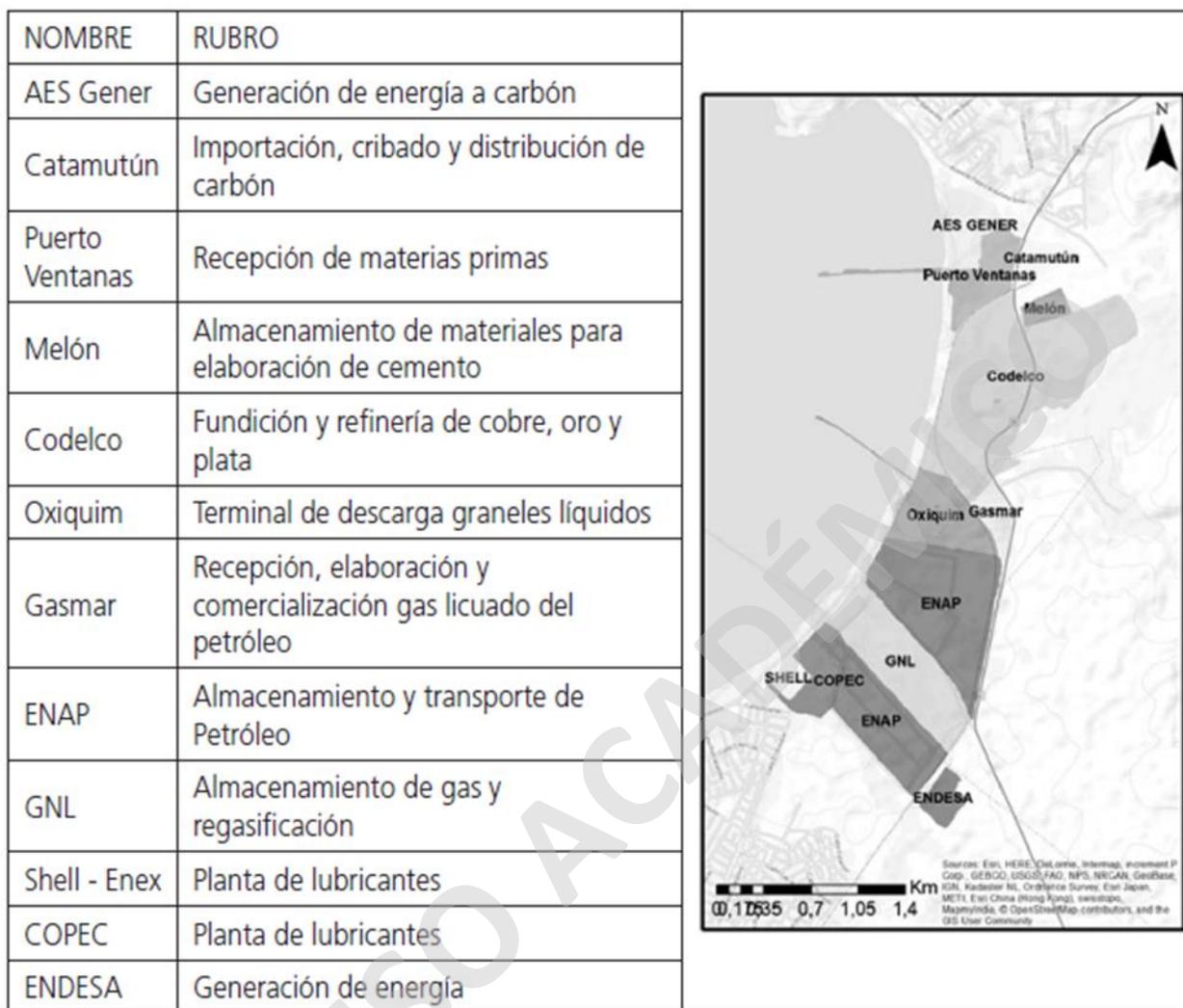


Figura 3. Nombres, rubros y ubicación de las empresas pertenecientes al complejo industrial ventanas. Extraído de Bergamini *et al.*, 2018.

En esta comuna se ubican varios cuerpos de agua superficiales (Figura 4), entre los cuales destacan:

- El Estero Puchuncaví, que atraviesa toda la comuna en una dirección aproximada noreste–suroeste, con una longitud aproximada de 15,3 km.
- El humedal Campiche, ubicado a 3,3 kilómetros al sur de Ventanas, posee una superficie aproximada de 20 hectáreas.

- El humedal Los Maitenes, ubicado a 1,6 km al este del Humedal Campiche, posee una superficie aproximada de 16 hectáreas.

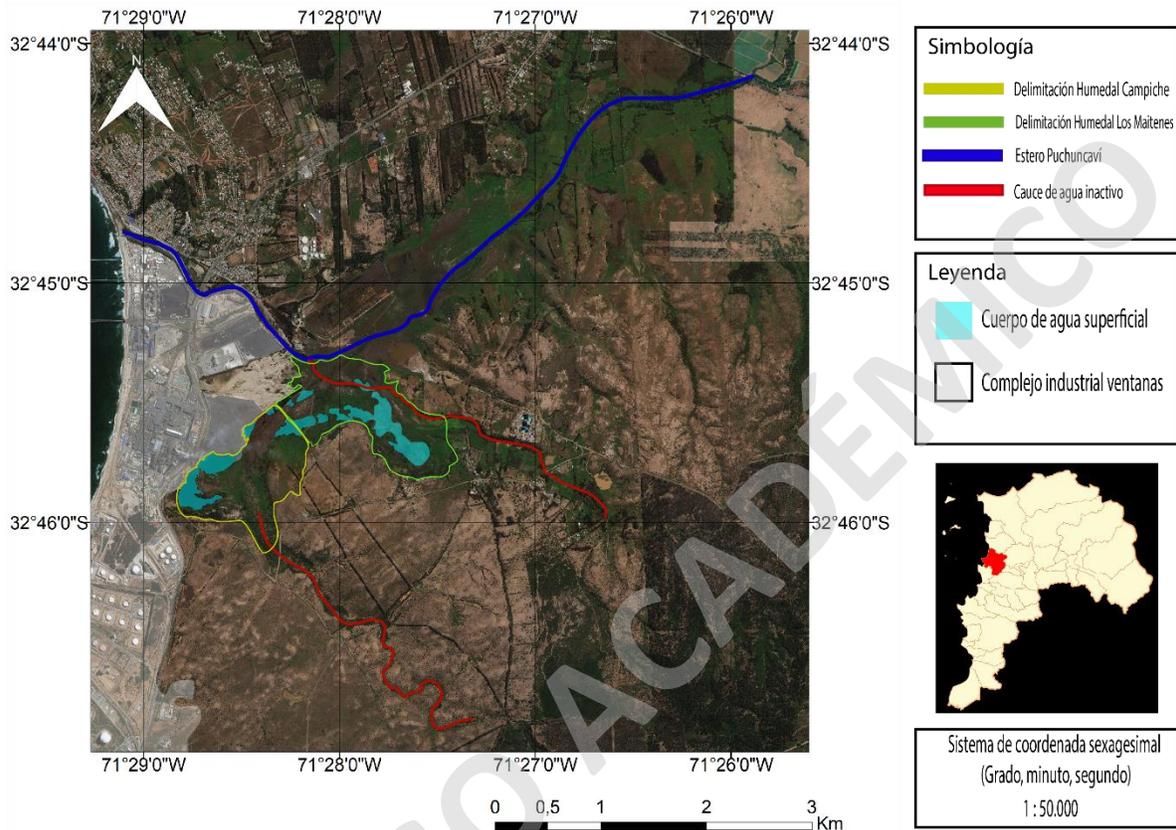


Figura 4. Zona de estudio en donde se destacan los principales cauces de agua presentes, la ubicación de los humedales Campiche, Los Maitenes y el CIV. Imagen extraída y modificada de Google Earth.

2.4 Antecedentes de la zona de estudio

A partir de la década del 80, Puchuncaví ha sido lugar de diversos estudios enfocados al ámbito social y ambiental, estos últimos con una clara orientación hacia las concentraciones de metales y metaloides en sedimentos, aire y biota (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de algunos estudios realizados en la comuna de Puchuncaví en aire, suelo, agua y plantas.

Título	Autores	Año	Matriz	Elementos analizados
Evidencias de contaminación con metales pesados en un sector del secano costero de la V Región	Sergio González y Enrique Bergqvist	1986	Sedimentos	Cd, Cu, Pb y Zn
Acumulación metálica en suelos del área bajo influencia de las chimeneas industriales de Ventanas (Provincia Valparaíso, V Región)	González e Ite	1992	Sedimentos	Cd, Cu, As, Pb y Zn
ENAMI's Ventanas smelter heavy metals pollution	E.A Siegel & P.D. Siegel	1995	Sedimentos	Cu, Pb, Zn, Cd y As
Sarcocornia neei as an Indicator of Environmental Pollution: A Comparative Study in Coastal Wetlands of Central Chile	Verónica Meza, Camilo Lillo, Daniela Rivera, Eva Soto, Rodrigo Figueroa	2018	Plantas	Cd, Cu, Pb y As
Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví	Centro Nacional del Medio Ambiente	2013	Aire	MP 10, MP 2.5 y SO ₂

Título	Autores	Año	Matriz	Elementos analizados
Informe de evaluación plan de descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas 1993 - 2004	Comisión Nacional del Medio Ambiente	2005	Aire	MP 10, MP 2.5 y SO ₂
Valoración del ecosistema Humedal Campiche: propuesta de líneas de acción para su conservación y uso racional	Joselin Fernández	2011	Agua y Sedimentos	As, Cd, Cu, Hg y Pb
Diagnóstico de sitios de alto valor para la conservación en la Región de Valparaíso Línea 1	Pontífice Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Playa Ancha	2015	Agua	Pb, As y Cu
Propuesta de reciclaje escoria de cobre de la Fundición Ventanas de Codelco, para mitigar impacto ambiental	Pedro Carrasco	2017	Sedimentos	Multielemental

El origen de estos estudios (Tabla 4) se debe en gran medida a la presión que ha ejercido la comunidad a los gobiernos e industrias presentes en la comuna de Puchuncaví para que den respuesta a los casos de intoxicación y malestar en la salud de los habitantes de la zona, además de una visible degradación ambiental en la comuna que ha impactado directamente en la pesca artesanal y agricultura (Terram, 2018).

El primer estudio en Puchuncaví orientado a la posible contaminación en los sedimentos fue realizada por Gonzáles y Bergqvist en 1986, los que estudiaron la concentración de diversos metales en el suelo (hasta 20 cm de profundidad) (Tabla 5) y hojas de eucaliptus de 25 lugares de la comuna de Puchuncaví, entre los cuales se encuentran Los Maitenes, Horcón, Campiche, El Rungue, Puchuncaví (pueblo) y Marbella.

Tabla 5. Concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc presentes en muestras de suelo en sitios de la comuna de Puchuncaví. Los resultados (ppm) se contrastan con un “testigo” (suelos sin presencia de contaminación), cuya diferencia se expresa de manera porcentual. Extraído y modificado de Gonzáles y Bergqvist (1986).

Sitio de Muestreo		Cadmio		Cobre		Plomo		Zinc	
Nº	Nombre	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
AL OESTE DE VENTANAS									
s/n	Testigo (Quintero)	<LMD ₂	-	9,5	-	3,7	-	4,4	-
AL SUR DE VENTANAS									
1	ENAP	0,3	500	265,8	2698	32,7	739	21,4	386
2	Valle Alegre A	<LMD	0	28,6	201	4,7	27	5,1	16
3	Valle Alegre C	<LMD	0	7,8	-18	1,8	-51	2,9	-34
AL ESTE DE VENTANAS									
5	Los Maitenes A	2	390 0	828,7	8623	116, 3	304 3	41,8	850
6	Los Maitenes B	0,8	900	198,5	1989	18,6	403	14	218
7	Los Maitenes C	0,2	300	58,7	518	24,8	651	8,5	93
12	Cerro La Cruz	<LMD	0	28,5	200	5,2	40	3,4	-23
10	Pucalán	0,1	100	31,3	229	38,5	940	4,8	4
AL NORTE DE VENTANAS									
11	Campiche	<LMD	0	137,4	1346	54,2	136 5	17,4	295
13	Alto Puchuncaví	<LMD	0	99,4	946	35,6	862	10,6	141
15	Puchuncaví C	0,01	100	67,5	610	21,9	492	17	286
17	El Rincón	<LMD	0	44,9	373	46,8	116 5	26,1	493
20	Rungue	<LMD	0	125	1216	45,4	112 7	28	536
22	Potrerrillos	<LMD	0	21,8	126	3,7	0	4,3	-2
18	Horcón	<LMD	0	8,7	-8	9	143	2,8	-36
25	Maitencillo	<LMD	0	41,5	337	30,4	722	11	150
¹ ppm = mg metal/Kg suelo									
² Límite mínimo de detección = 0,05 Cd/kg suelo; valor considerado para cálculo de porcentajes, en casos de contenidos menores									

A partir de sus resultados, Gonzáles & Bergqvist (1986) concluyen la existencia de contaminación por elevadas concentraciones de cadmio, cobre, plomo y zinc, los cuales poseen una buena correlación espacial y por ende podrían atribuirse a una única fuente estacionaria ubicada en las cercanías de las zonas que presentan una mayor concentración de metales pesados, atribuida al CIV. Las altas concentraciones de cobre en sentido noreste concordante con los vientos de la zona, hace suponer que el principal medio de transporte de estos metales es el aire.

El malestar social provocado por la notoria degradación ambiental generó que en el año 1991 se reglamentara el funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso y material particulado (MP 10 y MP 2,5) mediante el Decreto Supremo N° 185/91, el cual obliga a las empresas del CIV a regular estas emisiones para que cumplan con la normativa de calidad del aire dispuesta en ese año. En este proceso de regulación las empresas ENAMI y CHILGENER S.A. propusieron el “Plan de Descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas”, el cual fue aprobado mediante el Decreto Supremo N° 252/92 y contempla un cronograma para la disminución anual de azufre, anhídrido sulfuroso y material particulado (Tabla 6) hasta cumplir con la norma de calidad de aire para estas especies químicas.

Tabla 6. Emisiones de material particulado (a), azufre y anhídrido sulfuroso (b) que las empresas Fundición de Ventanas (ENAMI) y Termoeléctricas (CHILGENER) deben emitir durante los años 1993 a 1999, para cumplir con las normas de calidad de aire. Elaboración propia en base a DS N° 185/91.

Emisiones de material particulado				
Año	ENAMI Ventanas		ENAMI Ventanas	
	t/año	t/día	t/año	t/día
1993	3.400	9,3	26.000	71,3
1994	3.400	9,3	26.000	71,3
1995	3.400	9,3	3.000	8,2
1996	3.400	9,3	3.000	8,2
1997	3.400	9,3	3.000	8,2
1998	2.000	5,5	3.000	8,2
1999	1.000	2,7	3.000	8,2

(a)

Emisiones de azufre y anhídrido sulfuroso				
Año	ENAMI Ventanas		ENAMI Ventanas	
	t/año	t/día	t/año	t/día
1993	62.500	170	Deberá cumplir norma de emisión de 1,13 Kg de SO ₂ por millón de BTU	
1994	62.500	170		
1995	62.500	170		
1996	62.500	170		
1997	62.500	170		
1998	45.000	123		
1999	-	-		

(b)

En 1992 González e Ite continúan con la investigación de Gonzáles y Bergqvist (1986) siguiendo una metodología similar, analizando las concentraciones de los elementos cercanos en los suelos (hasta 20 cm) de las cercanías del CIV. Los resultados demuestran que las concentraciones de todos los metales pesados estudiados aumentaron en todos los lugares de muestreo desde 1983 a 1991, alcanzando variaciones de hasta 330 veces en el sitio 5, el cual es el sitio de máxima acumulación metálica ubicado a 1,5 kilómetros al Sureste del CIV. Se estableció la presencia de una correlación directamente proporcional en los contenidos de cobre, arsénico, cadmio y zinc (Figura 5) indicando una posible fuente común, correspondiente a una fundidora de cobre con aportes de una planta termoeléctrica para estos metales. Contrario a lo anteriormente mencionado, el plomo parecería poseer una fuente atribuible a los vehículos que circulan por el sector o la planta de refinería de hidrocarburos ubicada en Concón.

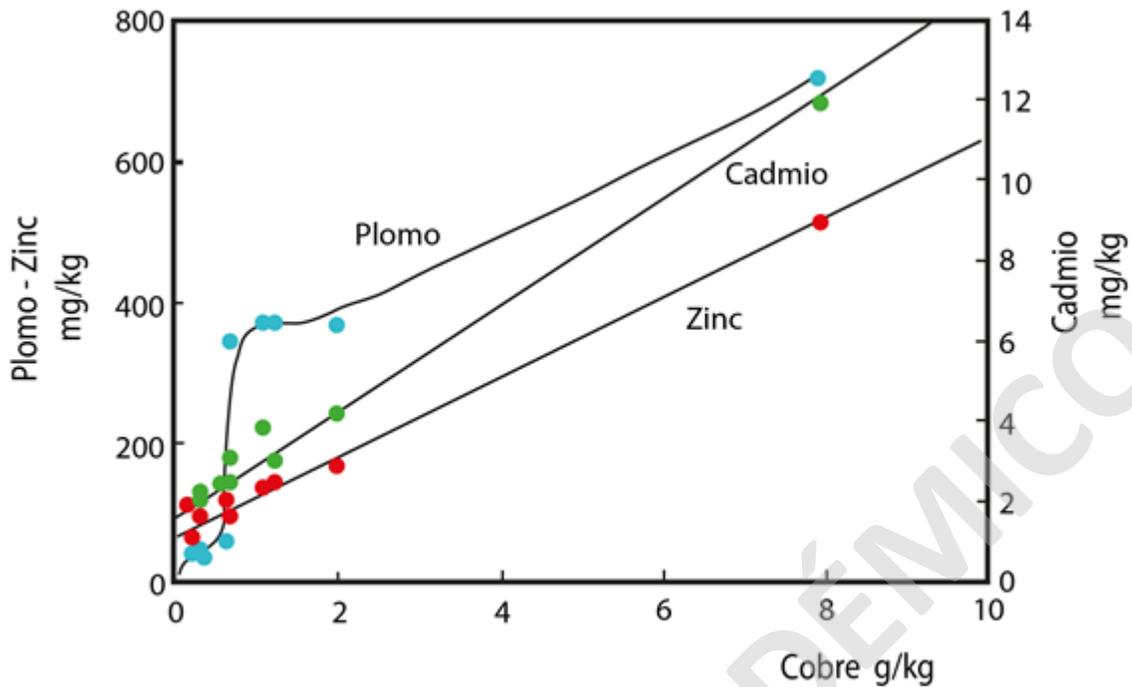


Figura 5. Correlación entre las concentraciones de cobre, plomo, zinc y cadmio. Extraído y modificado de González e Ite (1992).

A pesar de los planes de reducción de emisiones (Tabla 6), en el año 1994 la zona cercana al CIV es declarada “saturada” en anhídrido sulfuroso y material particulado mediante el Decreto Supremo N° 346/94.

Siegel & Siegel (1995) investigan la concentración de cobre, plomo, zinc, arsénico y cadmio en los sedimentos cercanos al complejo industrial ventanas, además de la mineralogía del Escorial de Codelco. En este estudio se demuestra que las concentraciones de los elementos anteriormente mencionados aumentan a medida que las muestras se acercan al CIV, además de la presencia de diferentes fases minerales que los incorporan (Tabla 7).

Tabla 7. Formula química de las diferentes fases minerales presentes en el Escorial de Codelco. Extraído de Siegel & Siegel (1995).

Fases	Fórmula
Mata de cobre	$Cu_{0,84}Fe_{0,08}S_{0,87} - Cu_{0,64}Fe_{0,01}S_{0,27}$
Digenita	$Cu_{2x}S$
Metal blanco	$Cu_{1,28}S_{0,64} - Cu_{1,44}S_{0,68}$
Ferritas (Cu)	$CuFe_2O_4$
Cuprita	Cu_2O
Sulfatos hidratados	$CuSO_4 \cdot nH_2O$
Ferritas (Zn)	$ZnFe_2O_4$
Óxidos	ZnO
Sulfuros	ZnS (trazas)
Anglesita	$PbSO_4$
Galena	PbS (trazas)
Thiocianita	PbS_2O_3
Fases de arsénico	$Cu_2As_7O_7 \cdot 3H_2O$ $Cu_2O \cdot As_2O_5 \cdot 3H_2O$ $Cu_3As_4O_{15} \cdot 10H_2O$ As_2O_3 αAs_2O_3

Conama (2005) realiza una recopilación sobre las emisiones que ENAMI y CHILGENER S.A. realizan entre los años 1993 – 2004, con la finalidad de saber si las promesas sobre las emisiones de anhídrido sulfuroso y material particulado propuestas en el Decreto Supremo N° 252/92 se han cumplido. Entre los resultados del informe, se destaca el cumplimiento de las promesas propuestas en el decreto anteriormente mencionado, con una disminución de un

94,4% para el material particulado y 68% de SO₂. Estas disminuciones lograron el cumplimiento de las normas anuales y diarias de SO₂ (D.S. N° 185/92 y D.S. N° 113/03), sin embargo, existe un incumplimiento entre el año 1993 al 2004 de la norma horaria de calidad secundaria, encontrándose concentraciones que superan la concentración sobre el nivel de saturación¹. Para el material particulado se logra el cumplimiento de las normas diarias y anuales que aseguran niveles bajo la saturación, pero de igual manera se registran niveles anuales sobre la latencia² (D.S. N° 59/98 y D.S. N° 45/01).

En vista de estos resultados se proponen recomendaciones como la mejora del inventario en el CIV para crear nuevos modelos de dispersión, debido principalmente a que la zona saturada establecida por el D. S. N° 346/94 no considera las nuevas empresas que a la fecha de elaboración de este informe comenzaron a operar en el CIV. Además, sugiere una actualización del “Plan de descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas” establecido por el D.S. N° 252/92, ya que, a pesar de cumplirse, aún no se logra un cumplimiento total de las normas de calidad de aire, el cual era el principal objetivo de dicho plan.

Fernández (2011) aborda el estudio del humedal Campiche desde múltiples puntos de vistas destacándose los datos de parámetros físicos obtenidos y metales presentes (Tabla 8). Dentro de las observaciones realizadas en este informe se destaca que la concentración de metales aumenta a medida que las muestras se sitúan en las cercanías del escorial de la planta de Fundición de Cobre Ventanas, junto con una disminución en su pH y demanda biológica de oxígeno.

¹ Zona en la cual una o más normas de calidad ambiental se encuentran superadas.

² Zona en la que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo, se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma.

Tabla 8. Algunos parámetros físico-químicos, metales disueltos (a) y en sedimentos (b) presentes en el Humedal Campiche. Extraído y modificado de Fernández (2011).

	T°	pH	SDT (mg/l)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)
Máximo	23	8	33	0,27	<0,01	1,6	<0,02	0,23
Mínimo	22	8	10	0,22	<0,01	0,05	<0,02	0,04

(a)

	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Máximo	1.395	212	25.600	1.200	7.000
Mínimo	45	0,5	272	407	35

(b)

La principal conclusión de Fernández (2011) es que el Humedal Campiche a pesar de poseer algunos elementos disueltos fuera de la norma chilena como el cobre y el arsénico, puede sustentar vida, lo cual se refleja en la alta disponibilidad de oxígeno y especies que se pueden observar. Otro aspecto importante de este informe es la existencia de flora capaz de captar algunos metales pesados como el plomo, cobre y arsénico (*Typha angustifolia*), además de algunos microorganismos que ayudan con la autodepuración dentro del humedal.

Durante 2013, el Centro Nacional del Medio Ambiente (Cenma) realizó un estudio centrado en evaluar la exposición a la presencia de sustancias potencialmente contaminantes en el aire y polvo en la zona de estudio, así como también, establecer mecanismos y herramientas de gestiones integradas, eficientes y ambientalmente sustentables que permitan salvaguardar la salud de las personas y el medio ambiente.

Este estudio presenta los datos obtenidos de la exposición de contaminantes en el aire mediante estaciones de monitoreo propias de este informe en Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes y “Sur”, así como también reportes de estaciones de monitoreo de las empresas CODELCO Puchuncaví, ENAP Concón y Red GNL Quinteros.

En el informe se detallan las emisiones de SO₂ presentes en el CIV, en donde se logra apreciar las diferencias en las emisiones de CODELCO División Ventanas, AES GENER, ENAP y otras empresas del complejo (Figura 6).

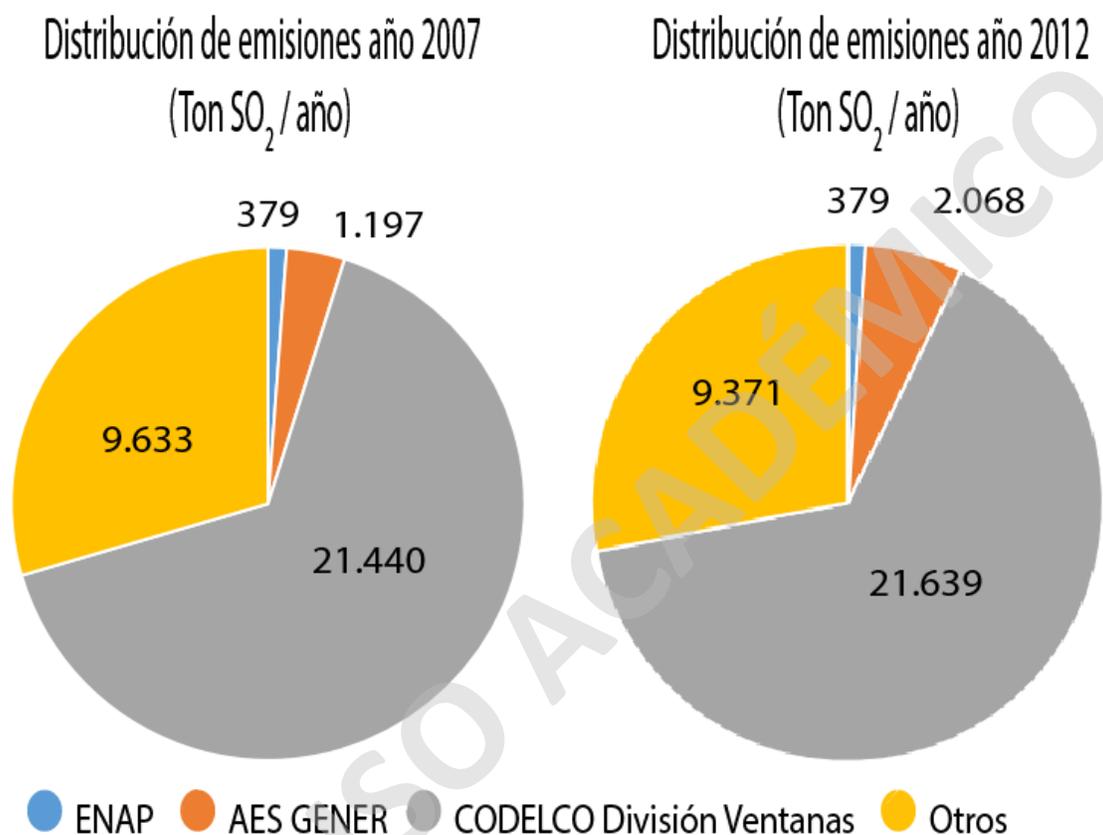


Figura 6. Emisiones de SO₂ de las empresas presentes en el CIV. Elaboración propia en base a datos de Cenma (2013).

En base a la información disponible para el 2012 en las estaciones de monitoreo se realizaron modelos de dispersión de SO₂, en los cuales se observa la variabilidad que tiene este compuesto en la atmósfera dependiendo de la hora, siempre con un predominio en dirección norte, variable a noroeste o noreste.

Respecto al material particulado, este se encuentra en la zona de estudio tanto en su fracción fina (2,5 micrómetros) como gruesa (10 – 500 micrómetros). Se registra la existencia

esporádica de MP 2,5 sobre la norma, detectándose altas concentraciones de cobre y selenio en él, mientras que el material particulado sedimentable presenta metales pesados como cadmio, arsénico, plomo, cromo, níquel, zinc, manganeso, vanadio, molibdeno y cobre (Tabla 9).

CENMA concluye que existen contaminantes en el aire asociados a anhídrido sulfuroso y metales pesados presentes en el material particulado, además, propone actualizar la red de monitoreo de aire con la finalidad de actualizar los modelos de dispersión, ya que estos no poseen la robustez necesaria que una zona como Puchuncaví necesita.

Tabla 9. Concentraciones de metales pesados en material particulado sedimentable presentes en diversos lugares de la comuna de Puchuncaví. Extraído de Cenma (2013).

Estación	Concentración promedio de metales de MPS insoluble (polvo grueso)									
	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	V (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Hogar de ancianos	6,78	332,27	422,24	717,77	190,21	1.067	1.182	358,9	117,6	29.014
La Greda	3,96	361,25	475,45	223,6	156,31	1.252	412,2	129,7	86,41	25.885
Los Maitenes	281	224,15	519,28	429,38	106,76	1.141	376	121,5	69,13	12.582
Horcón	1,43	67,2	157,97	418,55	131,86	142,5	390,2	129,1	17,04	4.192
Consultorio Puchuncaví	2,38	66,98	123,52	602,3	272,43	379,11	478,7	110,5	22,65	5.820
Interior-Puchuncaví	5,69	14,66	184,95	3.716	1.767	275,1	890,1	148,1	8,2	4.260
Mínimo	1,43	26,97	104,06	223,6	106,76	142,5	376	10,5	12,97	4.198
Máximo	6,78	361,25	519,28	3.628	1.744	1.252	1.182	358,9	117,6	29.014
Promedio	3,73	179,8	300,42	1.003	433,72	712	618,1	164,1	54,3	13.726

El estudio realizado por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y la Universidad de Playa Ancha (UPA) durante el año 2015 en el Humedal Los Maitenes, titulado “Diagnóstico de sitios de alto valor para la conservación en la Región de Valparaíso, línea 1”, entrega las primeras directrices de la calidad hidroquímica del humedal Los Maitenes en donde destacan líneas bases de suelo y agua, además de clasificar los humedales

Campiche y Los Maitenes como costeros. Otra consideración importante de estos humedales es que se alimentan exclusivamente de las lluvias invernales y el nivel del acuífero, y que ambos conforman una sola gran unidad compleja en donde los espejos de agua presentes en ambos pueden exhibir una alta variabilidad, al igual que su calidad hidroquímica.

Se realizaron dos campañas de muestreos en enero y mayo del 2014, cuyo objetivo es caracterizar el agua de este humedal mediante dos muestras puntuales (Figura 7), de las cuales se obtienen diversos parámetros físicos y químicos como pH, T°, Conductividad eléctrica, plomo, cobre, arsénico entre otros (Tabla 10).

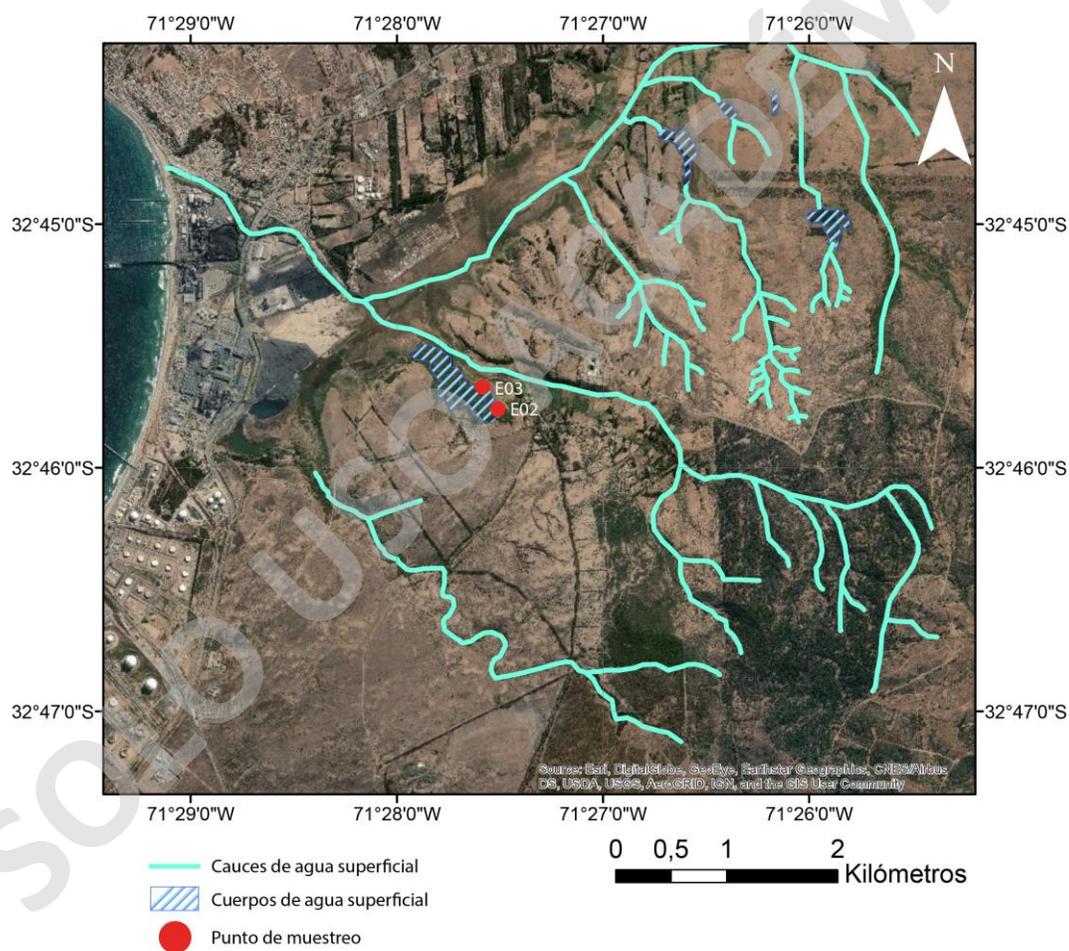


Figura 7. Hidrografía presente en el humedal Campiche, Los Maitenes y parte del Estero Puchuncaví, además de las muestras extraídas en el estudio realizado por la PUCV y UPA, 2015.

Entre las principales conclusiones de este estudio se encuentra la variación estacional en los valores de pH y T°, además de las altas concentraciones de metales pesados y arsénico en comparación con ríos de la Región de Valparaíso, O'Higgins y del Biobío.

Tabla 10. Parámetros obtenidos de las muestras E2 y E3 presentes en el estudio presentado por la PUCV y UPA en el 2015 y su comparación a la clasificación de la guía de criterios de calidad para normas secundarias de CONAMA (2004).

Parámetros	Unidad	Verano		Otoño		Guía Conama		
		E2	E3	E2	E3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
pH	pH	7,2	6,6	8,3	8	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
Temperatura	°C	15,4	24	22,52	21,55			
Conductividad	μS/l	1.141	595	3.249	1.606	750	1.500	2.250
Sólidos suspendidos totales	mg/l	0,5	0,5	1.797	998	-	-	-
Alcalinidad	Mg/l CaCO ₃	400	500	409	252	-	-	-
Nitrato	mg/l	0,01	0,04	N/D	N/D	0,06	>0,06	>0,06
Nitrato	mg/l	2,53	1,37	0,2	0,04	-	-	-
Cloruro	mg/l	424,5	354,5	425	301	100	150	200
Plomo	mg/l	<0,05	<0,05	N/D	N/D	0,0025	0,2	5
Arsénico	mg/l	0,019	0,043	N/D	N/D	0,05	0,1	0,1
Cobre	mg/l	<0,05	<0,05	N/D	N/D	9	200	1.000

Carrasco (2017) realizó una investigación sobre el Escorial de Codelco enfocada en su caracterización química, mediante la cual compara las composiciones de diferentes escoriales de cobre en el mundo con el ubicado en el CIV. La química elemental presente en el Escorial de Codelco se obtuvo mediante un análisis de fluorescencia de rayos X (Tabla 11), siendo esta la única caracterización geoquímica presente en este escorial.

Tabla 11. Concentraciones de diferentes elementos presentes en el Escorial de Codelco. Extraído de Carrasco, 2017.

Elemento	Concentración (%)	Óxido	Concentración (%)
Fe	48,16	Fe ₂ O ₃	68,85
O	34,76	-	
Si	8,92	SiO ₂	19,08
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	1,37	Al ₂ O ₃	2,59
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	NaO	0,75
K	0,46	K ₂ O	0,55
Si	0,29	SO ₃	0,73
Ti	0,18	TiO ₂	0,31
Pb	0,1	PbO ₂	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO ₂	0,11
Mo	0,06	MoO ₃	0,09
Cr	0,03	Cr ₂ O ₃	0,05
Sb	0,03	Sb ₂ O ₅	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P ₂ O ₅	0,06
Sn	0,01	SnO ₂	0,02
Zr	0,01	ZrO ₂	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

Meza *et al.* (2018) estudian la especie *Sarcocornia neei*, la cual pertenece a un tipo de plantas que toleran altas concentraciones de sales conocidas como halófitas. Esta especie ha sido foco de interés científico en el ámbito medioambiental debido a su capacidad de absorber

algunos metales pesados, siendo idóneas para trabajos de fitorremediación. En este estudio se comparan las concentraciones de cadmio, plomo, cobre, arsénico, nitrógeno, fosforo, potasio, sodio, calcio, magnesio, manganeso, zinc, hierro y boro, además de valores de pH y conductividad eléctrica, presentes tanto en el suelo como en la especie anteriormente mencionada para dos humedales: Los Maitenes, el cual es un humedal ubicado a 4 km de un importante polo industrial, y la Laguna de Matanzas, la cual es parte del humedal “El Yali”, que es protegido por el gobierno chileno mediante DS/N°41 del año 1996, además de ser un sitio Ramsar.

Las principales conclusiones de este estudio es que las concentraciones de metales pesados en el Humedal Los Maitenes son mucho mayores a las existentes en la Laguna de Matanzas, reflejado tanto en las muestras de sedimentos como de *Sarcocornia neei*, sin embargo, esta concentración no afecta el crecimiento de esta planta, mostrando solamente variaciones en el color que esta presenta. Los metales pesados presentes en el Humedal Los Maitenes se asocian principalmente a la presencia de la refinera de Cobre presente en las cercanías.

3. Caracterización de la Zona de Estudio

3.1 Clima

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima seco con nubosidad casi permanente, en donde la humedad relativa es elevada, alcanzando entre un 60-80% (Cosio *et al.*, 2007). La pluviometría presenta variaciones a lo largo de la comuna, presentándose la mayor en los sectores cercanos a la cordillera de la costa con una tasa de precipitaciones cercana a 600 mm anuales, seguido de los sectores costeros con un promedio de unos 400 mm al año y finalmente, la zona intermedia con un promedio de 300 mm al año (Dirección Meteorológica de Chile, 2001). Desde el año 2011 a la fecha del actual estudio, se han presentado periodos de escasas precipitaciones en la Región de Valparaíso, presentándose en algunos casos déficits de alrededor del 80% respecto a un año normal de lluvia, como lo es el caso del 2019 (Tabla 12).

Tabla 12. Precipitaciones (mm) por mes en la zona de estudio, desde el 2011 hasta el 2019. Datos extraídos de estación meteorológica “Laguna de Zapallar” mediante consulta con la Dirección General de Aguas.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	3	1	0	0	1,5
Abril	0	0	0	0	0	88,5	0	0	3
Mayo	0	67	141	7,5	0	0	103	24	8,5
Junio	66,5	77	40,1	117	0	64	135	78,5	54
Julio	43,5	0	0	28	44,5	96	32	64	13
Agosto	21,6	53	12,5	25,5	162	0	0	15	0
Septiembre	0	0	0	28,5	49,1	0	5,5	17,5	0
Octubre	0	76	0	1	51,5	14	46,5	4	0
Noviembre	0	1,5	0	0	0	0	1	0	0
Diciembre	0	19	0	0	0	13	1	0	0
Total	132	294	193	208	310	277	324	203	80

Al contrastar las distribuciones temporales de las precipitaciones, se puede observar la tendencia que presenta la lluvia en el sector, donde los meses de mayo, junio y julio son comúnmente los más lluviosos. El año en el que se realizó el muestreo fue el más seco en los últimos 10 años, y al contrastarse con un año de lluvias normales, se puede observar la tendencia temporal anteriormente mencionada, pero con un claro déficit en las precipitaciones (Figura 8).

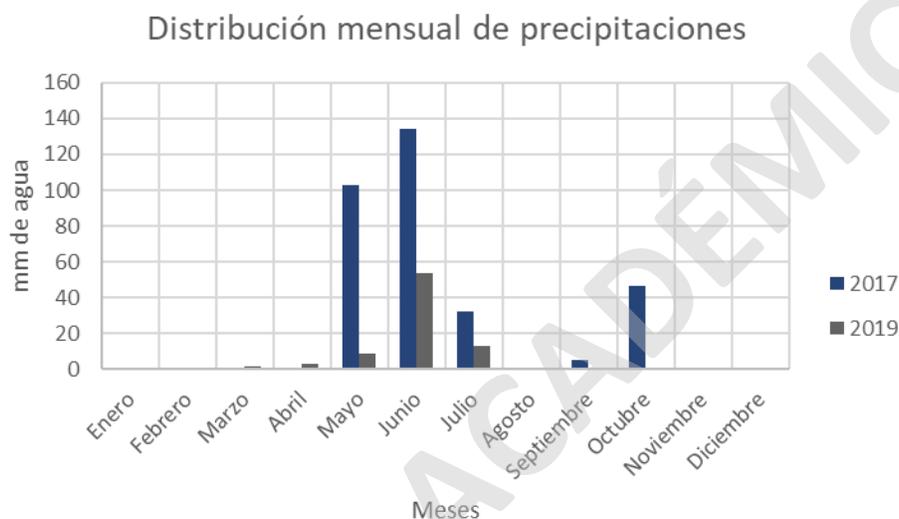


Figura 8. Distribución temporal de las precipitaciones entre los años más (2017) y menos (2019) lluviosos en los últimos 10 años para la comuna de Puchuncaví. Elaboración propia en base a datos de la Dirección General de Aguas.

Según la clasificación de clima de Köppen (1948), le correspondería un clima Csbn: en donde el mes más frío oscila entre los 18°C y -3°C, presenta una tendencia secoestival en las precipitaciones, la temperatura promedio del mes más caliente es inferior a 22°C y a lo menos mayor a 10°C durante 4 meses, además de una alta frecuencia de nubosidad.

3.2 Geomorfología

Börgel (1983) propone 8 dominios geomorfológicos en la Región de Valparaíso (Figura 9), entre los cuales destacan las planicies marinas y/o fluviomarinas junto con la Cordillera de la Costa en la zona de estudio. Las planicies tienen su génesis debido a procesos de erosión

y sedimentación marinos combinados con procesos sedimentarios continentales durante el Pleistoceno – Plioceno, mientras que la Cordillera de la Costa está formada por unidades volcánicas, sedimentarias e intrusivas (Rivano, 1993).

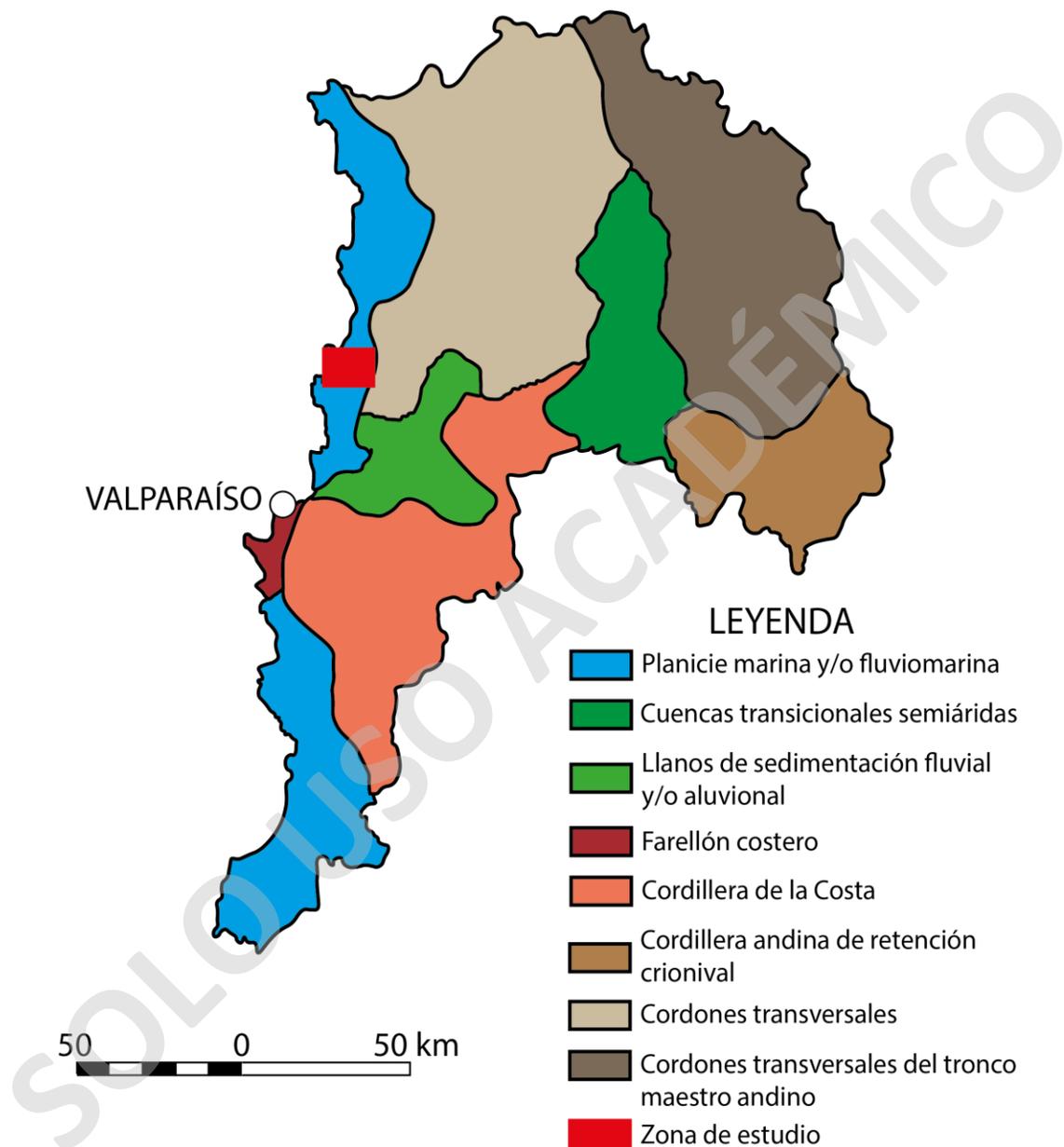


Figura 9. Mapa geomorfológico de la Región de Valparaíso. El polígono en rojo representa a la zona de estudio. Modificado de Börgel (1983).

3.3 Hidrogeología

La comuna de Puchuncaví se encuentra en su totalidad en el dominio de las “Cuencas costeras”, las que se caracterizan por poseer un aporte netamente pluvial debido a la baja altura que posee la Cordillera de la Costa, lo que impide la acumulación de grandes cantidades de nieve. En la zona de estudio se encuentra una sola de estas cuencas, correspondiente a la “Cuenca Estero Puchuncavi” (MOP, 2012).

La red de drenaje es del tipo dendrítico, y se destaca por presentar 4 esteros principales, correspondientes al Estero Puchuncaví, La Canela, Pucalán y Catapilco. El primero presenta sectores de vega y un escurrimiento bajo que atraviesa toda la comuna en un sentido noreste-suroeste por un valle conocido como la depresión del rungue, el segundo se presenta un sentido sureste-noreste y desemboca en el Estero Catapilco, el cual es el límite de separación con la comuna de Maitencillo. Finalmente, el Estero La Canela corresponde a un cuerpo de agua superficial presente en el extremo sureste de la comuna, el que desemboca en la comuna de Quintero (Municipalidad de Puchuncaví, 2009).

En la comuna se presentan dos acuíferos llamados “Horcón” y “Estero Puchuncaví”, siendo este último el único presente en la zona de estudio (Figura 10). El acuífero Estero Puchuncaví se caracteriza por su poca profundidad del nivel freático, de alrededor de 8 m (DGA, 2018), además de presentar un relleno sedimentario variable entre 50 metros en las zonas más cercanas a la Cordillera de la Costa, hasta 80 metros en las cercanías de su desembocadura en la localidad de Ventanas. El área de la cuenca aportante es de alrededor de 110,3 km², mientras que el área del relleno del acuífero es de 94,5 km². Su transmisividad se ha calculado en torno a 20 m³/d (DGA, 2004).

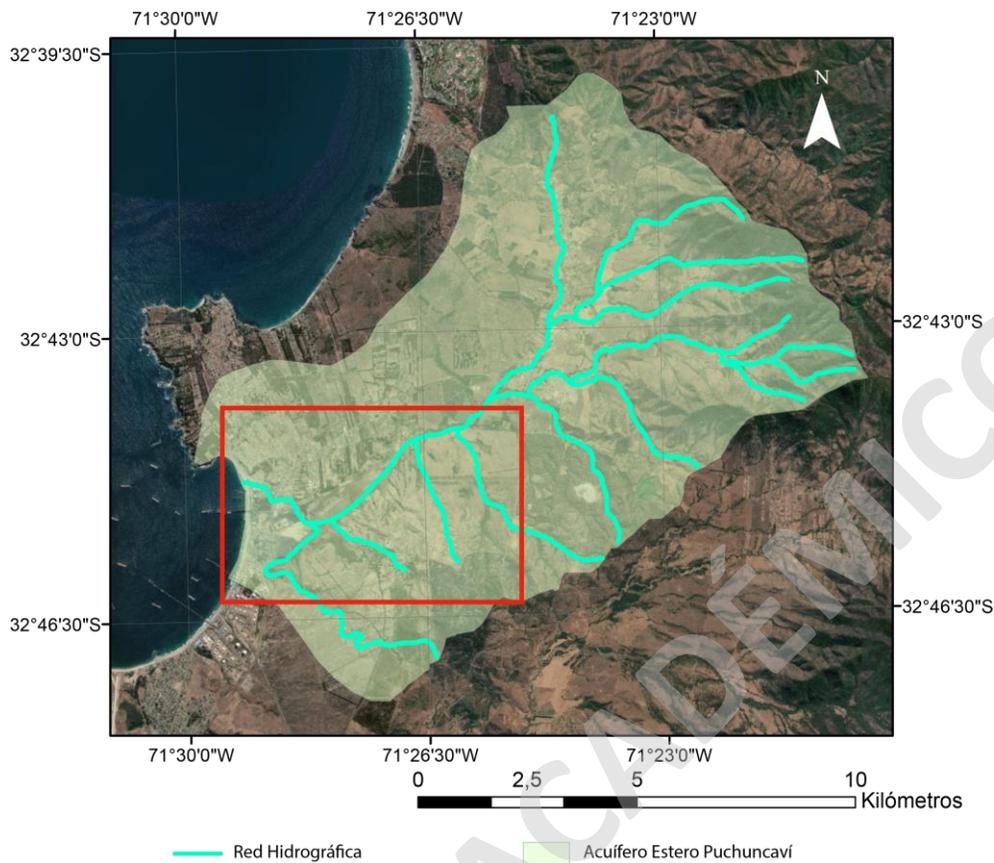


Figura 10. Red hidrográfica y Acuífero Estero Puchuncaví presentes en la comuna de Puchuncaví. El polígono en rojo indica la zona de estudio.

3.4 Marco Geológico

En la zona de estudio afloran unidades intrusivas, volcano sedimentarias y sedimentarias (Figura 11). Las dos primeras datan del Jurásico y corresponden a la Superunidad Mincha, la cual está compuesta por dioritas, sienogranitos, tonalitas y granodioritas, mientras que la segunda corresponde a la Formación Ajial, y está compuesta en su gran mayoría por rocas de origen volcánico (tobas, brechas volcánicas y lavas) con escasas intercalaciones de rocas sedimentarias como areniscas, conglomerados y pelitas calcáreas.

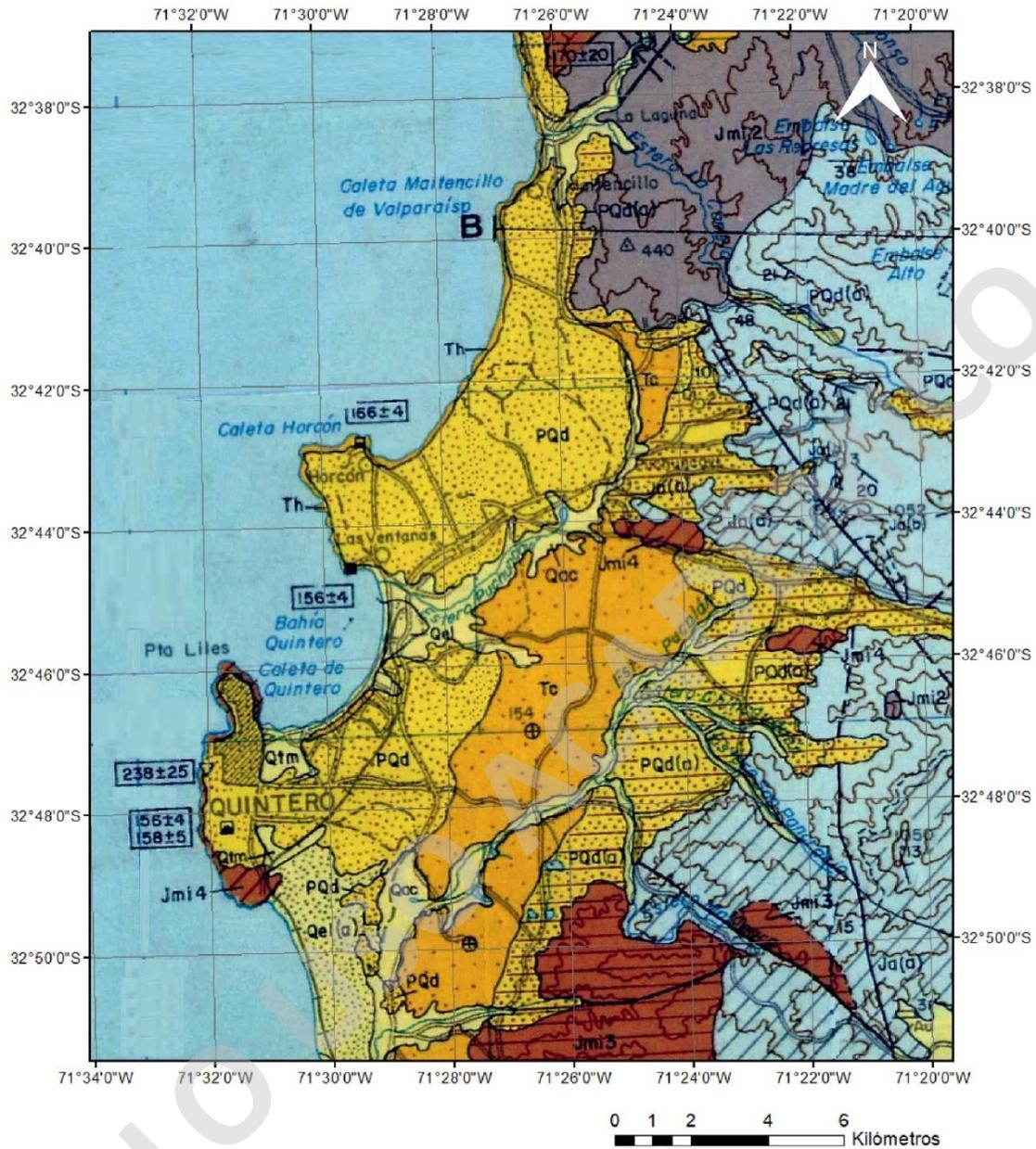


Figura 11. Mapa Geológico de la zona de estudio donde se puede observar: Jmi2: Unidad Puerto Oscuro, Jmi4: Unidad Cavívolén, Ja: Formación Ajial, Tc: Formación Confluencia, PQd: Sedimentos eólicos antiguos (paleodunas), Th: Formación Caleta Horcón, Qel: Sedimentos eólicos y litorales; depósitos de playa, Qtm: Terrazas de depósitos marinos, Qac: Sedimentos Aluviales y Coluviales. El sistema humedal Campiche – Maitenes está representado por el polígono incoloro con borde rojo, mientras que el estero Puchuncaví está representado con la línea de color azul. Extraído y modificado de Rivano et al. (1993).

Las unidades sedimentarias están representadas por la Formación Confluencia, la cual está compuesta por conglomerados, areniscas, brechas y limonitas poco consolidadas, y sedimentos cuaternarios tanto consolidados como no consolidados correspondientes a terrazas marinas y continentales activas e inactivas, junto con depósitos eólicos y litorales.

3.4.1 Estratigrafía

3.4.1.1 Formación Ajial

Aflora desde el Cerro Imán hasta el sector de Olmúe por el sur con un espesor de 1.405 m (Cancino, 1992) y de acorde a Rivano (1993), está compuesta por tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas, con escasas intercalaciones sedimentarias de conglomerados, areniscas y pelitas calcáreas siendo las más importantes las que afloran al norte del río Petorca. Covacevich (1987) le otorga una edad mínima de Bajociano Inferior por medio de una biocorrelación con el miembro La Cruz de la Formación Cerro Calera, mientras que su edad máxima se determina debido al contacto concordante que esta formación presenta con la Formación Quebrada del Pobre, de edad Pliensbachiano a post-Pliensbachiano.

Las tobas presentes en esta formación poseen un color gris a pardo, conformadas entre un 5 a 45% por fragmentos pumíceos menores a 1 cm de diámetro inmersos en una matriz cuarzo feldespática, alterada a clorita – epidota – sericita. Se reconoce la presencia de calcita.

Las brechas volcánicas presentan un color pardo rojizo, con presencia de clastos de composición andesítica que alcanzan los 10 cm de diámetro (en los que se observan texturas porfíricas y hialopilíticas), riodacíticas (evidenciados en fragmentos pumíceos y riodacítas) y clastos sedimentarios en menor proporción. Los clastos volcánicos representan entre el 10 al 40% del volumen total de la roca.

Las lavas andesítico basálticas presentan colores pardo oscuro a pardo rojizo, con una textura porfírica y fenocristales subhedrales de plagiocalasa An_{15-40} , con una abundancia que varía

entre un 5 al 30%, además de clinopiroxeno, con una abundancia que varía entre 1-10% y una matriz con evidencia de desvitrificación.

Los flujos dacíticos presentan un color gris rojizo a rosado con texturas porfiro – volcanoclásticas. Estos flujos presentan clastos pumíceos, albitas, feldespatos potásico, cuarzo y esporádicas anfíboles. La matriz se presenta como un agregado criptocristalino con presencia de alteraciones a sericita, clorita y epidota.

Los conglomerados presentan un color amarillo y se caracterizan por poseer clastos de andesíta, dacíta y riolítas de hasta 10 cm inmersos en una matriz de tamaño arena fina con una matriz calcárea.

Las areniscas son de color amarillento a ocre variando desde subarcosas a grauwas, es frecuente el cemento calcáreo. Las rocas pelíticas (fangolitas) son lutitas calcáreas que gradan a veces a calcilutitas y calcarenitas.

3.4.1.2 Formación Confluencia

Acorde a Rivano (1993) aflora en los valles de La Ligua, Catapilco, Limache, el valle del Río Aconcagua y el valle del Estero Quilimarí con un espesor variable entre 50 a 100 m, y está conformada por una secuencia de gravas y ripios con intercalaciones de arenas poco consolidadas que se distribuyen en terrazas altas parcialmente concordantes con el sistema hidrográfico actual. Sobreyacen mediante una discordancia sobre las unidades jurásicas y paleozoicas que afloran en la costa, además de poseer una interdigitación lateral con la Formación Horcón (Plioceno) hacia el sur y Formación Coquimbo (Mio – Plioceno) hacia el norte.

3.4.1.3 Sedimentos eólicos antiguos

Rivano (1993) las define como paleodunas ubicadas en todo lo largo de la costa desde el norte del Río Quilimarí hasta Concón, con un espesor variable entre pocos cm hasta 10 m.

Se describen como superficies suavemente onduladas de arenas poco consolidadas de colores ocre, muy bien seleccionadas y con presencia de estratificación cruzada. Cubren parcialmente las terrazas costeras, depositándose sobre la Formación Horcón y los granitoides de las superunidades Cochoa y Mincha, así como también sobre rocas Triásicas y Jurásicas. Relacionadas con estas paleodunas se reconocen gravas finas y arenas de origen aluvial al este de Quintero, asociados a procesos erosivos ocurridos en relieves ubicados al este de los sedimentos.

Se le otorga una edad del Plioceno – Pleistoceno (Rivano y Sepulveda, 1991)

3.4.1.4 Sedimentos eólicos y litorales recientes

Rivano (1993) las describe como acumulaciones costeras expuestas bajo la forma de playas actuales y dunas, las que se ubican adyacentes a la franja costera y su desarrollo está directamente relacionado con los rasgos morfológicos actuales, ya que se forman al norte en bahías protegidas por acantilados de los vientos nor-noreste y de las corrientes costeras de dirección norte. Las acumulaciones eólicas aparecen siempre al norte de las playas, de acuerdo con los vientos predominantes (nor-noreste) los que transportan desde las playas y desde depósitos más antiguos el material fino que es depositado en las zonas de baja presión al perder el viento su capacidad de transporte, tanto en las playas actuales como en las dunas es posible apreciar la clásica forma de media luna, parabólicas, de tipo barján, características de las dunas crecientes (Spaletti, 1980)

3.4.2 Unidades intrusivas

3.4.2.1 Superunidad Mincha

Definida por Rivano *et al* (1985) como una franja con disposición norte-sur que conforma gran parte de la Cordillera de la Costa y parte de las Planicies Litorales (aproximadamente

un 40%). Las rocas de esta superunidad intruyen a rocas Paleozoicas y del Triásico – Jurásico Medio, y subyacen a sedimentos consolidados y no consolidados del Neógeno y Cuaternario.

En la comuna de Puchuncaví afloran 2 de las 3 unidades que conforman esta superunidad:

3.4.2.1.1 Unidad Puerto Oscuro (Rivano *et al.*, 1985) (156 – 170 m.a.)

Rivano *et al* (1985) las definen como dos batolitos de formas irregulares, uno ubicado hacia el norte del Humedal la Laguna, bajo el nombre de Plutón Papudo, y el otro hacia el sur, bajo el nombre de Plutón La Laguna. Estos cuerpos se encuentran separados debido a la intrusión de la Unidad Cavivolén y se distinguen por un característico color gris verdoso y una abundante presencia de minerales máficos. Presenta una edad entre 156 – 170 m.a. y se reconocen tres subunidades:

a) Subunidad Cuarzodioritas de Cachagua

Definida en 1989 por Espiñeira como Unidad Cachagua y redefinida por Rivano en 1993, aflora en el Plutón Papudo y a lo largo de los acantilados entre Horcón y Ventanas. Corresponde a cuarzodioritas, cuarzomonzodioritas y dioritas de color gris oscuro a negro, con una presencia escasa de tonalitas, las cuales presentan ocasionalmente una orientación mineralógica en los sectores costeros.

b) Subunidad Gabro de las Cujas

Definida en 1989 por Espiñeira como Unidad Cachagua y redefinida por Rivano en 1996, aflora en el norte de la caleta Las Cujas, mediante dos cuerpos de no más de $\frac{1}{4}$ de km², uno ubicándose en contacto brusco con la Subunidad Cuarzodioritas de Cachagua, y el otro en el sector de Santa Rosa de Colmo en la vertiente sur del Valle del río Aconcagua, donde es parcialmente cubierto por depósitos de la Formación Confluencia.

Se describen como gabros de hornblenda de color gris negro de grano grueso a muy grueso, con presencia subordinada de clinopiroxenos de hábito prismático con parches de anfífolas y plagioclasas An₄₃₋₅₄. Presencia de pistacita y opacos.

c) Subunidad Cuarzodioritas de La Laguna

Definida por Rivano (1993), está conformada únicamente por el Plutón La Laguna, el cual posee una forma irregular e intruye rocas volcánicas de la formación Ajjal. Hacia el norte de esta unidad se presentan intrusiones de la Unidad Cavivolén. Las rocas corresponden a cuarzodioritas de grano medio, similares a la de la Subunidad Cachagua pero con presencia silicificación y cloritización, esta última afectando principalmente a los minerales máficos de la roca.

Petrográficamente, las rocas de esta subunidad corresponden a cuarzodioritas, cuarzomonzodioritas y, subordinadamente, tonalitas y monzonitas cuarcíferas de anfíboles verde y clinopiroxeno

3.4.2.1.2 Unidad Cavivolén

Aflora principalmente como dos batolitos de formas irregulares conformados por los plutones Petorca – Quilimari, Guaquén, La Ligua, Las Salinas, El Melón - Catapilco, Zapallar, Quintero, Santa Teresa y Limache. Mediante dataciones radiométricas se le otorga una edad que varía entre los 156 a 166 m.a. aproximadamente, perteneciendo al Jurásico (Rivano, 1993).

4. Metodologías

Con la finalidad de comprobar la hipótesis planteada, las metodologías seleccionadas para esta investigación permiten asegurar tanto la representatividad de las muestras de aguas obtenidas desde los humedales de interés como la calidad analítica de las muestras obtenidas.

4.1 Plan de muestreo.

Para la toma de muestras se eligieron 14 lugares distribuidos heterogéneamente en el Estero Puchuncaví, el Humedal Campiche y el Humedal Los Maitenes (Tabla 13) con el objetivo de lograr la mayor representatividad de la hidroquímica presente en la zona de estudio.

Tabla 13. Coordenadas UTM 19H de las muestras obtenidas en este estudio.

Muestra	X	Y
EP-0	272141	6375380
EP-1	270451	6374390
HM-1	269328	6372806
HM-3	268776	6372986
HC-8	267789	6371961
HC-2	268525	6372818
HC-7	267694	6372140
HM-2	269110	6372961
HC-1	268604	6372595
EP-2	268550	6373147
HC-4	268227	6372617
HC-6	267833	6372267
HC-5	268106	6372359
HC-3	268385	6372763

Estos lugares de muestreo (Figura 12) fueron elegidos en base a su accesibilidad y presencia de agua superficial (ya sea corriente o estancada), además de su proximidad/lejanía del CIV y la presencia de tributarios, que podrían eventualmente alterar la hidroquímica de los cauces principales. Este diseño de muestreo tiene la ventaja de permitir observar posibles variaciones

espaciales en la hidroquímica a lo largo del recorrido natural de estos cuerpos de agua, al mismo tiempo que identificar alguna zona atribuible a estas variaciones.

En los humedales Campiche y Los Maitenes las muestras se distribuyeron en un sentido noroeste–sureste, dado que el curso del agua sigue esta dirección desde las zonas más distales del CIV (hacia el este), a las más cercanas a este complejo (hacia el oeste). Las muestras ubicadas en el Estero Puchuncaví presentan una orientación noreste – suroeste dada la dirección de este estero, el cual atraviesa toda la comuna desde el pueblo de El Rungue hasta su desembocadura al Océano Pacífico en Ventanas.

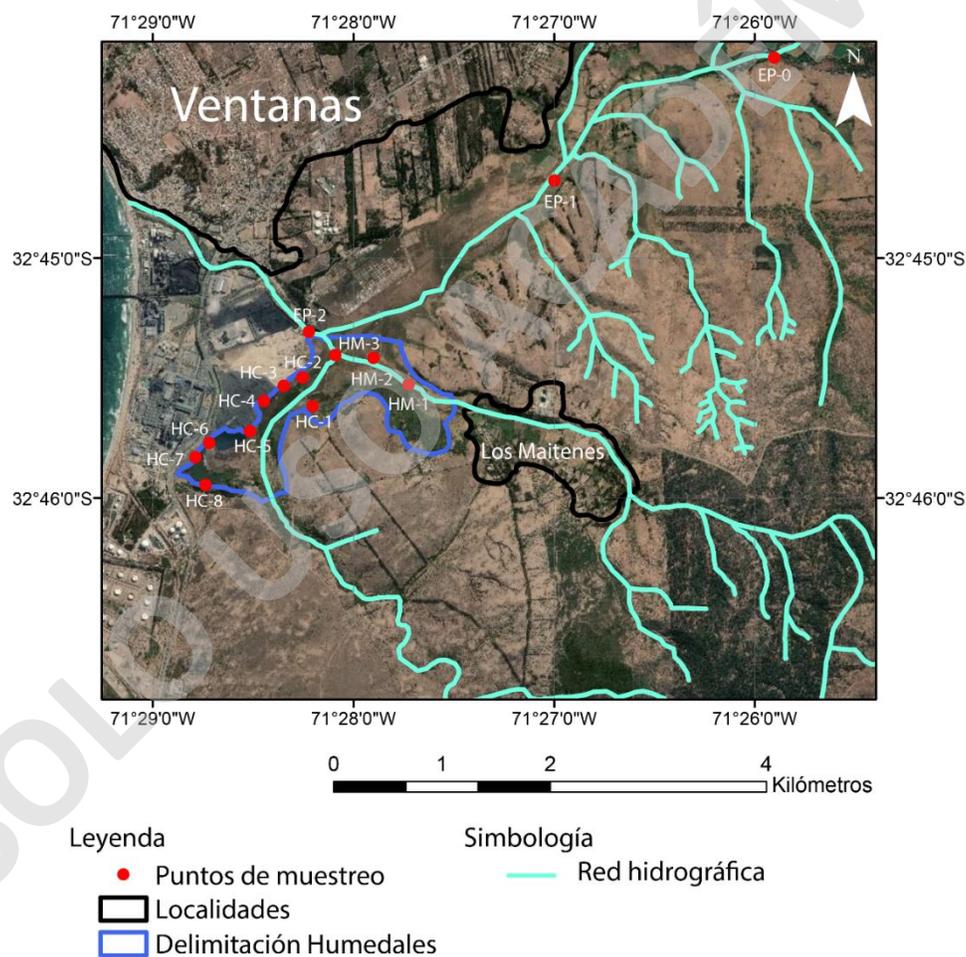


Figura 12. Lugares seleccionados para la toma de muestras (Círculos rojos) en el Humedal Campiche (HC), Los Maitenes (HM) y Estero Puchuncaví (EP). Imagen extraída y modificada de Google Earth.



Punto de muestreo ubicado en el Estero Puchuncaví debido a su ubicación lejana al CIV (aproximadamente 5 kilómetros al este), la que permite obtener información sobre la calidad hidroquímica de los cauces de agua superficiales ubicados al este de la comuna. Este punto de muestreo se ubica bajo un puente perteneciente a la ruta F-20.



Ubicado aproximadamente a 3 kilómetros al este del CIV, su objetivo es comprobar la existencia de alguna variación en la calidad hidroquímica a las observadas en la muestra EP-0.



Ubicada en el Estero Puchuncaví a solo 150 metros del CIV, corresponde a la muestra más occidental de las obtenidas en este cuerpo de agua superficial, al igual que la más cercana al CIV. Su objetivo es comprobar la variación hidroquímica presente entre esta muestra y las obtenidas aguas arriba del Estero Puchuncaví correspondientes a EP-0 y EP-1, además de otras cercanas tales como HM-3 y HC-2.



Ubicada en el Humedal Los Maitenes a 1,6 kilómetros al este del CIV. Su objetivo es conocer la hidroquímica del humedal en la zona más alejada que este posee del polo industrial. Esta ubicación corresponde al primer afloramiento de agua superficial encontrado en el Humedal Los Maitenes en un sentido este-oeste desde el pueblo Los Maitenes.



Ubicada en el Humedal Los Maitenes a 1,35 kilómetros al este del CIV. Corresponde al cuerpo de agua superficial más grande observado en este humedal.

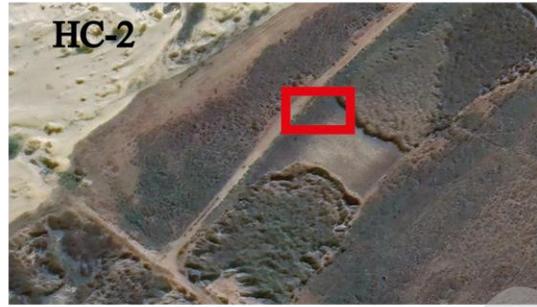


Ubicada en el Humedal Los Maitenes a 1 kilómetro al este del CIV, es la muestra más cercana al polo industrial de las obtenidas en este humedal. Unos 50 metros al norte del punto de muestreo, el cuerpo de agua superficial de donde se extrae la muestra HM-3 desemboca en el Estero Puchuncaví.



HC-1

Ubicado en el Humedal Campiche a unos 500 m al este del CIV. A un costado de este se ubica un camino de tierra. Es posible presenciar animales como caballos y vacas en las cercanías, además de una espuma de color café clara a blanca. Presenta una profundidad mayor a 1 metro y no es apreciable corriente de agua en el lugar.



HC-2

Ubicado en el Humedal Campiche a unos 550 m del CIV en dirección noreste. A un costado de este se ubica un camino de tierra. Es posible presenciar animales como caballos y vacas en las cercanías. No es apreciable corriente de agua en el lugar.



HC-3

Ubicado en el Humedal Campiche a unos 100 m del CIV en dirección noreste. Está en contacto con las paleodunas descritas por Rivano (1993), y presenta material fecal animal en él. Presenta una profundidad de entre 30 a 50 cm y no es apreciable algún tipo de movimiento en ella.



HC-4

Ubicada en el Humedal Campiche, esta en contacto con el CIV (específicamente con el Escorial de Codelco). No se registra ningún tipo de actividad biológica, avistamiento de aves o algún otro animal. Las aguas no presentan una turbiedad visible.



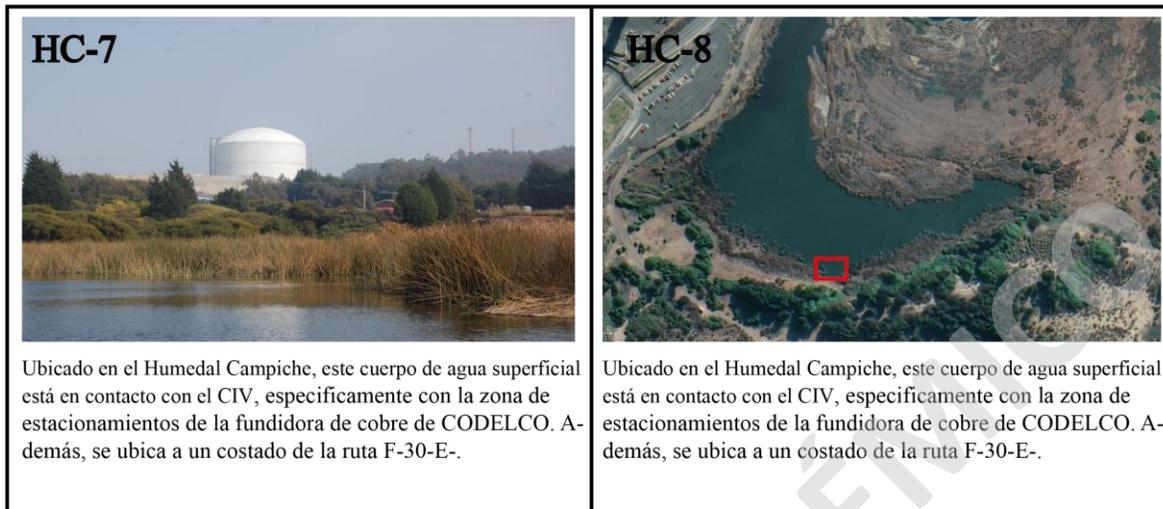
HC-5

Ubicada en el Humedal Campiche, esta en contacto con el CIV (específicamente con el Escorial de Codelco). Corresponde al cuerpo de agua más grande presente en este humedal. En él se aprecian aves y pequeños organismos en sus aguas.



HC-6

Ubicada en el Humedal Campiche, esta en contacto con el CIV (específicamente con el Escorial de Codelco). Corresponde al cuerpo de agua más grande presente en este humedal. En él se aprecian aves y pequeños organismos en sus aguas.



4.1.1 Obtención de muestras.

Las muestras fueron obtenidas mediante el protocolo de muestreo para aguas superficiales dispuesto en el “Manual de normas y procedimientos del departamento de conservación y protección de los recursos hídricos” propuesto por la Dirección General de Aguas en el año 2007, dicho manual señala que las muestras deben ser extraídas de un cuerpo de agua con una profundidad mínima de 15 a 20 cm, en donde se tomará una muestra preferentemente en el centro de la masa de agua. En el caso que existan razones de seguridad que impidan dicha acción, se procederá a realizar la toma de muestra lo más cercano posible al centro mencionado.

Una vez identificado el punto de toma de muestra se procede a ambientar un recipiente de polietileno (previamente esterilizado) enjugándolo 3 veces en el cuerpo de agua a ser muestreado, para luego extraer la cantidad necesaria dependiendo del análisis a realizar. Las muestras son extraídas entre los días jueves 11 y viernes 12 de julio del 2019 siendo inmediatamente refrigeradas a 4°C hasta su arribo al laboratorio ALS CHILE, el cual fue a las 20:00 horas del último día anteriormente mencionado.

Los análisis de metales disueltos, boro disuelto y sílice disuelta (Tabla 14) se filtraron en laboratorio con un filtro de 0,45 micras.

Tabla 14. Tipo de envases, su volumen y el tipo de análisis a realizar en las muestras obtenidas.

Envase	Volumen	Análisis
Botella plástica	250 ml	SDT
Botella plástica	250 ml	Boro disuelto
Botella plástica	125 ml	Aniones
Botella plástica	125 ml	Metales disueltos
Botella plástica	125 ml	Metales totales
Botella plástica	125 ml	Sílice disuelta
Botella plástica	500 ml	Alcalinidad, CE, pH

4.2 Análisis de muestras.

4.2.1 Análisis químico

Se realizaron análisis químicos en terreno y laboratorio con el motivo de conocer las concentraciones de diferentes parámetros tales como la T°, pH, potencial de oxidación (Eh), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), alcalinidad, diferentes cationes y aniones (Tabla 15).

Se midieron parámetros en terreno, correspondientes al Eh y T° mediante un equipo multiparámetro SANXIN 731, mientras que el resto fueron medidos en laboratorio: Los aniones se analizaron mediante cromatografía iónica (aguas) siguiendo la metodología QWI-IO-ANA-01 Emisión B mod.2 US EPA 300.1. 3ed.4ta act 2011, mientras que los metales y metaloides se analizaron mediante un ICP – MS bajo la metodología QWI-IO-ANA-02 Emisión B, Modificación 0 EPA METHOD 6020 A – INDUCTIVELY COUPLED PLASMA – MASS SPECTROMETRY. Para medir la CE se utiliza la metodología QWI-

IO-CE-01 Emisión B, mod.3. SM 2510-B, 22 Ed. 2012, mientras que para los SDT se sigue la metodología SM 2540-C. 22st Edition, 2012.

La alcalinidad se determina mediante la metodología SM 2320-A y B Alkalinity. Edition 22st 2012, mientras que para el pH fue utilizada la metodología QWI-IO-PH-01. Emisión B, modificación 2. SM 4500-H+ B, 22nd Edition 2012.

Tabla 15. Parámetros analizados en terreno y laboratorio (*: parámetros disueltos).

Parámetros medidos en terreno		
Fisicoquímicos	T°, Eh	
Parámetros medidos en laboratorio		
Fisicoquímicos	T°, pH, CE, SDT, Alcalinidad	
Cationes*	Metales	Al, Bi, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Li, Mn, Hg, Mo, Ni, K, Ag, Na, Tl, Sn, Ti, V, Zn,
	Alcalinotérreos	Ca, Sr, Ba, Mg, Be
	Actínidos	U
	No metales	Se, P
	Metaloides	B, Si, As, Sb
Aniones	SO ₄ ⁻² , Cl ⁻ , Br ⁻ , F ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	

Para validar los análisis del laboratorio se realizó un balance iónico (Fórmula 1) a cada una de las muestras obtenidas, considerando aniones, alcalinidad (como HCO₃) y cationes.

$$e = \frac{(rc - ra) \times 100}{rc + ra}$$

Fórmula 1. Cálculo del error en el balance iónico, donde rc: sumatoria total de cationes, ra: sumatoria total de aniones y e: error total expresado como %.

Tras la aplicación de esta fórmula, se obtienen los errores en los balances iónicos para cada muestra extraída (Tabla 16), siendo todas menores o iguales a un 10%.

Tabla 16. Porcentaje de error de balance iónico para cada muestra presente en la zona de estudio.

Muestra	Balance iónico (%)
EP-0	1,06
EP-1	8,3
EP-2	0,13
HC-1	7,76
HC-2	6,71
HC-3	9,81
Duplicado HC-3	10
HC-4	0,53
HC-5	7,96
HC-6	2,59
HC-7	5,29
HC-8	6,98
HM-1	3,98
HM-2	8,34
HM-3	1,69

4.2.2 Procesamiento y análisis de resultados

El procesamiento de datos se realiza mediante los siguientes *softwares*:

- Excel: Procesamiento de la base de datos y creación de gráficos, en los cuales se contrastan las concentraciones obtenidas en este estudio con las normas chilenas de agua potable (NCh 409) y riego (NCh 1333)
- *Diagrammes*: Creación de diagramas Piper y Stiff
- PHREEQC: Modelo de especiación y las posibles fases minerales que podrían precipitar en las aguas de la zona de estudio.

- R: Análisis de componentes principales para agrupar datos con tendencias similares.

Los resultados fueron analizados mediante gráficos Excel para contrastar sus concentraciones con las normas chilenas 409 y 1333, además de su ploteo en diagramas Piper y Stiff mediante el *software Diagrammes* con la finalidad de poder clasificar el tipo de agua y observar posibles variaciones espaciales en las concentraciones de los aniones y cationes mayores.

Se realiza un modelo hidroquímico en PHREEQC para conocer las posibles especiaciones y fases minerales que podrían estar presentes en la zona de estudio para cada punto de muestreo, donde la T°, pH y Eh ingresado a este *software* corresponden a las presentes en los resultados obtenidos para cada muestra (Anexo 1). No se realizó ningún tipo de restricción para el cálculo del índice de saturación (IS) de las posibles fases minerales presentes, donde un $IS > 0$ representa una sobresaturación, $IS = 0$ equilibrio e $IS < 0$ una solución subsaturada en la fase mineral analizada.

Se utilizó la base de datos mindat.v4 debido a dos factores:

- Mayor abarcamiento de los elementos encontrados en solución respecto a las otras bases de datos presentes.
- Utilización de esta base de datos en otros estudios ambientales relacionados a la actividad industrial y minera (Halim *et al.*, 2005, Koide *et al.*, 2012 y Magu *et al.*, 2016).

Para observar datos con tendencias similares se utilizó el *package* Factoshiny del *software* R, el cual incorpora funciones de análisis de componentes principales.

5. Resultados

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de las muestras analizadas acorde al plan de muestreo propuesto en la Figura 12, según la siguiente estructura:

- Resultados analíticos: Breve descripción general de las concentraciones de cationes y aniones, separando aquellos elementos que no cumplen con las regulaciones chilenas de los que sí lo hacen.
- Parámetros físicoquímicos: Concentraciones y valores obtenidos de estos parámetros, tanto en laboratorio (pH, CE, SDT) como en terreno (T°, Eh).
- Clasificación de las aguas: En base a las concentraciones de los cationes y aniones mayores, se realizarán diagramas Stiff y Piper para lograr una caracterización hidroquímica de las aguas analizadas.
- Especies químicas disueltas: Se analizarán en detalle aquellos elementos que sobrepasen las normas chilenas, con principal énfasis en su distribución espacial.
- Correlaciones entre elementos: Se realiza un análisis de correlación de Pearson entre los parámetros físicoquímicos y los elementos cuyas concentraciones sobrepasan lo estipulado en las normas chilenas, con el motivo de observar posibles tendencias en común respecto a sus distribuciones espaciales.

5.1 Resultados analíticos

Del total de elementos y compuestos analizados, se registraron 5 elementos cuyas concentraciones se encuentran en su totalidad bajo el límite de detección en todas las muestras, los cuales corresponden a fluoruro, bromuro, bismuto, mercurio y talio, al igual que el nitrito. Otros 9 elementos presentan concentraciones bajo el límite de detección en algún punto de muestreo, los cuales corresponden a aluminio, berilio, cadmio, cromo, plomo, litio, selenio, plata y boro. El resto de los elementos y compuestos presentan valores sobre el límite de detección en todas muestras.

Del total de muestras extraídas, solamente EP-1 no presenta algún elemento o compuesto sobre las normas previamente mencionadas, mientras que las otras muestras obtenidas en el Estero Puchuncaví correspondientes a EP-0 y EP-2 presentan concentraciones sobre las normas nacionales de manganeso para la primera, y cloruro para la segunda.

Las muestras extraídas desde el Humedal Los Maitenes correspondientes a HM-1, HM-2 y HM-3 presentan algunos elementos fuera de norma como el arsénico, hierro, manganeso, molibdeno, cobre y cloruro, mientras que las muestras obtenidas en el Humedal Campiche correspondientes a HC-1, HC-2, HC-3, HC-4, HC-5, HC-6, HC-7 y HC-8 presentan en su totalidad a lo menos un elemento o compuesto sobre las normas, entre los cuales se encuentran manganeso, cloruro, arsénico, hierro, magnesio, cobre, plomo, molibdeno, boro y sulfato (Tabla 17).

Tabla 17. Elementos y/o compuestos sobre las Normas Chilenas 409 y 1333 para cada muestra obtenida.

Muestras	Norma Chilena 409	Norma Chilena 1333
EP - 0	Mn	Mn
EP - 1	-	-
EP - 2	Cl ⁻	Cl ⁻
HC - 1	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mg, Mn	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , B, Cu, Mn, Mo
HC - 2	Cl ⁻ , As, Mn	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , Cu, Mn, Mo
HC - 3	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mg, Mn, Fe	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, B, Cu, Mn, Mo
HC - 4	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mg, Mn	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , B, As, Mn, Mo
HC - 5	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mg	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , B, As, Mo
HC - 6	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mg	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , B, Mo
HC - 7	Cl ⁻ , As, Pb, Mn, Fe	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mn, Mo
HC - 8	Cl ⁻ , As, Pb, Mn, Fe	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Cu, Mn, Mo
HM - 1	As, Mn	Cl ⁻ , Mn
HM - 2	Cl ⁻ , As, Fe, Mn	Cl ⁻ , As, Cu, Fe, Mn
HM - 3	Cl ⁻ , As, Fe	Cl ⁻ , Cu, Mo

5.2 Parámetros Físico – Químicos

5.2.1 Temperatura

La temperatura en la zona de estudio varía entre 12,2 °C (HM-1) y 17,1 °C (HC-4), con un promedio de 14,6 °C, el cual es cercano a la mediana (14,4 °C), indicando una variación de 4,9 °C en la temperatura de la zona de estudio (Tabla 18). No existen tendencias al aumento o disminución de la temperatura hacia algún lugar en particular de la zona de estudio.

Tabla 18. Temperatura (°C) presente en cada muestra extraída.

T (°C)	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
	12,5	15,1	14	15,8	14	16,5	17,1	14	14,9	13,7	16	12,2	13,3	14,7

5.2.2 pH

Los valores de pH en la zona de estudio varían entre pH 7 (HM-3) y pH 8,5 (HC-4), con un promedio de pH 7,6 el cual es cercano a la mediana (pH 7,8), por lo que se caracteriza presentar condiciones neutro–alcalinas (Tabla 19). Todas las muestras cumplen con los límites establecidos en las normas chilenas 409 y 1333.

Tabla 19. pH presente en cada muestra extraída.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
pH	7,3	8,1	7,8	7,0	7,1	7,8	8,5	7,8	7,9	8,2	8,0	7,1	7,1	7,0

Los valores más bajos de pH en la zona de estudio se presentan en las muestras HC–2 (pH 7,1), HC–1 (pH 7), HM–3 (pH 7), HM–2 (pH 7,1) y HM–1 (pH 7,1), ubicadas en el extremo este del Humedal Campiche y en la totalidad del Humedal Los Maitenes. Las otras muestras

cuyo valor de pH es superior a 7,1 no presentan una tendencia en su distribución espacial (Figura 13).

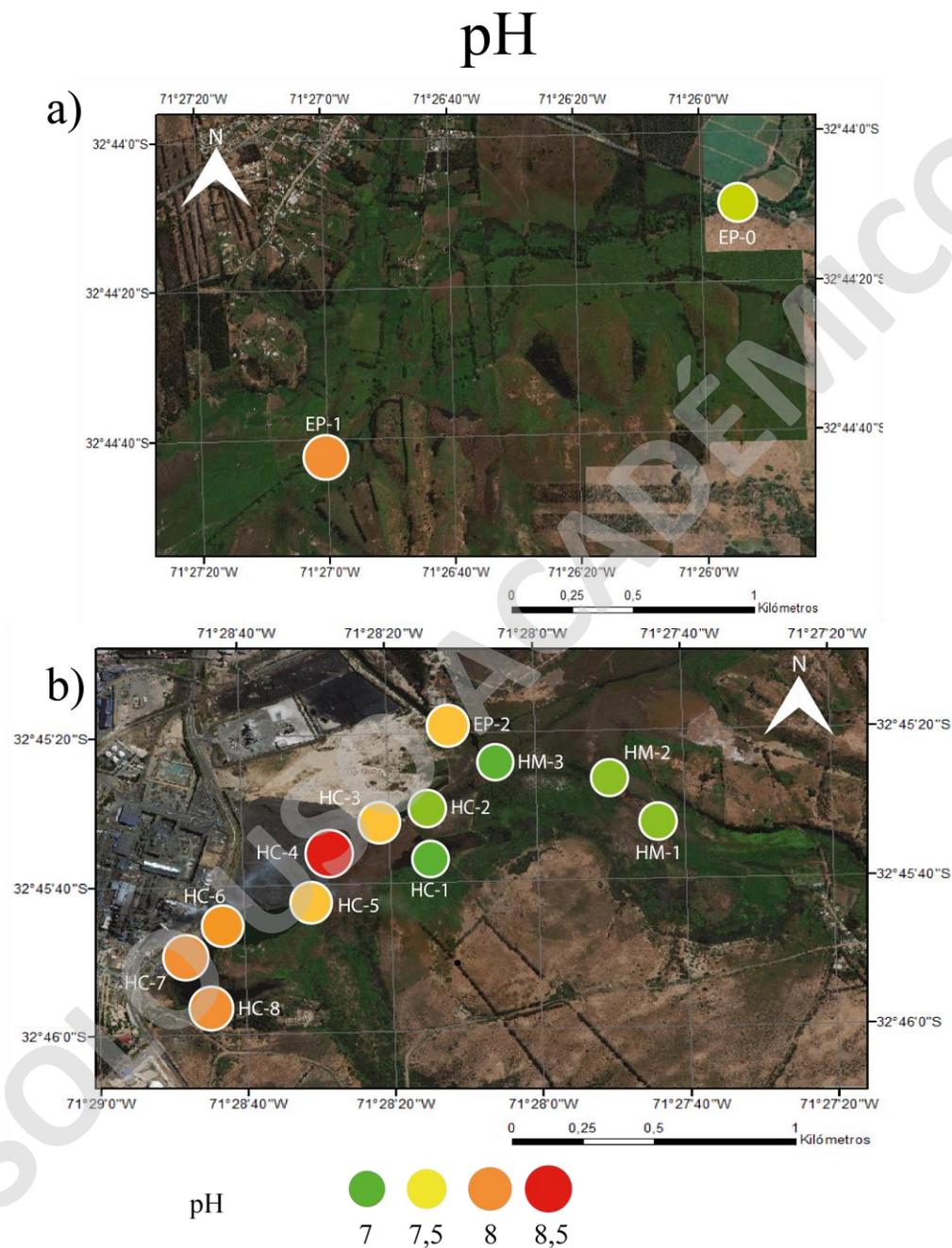


Figura 13. Distribución espacial de valores de pH en la zona de estudio. a) valores de pH para las muestras EP – 0 y EP – 2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.

5.2.3 Potencial redox

En la zona de estudio predominan condiciones principalmente oxidantes, con un valor máximo medido en la muestra HC-8 de 212 mV y un mínimo medido de -23 mV en la muestra HM-3. Esta última es la única que posee el carácter de reductor en toda la zona de estudio. El promedio es de 115 mV, muy cercano a la mediana la cual posee un valor de 119 mV (Tabla 20).

Tabla 20. Potencial redox (mV) presente en cada muestra extraída en este estudio.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
eH	141	64	152	110	150	91	110	148	133	118	212	88	120	-23

No se presentan distribuciones espaciales hacia algún punto en específico de la zona de estudio (Figura 14).

Eh

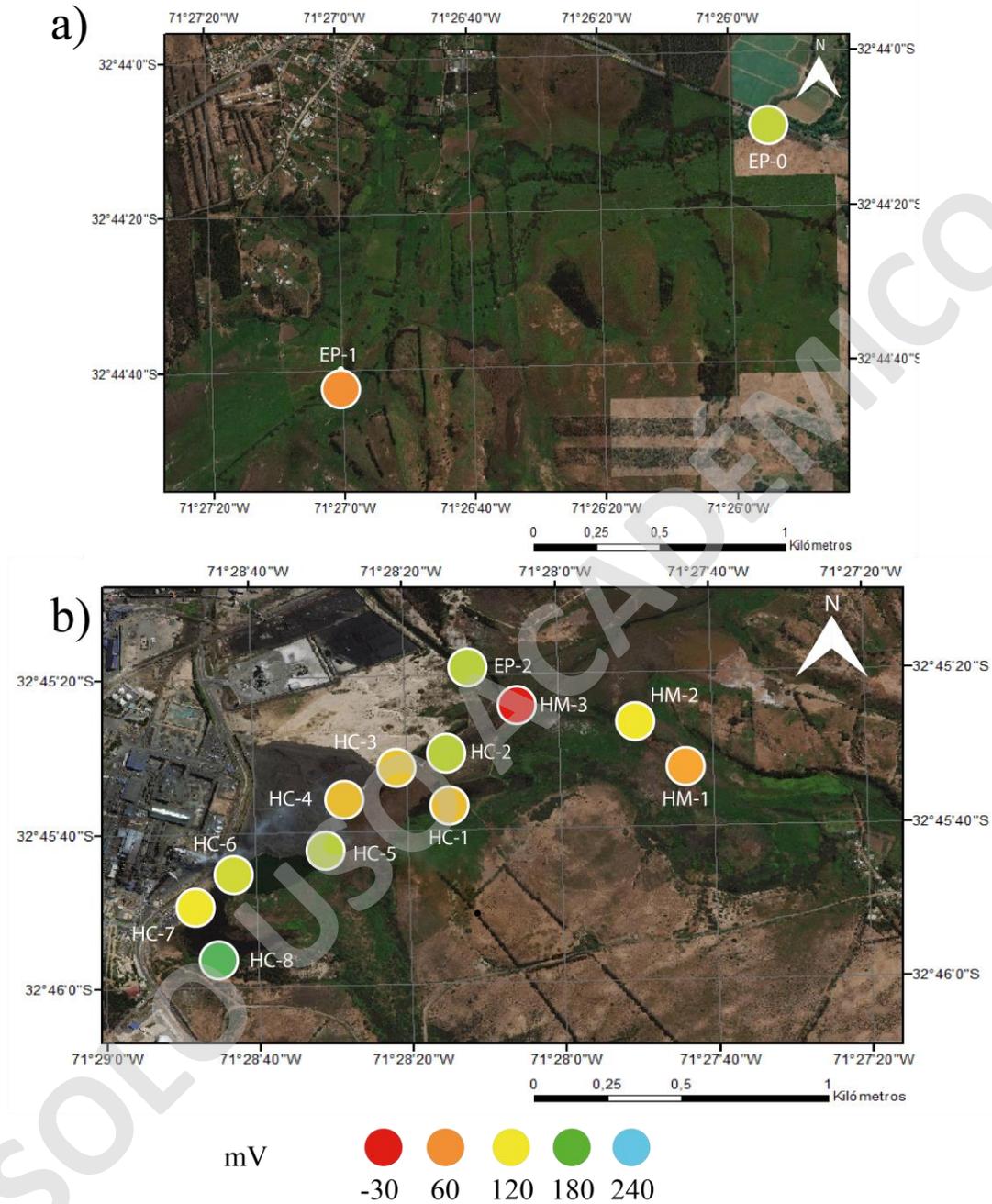


Figura 14. Distribución espacial de valores de Eh en la zona de estudio. a) valores de Eh para las muestras EP – 0 y EP – 2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.

5.2.4 Sólidos disueltos totales

La concentración de sólidos disueltos totales varía entre 624 mg/L medido en la muestra EP-0, a 6.996 mg/L medido en la muestra HC-3, presentando una diferencia porcentual en las concentraciones de 1.121% entre el valor mínimo y el máximo. El promedio es mayor a la mediana, lo que se justifica por la presencia de concentraciones elevadas como las obtenidas en las muestras HC-3 (6.996 mg/L), HC-4 (6.926 mg/L), HC-5 (3.911 mg/L) y HC-6 (3.906 mg/L) (Tabla 21), las que forman un agrupamiento al este del CIV en la zona de contacto entre los humedales Campiche y Los Maitenes.

Tabla 21. Sólidos disueltos totales (SDT) (mg/L) presentes en cada muestra extraída en este estudio.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
SDT	624	782	4.716	3.926	2886	6.996	6.926
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
SDT	3911	3.906	1.906	1.933	842	1.979	2.371

La distribución espacial de los sólidos disueltos totales tiende a presentar un aumento hacia el oeste de la zona de estudio, como se puede observar en las variaciones de concentración en EP-0 (624 mg/L), EP-1 (782 mg/L) y EP-2 (4.716 mg/L), en donde la última muestra corresponde a la más cercana al mar y al CIV obtenida en el Estero Puchuncaví, y presenta una concentración entre 4 a 5 veces mayor que las registradas hacia el este del estero. Las muestras obtenidas en el Humedal Los Maitenes correspondientes a HM-1 (842 mg/L), HM-2 (1.979 mg/L) y HM-3 (2.371 mg/L), presentan una tendencia similar, en donde las concentraciones aumentan en un sentido este-oeste.

Las muestras obtenidas en el Humedal Campiche no presentan una tendencia como la anteriormente mencionada, dado que su distribución espacial presenta una convergencia hacia el Escorial de Codelco. Una de las variaciones más significativas ocurre en el extremo suroeste de la zona de estudio, en donde existen dos cuerpos de agua superficial cercanos a

unos 10 metros el uno del otro, los que presentan variaciones considerables en su concentración de SDT: Las muestras HC-7 (1.906 mg/L) y HC-8 (1.933 mg/L) presentan casi la mitad de concentración de SDT que las muestras HC-5 (3.911 mg/L) y HC-6 (3.906 mg/L), en donde estas últimas se ubican en el cuerpo superficial de agua que está en contacto con el Escorial de Codelco (Figura 15).

SOLO USO ACADÉMICO

Sólidos disueltos totales

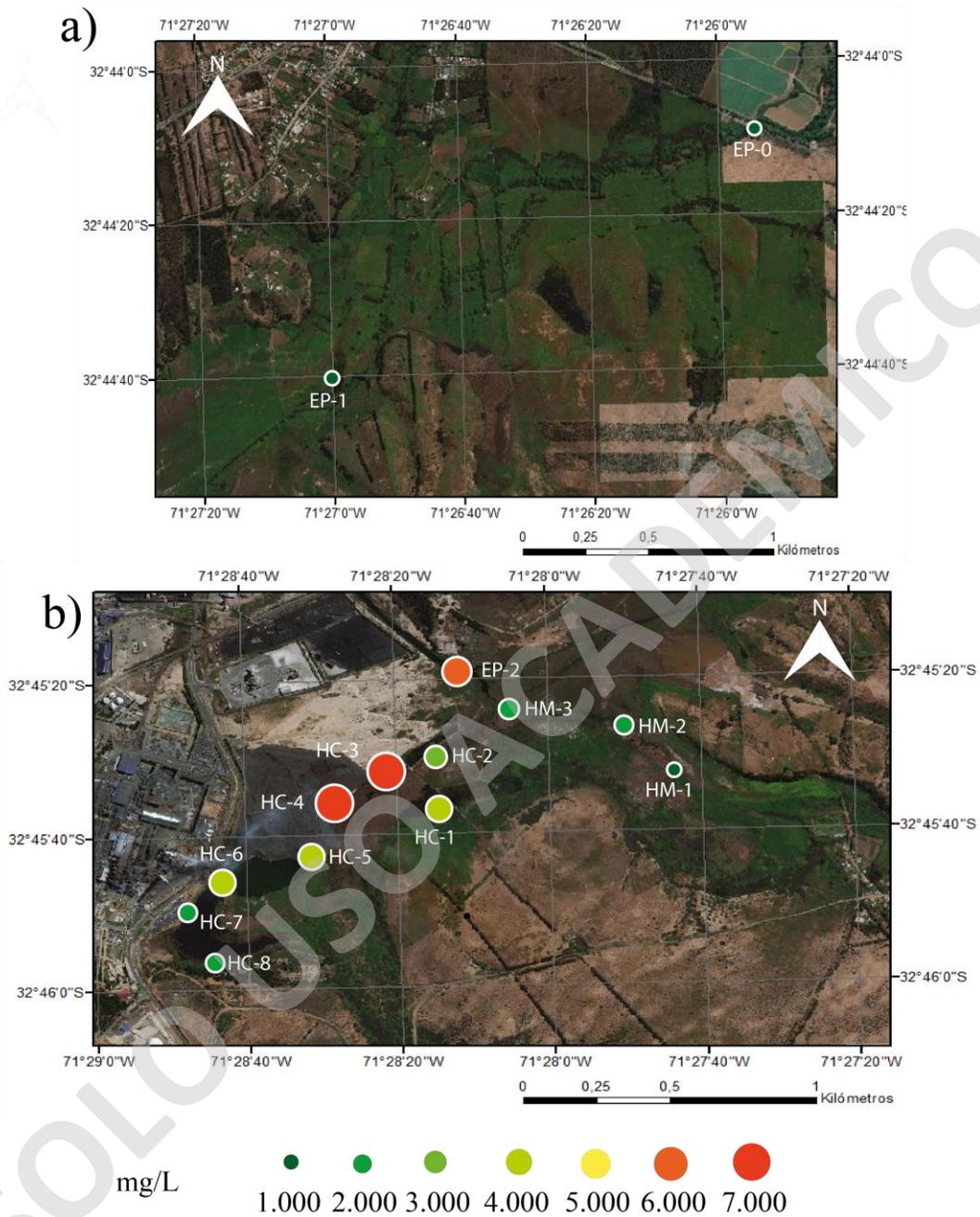


Figura 15. Distribución espacial de SDT en la zona de estudio. a) Concentraciones de SDT para las muestras EP-0 y EP-1, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) resto de las muestras ubicadas al este del CIV.

5.2.5 Conductividad eléctrica

El valor mínimo de conductividad eléctrica es obtenido en la muestra EP-0 (1.159 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mientras que el máximo en la muestra HC-3 (11.270 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con una diferencia de poco menos de 10 veces entre el valor mínimo y el máximo. La concentración promedio de la zona es (4.804 $\mu\text{S}/\text{cm}$) superior a la mediana (4.264 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que indica la presencia de más valores altos que bajos (Tabla 22).

Tabla 22. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) presente en cada muestra extraída en este estudio.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
CE	1.159	1.183	8.283	5.315	4.499	11.270	9.528

	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
CE	5.547	5.545	3.174	3.196	1.371	3.161	4.029

La distribución espacial de la conductividad eléctrica indica un aumento en sentido este-oeste (Figura 16), con una clara tendencia a aumentar hacia el Escorial de Codelco, presentando un comportamiento casi idéntico al observado en los Sólidos disueltos totales para las muestras obtenidas en el Estero Puchuncaví, el Humedal Campiche y el Humedal Los Maitenes.

Conductividad eléctrica

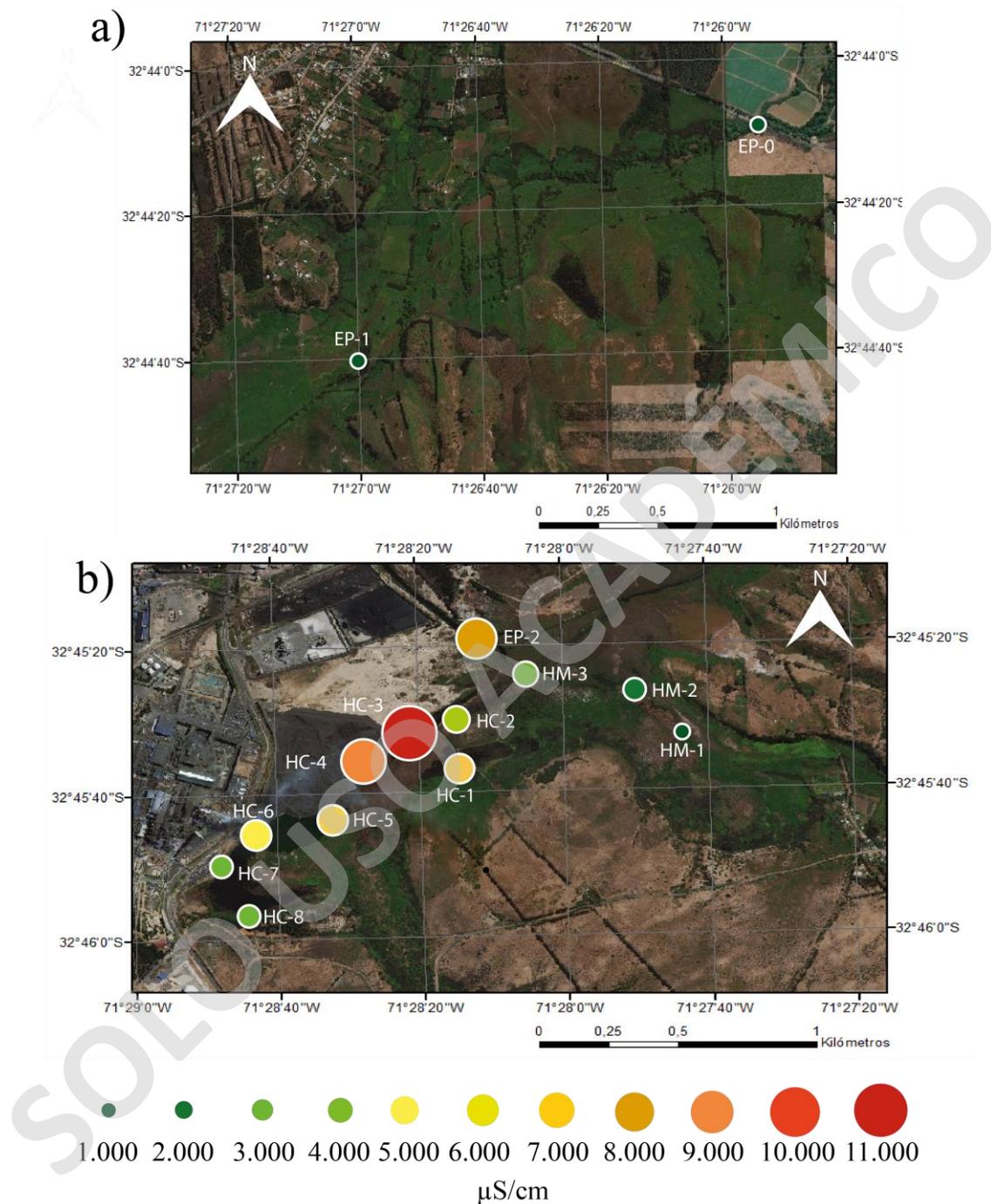


Figura 16. Distribución espacial de CE en la zona de estudio. a) Concentraciones de CE para las muestras EP-0 y EP-2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, b) Resto de las muestras ubicadas al este del CIV.

5.3 Clasificación de las aguas

Las concentraciones químicas de cationes y aniones mayores (Tabla 23) fueron ploteadas en un diagrama Piper (Figura 17), obteniéndose que la mayoría de las muestras presentes en este estudio tienen la clasificación principal de aguas cloruradas sódicas, con una leve tendencia a presentarse como cloruradas y sulfatadas sódicas.

Tabla 23. Concentración de cationes y aniones mayores obtenidos en este estudio.

Muestra	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Mg	Ca	K	Na	HCO ₃ ⁻
EP - 0	128,5	85,7	21,3	75,5	10,1	81,1	226
EP - 1	177,6	107	28,9	90,6	12,8	99,2	155
EP - 2	2.221	242,5	133,2	118,3	42,4	1.219	185
HC - 1	749,2	1.130	131,1	247,4	36,1	736,4	205
HC - 2	817,6	467,2	75,3	106,9	36,8	646,9	171
HC - 3	2.402	2.418	232,8	309,9	77,4	2.087	484
HC - 4	1.269	2.050	139,2	76,7	77,5	2.077	671
HC - 5	783,1	1.234	175,9	158,1	77,4	848,1	269
HC - 6	789	1.054	141,8	120,9	57,6	739,2	276
HC - 7	599	256,7	76,5	88,4	21,5	413	246
HC - 8	614,8	254,1	72,8	88,3	22,7	449,4	238
HM - 1	232,4	52,5	32,9	56,9	7,8	132	178
HM - 2	824,8	72,4	80,7	115,3	17,4	478,6	225
HM - 3	738,1	85,3	54,1	70,1	22,3	409,7	174

Para las muestras obtenidas en el Estero Puchuncaví, se presenta un aumento relativo de Na+K en la muestra EP-2 al compararse con EP-0 y EP-1, en donde estas últimas presentan una concentración relativa casi idéntica de sus cationes (Figura 17).

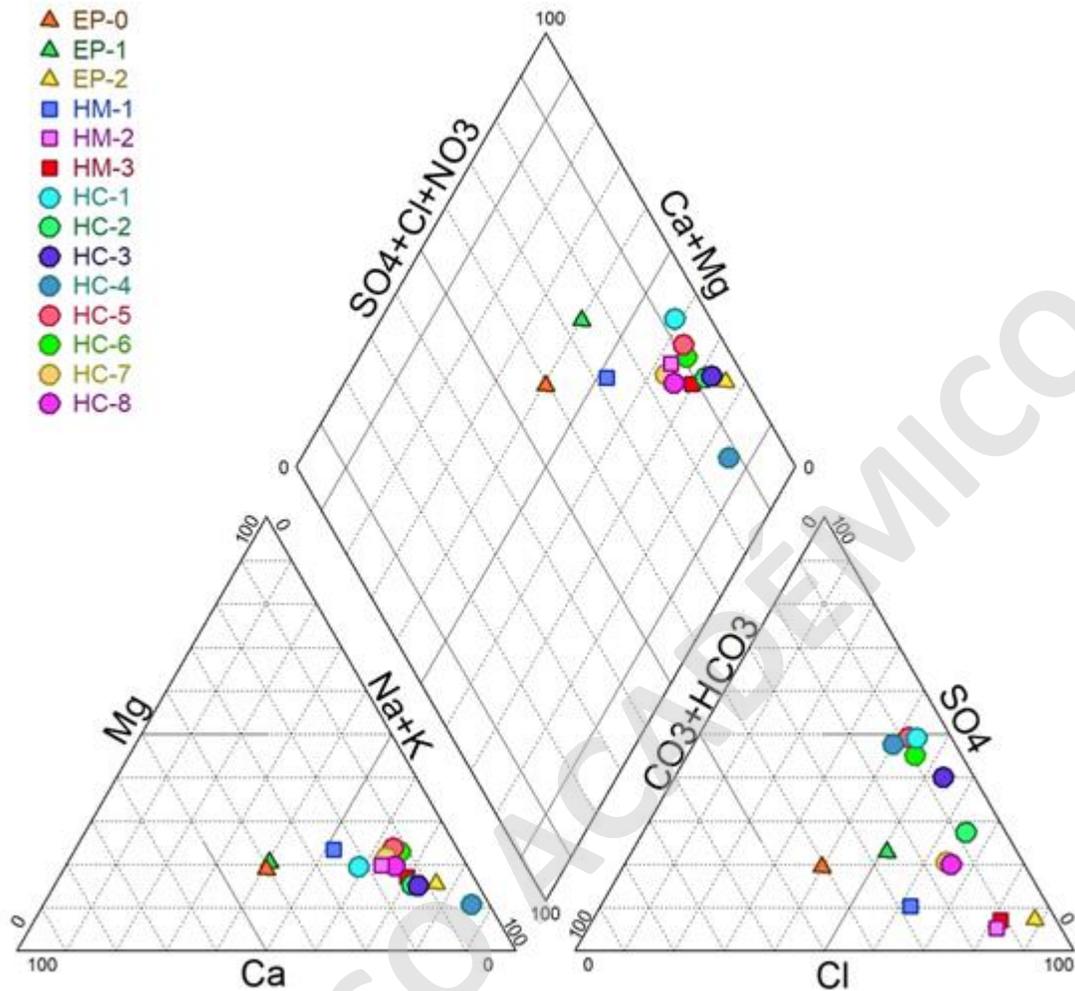


Figura 17. Diagrama Piper en donde se ubican todas las muestras obtenidas en este estudio.

Este comportamiento difiere para el caso de los aniones, dado que estos presentan una tendencia al aumento de la concentración relativa de Cl^- desde EP-0 a EP-2. Las concentraciones de $\text{Na}+\text{K}$ y Cl^- aumentan hacia el oeste. El agua presente en las muestras EP-0, EP-1 y EP-2 se clasifica como clorurada sódica.

Las muestras obtenidas en el Humedal Los Maitenes (HM-1, HM-2 y HM-3) presentan una tendencia similar a las del Estero Puchuncaví dado el aumento de la concentración relativa de $\text{Na}+\text{K}$ y Cl^- hacia el oeste. Todas las muestras de este humedal presentan una clasificación de clorurada sódica.

Para el caso de las muestras obtenidas en el Humedal Campiche, se pueden separar en dos grupos, uno ubicado en las cercanías del Escorial de Codelco correspondiente a HC-5, HC-4, HC-3, HC-6 y HC-1, y otro conformado por las muestras más distales de este escorial compuesto por las muestras HC-8, HC-7 y HC-2. Esta separación se realiza debido a la diferencia en la concentración relativa de sulfato que presentan estas muestras, evidenciado en la Figura 17. El primer grupo presenta un carácter más sulfatado que el segundo, el cual presenta un carácter clorurado, siendo este último similar al observado en las muestras del Humedal Los Maitenes y el Estero Puchuncaví.

La Figura 18 presenta diferentes diagramas de Stiff ploteados en una imagen satelital de la zona de estudio, y en ella se puede observar las variaciones espaciales de las concentración en meq/L de Na^+K , Mg, Ca, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} .

Las muestras que presentan una menor concentración tanto de aniones como cationes son HM-1, EP-0 y EP-1, las cuales corresponden a las muestras más distales del CIV en dirección este.

Se presenta un aumento en la concentración de todos los aniones y cationes en las muestras a medida que estas se acercan al CIV, sin embargo, destaca el aumento de SO_4^{2-} , Na^+K y Cl^- presente en las muestras cercanas al Escorial de Codelco.

Diagramas Stiff

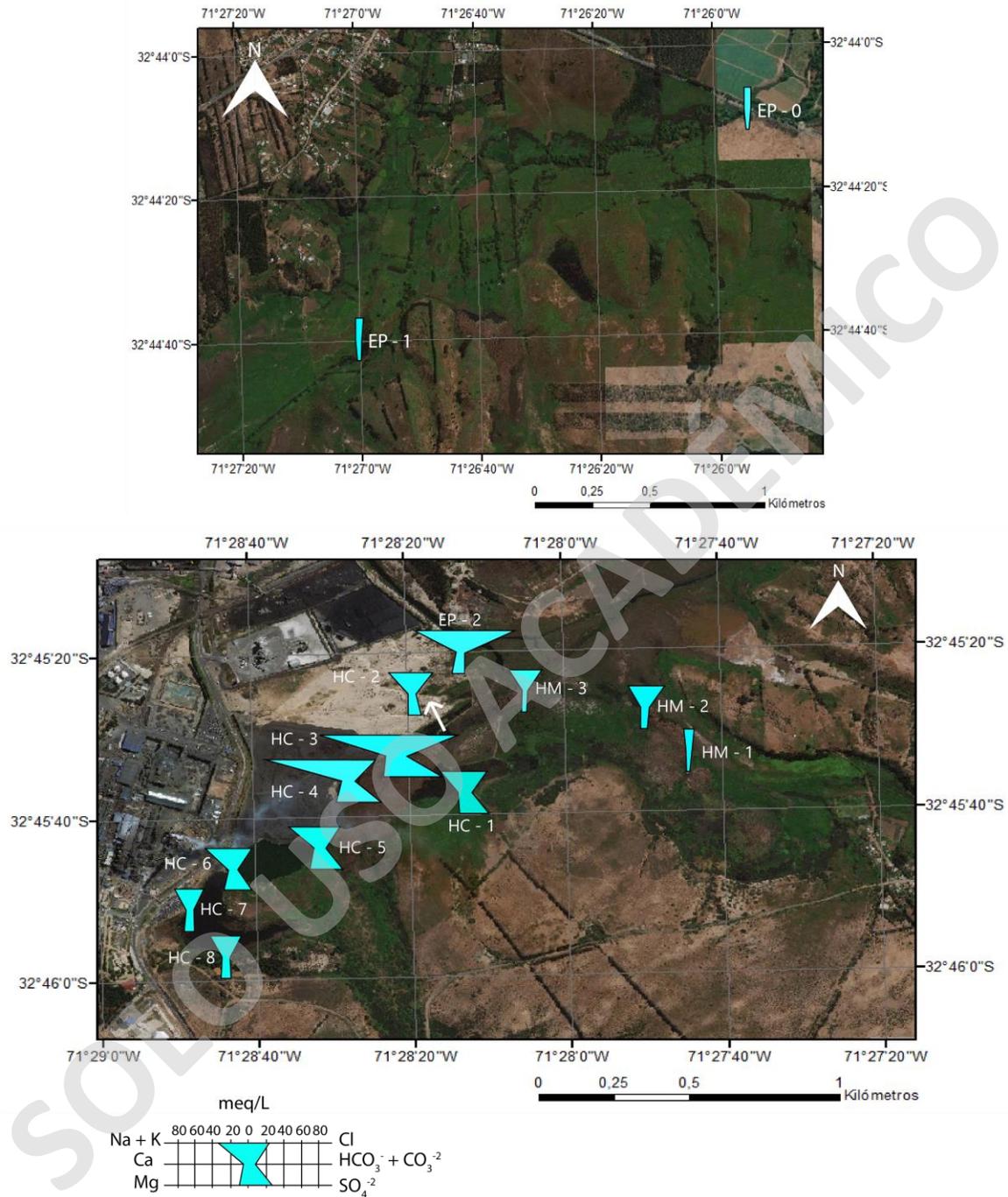


Figura 18. Diagramas de Stiff para cada muestra presente en la zona de estudio. En la imagen superior se observan los gráficos para las muestras EP-0 y EP-2, ubicadas en el extremo noreste de la zona de estudio, mientras que en la imagen inferior se observan el resto de los gráficos, ubicados al este del CIV.

5.4 Especies químicas disueltas

Los resultados de las concentraciones de los aniones fluoruro, cloruro, bromuro, sulfato, nitrito y nitrato, así como también las concentraciones tanto totales como disueltas de aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilio, bismuto, boro, cadmio, calcio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, litio, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, fósforo, potasio, selenio, plata, sodio, sílice, estroncio, talio, estaño, titanio, uranio, vanadio, zinc (Anexo 1) indican la presencia de a lo menos 10 elementos y/o compuestos que se encuentran fuera de la NCh 409 y NCh 1333 (Anexo 2).

5.4.1 Arsénico

Las concentraciones de arsénico varían entre 0,002 mg/L y 1,04 mg/L (Tabla 24), en donde el valor máximo equivale a 521 veces el valor mínimo. El promedio es de 0,2 mg/L y supera a la mediana en un 200%, la cual posee un valor de 0,09.

Tabla 24. Concentración de arsénico disuelto (mg/L) presente en cada muestra

	EP - 0	EP - 1	EP - 2	HC - 1	HC - 2	HC - 3	HC - 4
As	0,002	0,01	0,02	0,1	0,08	0,38	1,04
	HC - 5	HC - 6	HC - 7	HC - 8	HM - 1	HM - 2	HM - 3
As	0,14	0,09	0,27	0,24	0,02	0,11	0,07

La concentración mínima se midió en la muestra EP-0 (0,002 mg/L), mientras que la máxima en HC-4 (1,04 mg/L). Las muestras más lejanas al complejo industrial ventanas (CIV) correspondientes a EP-0 (0,002 mg/L) y EP-1 (0,01 mg/L) son las únicas que no sobrepasan las concentraciones permitidas en las regulaciones chilenas, mientras que todas las otras muestras presentan concentraciones sobre el límite dispuesto en la NCh 409 (0,01 mg/L), mientras que el límite estipulado de la NCh 1333 (0,1 mg/L) es superado por las muestras

HM-2 (0,11 mg/L), HC-5 (0,14 mg/L), HC-8 (0,24 mg/L), HC-7 (0,27 mg/L), HC-3 (0,38 mg/L), HC-4 (1,04 mg/L) (Figura 19).



Figura 19. Concentraciones de arsénico disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.

Acorde a la Figura 19, 12 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 409 (0,01 mg/L) correspondiendo a un total del 86% de las muestras analizadas, mientras que las muestras sobre la NCh 1333 (0,1 mg/L) disminuyen a 6, representando un 42% del total analizado.

Al ver la distribución espacial del arsénico en la zona de estudio (Figura 20) se observa que la muestra HC-4 (1,04 mg/L) presenta una mayor concentración que las otras ubicadas en el Humedal Campiche, seguido de la muestra HC-3 (0,38 mg/L), ambas ubicadas a tan solo 150 metros de distancia una de la otra, en las cercanías del escorial de Codelco.

Las muestras HC-7 (0,27 mg/L) y HC-8 (0,24 mg/L) son extraídas del mismo cuerpo de agua y presentan concentraciones similares de arsénico, con una variación del 9%. Al igual

que las muestras anteriormente mencionadas, HC-6 (0,09 mg/L) y HC-5 (0,14 mg/L) presentan un origen común, con una variación en su concentración de un 50% aproximadamente.

Arsénico disuelto

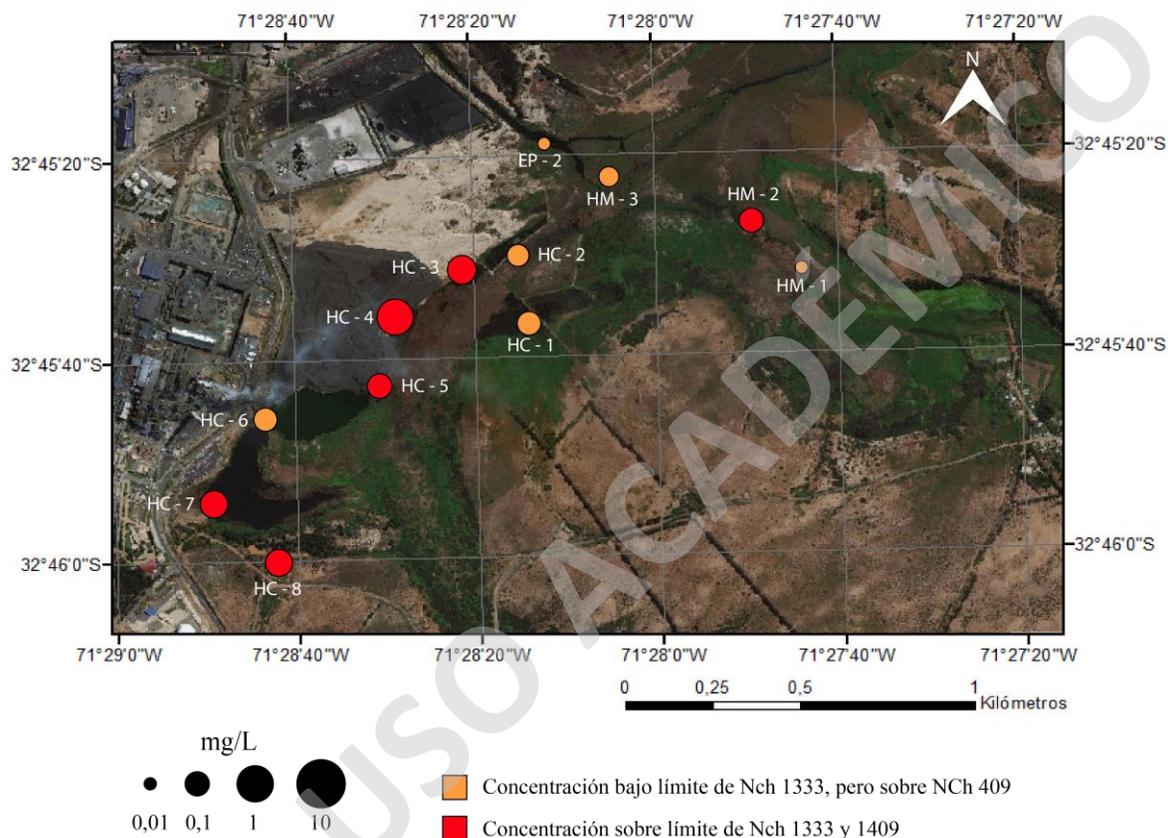


Figura 20. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1

Las muestras HC-1 (0,1 mg/L), HC-2 (0,08 mg/L) y HM - 3 (0,07 mg/L) se encuentran a una distancia de 200 metros aproximadamente una de la otra y no presentan grandes variaciones en sus concentraciones, mientras que la diferencia entre HC-2 (0,08 mg/L) y HC - 3 (0,38 mg/L) es sustancial si se considera que están a tan solo 150 metros una de la otra, en donde esta última se encuentra más cerca del escorial de Codelco.

El modelo hidroquímico de PHREEQC para el arsénico sugiere la presencia de 4 especies mayoritarias en las muestras de la zona de estudio: H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , HAsO_4^{2-} y H_2AsO_4^- (Tabla 25), con una clara tendencia de predominancia de aquellas que están compuestas por As^{+5} por sobre las de As^{+3} . No existe una gran variación referente a la ocurrencia de las especies químicas, pero sí en sus concentraciones.

Tabla 25. Especies químicas más abundantes con presencia de arsénico en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	As^{+3}		As^{+5}	
	H_3AsO_3	H_2AsO_3^-	HAsO_4^{2-}	H_2AsO_4^-
EP-0	3,51E-10	4,48E-12	2,05E-08	5,82E-09
EP-1	2,07E-12	1,61E-13	1,16E-07	5,32E-09
EP-2	1,74E-12	1,63E-13	2,10E-07	5,40E-09
HC-1	1,98E-07	1,34E-09	7,83E-07	3,00E-07
HC-2	6,03E-08	5,22E-10	7,82E-07	2,57E-07
HC-3	4,70E-10	2,32E-11	4,86E-06	1,90E-07
HC-4	3,40E-12	7,28E-13	1,37E-05	1,36E-07
HC-5	2,27E-10	9,77E-12	1,76E-06	1,04E-07
HC-6	8,45E-11	4,28E-12	1,19E-06	6,16E-08
HC-7	2,02E-11	1,94E-12	3,43E-06	1,09E-07
HC-8	8,56E-11	5,01E-12	3,06E-06	1,64E-07
HM-1	2,32E-08	1,76E-10	1,33E-07	6,23E-08
HM-2	1,49E-07	1,13E-09	9,77E-07	3,84E-07
HM-3	3,43E-07	1,92E-09	3,50E-07	1,95E-07

Acorde a este mismo modelo, el $\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$ es la única fase mineral que presentaría sobresaturación en la zona de estudio, presentando esta posible característica en todos los lugares de muestreo (Anexo 3).

5.4.2 Cobre

Las concentraciones de cobre varían entre 0,01 mg/L y 1,29 mg/L (Tabla 26), en donde el valor máximo es 98 veces el mínimo. El promedio es de 0,26 mg/L y supera a la mediana en un 179%, la cual posee un valor de 0,15.

Tabla 26. Concentración de cobre disuelto (mg/L) presente en cada muestra.

	EP - 0	EP - 1	EP - 2	HC - 1	HC - 2	HC - 3	HC - 4
Cu	0,01	0,03	0,08	0,53	0,31	1,29	0,02
	HC - 5	HC - 6	HC - 7	HC - 8	HM - 1	HM - 2	HM - 3
Cu	0,13	0,05	0,16	0,58	0,02	0,27	0,22

En la Figura 21 se puede observar la presencia de 6 datos fuera de la NCh 1333 correspondiente al 46% de la población, además de la presencia de un valor máximo de 1,29 mg/L que se escapa de la distribución, el cual es medido en la muestra HC-3.

La distribución de las concentraciones de cobre (Figura 22) sobre la NCh 1333 presenta una cierta tendencia a ubicarse hacia el este-noreste del CIV en un grupo conformado por las muestras HC-3 (1,29 mg/L), HC-2 (0,31 mg/L), HC-1 (0,53 mg/L), HM-3 (0,22 mg/L) y HM-2 (0,27 mg/L). Las muestras HC-8 (0,58 mg/L) y HC-7 (0,16 mg/L) son obtenidas en el mismo cuerpo de agua ubicado al sur de la zona de estudio y presentan una variación en la concentración de cobre disuelto de 355% aproximadamente.

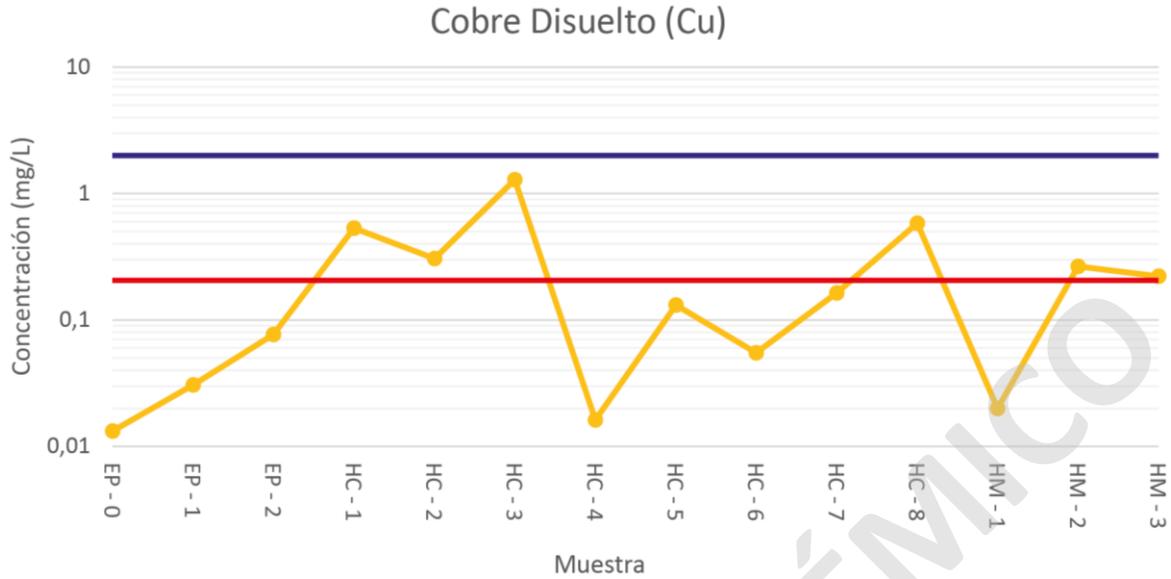


Figura 21. Concentraciones de cobre disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.

Las muestras HC-6 (0,06 mg/L) y HC-5 (0,13 mg/L) se extrajeron del mismo cuerpo de agua presentando una variación del 42,5%, mientras que las muestras obtenidas del Estero Puchuncaví presentan una mayor concentración a medida que se acercan al CIV: EP-0 (0,01 mg/L), EP - 1 (0,03 mg/L), EP - 2 (0,08 mg/L), encontrándose todas las concentraciones medidas en esta zona bajo la NCh 1333 (Figura 22).

Cobre disuelto

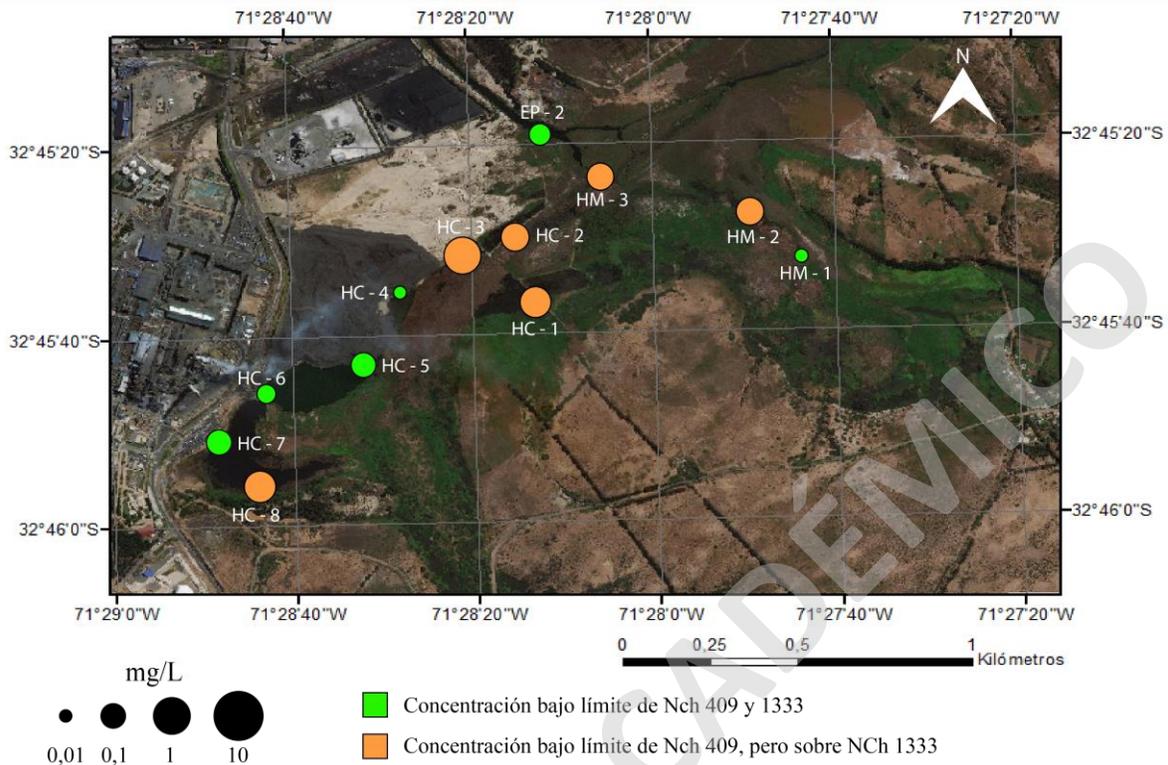


Figura 22. Distribución espacial de las concentraciones de cobre disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1

El modelo hidroquímico de PHREEQC supone la presencia de aproximadamente 20 especies diferentes de cobre, entre las cuales destacan debido a su abundancia CuCl_2^- , CuCl , CuCO_3 , Cu^{+2} y $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{-2}$ (Tabla 27). Las especies que presentan Cu^+ serían más abundantes que aquellas que incorporan Cu^{+2} en su estructura para todas las muestras obtenidas en la zona de estudio, siendo CuCl_2^- la posible especie dominante.

Tabla 27. Especies químicas más abundantes con presencia de cobre en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	Cu^+			Cu^{+2}	
	CuCl_2^-	CuCl	CuCO_3	Cu^{+2}	$\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{-2}$
EP-0	1,01E-07	7,67E-08	1,34E-09	1,09E-10	1,96E-11
EP-1	2,20E-07	2,10E-07	6,72E-09	1,43E-10	4,02E-10
EP-2	1,10E-06	8,30E-08	2,45E-10	7,87E-12	3,28E-11
HC-1	6,72E-06	1,51E-06	1,27E-09	4,37E-10	1,30E-11
HC-2	3,93E-06	8,12E-07	7,86E-10	2,08E-10	7,84E-12
HC-3	1,85E-05	1,28E-06	4,52E-09	1,47E-10	1,12E-09
HC-4	2,19E-07	2,88E-08	1,21E-09	6,03E-12	1,50E-09
HC-5	1,67E-06	3,59E-07	2,56E-09	1,11E-10	2,21E-10
HC-6	6,99E-07	1,49E-07	1,27E-09	4,22E-11	1,28E-10
HC-7	1,96E-06	5,53E-07	1,06E-08	1,63E-10	1,47E-09
HC-8	7,01E-06	1,93E-06	2,79E-08	6,59E-10	2,29E-09
HM-1	1,69E-07	1,24E-07	3,74E-10	6,79E-11	2,64E-12
HM-2	3,41E-06	7,00E-07	7,31E-10	1,56E-10	7,88E-12
HM-3	2,79E-06	6,40E-07	3,21E-10	1,07E-10	1,91E-12

No existiría ninguna fase mineral que posiblemente este precipitando en la zona de estudio e incorpore cobre dentro de su composición.

5.4.3 Molibdeno

Las concentraciones de molibdeno disuelto varían entre 0,0007 mg/L y 3,28 mg/L (Tabla 28), en donde el valor máximo es $4,682 \times 10^3$ veces el mínimo. El promedio es de 0,54 mg/L y supera a la mediana en 11,6 veces, la cual posee un valor de 0,05.

La gran variación entre el promedio y la mediana indica la presencia de pocas muestras que poseen concentraciones de molibdeno muy altas, correspondientes a las muestras HC-3 (3,05 mg/L) y HC-4 (3,28 mg/L), las que presentan una concentración 8 veces superior a la muestra más cercana en HC-5 (0,38 mg/L).

Tabla 28. Concentración de molibdeno disuelto (mg/L) presente en cada muestra.

	EP - 0	EP - 1	EP - 2	HC - 1	HC - 2	HC - 3	HC - 4
Mo	0,001	0,003	0,006	0,09	0,3	3,05	3,28
	HC - 5	HC - 6	HC - 7	HC - 8	HM - 1	HM - 2	HM - 3
Mo	0,38	0,3	0,02	0,01	0,001	0,009	0,075

Acorde a la Figura 23, 9 muestras presentan concentraciones sobre el límite permitido por la NCh 1333 (0,01 mg/L) correspondiendo a un total del 64% de las muestras analizadas.

La concentración mínima se midió en la muestra EP-0 (0,0007 mg/L), mientras que la máxima en HC-4 (3,28 mg/L). Las muestras más lejanas al CIV correspondientes a EP-0 (0,0007 mg/L) y EP-1 (0,003 mg/L) presentan concentraciones de molibdeno bajo la NCh 1333 al igual que EP-2 (0,006 mg/L), HM-2 (0,009 mg/L) y HM-1 (0,0009 mg/L), las cuales se ubican en las cercanías de este complejo. Las otras muestras correspondientes a HC-8 (0,01 mg/L), HC-7 (0,02 mg/L), HM-3 (0,08 mg/L), HC-1 (0,09 mg/L), HC-6 (0,3 mg/L), HC-2 (0,3 mg/L), HC-5 (0,38 mg/L), HC-3 (3,05 mg/L) y HC-4 (3,28 mg/L) presentan concentraciones sobre el límite dispuesto en la NCh 1333 de 0,01 mg/L.

Al ver la distribución espacial del molibdeno en la zona de estudio (Figura 24) se observa que la muestra HC-4 (3,28 mg/L) y HC-3 (3,05 mg/L) presentan concentraciones de molibdeno mayores a las demás, seguido de la muestra HC-5 (0,38 mg/L) con una concentración de 8,72 y 8,1 veces menor. La diferencia espacial entre HC-4 y HC-3 es de aproximadamente 50 metros, mientras que para HC-5 100 y 150 metros aproximadamente.

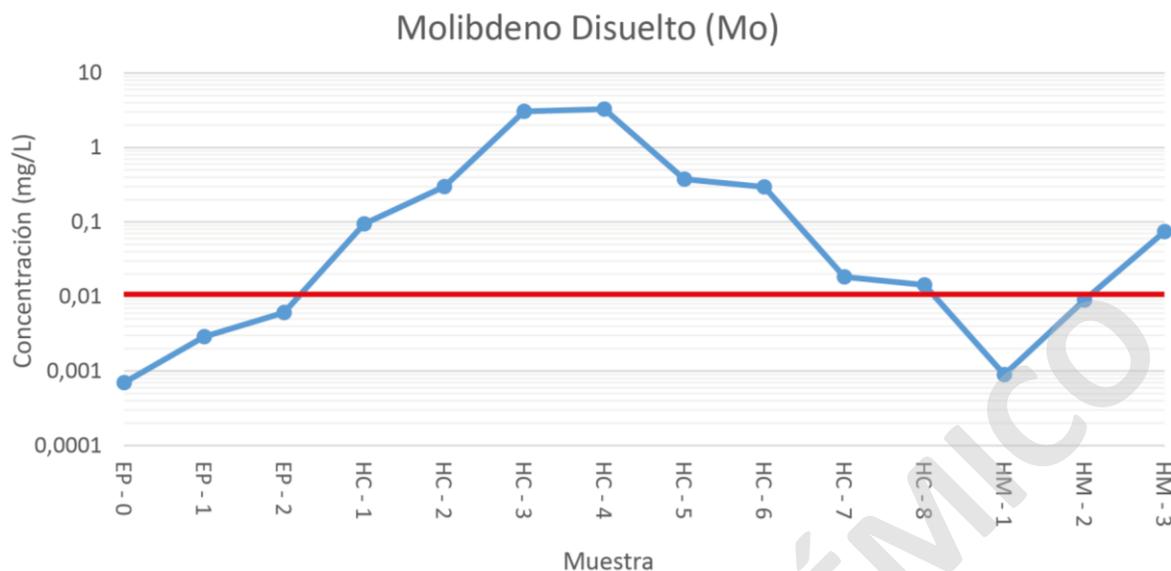


Figura 23. Concentraciones de molibdeno disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea roja corresponde al límite estipulado en la NCh 1333.

Las muestras HC-7 (0,02 mg/L) y HC-8 (0,01 mg/L) son extraídas del mismo cuerpo de agua y presentan concentraciones similares de molibdeno, con una variación del 21% aproximadamente. Al igual que las muestras anteriormente mencionadas, HC-6 (0,3 mg/L) y HC-5 (0,38 mg/L) presentan un origen común, con una variación en su concentración de un 26,38% aproximadamente.

Las muestras HM-1 (0,0009 mg/L), HM-2 (0,009 mg/L) y EP-2 (0,006 mg/L) se encuentran a una distancia de 250 metros aproximadamente una de la otra y no presentan grandes variaciones en sus concentraciones. La concentración de molibdeno en las muestras HC-1 (0,09 mg/L), HC-2 (0,3 mg/L) y HC-3 (3,05 mg/L) presentan una tendencia a ser mayor hacia el escorial de Codelco, al igual que el conjunto de muestras HC-7 (0,02 mg/L), HC-8 (0,01 mg/L), HC-6 (0,3 mg/L), HC-5 (0,38 mg/L) y HC-4 (3,28 mg/L), en donde se observa la misma tendencia mencionada anteriormente (Figura 24).

Molibdeno disuelto

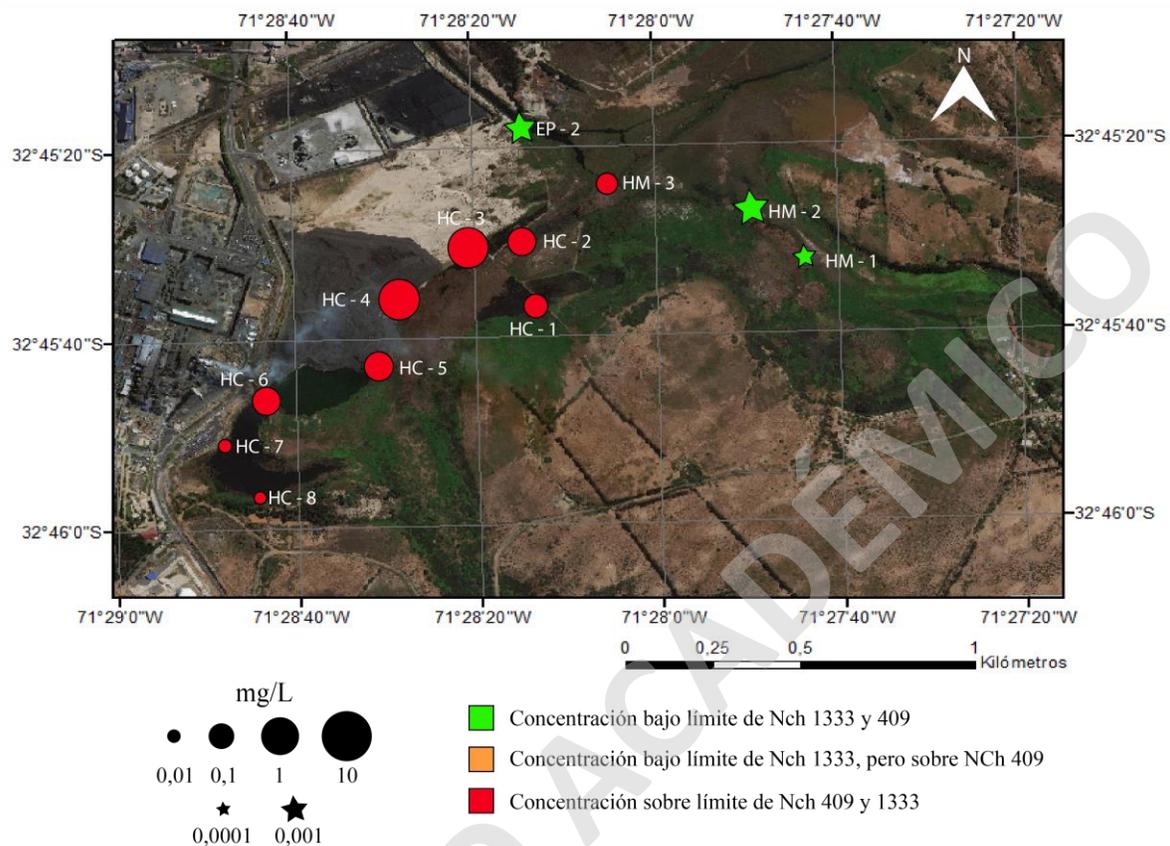


Figura 24. Distribución espacial de las concentraciones de molibdeno disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

El modelo hidroquímico del molibdeno sugiere la presencia de 4 diferentes especies químicas, destacando la presencia de MoO_4^{2-} y HMoO_4^- . Estas últimas dos especies estarían presentes en todas las muestras de la zona de estudio con una concentración variable (Tabla 29), siguiendo las mismas tendencias en su distribución espacial observadas en la Figura 24. No se presentarían fases minerales que regularan la precipitación de molibdeno dentro de la zona de estudio.

Tabla 29. Especies químicas más abundantes con presencia de molibdeno en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	MoO_4^{2-}	HMoO_4^-
EP-0	7,29E-08	4,83E-11
EP-1	3,02E-08	3,26E-12
EP-2	6,36E-08	5,32E-12
HC-1	9,86E-07	1,15E-09
HC-2	3,12E-06	2,83E-09
HC-3	3,17E-05	5,38E-09
HC-4	3,42E-05	1,29E-09
HC-5	3,91E-06	7,14E-10
HC-6	3,10E-06	4,78E-10
HC-7	1,91E-07	1,58E-11
HC-8	3,42E-02	4,68E-09
HM-1	9,37E-12	1,03E-11
HM-2	9,37E-08	9,81E-11
HM-3	7,77E-07	1,11E-09

5.4.4 Manganeso

Las concentraciones de manganeso varían entre 0,03 mg/L a 13,31 mg/L (Tabla 30), en donde la diferencia entre el valor mínimo y el máximo es de 490 veces. El promedio es de 2,06 mg/L y supera a la mediana 3,55 veces, la cual posee un valor de 0,58.

Tabla 30. Concentración de manganeso disuelto (mg/L) presente en cada muestra.

	EP - 0	EP - 1	EP - 2	HC - 1	HC - 2	HC - 3	HC - 4
Mn	0,3	0,09	0,10	13,31	1,28	7,6	0,4
	HC - 5	HC - 6	HC - 7	HC - 8	HM - 1	HM - 2	HM - 3
Mn	0,07	0,06	0,76	1,02	1,17	2,7	0,03

La concentración mínima se midió en la muestra HM-3 (0,03 mg/L), mientras que la máxima en HC-1 (13,31 mg/L). Las muestras más lejanas al complejo industrial ventanas (CIV) correspondientes a EP-0 (0,3 mg/L) y EP-1 (0,09 mg/L) presentan concentraciones fuera del límite permitido por la NCh 409 y NCh 1333 en EP-0. La muestra EP-2 (0,1 mg/L) está apenas 0,0044 mg/L por sobre del límite permitido por la NCh 409, con una concentración similar a la EP - 1 (0,09 mg/L). Las muestras correspondiente a HC-5 (0,07 mg/L) y HC-6 (0,06 mg/L) presentan concentraciones bajo las normas Chilenas, caso diferente a HC-4 (0,4 mg/L) la cual pese a estar en contacto con el Escorial de Codelco al igual que HC-5 y HC-6, presenta concentraciones sobre las regulaciones nacionales (Figura 25).

Todas las otras muestras correspondientes a HC-1 (13,31 mg/L), HC-2 (1,28 mg/L), HC-3 (7,6 mg/L), HC-7 (0,76 mg/L), HC-8 (1,02 mg/L), HM-1 (1,17 mg/L) y HM-2 (2,7 mg/L), (con la excepción de HM-3), presentan concentraciones sobre la NCh 409 y 1333.

Acorde a la Figura 25, 10 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 409 (0,1 mg/L) correspondiendo a un total del 66,6% de las muestras analizadas, mientras que las muestras sobre la NCh 1333 (0,2 mg/L) disminuyen a 9, representando un 60% del total analizado.

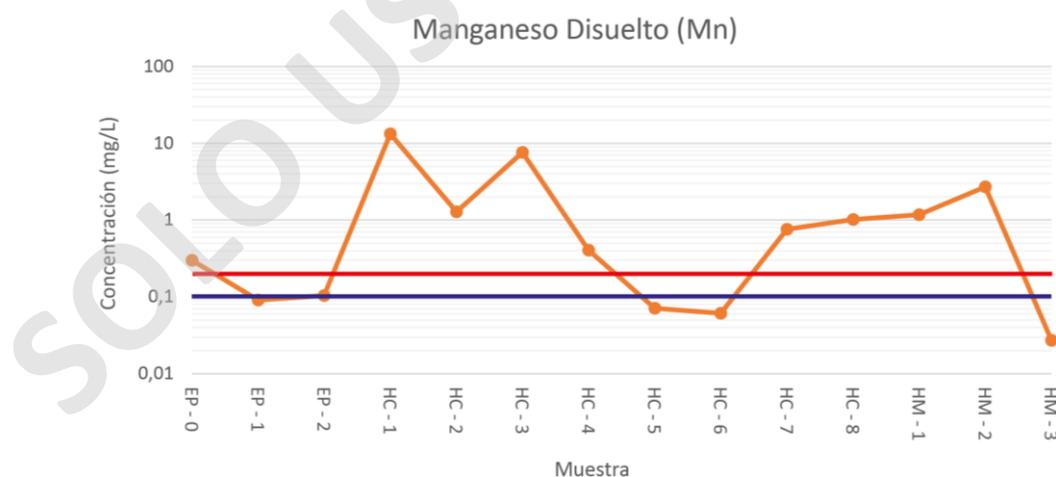


Figura 25. Concentraciones de manganeso disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.

La distribución espacial del manganeso en la zona de estudio (Figura 26) es irregular, en donde no se presentan tendencias de convergencias hacia algún punto específico. Se destacan agrupamientos de altas concentraciones hacia el este del Escorial de Codelco conformadas por HC-1 (13,31 mg/L), HC-2 (1,28 mg/L), HC-3 (7,6 mg/L) y HC-4 (0,4 mg/L), mientras que las muestras ubicadas en el Humedal Maitenes, correspondientes a HM-1 (1,17 mg/L), HM-2 (2,7 mg/L) y HM-3 (0,03 mg/L) presentan una concentración decreciente a medida que las muestras se acercan al complejo industrial ventanas.

Las muestras obtenidas del Estero Puchuncaví presentan una tendencia similar a las del Humedal Maitenes, en donde la más distal al complejo industrial correspondiente a EP-0 (0,3 mg/L) es la que presenta una mayor concentración de manganeso, a diferencia de EP-1 (0,09 mg/L) y EP-2 (0,1 mg/L) las que presentan concentraciones similares.

Manganeso disuelto

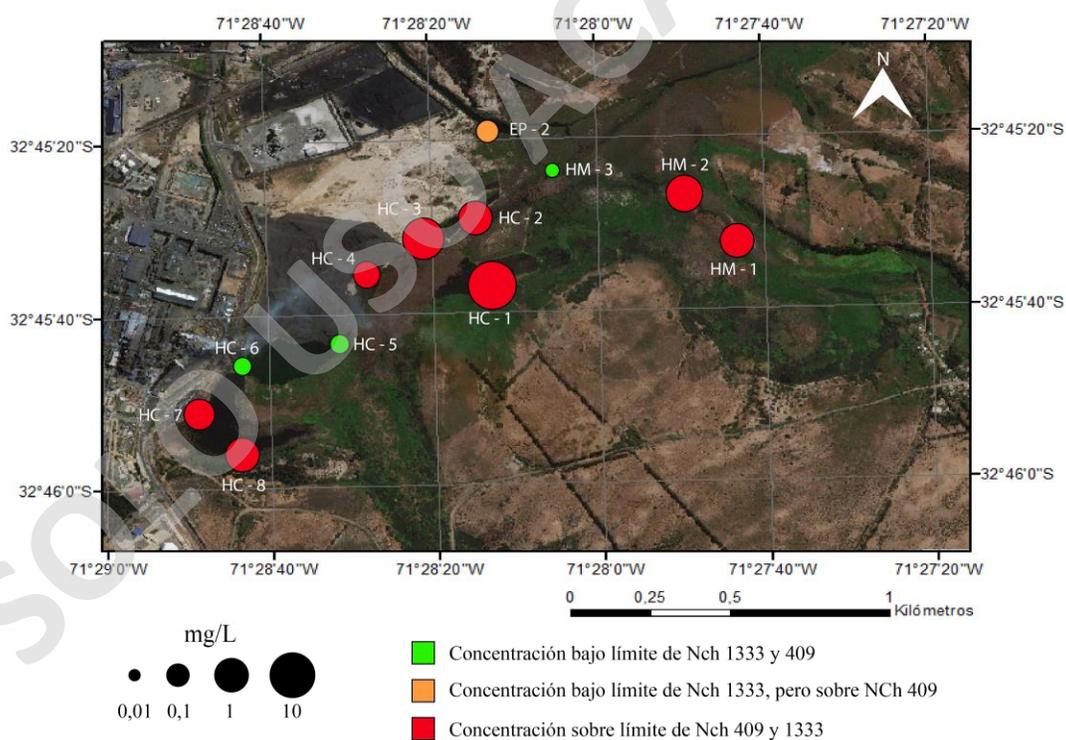


Figura 26. Distribución espacial de las concentraciones de manganeso disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

Las muestras HC-7 (0,76 mg/L) y HC-8 (1,02 mg/L) son extraídas del mismo cuerpo de agua y presentan concentraciones similares de Manganeseo, con una variación del 30%. Al igual que las muestras anteriormente mencionadas, HC-6 (0,09 mg/L) y HC-5 (0,14 mg/L) presentan un origen común, con una variación en su concentración de un 49,67% aproximadamente. Las muestras HC-7 y HC-8 presentan concentraciones fuera de las normas chilenas, a diferencia de las muestras HC-5 y HC-6, cuyas concentraciones cumplen con todas las normas. Estos cuerpos de agua se encuentran distantes entre sí no más de 20 metros, pero presentan variaciones en sus concentraciones del orden de 10 a 15 veces más en el cuerpo ubicado hacia al sur con el cuerpo de agua en contacto con el escorial de Codelco (Figura 26).

El modelo hidroquímico para el manganeseo sugiere la presencia de 11 especies químicas (conformadas en su totalidad por Mn^{+2}) en las muestras de la zona de estudio, las que poseen una ocurrencia heterogénea. Debido a su posible abundancia destacan entre estas especies Mn^{+2} , $MnSO_4$, $MnHCO_3^+$, $MnCl^+$, $MnCl_2$, $MnOH^+$ (Tabla 31), siendo Mn^{+2} la que presentaría una mayor concentración.

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC solamente una fase mineral se podría encontrar sobresaturada, correspondiente a $MnCO_3$. Su posible ocurrencia en la zona de estudio sería heterogénea, dado que esta fase mineral presentaría sobresaturación solo en las muestras HM-2, HC-1, HC-3, HC-4, HC-7 y HC-8.

Tabla 31. Especies químicas más abundantes con presencia de manganeso en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	Mn^{+2}	$MnSO_4$	$MnHCO_3^+$	$MnCl^+$	$MnCl_2$	$MnOH^+$
EP-0	4,98E-06	2,44E-07	2,10E-07	1,36E-08	5,57E-11	2,32E-10
EP-1	1,53E-06	8,55E-08	4,10E-08	5,53E-09	3,10E-11	3,29E-09
EP-2	1,77E-06	6,20E-08	2,53E-08	3,71E-08	2,08E-09	1,97E-09
HC-1	1,99E-04	3,82E-05	3,78E-06	1,60E-06	3,13E-08	1,84E-05
HC-2	2,04E-05	2,37E-06	4,01E-07	2,18E-07	4,88E-09	3,02E-06
HC-3	1,14E-04	2,01E-05	2,71E-06	1,64E-06	9,09E-08	3,93E-05
HC-4	5,82E-06	1,26E-06	2,22E-07	5,42E-08	1,65E-09	1,10E-05
HC-5	1,04E-06	2,13E-07	2,47E-08	8,48E-09	1,72E-10	5,92E-10
HC-6	9,03E-07	1,82E-07	2,38E-08	7,96E-09	1,65E-10	6,56E-10
HC-7	1,23E-05	9,75E-07	3,78E-07	1,11E-07	1,89E-09	2,36E-08
HC-8	2,30E-07	2,17E-08	7,54E-09	2,24E-09	4,00E-11	2,85E-10
HM-1	2,01E-05	5,67E-07	6,45E-07	9,49E-08	6,95E-10	4,22E-09
HM-2	4,64E-05	9,14E-07	1,30E-06	5,46E-07	1,27E-08	6,61E-09
HM-3	4,63E-07	1,34E-08	1,13E-08	5,35E-09	1,14E-10	5,42E-11

5.4.5 Sulfato

Las concentraciones de sulfato varían entre 52,51 mg/L a 2.417 mg/L (Tabla 32), en donde la diferencia entre el valor mínimo y el máximo es de 46,04 veces. El promedio es 679,07 mg/L y supera a la mediana 2,65 veces, la cual posee un valor de 255,4.

Tabla 32. Concentración de sulfato (mg/L) presente en cada muestra.

	EP - 0	EP - 1	EP - 2	HC - 1	HC - 2	HC - 3	HC - 4
SO_4^{-2}	85,16	107	242,5	1.129	467,2	2.417	2.049
	HC - 5	HC - 6	HC - 7	HC - 8	HM - 1	HM - 2	HM - 3
SO_4^{-2}	1.233	1.053	256,7	254,11	52,51	72,39	85,33

La concentración mínima se midió en la muestra HM-1 (53 mg/L), mientras que la máxima en HC-3 (2.417 mg/L). Las muestras más lejanas al complejo industrial ventanas (CIV) correspondientes a EP-0 (85 mg/L), EP-1 (107 mg/L), HM-1 (53 mg/L), HM-2 (72 mg/L) y HM-3 (85 mg/L) presentan concentraciones bajo del límite permitido por la NCh 409 y NCh 1333. La muestra EP-2 (242 mg/L) esta apenas 8 mg/L por sobre del límite permitido por la NCh 1333, mientras que las muestras correspondientes a HC-7 (257 mg/L), HC-8 (254 mg/L) y HC-2 (467 mg/L) presentan concentraciones bajo la NCh 409 pero sobre la NCh 1333. Todas las otras muestras correspondientes a HC-6 (1.053 mg/L), HC-1 (1.129 mg/L), HC-5 (1.233 mg/L), HC-4 (2.049 mg/L) y HC-3 (2.417 mg/L) presentan concentraciones sobre la NCh 409 y 1333.

Existen 8 muestras que sobrepasan el límite máximo permitido por la NCh 1333 de 250 mg/L (Figura 27) correspondientes a HC-1 (1.129 mg/L), HC-2 (467 mg/L), HC-3 (2.417 mg/L), HC-4 (2.049 mg/L), HC-5 (1.233 mg/L), HC-6 (1.053 mg/L), HC-7 (257 mg/L) y HC-8 (254 mg/L). Al comparar las concentraciones de las muestras obtenidas con los límites establecidos en la NCh 409 este es superado en 5 muestras (Figura 27), correspondientes a HC-1 (1.129 mg/L), HC-3 (2.417 mg/L), HC-4 (2.049 mg/L), HC-5 (1.233 mg/L) y HC-6 (1.053 mg/L).

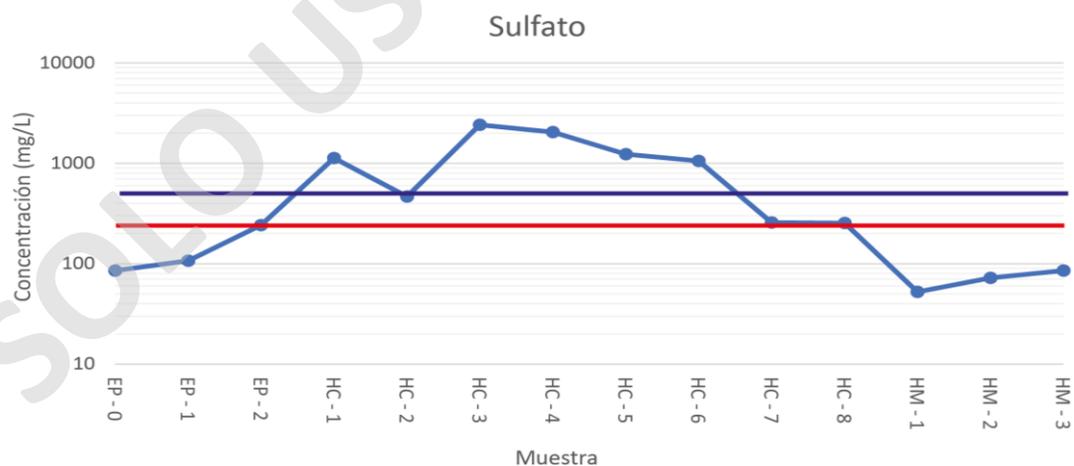


Figura 27. Concentraciones de sulfato disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.

La concentración de sulfato aumenta a medida que las muestras se aproximan al CIV, lo que se puede observar en la distribución espacial de las concentraciones presentes en las muestras EP-0, EP-1 y EP-2 (Figura 27), junto con el grupo de muestras obtenidas en el Humedal Los Maitenes HM-1, HM-2 y HM-3. De igual manera, las muestras que poseen las concentraciones más altas de Sulfato correspondientes a HC-3, HC-4, HC-5, HC-6 y HC-1 son las más cercanas al escorial de Codelco, mientras que HC-2, HC-7 y HC-8 se alejan del escorial de Codelco y presentan concentraciones menores de sulfato (Figura 28).

Sulfato disuelto

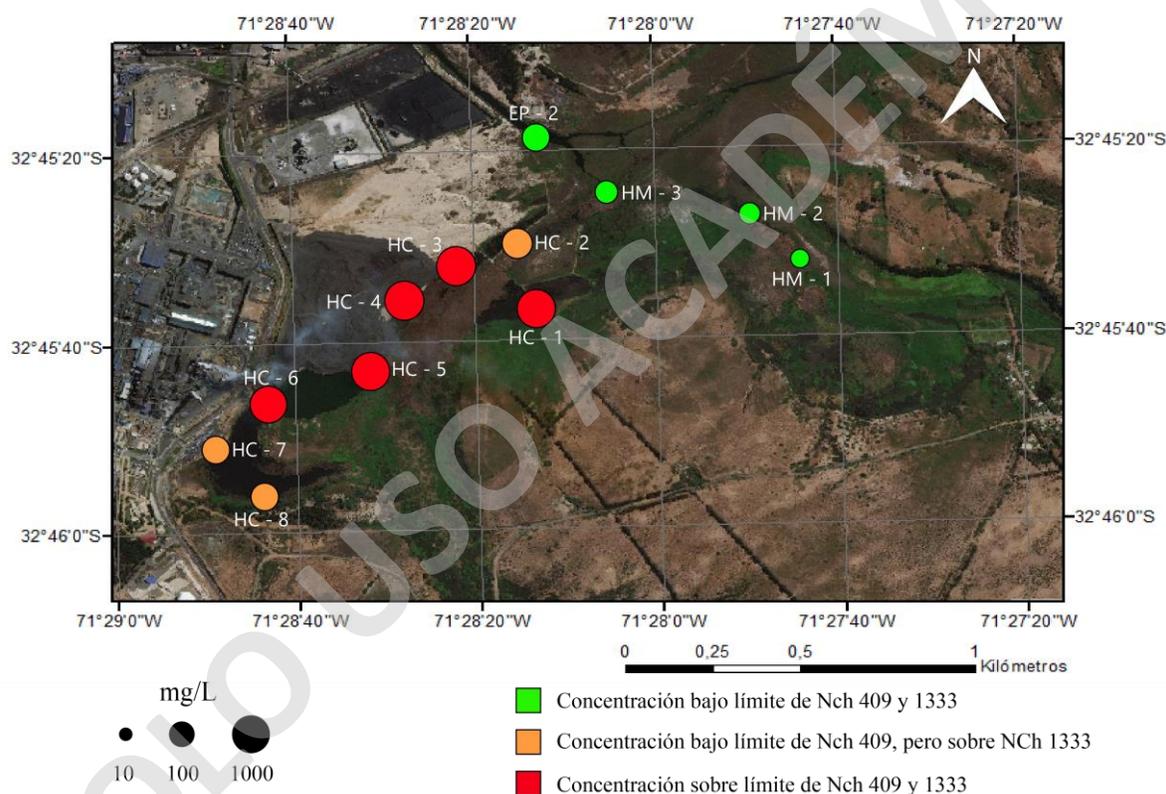


Figura 28. Distribución espacial de las concentraciones de sulfato (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

El modelo hidroquímico de PHREEQC sugiere la posible ocurrencia de 26 especies de sulfato en las muestras de la zona de estudio, destacando SO_4^{2-} , CaSO_4 , MgSO_4 y NaSO_4^- . La especie que presentaría con mayor concentración corresponde al SO_4^{2-} (Tabla 33).

Existe solo una fase mineral sobresaturada y que incorpora sulfato de acuerdo al modelo hidroquímico de PHREEQC correspondiente a BaSO_4 . Aquellas muestras donde la Baritina (BaSO_4) presentaría una sobresaturación son las que poseen las mayores concentraciones de sulfato, a excepción de HC-2, la cual posee concentraciones mayores a HC-7 y HC-8 pero su índice de saturación de -0,25.

Tabla 33. Especies químicas más abundantes con presencia de sulfato en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	SO_4^{2-}	CaSO_4	MgSO_4	NaSO_4
EP-0	7,20E-04	1,14E-04	4,33E-05	8,66E-06
EP-1	8,77E-04	1,57E-04	6,78E-05	1,03E-05
EP-2	1,86E-03	2,75E-04	2,07E-04	1,82E-04
HC-1	8,36E-03	1,55E-03	1,15E-03	5,93E-04
HC-2	3,77E-03	4,17E-04	4,01E-04	2,62E-04
HC-3	1,75E-02	2,33E-03	2,49E-03	2,76E-03
HC-4	1,64E-02	5,78E-04	1,52E-03	2,74E-03
HC-5	9,37E-03	1,04E-03	1,63E-03	7,49E-04
HC-6	8,30E-03	7,66E-04	1,26E-03	6,01E-04
HC-7	2,07E-03	2,29E-04	2,70E-04	9,97E-05
HC-8	2,25E-03	2,62E-04	4,14E-06	1,22E-04
HM-1	4,45E-04	5,18E-05	3,94E-05	8,46E-06
HM-2	5,57E-04	8,36E-05	7,82E-05	3,03E-05
HM-3	7,06E-04	7,40E-05	7,17E-05	3,49E-05

5.4.6 Cloruro

Las concentraciones de cloruro varían entre 129 mg/L y 2.402 mg/L, donde el valor máximo equivale a 18,69 veces el mínimo. El promedio es de 881,92 mg/L y supera a la mediana en un 15,11%, la cual posee un valor de 766 (Tabla 34).

Las muestras más lejanas al CIV correspondientes a EP-0 (129 mg/L) y EP-1 (178 mg/L) son las únicas que no sobrepasan las concentraciones permitidas en las normas chilenas, todas las otras muestras presentan concentraciones sobre el límite dispuesto en la NCh 1333 (200

mg/L), mientras que el límite estipulado de la NCh 409 (400 mg/L) es superado por las muestras EP-2 (2.221 mg/L), HC-1 (749mg/L), HC-2 (818 mg/L), HC-3 (2.402 mg/L), HC-4 (1.269 mg/L), HC-5 (783 mg/L), HC-6 (788 mg/L), HC-7 (599 mg/L), HC-8 (614 mg/L), HM-2 (825 mg/L) y HM-3 (738 mg/L).

Tabla 34. Concentración de cloruro (mg/L) presente en cada muestra.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
Cl ⁻	128,5	177,6	232,4	599,08	614,8	738,1	749,19
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Cl ⁻	783,1	789	817,6	824,79	1.269	2.221	2.402

De acorde a la Figura 29, 12 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 1333 (200 mg/L) correspondiendo a un total del 86% de las muestras analizadas, mientras que las muestras sobre la NCh 409 (400 mg/L) disminuyen a 11, representando un 78,57% del total analizado.

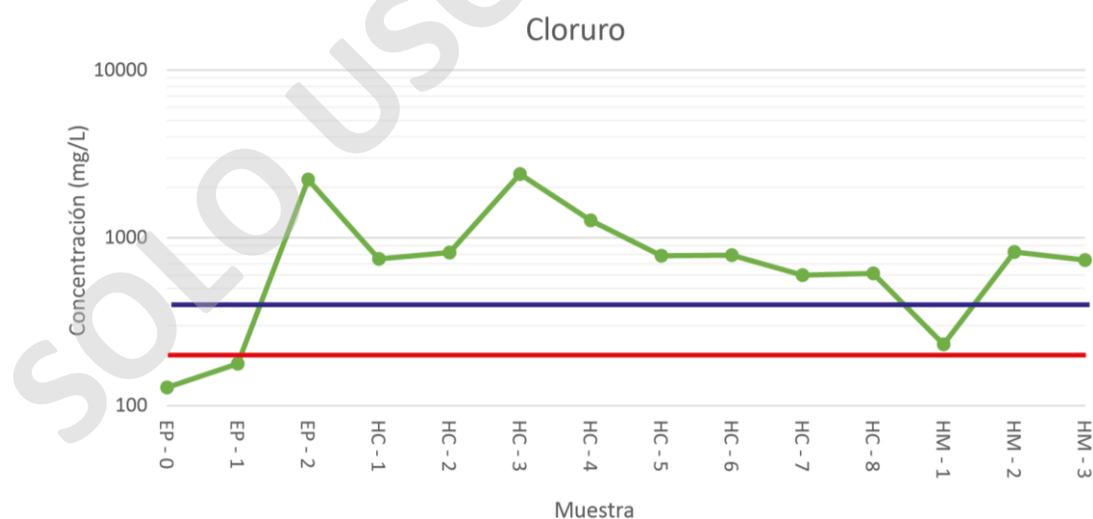


Figura 29. Concentraciones de cloruro disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja a la NCh 1333.

Las únicas muestras que cumplen con todas las regulaciones chilenas corresponden a EP-0 (128,52 mg/L) y EP-1 (177,59 mg/L) (Figura 29). Al ver la distribución espacial del cloruro en la zona de estudio (Figura 30) se observa que casi toda la zona oeste presenta concentraciones sobre todas las normas chilenas.

Cloruro disuelto

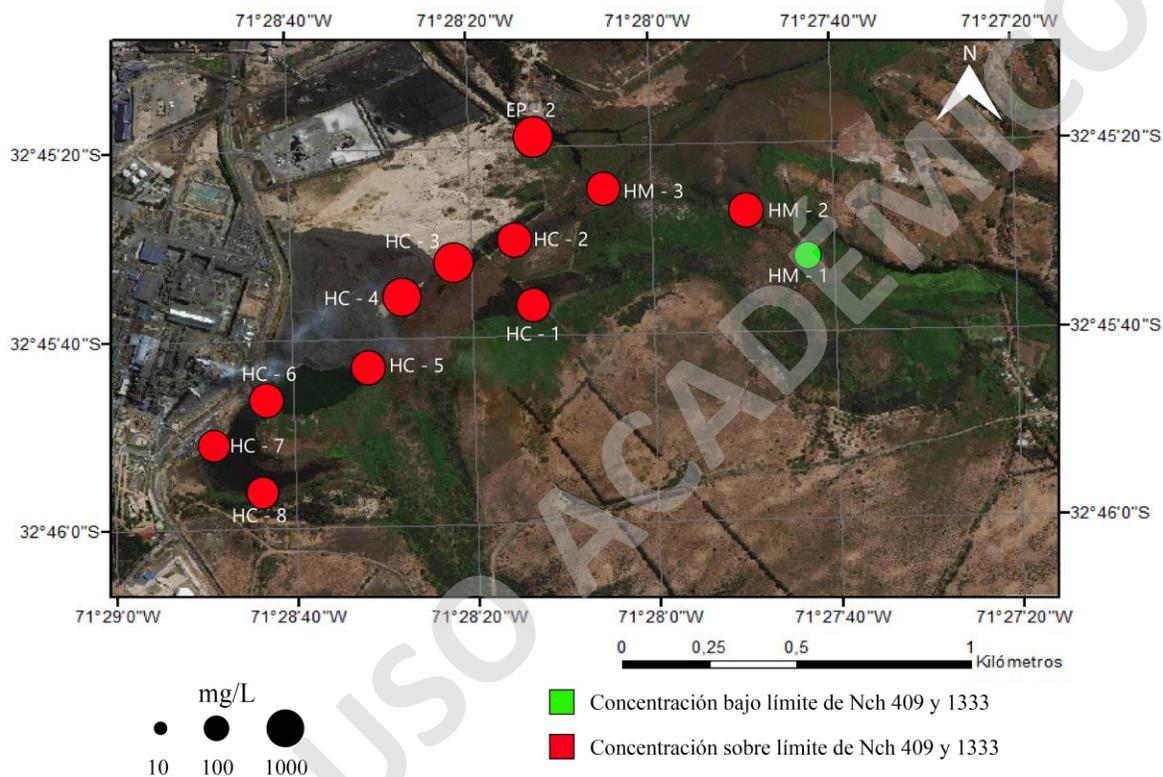


Figura 30. Distribución espacial de las concentraciones de cloruro (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

El modelo hidroquímico de PHREEQC sugiere la presencia 33 especies químicas diferentes, siendo el Cl⁻ la dominante (Tabla 35). Respecto a las fases minerales, no se registra ninguna posible sobresaturación en la zona de estudio.

Tabla 35. Especie química más abundante de cloruro. Concentración expresada como molalidad.

	Cl⁻
EP-0	3,63E-03
EP-1	5,01E-03
EP-2	6,27E-02
HC-1	2,11E-02
HC-2	2,31E-02
HC-3	6,77E-02
HC-4	3,58E-02
HC-5	2,21E-02
HC-6	2,23E-02
HC-7	1,69E-02
HC-8	1,73E-02
HM-1	6,56E-03
HM-2	2,33E-02
HM-3	2,08E-02

5.4.7 Magnesio

Las concentraciones de magnesio varían entre 21,31 mg/L y 232,8 mg/L (Tabla 36), en donde la concentración máxima equivale a 10,92 veces la mínima. El promedio es de 99,72 mg/L y supera a la mediana en un 26,88%, la cual posee un valor de 78,59.

Tabla 36. Concentración de magnesio disuelto (mg/L) presente en cada muestra.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
Mg	21,31	28,91	133,22	131,13	75,34	232,8	139,18
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Mg	175,9	141,82	76,48	72,82	32,39	80,7	54,09

La concentración mínima se midió en la muestra EP-0 (21,31 mg/L), mientras que la máxima en HC-3 (232,8 mg/L). Las muestras más lejanas al CIV correspondientes a EP-0 (21,31 mg/L) y EP-1 (28,91 mg/L) son las que presentan las concentraciones más bajas de la zona de estudio. Estas muestras junto con HM-1 (32,39 mg/L), HM-3 (54,81 mg/L), HC-8 (72,82 mg/L), HC-2 (75,34 mg/L), HC-7 (76,48 mg/L) y HM-2 (80,7 mg/L) cumplen con los límites dispuestos en la NCh 409. Las otras muestras superan el límite de dicha ley, y corresponden a HC-1 (131,13 mg/L), EP-2 (133,22 mg/L), HC-4 (139,18 mg/L), HC-6 (141,82 mg/L), HC-5 (175,9 mg/L) y HC-3 (232,8 mg/L).

Acorde a la Figura 31, 6 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 409 (125 mg/L) correspondiendo a un total del 42,85% de las muestras analizadas.

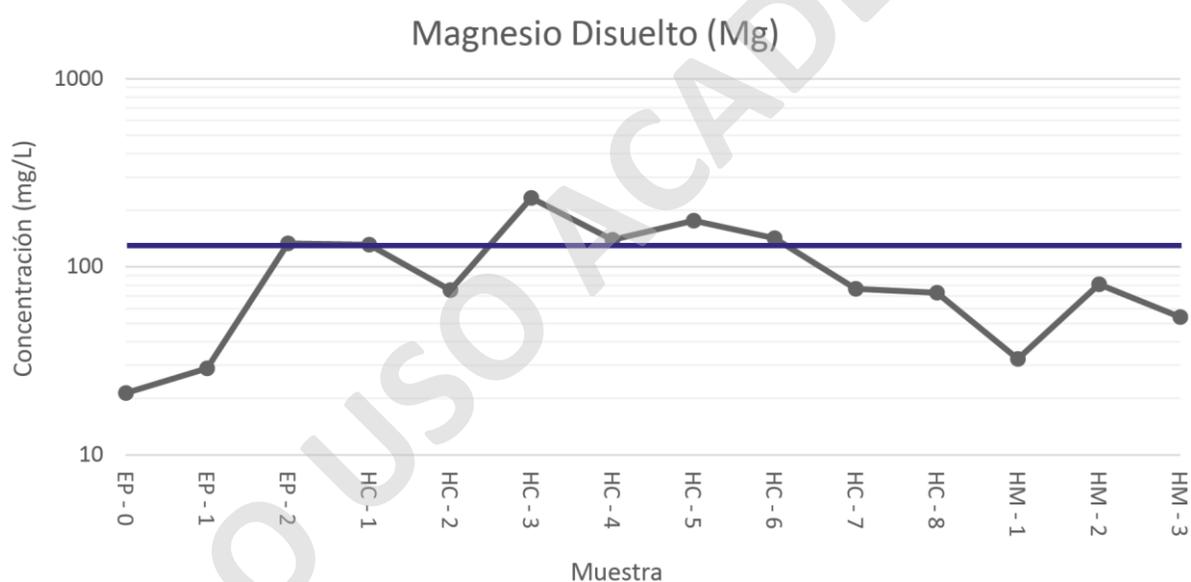


Figura 31. Concentraciones de magnesio disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409.

Al ver la distribución espacial del magnesio en la zona de estudio se observa una clara convergencia hacia el Escorial de Codelco, representada por las muestras que están más cerca de este: HC-6 (141,82 mg/L), HC-5 (175,9 mg/L), HC-4 (139,18 mg/L), HC-3 (232,8mg/L) y HC-1 (131,13 mg/L) (Figura 32).

Magnesio disuelto

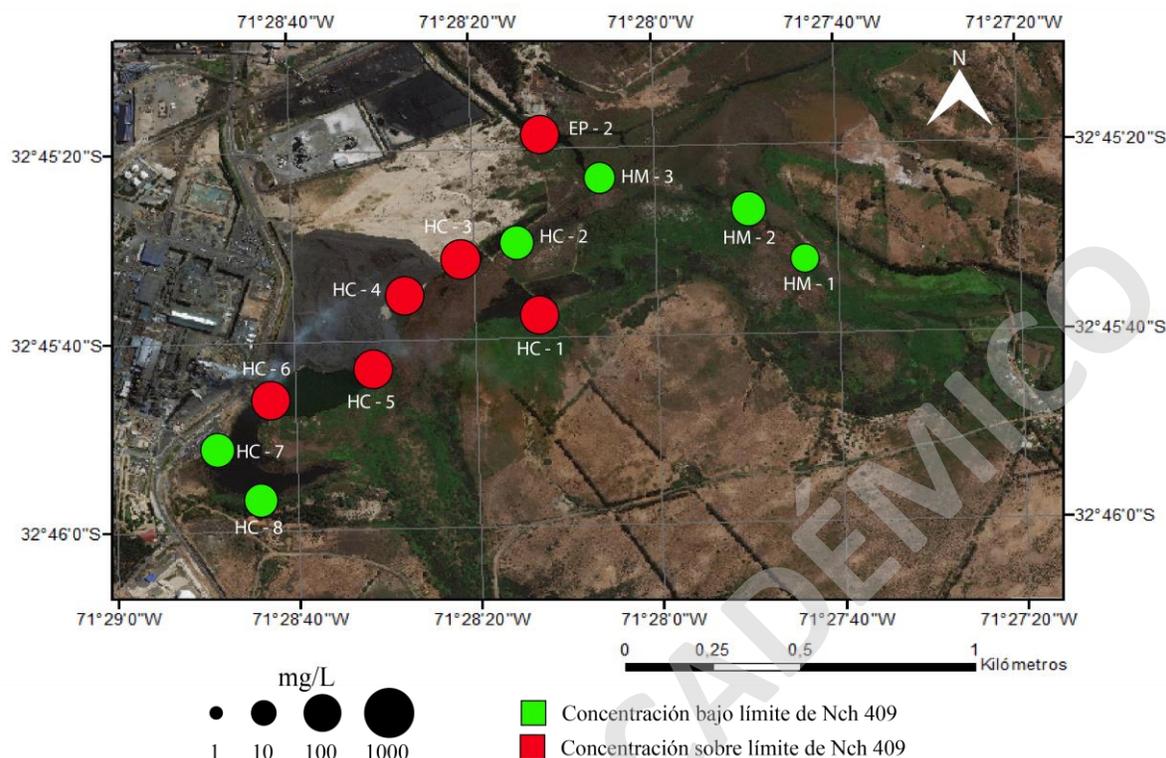


Figura 32. Distribución espacial de las concentraciones de magnesio disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

Acorde al modelo hidroquímico de PHREEQC existirían 9 especies diferentes de magnesio en la zona de estudio, donde Mg^{+2} sería la dominante, seguida de $MgSO_4$. Estas especies estarían presentes en toda la zona de estudio, variando solamente sus concentraciones (Tabla 37).

Existirían 3 fases minerales posiblemente sobresaturadas acorde al modelo hidroquímico de PHREEQC, correspondientes a Fe_2MgO_4 , $MgCO_3$ y $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Estas fases presentarían una distribución heterogénea, donde el $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ estaría sobresaturado solo en la muestra HC-4, el $MgCO_3$ solamente en HC-3 y HC-4 y el Fe_2MgO_4 en todas las muestras a excepción de HC-2 y HM-3.

Tabla 37. Especies químicas más abundantes con presencia de magnesio en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.

	Mg ⁺²	MgSO ₄
EP-0	8,06E-04	4,33E-05
EP-1	6,78E-05	1,63E-05
EP-2	2,75E-04	5,70E-05
HC-1	4,19E-03	1,15E-03
HC-2	2,66E-03	4,01E-04
HC-3	6,89E-03	2,49E-03
HC-4	3,94E-03	1,52E-03
HC-5	5,49E-03	1,63E-03
HC-6	4,47E-03	1,26E-03
HC-7	2,79E-03	2,70E-04
HC-8	3,67E-05	4,14E-06
HM-1	3,94E-05	2,26E-05
HM-2	7,82E-05	5,64E-05
HM-3	7,40E-05	3,13E-05

5.4.8 Boro

Las concentraciones de boro sobre el límite de detección varían entre 0,73 mg/L y 2,91 mg/L (Tabla 38), en donde la concentración máxima equivale a 3,99 veces la mínima. El promedio es de 1,467 mg/L y supera a la mediana en un 12,38%, la cual posee un valor de 1,305.

Tabla 38. Concentración de boro disuelto (mg/L) presente en cada muestra. L.D. corresponde a “límite de detección, con un valor < 0,35 mg/L.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
B	L.D.	L.D.	L.D.	0,87	0,73	2,91	1,68
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
B	1,48	1,13	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.

La concentración mínima sobre el límite de detección se midió en la muestra HC-2 (0,73 mg/L), mientras que la máxima en HC-3 (2,91 mg/L). Las muestras más lejanas al Escorial de Codelco correspondientes a EP-0 (<0,35 mg/L) y EP-1 (<0,35 mg/L), EP-2 (<0,35 mg/L), HM-3 (<0,35 mg/L), HM-2 (<0,35 mg/L), HM-3 (<0,35 mg/L), HC-8 (<0,35 mg/L), HC-7 (<0,35 mg/L) presentan bajas concentraciones las cuales se encuentran en su totalidad bajo las normas chilenas, al igual que HC - 2 (0,73 mg/L). Las muestras HC-1 (0,84 mg/L), HC-3 (2,91 mg/L), HC-4 (1,68 mg/L), HC-5 (1,48 mg/L), HC-6 (1,13 mg/L) sobre pasan las concentraciones máximas permitidas de boro presentes en la NCh 1333.

Acorde a la Figura 33, 6 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 1333 (0,75 mg/L) correspondiendo a un total del 42,85% de las muestras analizadas.

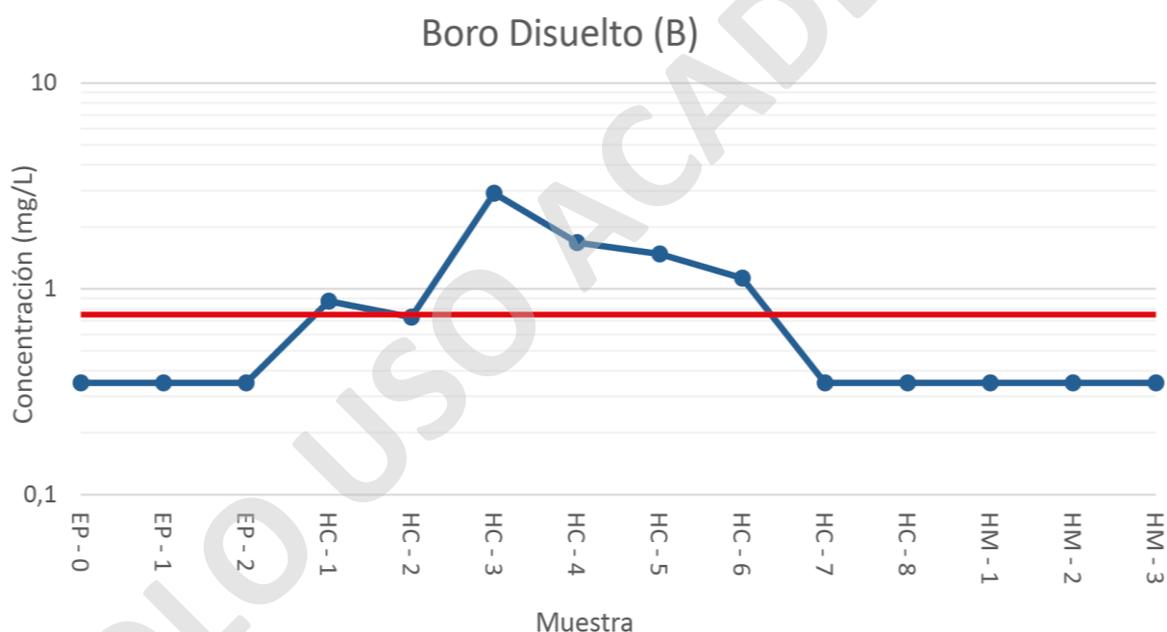


Figura 33. Concentraciones de boro disuelto (mg/L) de cada una de las muestras analizadas. La línea roja corresponde al límite estipulado en la NCh 1333.

Al ver la distribución espacial del boro en la zona de estudio (Figura 34) se observa una clara convergencia hacia el escorial de Codelco en las concentraciones que superan el límite de la

NCh 1333, ya que las muestras más lejanas a este como EP-0, EP-1, HM-1, HM-2, HC-8 y HC-7 presentan concentraciones bajo el límite de detección de 0,35 mg/L.

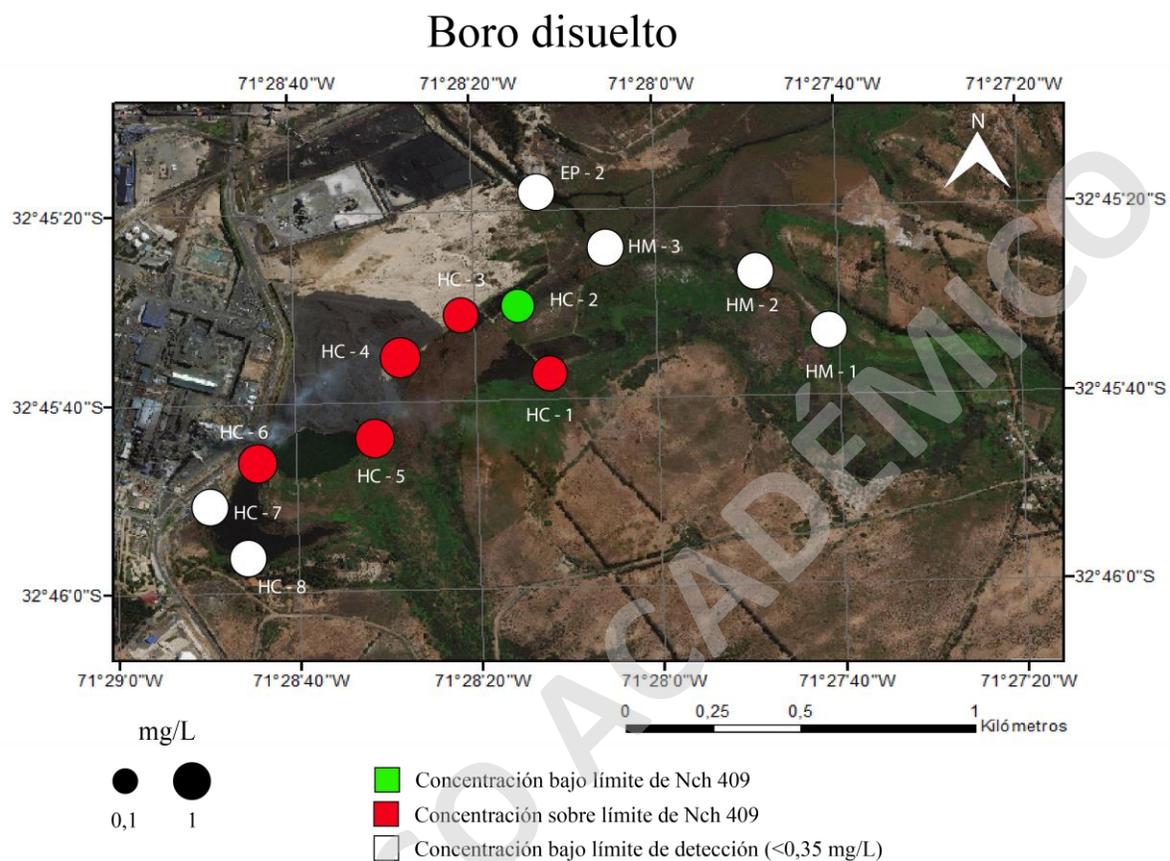


Figura 34. Distribución espacial de las concentraciones de boro disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

El modelo hidroquímico de PHREEQC para el boro sugiere la ocurrencia probable de 3 especies diferentes que contendrían este elemento dentro de su fórmula química (Tabla 39), las cuales se encuentran en su totalidad disueltas para todas las muestras que presentan concentraciones de boro sobre el límite de detección (<0,35 mg/L). Este elemento no presentaría ninguna sobresaturación que pudiese propiciar la precipitación de algún mineral que contenga boro en su estructura.

Tabla 39. Especies químicas más abundantes con presencia de boro en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.

	H ₃ BO ₃	H ₂ BO ₃ ⁻
HC-1	7,98E-05	5,88E-07
HC-2	6,68E-05	6,39E-07
HC-3	2,53E-04	1,31E-05
HC-4	1,23E-04	2,81E-05
HC-5	1,30E-04	6,07E-06
HC-6	9,83E-05	5,45E-06

5.4.9 Plomo

Las concentraciones de plomo sobre el límite de detección (0,0002 mg/L) varían entre 0,0006 mg/L y 0,08 mg/L (Tabla 40), en donde la diferencia entre el valor mínimo y el máximo es de 140,17 veces. El promedio es de 0,02 mg/L y supera a la mediana en un 377,75%, la cual posee un valor de 0,006.

Tabla 40. Concentración de plomo disuelto (mg/L) presente en cada muestra. L.D. corresponde a “límite de detección, con un valor < 0,0002 mg/L.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
Pb	L.D.	L.D.	L.D.	0,04	0,0006	0,01	0,001
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Pb	0,003	0,002	0,06	0,08	0,001	0,009	L.D.

La concentración mínima sobre el límite de detección se midió en la muestra HC-2 (0,0006 mg/L), mientras que la máxima en HC-8 (0,08 mg/L). Las muestras más lejanas al complejo industrial ventanas correspondientes a EP-0 (<0,0002 mg/L) y EP-1 (<0,0002 mg/L) presentan bajas concentraciones de plomo, al igual que algunas muestras más cercanas al complejo industrial como HM-3 (<0,0002 mg/L), EP-2 (<0,0002 mg/L), HC-1 (0,04 mg/L),

HC-3 (0,01 mg/L), HM-2 (0,009 mg/L), HC-5 (0,003 mg/L), HC-6 (0,002 mg/L), HM-1 (0,001 mg/L) y HC-2 (<0,0002 mg/L) las cuales se encuentran en su totalidad bajo las normas chilenas. Las muestras HC-8 (0,08 mg/L), HC-7 (0,06 mg/L) son las únicas que presentan concentraciones sobre el máximo permitido en la NCh 409.

Acorde a la Figura 35, 2 muestras presentan valores sobre el límite permitido por la NCh 409 (0,05 mg/L) correspondiendo a un total del 14,28% de las muestras analizadas.

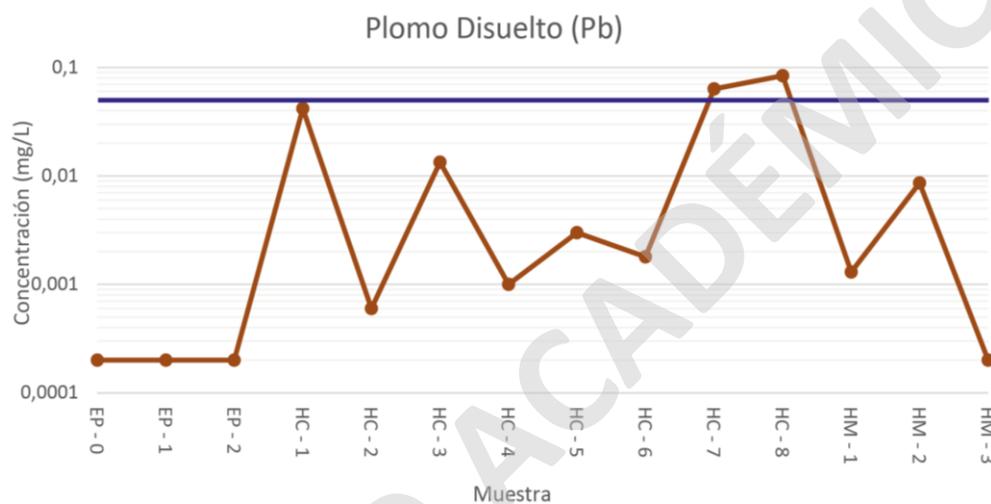


Figura 35. Concentraciones de plomo disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409.

Al ver la distribución espacial del plomo en la zona de estudio (Figura 36) se observa la presencia de valores sobre el límite de detección hacia el complejo industrial ventanas, aunque solo dos concentraciones superan el límite permitido por la NCh 409, mientras que ninguno supera la NCh 1333.

Plomo disuelto

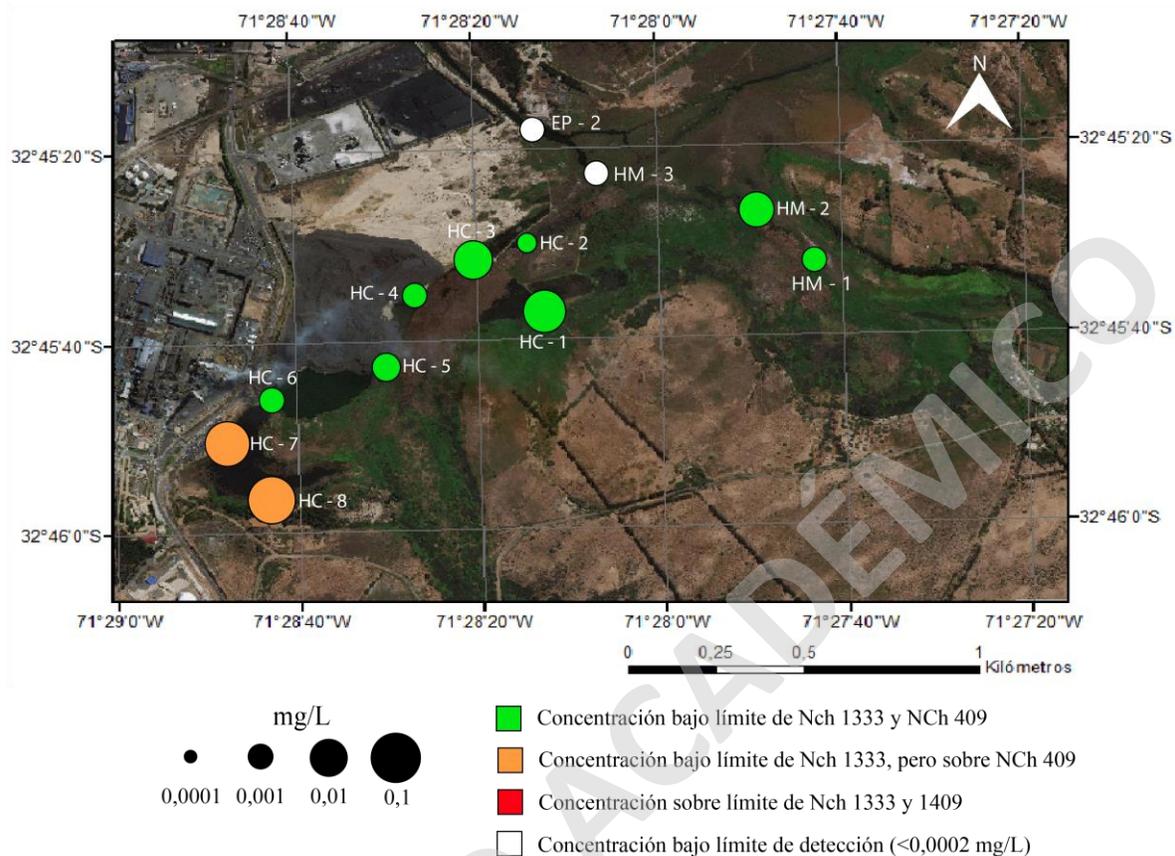


Figura 36. Distribución espacial de las concentraciones de plomo disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

Las muestras EP-0, EP-1 y EP-2 presentan concentraciones de plomo bajo los límites de detección (0,0002 mg/L) por lo que no se consideraron para el modelo hidroquímico de PHREEQC.

Dicho esto, el modelo hidroquímico de PHREEQC para el plomo sugiere la posible ocurrencia de 19 especies diferentes que contienen este elemento dentro de su fórmula química, siendo $PbCO_3$ la especie dominante, seguido de $PbSO_4^-$, Pb^{+2} y $PbCl^+$ (Tabla 41). El $PbCO_3$ presentaría de igual forma sobresaturación en las muestras HC-7 y HC-8, siendo la única posible fase mineral que podría precipitar en la zona de estudio.

Tabla 41. Especies químicas más abundantes con presencia de plomo en la zona de estudio. Concentración expresada como molalidad.

	$PbCO_3$	$PbHCO_3^+$	Pb^{+2}	$PbSO_4$	$PbCl^+$	$Pb(CO_3)_2^{-2}$	$PbOH^+$
EP-0	-	-	-	-	-	-	-
EP-1	-	-	-	-	-	-	-
EP-2	-	-	-	-	-	-	-
HC-1	6,12E-08	4,45E-08	4,14E-08	3,05E-08	1,43E-08	6,72E-10	5,83E-09
HC-2	1,12E-09	5,74E-10	5,80E-10	2,35E-10	2,36E-10	1,20E-11	1,16E-10
HC-3	3,90E-08	5,20E-09	2,48E-09	2,41E-09	2,39E-09	1,03E-08	2,03E-09
HC-4	2,00E-09	5,54E-11	1,94E-11	2,03E-11	1,02E-11	2,64E-09	7,38E-11
HC-5	9,82E-09	1,14E-09	8,32E-10	6,63E-10	2,96E-10	9,09E-10	7,33E-10
HC-6	6,13E-09	5,81E-10	3,99E-10	3,03E-10	1,47E-10	6,61E-10	4,31E-10
HC-7	2,34E-07	1,01E-08	7,01E-09	1,83E-09	2,23E-09	3,46E-08	1,69E-08
HC-8	3,11E-07	2,15E-08	1,44E-08	4,37E-09	4,83E-09	2,73E-08	2,18E-08
HM-1	3,14E-09	1,48E-09	1,12E-09	9,38E-11	1,64E-10	2,37E-11	2,59E-10
HM-2	1,81E-08	1,02E-08	7,58E-09	5,02E-10	3,24E-09	2,10E-10	1,39E-09
HM-3	3,43E-10	2,49E-10	2,23E-10	2,10E-11	8,95E-11	2,19E-12	3,21E-11

5.4.10 Hierro

Las concentraciones de hierro varían entre 0,12 mg/L y 5,96 mg/L (Tabla 42), en donde la diferencia entre el valor mínimo y el máximo es de 49,67 veces. El promedio es de 1,15 mg/L y supera a la mediana en un 410,71%, la cual posee un valor de 0,28.

Tabla 42. Concentración de hierro disuelto (mg/L) presente en cada muestra.

	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4
Fe	0,25	0,12	0,29	2,84	0,19	1,05	0,27
	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Fe	0,14	0,13	1,03	1,91	1,79	5,96	0,19

La concentración mínima se midió en la muestra EP-1 (0,12 mg/L), mientras que la máxima en HM-2 (5,96 mg/L). Las muestras más lejanas al CIV correspondientes a EP-0 (0,25 mg/L) y EP-1 (0,16 mg/L) presentan bajas concentraciones de hierro, al igual que algunas muestras más cercanas al complejo industrial como HM-3 (0,19 mg/L), EP-2 (0,29 mg/L), HC-2 (0,18 mg/L), HC-4 (0,27 mg/L), HC-5 (0,14 mg/L) y HC-6 (0,13 mg/L), las cuales se encuentran en su totalidad bajo las normas chilenas. Las muestras HC-1 (2,84 mg/L), HC-3 (1,05 mg/L), HC-7 (1,03 mg/L), HC-8 (1,9 mg/L) y HM-1 (1,79 mg/L) presentan concentraciones sobre el máximo permitido en la NCh 409, pero bajo el de la NCh 1333. La única muestra que está sobre el límite NCh 1333 corresponde a la muestra HM-2 (5,96 mg/L) (Figura 37).

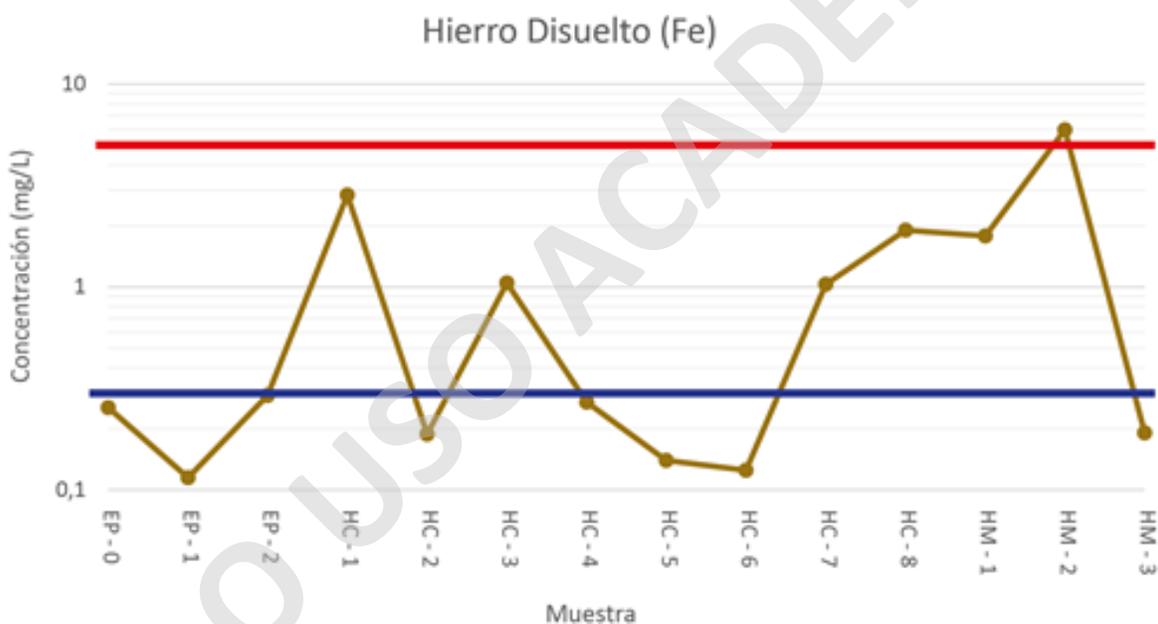


Figura 37. Concentraciones de hierro disuelto en mg/L de cada una de las muestras analizadas. La línea azul corresponde al límite estipulado en la NCh 409, mientras que la roja al límite presente en la NCh 1333.

Al ver la distribución espacial de hierro en la zona de estudio (Figura 38) se observa la presencia de valores sobre el límite de detección hacia el complejo industrial ventanas, donde cinco muestras superan el límite permitido por la NCh 409, mientras que solo una supera la

NCh 1333. Además, existen 6 muestras cercanas al CIV que presentan concentraciones bajo los límites establecidos en las normas chilenas.

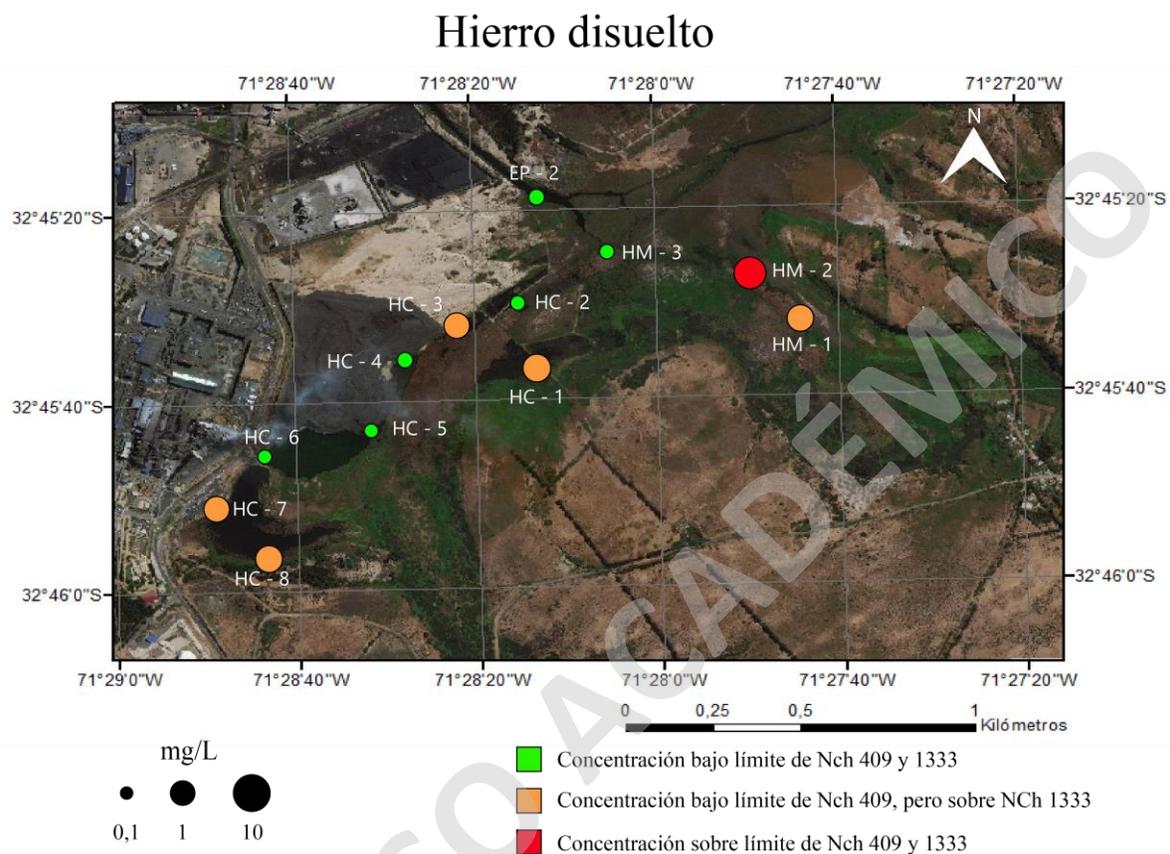


Figura 38. Distribución espacial de las concentraciones de hierro disuelto (mg/L) en la zona de estudio, con las excepciones de EP-0 y EP-1.

El modelo hidroquímico de PHREEQC para el hierro sugiere la presencia de 23 especies diferentes que contienen este elemento dentro de su fórmula química, presentándose especies con Fe^{+2} y Fe^{+3} , siendo las especies Fe^{+2} y $FeSO_4$ las dominantes (Tabla 43).

Existirían 9 fases minerales sobresaturadas con la presencia de hierro en su composición, correspondientes a: Fe_3O_4 , $CuFeO_2$, Fe_2O_3 , $CuFe_2O_4$, $FeOOH$, Fe_2MgO_4 , $Fe(OH)_3$, $Fe_3(OH)_8$, $FeCO_3$. Su distribución en la zona de estudio sería heterogénea.

Tabla 43. Especies químicas más abundantes con presencia de hierro en la zona de estudio. Concentraciones expresadas como molalidad.

	Fe^{+2}	FeSO_4
EP-0	3,92E-06	2,65E-07
EP-1	1,69E-06	1,31E-07
EP-2	4,70E-06	2,27E-07
HC-1	3,95E-05	1,05E-05
HC-2	2,85E-06	4,57E-07
HC-3	1,48E-05	3,61E-06
HC-4	2,97E-06	8,92E-07
HC-5	1,91E-06	5,36E-07
HC-6	1,70E-06	4,72E-07
HC-7	1,46E-05	1,59E-06
HC-8	2,77E-05	3,60E-06
HM-1	2,91E-05	1,14E-06
HM-2	1,01E-04	2,75E-06
HM-3	3,22E-06	1,29E-07

5.5 Análisis de componentes principales

Para visualizar de mejor manera las correlaciones entre los parámetros más importantes obtenidos en este estudio, correspondientes a sulfato, molibdeno, arsénico, magnesio, boro, cloruro, magnesio, manganeso, cobre, plomo, hierro, sodio, potasio, Eh, pH, T°, CE y SDT, se procede a realizar un análisis de componentes principales.

La Figura 39 presenta los resultados del análisis de componentes principales realizado, destacando 3 agrupaciones prioritarias:

- El grupo 1, conformado por sulfato, molibdeno, arsénico, magnesio, boro, cloruro, potasio, sodio, CE, SDT y T°.
- El grupo 2, conformado por manganeso, cobre, plomo, hierro y, en menor medida, Eh.

- El grupo 3, conformado únicamente por el pH, dada la baja correlación que este posee con los otros parámetros analizados.

Análisis de componentes principales

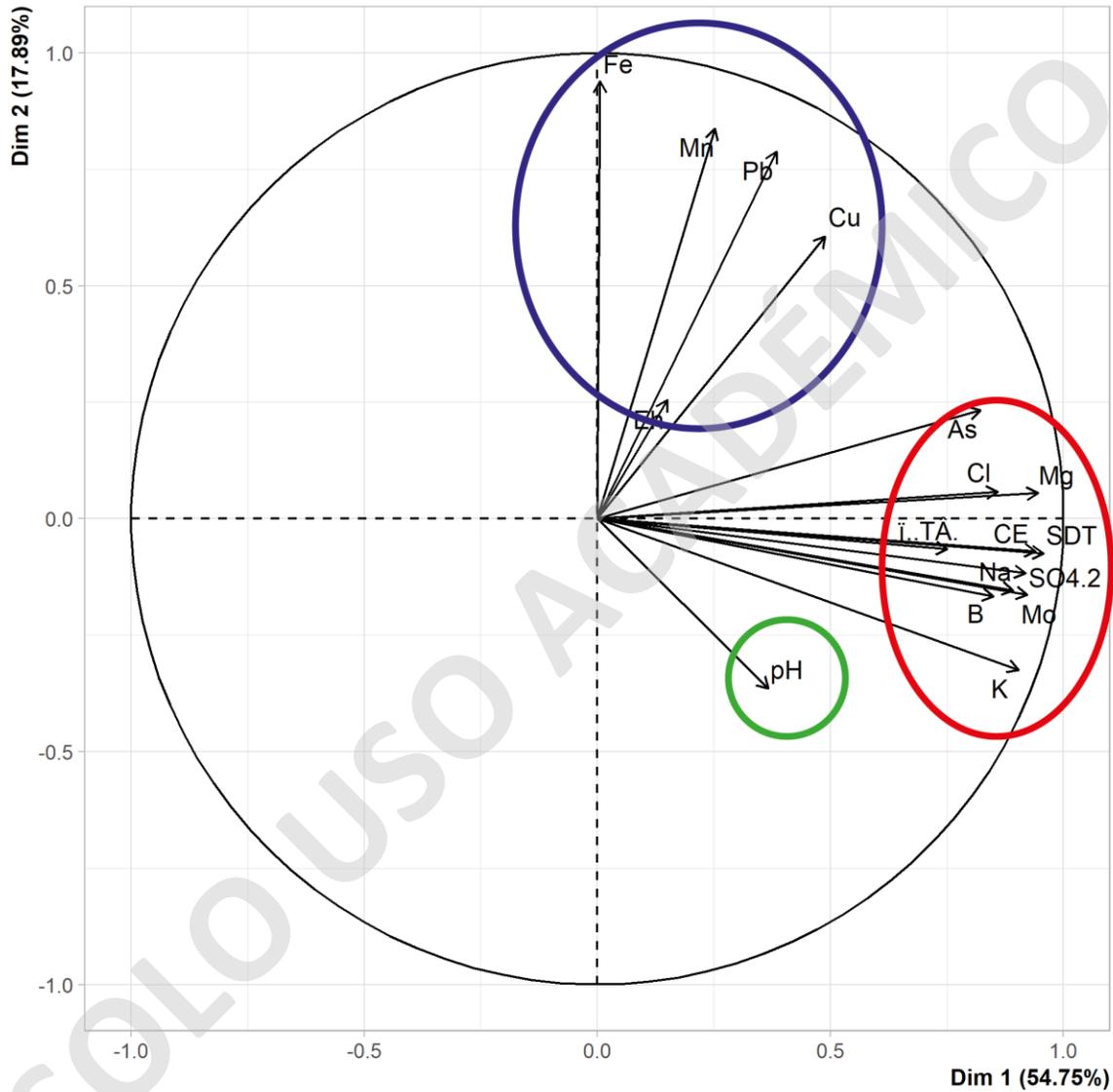


Figura 39. Mapa de factores de variables para el análisis de componentes principales realizado. Se puede observar la presencia de 3 grupos, diferenciados entre sí por colores rojo (grupo 1), azul (grupo 2) y verde (grupo 3).

6. Discusiones

A continuación, se discuten los principales factores que influenciarían la hidroquímica de los humedales Campiche, Los Maitenes y el Estero Puchuncaví, abarcando posibles variables naturales y antrópicas. Las discusiones se dividirán en 5 subcapítulos:

- **Calidad del agua en los humedales Campiche, Los Maitenes y el Estero Puchuncaví:** En esta sección se aborda la caracterización de la calidad del agua desde considerando diversos factores que influenciarían la variabilidad en la concentración de elementos hidroquímicos.
- **Adsorción de elementos:** Se discute la ocurrencia de fenómenos de adsorción para diferentes elementos en la zona de estudio, enfocado principalmente en los óxidos e hidróxidos de hierro.
- **Variabilidad y correlación espacial:** El objetivo de esta discusión es observar las similitudes y diferencias espaciales que poseen los elementos entre ellos.
- **Comparación con otros estudios hidroquímicos en la zona:** Se realiza una comparación de algunas variables hidroquímicas presentes en este estudio con el obtenido por la PUCV y UDPA el año 2015 referente a la calidad hidroquímica del Humedal Los Maitenes.
- **Comparación con otros lugares afectados por contaminación industrial:** Esta sección discute la degradación ambiental observada en distintos lugares internacionales afectados por industrias (principalmente de fundición de cobre y termoeléctricas), para luego compararla con lo observado en las cercanías del humedal Campiche.

6.1 Calidad del agua de los humedales Campiche, Los Maitenes y Estero Puchuncaví

Las aguas de los humedales Campiche, Los Maitenes y el Estero Puchuncaví presentan un amplio rango composicional, con variaciones particularmente en las concentraciones de

arsénico, cobre, molibdeno, manganeso, cloruro, hierro, magnesio, boro, plomo y sulfato, y en los valores de pH y Eh (Tabla 44). Entre los factores que influenciarían la variabilidad hidroquímica se incluyen litología, actividad antropogénica, actividad biológica/vegetación, clima y tiempo de residencia del agua (Smith & Huyck, 1994).

Tabla 44. Concentraciones y valores máximos/mínimos de diferentes cationes, aniones y parámetros físico-químicos.

	As	Cu	Mo	Mn	Cl	Fe	Mg	B	Pb	SO ₄ ⁻²	pH	Eh
Unidades	mg/L										pH	mV
Máximo	1,04	1,29	3,28	13,31	2.402	5,96	232,8	2,91	0,08	2.417	8,5	212
Mínimo	0,002	0,1	0,0007	0,03	128,5	0,12	21,31	0,73	0,0006	53	7	-23

6.1.1 Factores que indican en la concentración de elementos disueltos

6.1.1.1 Litología

Una de las principales fuentes a partir de las cuales los cuerpos de agua adquieren sus concentraciones elementales en la naturaleza es mediante la meteorización química de los minerales que conforman las rocas y sedimentos que afloran en las cuencas, por lo que la litología es un factor importante a considerar en todo estudio hidroquímico. La zona de estudio se caracteriza por presentar unidades mayoritariamente sedimentarias, compuestas por areniscas, conglomerados y depósitos no consolidados.

El agua presente en las muestras EP-0, EP-1, HM-1 y HM-2 está en contacto con todas las litologías presentes en la zona de estudio, sin embargo, su calidad hidroquímica es muy diferente a las observadas en la zona oeste hacia el CIV. A pesar de no poseer datos geoquímicos en estas unidades, se puede deducir que el aumento en la concentración de elementos como el molibdeno, arsénico, cobre, hierro, manganeso, plomo y boro no tendría

como responsable directo la litología, debido a que las variaciones observadas en estas concentraciones se sitúan sobre las mismas unidades litológicas (Figura 40).

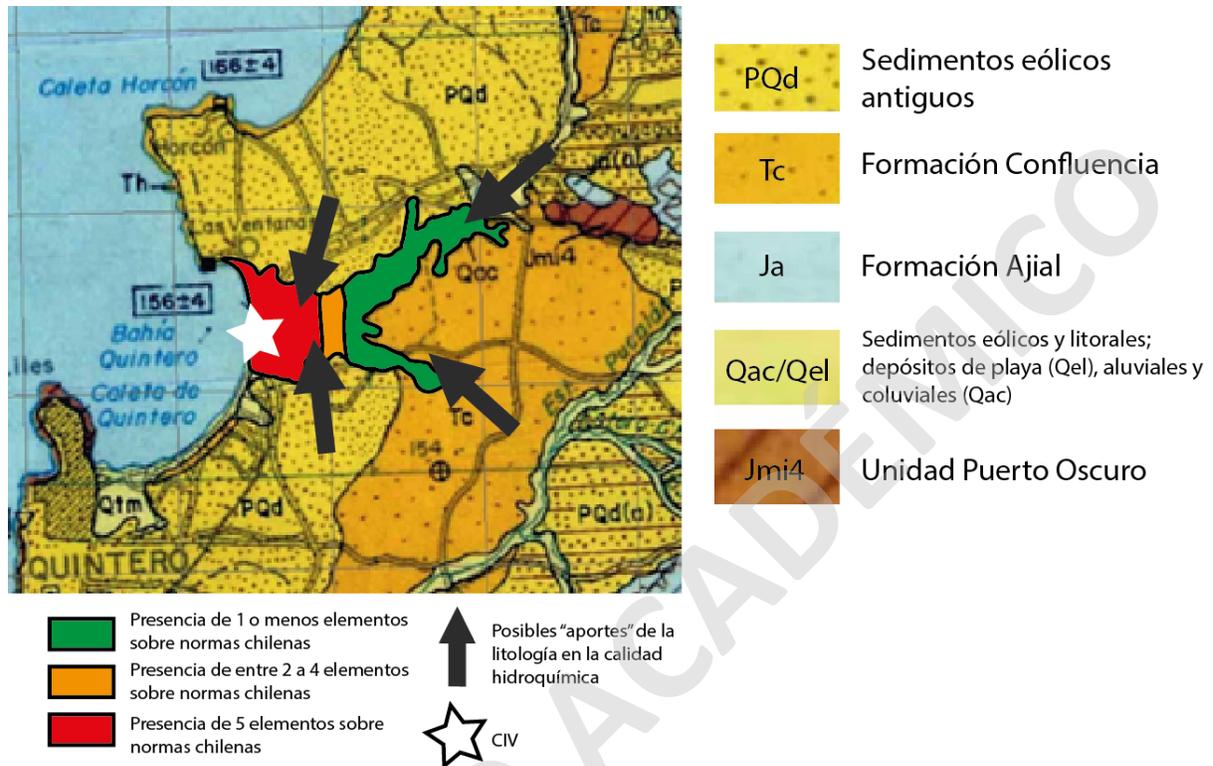


Figura 40. Cambios en la calidad hidroquímica en sentido este-oeste y las unidades geológicas PQd, Tc, Qel y Qac (estas últimas dos ubicadas bajo los polígonos realizados) definidas por Rivano (1996).

6.1.1.2 Eh y pH

Dentro de todas las variables que regulan la presencia de elementos disueltos en el agua, el Eh y pH juegan un rol fundamental, ya que de ellas depende la estabilidad de las especies y fases minerales. Si las condiciones Eh y pH de los cuerpos de agua en contacto con las litologías anteriormente mencionadas presentan variaciones significativas, podrían ocurrir cambios en las especiaciones o en la precipitación/dilución de fases minerales, alterando así las concentraciones de los elementos en el agua.

Las condiciones de Eh y pH presentan variaciones significativas, donde el Eh varía entre -23 a 212 mV y el pH entre 7 a 8,5 pH. Dependiendo del elemento analizado existirán variaciones en las tasas de precipitación/dilución de fases minerales, así como también en las especiaciones presentes, lo que podría eventualmente producir cambios en la calidad hidroquímica. Estas posibles variaciones y sus efectos se discutirán más adelante.

6.1.1.3 Factores antrópicos

La zona de estudio se caracteriza por presentar pequeñas comunidades rurales y urbanas, las cuales hacen uso de las aguas del Estero Puchuncaví desde su nacimiento hasta unos kilómetros antes de su desembocadura al Océano Pacífico. Este uso se limita casi exclusivamente a la agricultura.

La principal variación observada en la química de la zona de estudio ocurre al oeste, en las cercanías del CIV y el Océano Pacífico donde tiene lugar un enriquecimiento de diferentes elementos en los suelos, tales como el arsénico, cobre, molibdeno y plomo (PGS, 2015). Estos elementos, además del manganeso, están presentes en las emisiones de material particulado que genera el CIV (Cenma, 2013), por lo que su distribución en sentido noreste concordante con los vientos de la zona de estudio sería una respuesta plausible para el aumento en la concentración de estos elementos observado en todas las muestras del Humedal Campiche, HM-2 y HM-3 del Humedal Los Maitenes y la muestra EP-2 del Estero Puchuncaví, debido a la presencia de una mayor disponibilidad de estos elementos en los sedimentos.

El Escorial de Codelco es parte del CIV, y está en contacto con los cuerpos de agua en donde se extrajeron las muestras HC-3, HC-4, HC-5 y HC-6. Estas muestras son las que presentan las mayores concentraciones de elementos disueltos en toda la zona de estudio, donde se puede observar un claro incremento en el sulfato, sodio, potasio, cloruro, molibdeno, boro, magnesio, cobre, arsénico, manganeso y hierro. Este aumento podría estar relacionado con la geoquímica presente en el escorial, puesto que en él se presentan todos los elementos

anteriormente mencionados en una concentración suficiente como para influir en la calidad de las aguas (Oyarzún, 2013), además de la presencia de diferentes sulfuros (Tabla 7) que debido al ambiente oxidante imperante, tenderían a oxidarse para formar sulfato y liberar cobre, hierro, zinc y plomo. La presencia de fases de arsénico en el escorial puede de igual manera ser una fuente de enriquecimiento para este elemento en las aguas de la zona de estudio. Sin embargo, son necesarios más análisis de sedimentos y mineralogía para saber con exactitud la influencia de este escorial en las aguas de la zona de estudio.

6.1.1.4 Otros factores

El factor climático puede generar variaciones en la concentración de metales suspendidos o disueltos de un área (Muezzinoglu & Cizmecioglu, 2006), principalmente mediante la lluvia, que ejerce un rol importante en las tasas de meteorización, dilución y evaporación (White & Blum, 1995; WitEhead *et al.*, 2009). Todas las muestras de la zona de estudio estuvieron sometidas a las mismas condiciones climáticas dado que la variabilidad espacial de entre estas no es la suficientemente como para exhibir cambios en estas condiciones. Puchuncaví se caracteriza por poseer precipitaciones en torno a los 400 mm por año, sin embargo, durante el año 2019 el déficit hídrico en la zona llegó en torno al 85% según datos oficiales de la DGA de sus estaciones de Valparaíso, por lo que las concentraciones de elementos disueltos obtenidas en este estudio podrían ser sobreestimadas en comparación a las presentes en un periodo de lluvia normal.

La vegetación puede llegar a ser un factor determinante en la movilidad de metales, debido a la existencia de plantas fitorremediadoras que pueden incorporar dentro de su estructura biológica metales como el plomo, cromo, cadmio, cobalto, níquel, cobre, zinc, arsénico, molibdeno, estaño, bario y mercurio (Ortega *et al.*, 2012). En la zona de estudio, existe la presencia de *Sarcocornia neei* (Meza *et al.*, 2018), la cual es capaz de absorber elementos como el cadmio, plomo, cobre, arsénico, magnesio, manganeso, hierro y boro. Sin embargo, la distribución espacial de esta planta se restringe a los humedales Campiche y Los Maitenes,

lugares que, en vez de ver reducida la concentración de metales disueltos, aumentan (Anexo 2).

Dado lo anteriormente mencionado, las variaciones en las concentraciones disueltas presentes en la zona de estudio no responderían a los factores climáticos, litológicos, biológicos, químicos o físicos.

A continuación, se realizará una discusión elemento por elemento donde se abordarán las posibles especies y fases minerales presentes en la zona de estudio que incorporarían a estos elementos, además de una comparación con las normas chilenas que a la fecha regulan los límites aceptables para la concentración de estos en el agua potable y de riego.

6.1.2 Ocurrencia de concentraciones elementales sobre la norma chilena

6.1.2.1 Arsénico

Las concentraciones naturales de arsénico pueden variar en amplios rangos, algunos autores registran concentraciones desde 0,83 $\mu\text{g/L}$ (Andreae et al. (1983); Froelich et al. (1985); Seyler and Martin (1991) a 21,8 mg/L (Cáceres et al., 1992), dependiendo en mayor parte de la disponibilidad de arsénico en el ambiente geológico (sedimentos, zona de alteración, campos geotérmicos), sin embargo, la geología de la zona de estudio no cumple con ningún indicio de alguna litología o alteración (Rivano, 1993) que den respuesta a las concentraciones exhibidas en las muestras localizadas desde HM-1 al oeste de la zona de estudio (Figura 20).

Acorde al modelo hidroquímico de PHREEQC, este elemento se presentaría mayoritariamente como arsénico pentavalente (As^{+5}), en donde las especies dominantes son HAsO_4^{-2} y/o H_2AsO_4^- . Estas especies son comunes en los ríos y lagos debido a los pH neutros a alcalinos y condiciones oxidantes que estos sistemas suelen poseer (Smedley &

Kinniburgh, 2002), por lo que su ocurrencia en la zona de estudio podría calificarse como normal.

Siguiendo con los resultados obtenidos con PHREEQC, existe 1 fase mineral que poseería un índice de saturación positivo y podría precipitar en la zona de estudio correspondiente a $\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$, la que presenta una tendencia homogénea, potencialmente controlando en parte las concentraciones disueltas de este elemento (Anexo 3). Dado que toda la zona de estudio presenta condiciones óptimas para la precipitación de esta fase mineral, es necesario la realización de análisis mineralógicos en los sedimentos de donde se obtuvieron las muestras de agua pertenecientes a este estudio con la finalidad de confirmar la presencia de esta (u otras) fases minerales de arsénico, así como también de su abundancia. Otro factor a considerar en la concentración de arsénico disuelto es la presencia de procesos de adsorción, que serán detallados más adelante.

Al no existir cambios en las especiaciones, y que la eventual precipitación de fases minerales tendería a ser homogénea, es posible suponer que las concentraciones de arsénico observadas en el sector oeste de la zona de estudio presentan una influencia del complejo industrial ventanas, dadas las altas concentraciones de arsénico disuelto y en los sedimentos alrededor de este. La existencia de concentraciones por sobre las normas chilenas y la falta de una línea base de calidad hidroquímica en la zona de estudio permite concluir que el arsénico presenta concentraciones suficientemente elevadas para calificarse como contaminación.

6.1.2.2 Molibdeno

La concentración promedio de molibdeno en los ríos del mundo se sitúa entre 0,42 $\mu\text{g/L}$ (Gaillardet *et al.*, 2014) a 8,63 $\mu\text{g/L}$ (Linnik and Ignatenko, 2015), dependiendo en mayor parte de la disponibilidad de molibdeno en el ambiente geológico (sedimentos, zona de alteración, campos geotérmicos), fuentes antrópicas cercanas (generalmente asociadas a la minería) y a las condiciones redox, siendo un metal bastante sensitivo a estas condiciones (Smedley & Kinniburgh, 2017).

La geología de la zona de estudio no cumple con ninguna de las características previamente mencionadas (Rivano, 1993), sin embargo, la presencia de empresas ligadas al rubro de la minería cercana a la zona de estudio (Bergamini *et al*, 2018) supone un riesgo para la ocurrencia de molibdeno. Además, el Ministerio de Medio Ambiente (2015) realizó estudios en los sedimentos de la zona de estudio, mientras que Cenma (2013) lo hizo en el material particulado emitido por el CIV, indicando la presencia de molibdeno tanto en los sedimentos como en el aire cercano al CIV.

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC el estado de oxidación del molibdeno corresponde a +6 (Mo^{+6}), en donde la especie dominante en toda la zona de estudio es el MoO_4^{2-} . Esta especie es la más común en los ríos y lagos bajo condiciones oxidantes y sobre un pH 5 (Smedley, 2014).

Las concentraciones de molibdeno en los sedimentos tienden a aumentar hacia el CIV (Ministerio del Medio Ambiente, 2015) al igual que las concentraciones de molibdeno disuelto, en donde el máximo valor de 3,28 mg/L observado en la muestra HC-3 se encuentra en contacto con el Escorial de Codelco, al igual que HC-4, HC-5 y HC-6. Estas muestras en conjunto con HC-1, HC-2, HC-7, HC-8 y HM-1 superan el límite de 0,01 mg/L estipulado en la NCh1333, y dada la inexistencia de una línea base para la concentración de molibdeno disuelto en las aguas de la comuna, se podría concluir que las concentraciones de molibdeno observadas en la zona oeste de la zona de estudio podrían ser clasificadas como contaminadas, con una posible influencia del CIV.

6.1.2.3 Sulfato

En la Figura 18 se realiza una comparación espacial de los diagramas Stiff que cada muestra posee, observando una clara tendencia al aumento del sulfato hacia el oeste de la zona de estudio. La presencia de azufre en la zona de estudio ha sido explicada principalmente por Cenma (2013), en donde se reconocen emisiones de SO_2 provenientes del complejo industrial Ventanas, sin embargo, este compuesto tiene la característica de ser gaseoso, y a diferencia

del material particulado, no decantaría en los sedimentos o en los cuerpos de agua de la zona de estudio, por lo que el dióxido de azufre no puede ser la causa de las altas concentraciones de este mencionadas anteriormente, siendo su principal consecuencia la posibilidad de lluvia acida en el área de influencia que este gas posea (Clarke & Radojevic, 1987).

Las altas concentraciones de sulfato poseen una distribución espacial concéntrica hacia el Escorial de Codelco (Figura 28), el cual posee azufre en su geoquímica (Carrasco, 2017), además de diversos minerales sulfurados (Siegel & Siegel, 1995). La presencia de estos minerales sulfurados sería la respuesta al comportamiento hidroquímico del azufre en torno a este escorial, debido a que los procesos de oxidación presentes en la zona de estudio propiciarían el paso de S^{-2} a S^{+6} , el que luego pasaría a conformar SO_4^{-2} (Amend *et al.*, 2004; Matagi *et al.*, 1998).

Otro factor de posible enriquecimiento de sulfato puede ser la influencia marina, dado que las concentraciones que este anión presenta comúnmente en el agua de mar es de alrededor de 900 mg/L (Turekian, 1968), la cual es mayor a las encontradas en las muestras más alejadas del océano correspondientes a EP-0, EP-1 y HM-1. Si este fuese el principal factor de enriquecimiento de sulfato en la zona, se esperaría que la muestra con una mayor concentración de este anión fuese EP-2 ya que es la más cercana al océano, seguida de a HM-3 y HC-2. Sin embargo, las concentraciones observadas en las muestras no parecen converger hacia este lugar de la zona de estudio correspondiente a la desembocadura de los humedales en el Estero Puchuncaví, sustentando así la teoría de que la principal fuente de sulfato sería el escorial anteriormente mencionado.

Acorde al modelo hidroquímico de PHREEQC, el sulfato en la zona de estudio se encuentra principalmente libre como SO_4^{-2} , seguido de $NaSO_4^-$ y $MgSO_4$ para todas las muestras. Esto, en conjunto con lo anteriormente mencionado referente a otros parámetros físicos, químicos, y biológicos en la zona de estudio hace suponer que las variaciones en las concentraciones de sulfato disuelto no tendrían su origen en la ocurrencia de nuevas especiaciones.

Las muestras HC-2 a HC-8 presentan concentraciones de sulfato sobre las normas chilenas, y debido a la falta de una línea base, estas concentraciones se pueden catalogar como contaminación.

6.1.2.4 Cloruro

En la Figura 18 se realiza una comparación espacial de los diagramas Stiff que cada muestra posee, observando una clara tendencia al aumento del cloruro hacia el oeste de la zona de estudio. De acorde al modelo hidroquímico de PHREEQC, el cloruro en la zona de estudio se encuentra principalmente libre como Cl^- , seguido de CuCl y CuCl_2^- para todas las muestras. Esto, en conjunto con lo anteriormente mencionado referente a otros parámetros físicos, químicos, y biológicos en la zona de estudio, hace suponer que las variaciones de cloruro no tendrían su origen en la ocurrencia de nuevas especiaciones.

Dentro de estas variaciones en el contenido de cloruro destaca lo que ocurre entre la muestra EP-2, HC-2 y HC-3: La muestra EP-2 se ubica a unos pocos cientos de metros de la desembocadura del Estero Puchuncaví, por lo que el aumento en la concentración de sodio, potasio y cloruro es esperable debido a una posible influencia marina. Luego, en la muestra HC-2, ocurriría un efecto de dilución asociado a mezcla de aguas continentales con aguas marinas, evidenciado por la disminución en la concentración disuelta de estos tres elementos, sin embargo, en la muestra HC-3 y HC-4, las concentraciones de sodio, potasio y cloruro aumentan drásticamente superando a las observadas en EP-2

Este aumento podría responder a la influencia que tiene el Escorial de Codelco sobre los cuerpos de agua en el que se extrajeron las muestras HC-3 y HC-4, ya que todas las muestras en contacto con este escorial exhiben un aumento en la concentración de cloruro. Las diferencias observadas entre las muestras HC-5 y HC-6 con HC-3 y HC-4 podrían deberse a procesos de dilución, debido a que los cuerpos de agua de donde se extrajeron HC-3 y HC-4 presentan un menor volumen que aquel de donde se extrajeron las muestras HC-5 y HC-6.

Otra posible respuesta a este aumento de cloruro en la zona oeste de la zona de estudio podría deberse a la intrusión de una cuña marina, debido a las características hidrogeológicas de la zona de estudio en donde se destaca un acuífero bastante somero, el cual se ubica a unos 1,2 km del Océano Pacífico. Esta intrusión, en el caso de ocurrir, podría generar los aumentos de Cl^- observados.

6.1.2.5 Cobre

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC el estado de oxidación del cobre correspondería a mayoritariamente a +1 (Cu^+), con una presencia menor de Cu^{+2} en todas las muestras obtenidas. La especie más abundante sería CuCl , seguida de CuCl_2^- , que comparado a lo que comúnmente ocurre en ríos y lagos, no debería corresponder a la especie mayoritaria, puesto que esta es por lo general CuCO_3 (Long & Angino, 1977; Miwa *et al.*, 1989). Esta misma especie es la que, junto con los hidróxidos, tienden a regular la ocurrencia de cobre mediante la precipitación, sin embargo, el modelo de PHREEQC sugiere la presencia de otras 3 fases minerales sobresaturadas, correspondientes a CuFeO_2 , CuFe_2O_4 , Cu_2O . Debido a que estas fases minerales no controlan comúnmente las concentraciones de cobre, se necesitaría un estudio de difracción de rayos x enfocado en los minerales de cobre que se encuentren en los sedimentos de los lugares de muestreo, con el fin de corroborar o refutar su ocurrencia.

La disponibilidad de cobre en el ambiente de la zona de estudio estaría fuertemente ligada a la presencia del CIV y la dispersión del material particulado que este emite (Cenma, 2013; PSG, 2015). Debido a que las condiciones físico-químicas son relativamente homogéneas, no existirían cambios en las interacciones agua-roca dentro de la zona de estudio, por lo que las altas concentraciones de cobre disuelto observadas en la zona oeste de la ZE podrían estar ligadas al aumento de la disponibilidad de cobre mencionada anteriormente.

Si las emisiones de cobre del CIV fueran la única causa del aumento de este elemento disuelto en las aguas de la zona de estudio, esta hipótesis supondría que las muestras más cercanas al complejo industrial presentarían una mayor concentración, sin embargo, las muestras HC-5,

HC-6 y HC-7 (que se encuentran en contacto con el CIV) presentan una calidad hidroquímica buena de acorde a las normas chilenas 409 y 1333, a diferencia de las muestras HC-8, HC-1 y HC-2, ubicadas a una mayor distancia del CIV pero con una calidad hidroquímica peor, situándose sobre la NCh 1333. Debido a esto, es necesario realizar investigaciones detalladas sobre las mineralogías que incorporen cobre en los sedimentos de la zona de estudio, así como también, el efecto cuantitativo que puede tener la posible presencia de materia orgánica y óxidos/hidróxidos de hierro en la concentración de cobre, dado a los procesos de adsorción que podrían ocurrir.

Dado que no existe una línea base para la concentración de cobre presente en el agua de la zona de estudio, existe presencia de contaminación en las muestras HC-1, HC-2, HC-3, HC-8, HM-2 y HM-1 debido a que sobrepasan el límite permitido de cobre disuelto presente en la NCh 1333.

6.1.2.6 Manganeso

Parte de la comuna de Puchuncaví se encuentra conformada por la Cordillera de la Costa, la cual se ubica al este de la zona de estudio. En el estudio realizado por el Ministerio del Medio Ambiente (2015) se detallan las concentraciones de manganeso en los suelos de la comuna, las cuales presentan una mayor concentración relativa hacia esta cordillera.

Las variaciones en el Eh y pH podrían influenciar las concentraciones de manganeso disuelto, sin embargo, no se aprecia correlación alguna en la ocurrencia de manganeso en las aguas y estos dos parámetros. Acorde a Takeno (2005) la especie principal que se presentaría en la zona de estudio sería Mn^{+2} , dato concordante con el modelo de PHREEQC, por lo que las variaciones en las concentraciones de manganeso en la zona de estudio no se explicarían mediante el Eh y el pH.

Lo esperable para el manganeso en la zona de estudio sería encontrar un aumento en la concentración de este elemento en la zona este de la zona de estudio, debido a que se

encontraría más cercana a la fuente natural de este elemento que representa la Cordillera de la Costa. Suponiendo que las condiciones de Eh-pH no presentan grandes variaciones en los cursos de agua superficial en la comuna, las concentraciones de manganeso tenderían a disminuir hacia el oeste debido a la presencia de dilución, dado el aporte de tributarios cuyos sedimentos se sitúan en lugares con menores concentraciones de manganeso. Sin embargo, las mayores concentraciones de manganeso se sitúan en la zona oeste de la zona de estudio, por lo que es necesario discutir sobre otros factores que podrían estar influyendo en las concentraciones de manganeso disuelto dentro de la zona de estudio.

La concentración de manganeso en ambientes como los observados en la zona de estudio tiene directa relación con la condición redox y el pH, pero como se ha mencionado anteriormente, esta no podría ser la causa principal de las variaciones de manganeso, por lo que otro factor a considerar dado las condiciones de la zona de estudio, es la presencia de bacterias. Algunos tipos de bacterias oxidan el Mn^{+2} para formar Mn^{+3} o Mn^{+4} , el cual pasa a formar óxidos de manganeso insolubles, los cuales precipitan hasta el fondo de los cuerpos de agua en donde ocurren estas reacciones (Figura 41).

En el fondo de estos cuerpos de agua pueden predominar condiciones reductoras, reduciendo el Mn^{+3} y/o Mn^{+4} a Mn^{+2} , adquiriendo solubilidad y pasando nuevamente al agua como un catión disuelto, donde las bacterias lo metabolizan y lo oxidan (Davidson, 1993). Además, una gran parte del manganeso tiende a presentarse en suspensión en los cursos de agua superficiales, por lo que al momento que estas partículas suspendidas encuentren un sistema de menor energía (como los humedales Campiche y Los Maitenes), tenderán a precipitar. Una vez precipitadas (ya sea por la acción bacteriana, adsorción o cambios de energía en el sistema), podrían ocurrir los fenómenos de reducción previamente mencionados, aumentando la concentración de manganeso disuelto.

La presencia de altas concentraciones de manganeso en las aguas ubicadas en los humedales de la zona de estudio podría estar relacionada con este ciclo, sin embargo, dada la falta de información de las condiciones redox en el lecho de los humedales, así como también de la

actividad bacteriana relacionada con la oxidación del manganeso y las especies/fases en solución y suspensión, es imposible asegurar que las concentraciones de manganeso estén controladas por este ciclo.

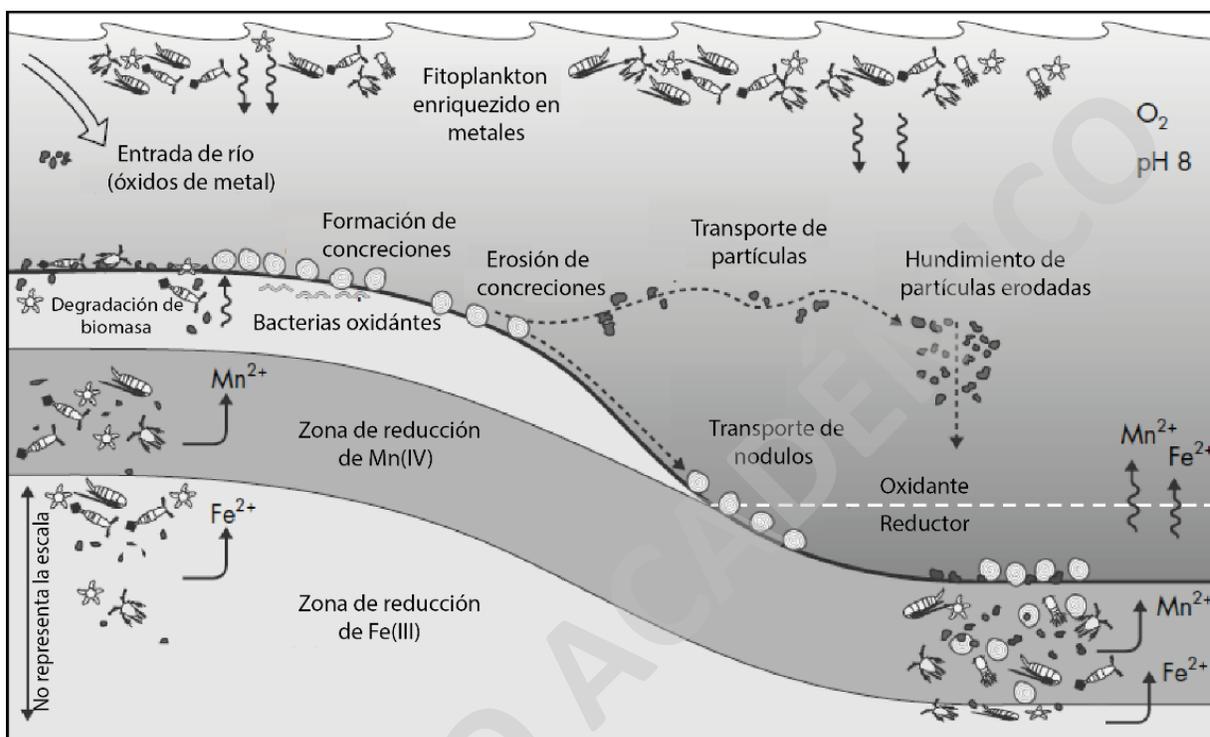


Figura 41. Ciclo del hierro y manganeso en lugares con alta actividad biológica, extraído y modificado de Konhauser (2007).

De igual manera, el CIV ha demostrado ser una fuente emisora de manganeso (Cenma, 2013), por lo que las altas concentraciones de manganeso disueltas observadas en la zona oeste de la zona de estudio podrían responder a las actividades industriales de este complejo. Dada la inexistencia de una línea base de manganeso, las altas concentraciones en la zona de estudio pueden clasificarse como contaminación, de un origen posiblemente antrópico.

6.1.2.7 Hierro

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC el estado de oxidación del hierro correspondería a mayoritariamente a +2 (Fe^{+2}), con una presencia menor de Fe^{+3} en todas las

muestras obtenidas. La especie más abundante en el agua sería Fe^{+2} , seguida de FeSO_4 y FeHCO_3^+ , que comparado a lo que comúnmente ocurre en ríos y lagos, no debería corresponder a la especie mayoritaria, puesto que esta es por lo general Fe^{+3} dadas las condiciones de oxidación que normalmente ocurren en estos ambientes.

Las muestras que presentan una concentración bajo el límite la NCh 409 y NCh 1333 presentan una distribución espacial aleatoria, como se puede observar en las diferencias de concentración entre HC-3 y HC-4, o HM-3 con las demás muestras obtenidas en el Humedal Los Maitenes (Figura 38). Estas diferencias son interesantes puesto que las altas concentraciones de hierro disuelto exhibidas en muestras como HC-7, HC-8 y HC-3 no tienen una explicación desde el punto de vista mineralógico o de su especiación, ya que por las condiciones Eh y pH imperantes en estas, se esperaría la ocurrencia de fases minerales de hierro, principalmente como óxidos e hidróxidos (Figura 42) (Langmuir, 1997), lo que implicaría bajas concentraciones de este elemento disuelto.

Contrario a las muestras mencionadas anteriormente, HM-3 presenta un Eh de -23 mV, por lo que debería presentar altas concentraciones de hierro disuelto dados los gráficos Eh-pH mencionados anteriormente (Figura 42), siendo lo observado bajas concentraciones. Esto podría deberse a la presencia de procesos biológicos que utilicen el Fe^{+2} estable a esas condiciones y lo oxiden a Fe^{+3} , favoreciendo la ocurrencia de óxidos y/o hidróxidos de hierro que tenderían a precipitar (Konhauser, 2007).

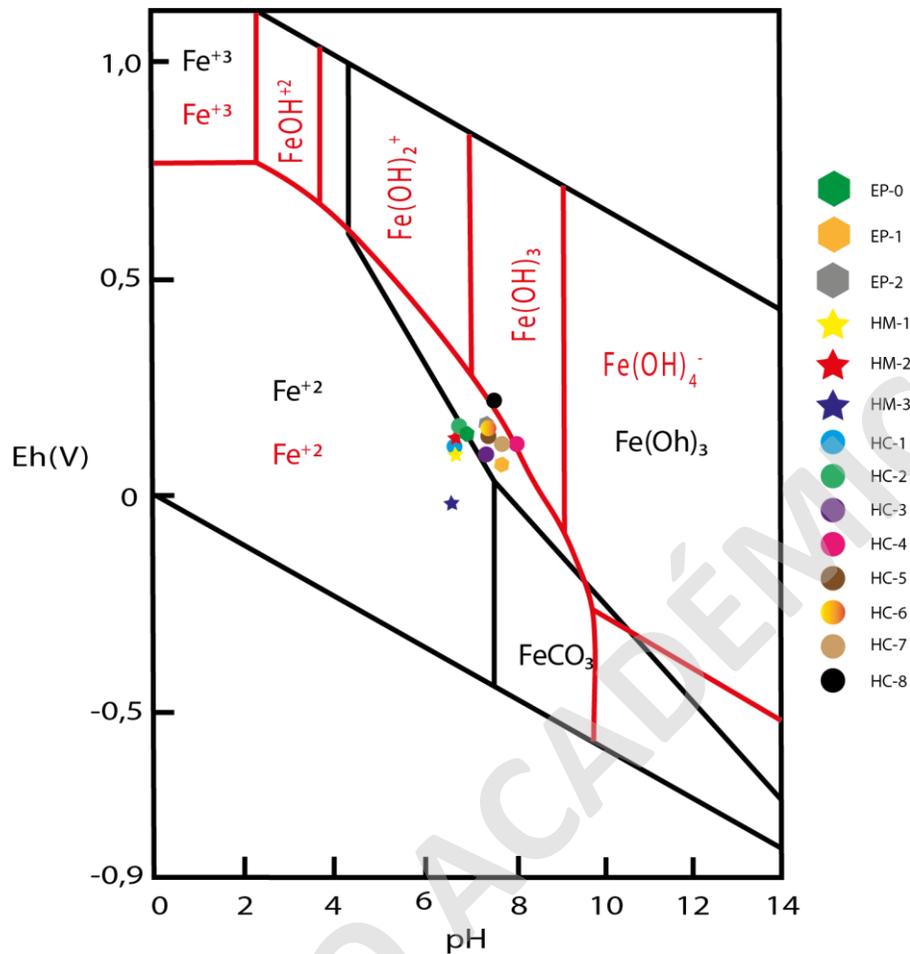


Figura 42. Diagrama de estabilidad Eh-pH para el hierro en donde se plotean las concentraciones disueltas de este elemento obtenidas en las muestras de la zona de estudio. Las líneas rojas corresponden a un sistema Fe-O₂-H₂O con concentración baja que no permiten el dominio de complejos polinucleares, mientras que las negras asumen un pK_{sp} = 37,1 para Fe(OH)₃ amorfo y bicarbonato fijo en 10^{-2,7} mol/kg. Extraído y modificado de Langmuir (1997).

Los cambios entre las muestras HC-4 y HC-3, desde 0,27 mg/L a 1,05 mg/L respectivamente, pueden deberse a la influencia del pH ya que el valor de este en la muestra HC-4 (8,5 pH) aseguraría una precipitación de óxidos y/o hidróxidos de hierro, a diferencia de HC-3 que presenta un menor pH (7,8 pH), el que podría influir en el estado de oxidación del hierro y/o en las especiaciones y fases minerales presentes (Figura 42).

Las muestras HC-7 y HC-8 presentan concentraciones altas de hierro disuelto, con características similares a las observadas en HC-4 y HC-3 pero sin una variación de pH tan

alta (de solo 0,2 pH), por lo que la diferencia en la concentración no puede explicarse por la influencia de este parámetro. La respuesta a las altas concentraciones de hierro disuelto observadas en las muestras HC-8 y HC-7 puede deberse al ciclo del hierro (Figura 41), el cual básicamente explica cómo se puede formar Fe^{+2} en el lecho de un cuerpo de agua siempre y cuando existan condiciones anóxicas, el cual luego pasaría al agua y permitiría la disponibilidad de hierro disuelto, antes que este se oxide y se repita el proceso (Konhauser, 2007)

Se presentan 10 fases minerales que podrían precipitar en la zona de estudio dados los índices de saturación positivos que estas poseen. Estas fases presentarían una ocurrencia heterogénea, sin alguna tendencia espacial en su posible ocurrencia (Anexo 3). El único estudio mineralógico presente en la zona de estudio (Siegel & Siegel, 1995) corrobora la presencia de una de las fases anteriormente mencionadas correspondiente a CuFe_2O_4 en los sedimentos del Escorial de Codelco, sin embargo, esta ocurrencia responde a desechos de los procesos de fundición de cobre más que a una ocurrencia natural.

A diferencia de otros elementos presentes en la zona de estudio, no existe información que cuantifique las concentraciones absolutas de hierro en los sedimentos de la zona de estudio, por lo que su disponibilidad y distribución son desconocidas. De igual manera, no existe registro de la presencia de hierro en el material particulado de la zona de estudio (Cenma, 2013), siendo la única fuente conocida el Escorial de Codelco debido a la mineralogía que este presenta (Tabla 7).

Dado que no existe una línea base de las concentraciones de hierro disuelto, las altas concentraciones de este elemento se califican como contaminación, sin embargo, a diferencia de otros elementos con presencia de contaminación en la zona de estudio, no se puede saber si estas concentraciones corresponderían a factores antrópicos o naturales, dada la falta de información mencionada anteriormente.

6.1.2.8 Boro

6.1.2.9 Magnesio

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC, la especie más abundante en el agua sería Mg^{+2} , seguida de $MgSO_4$ y $MgHCO_3^+$, las que corresponden a especies comunes dadas las condiciones de la zona de estudio. La presencia de $MgSO_4$ puede deberse a dos factores: el primero correspondería a la influencia marina, debido a la ocurrencia de esta especie en el océano (Florence *et al.*, 1980), mientras que el segundo a la presencia de minerales sulfurados en el Escorial de Codelco, los que una vez oxidados liberarían S^{+6} , el que pasaría a formar SO_4^{-2} en el ambiente, presentándose entonces disponibilidad para formar $MgSO_4$.

Se presentan 3 fases minerales que podrían precipitar en la zona de estudio dados los índices de saturación positivos que estas poseen. Estas fases presentarían una ocurrencia heterogénea con una tendencia a precipitar en las muestras HC-3 y HC-4, las que corresponden a las muestras con mayor contenido de magnesio en la zona de estudio. Todas estas fases minerales se remiten a carbonatos, cuya ocurrencia no sería extraña dada las condiciones de pH principalmente alcalinas existentes en HC-3 y HC-4.

A diferencia de otros elementos presentes en la zona de estudio, no existe un estudio que cuantifique las concentraciones absolutas de magnesio en los sedimentos de la zona de estudio, por lo que su disponibilidad y distribución son desconocidas. De igual manera, no existe registro de la presencia de magnesio en el material particulado de la zona de estudio (Cenma, 2013), siendo la única fuente conocida el Escorial de Codelco dada la geoquímica presente en el (Siegel & Siegel, 1995).

Dado que no existe una línea base de las concentraciones de magnesio disuelto, las altas concentraciones de este elemento se califican como contaminación, sin embargo, a diferencia de otros elementos con presencia de contaminación en la zona de estudio, no se puede saber si estas concentraciones corresponderían a factores antrópicos o naturales, dada la falta de información mencionada anteriormente.

6.1.2.10 Plomo

Acorde al modelo hidroquímico en PHREEQC, la especie más abundante en el agua sería PbCO_3 , la que corresponde a una especie de ocurrencia común dadas las condiciones de la zona de estudio (Florence et al., 1980).

Se presentaría solo una fase mineral con sobresaturación, correspondiente a PbCO_3 . Esta fase presenta una ocurrencia heterogénea con una tendencia a precipitar en las muestras HC-7 y HC-8 (Anexo 3), las que corresponden a las muestras con mayor contenido de plomo en la zona de estudio (Tabla 40). La posible ocurrencia de un carbonato en la zona de estudio es común dado los pH presentes en el agua, además, el hecho de que el PbCO_3 solo precipite en las muestras mencionadas anteriormente, hablaría de una sobresaturación debido a una mayor cantidad de plomo hacia el suroeste de la zona de estudio, debido a que las condiciones de Eh y pH presentes en HC-7 y HC-8 no se escapan de las del resto de las muestras.

La concentración de plomo en los sedimentos de la zona de estudio fue estudiada por PGS (2015) y demuestra un notorio incremento en las cercanías del CIV, mientras que el material particulado emitido por este complejo presenta plomo (Cenma, 2013). Las concentraciones de plomo disuelto aumentan en un sentido este-oeste, lo que podría explicarse debido a la presencia del CIV en el oeste de la zona de estudio, aumentando la disponibilidad de plomo en los sedimentos o el agua mediante la precipitación del material particulado en el suelo o los cuerpos de agua.

Dado que no existe una línea base de las concentraciones de plomo disuelto, y la posible influencia que tiene el CIV en la zona de estudio, las altas concentraciones de este elemento se califican como contaminación de un origen presumiblemente antrópico.

6.2 Adsorción de elementos

El fenómeno de adsorción en los humedales sucede principalmente por la presencia de arcillas y materia orgánica, además de hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio (Matagi *et al.*, 1998). Las condiciones redox y el pH presente en la zona de estudio permitirían la formación de diversos óxidos e hidróxidos de hierro (Tabla 45), no así la de manganeso, debido a que las condiciones oxidantes presentes en toda la zona de estudio no cumplen con los requisitos para formarlos (Bricker, 1965). Debido a la falta de información sobre la presencia de materia orgánica, así como también de hidróxidos de aluminio y arcillas, la discusión se centrará en los óxidos/hidróxidos de hierro, que podrían jugar un rol clave en la movilización de elementos como el arsénico, boro, molibdeno, cobre y plomo (Vesper, 2019; Matagi *et al.*, 1998).

Tabla 45. Óxidos/hidróxidos de hierro con índice de saturación positivo acorde a modelo de PHREEQC.

Fases minerales de hierro				
Fe ₃ O ₄	CuFeO ₂	Fe ₂ O ₃	Fe(OH) ₃	FeCO ₃
CuFe ₂ O ₄	FeOOH	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₃ (OH) ₈	

La adsorción de las especies de arsénico depende principalmente del estado de oxidación con el que se presente, con una clara tendencia a ser mayor para el As⁺³ que para el As⁺⁵ (Zeng, 2004). Para este elemento, en un sistema ideal de Fe/As la adsorción puede llegar a ser de un 80% (Dousová *et al.*, 2011) del total de arsénico, demostrando la importancia que este proceso podría tener en la explicación de las concentraciones de arsénico disuelto observadas en la zona de estudio. El rango de pH presente en la zona de estudio no permitiría variaciones respecto a la adsorción presente, debido principalmente a que la adsorción del As⁺⁵ entre un pH 7 a 8,5 es prácticamente el mismo (Goldberg, 2002).

En el caso del cobre, los procesos de adsorción por hidróxidos de hierro presentan un gran incremento desde un pH > 6 para el Cu⁺² (Figura 44) (Moon & Peacock, 2012), por lo que

existe la posibilidad de que las concentraciones de cobre disuelto se vean disminuidas por este proceso, dado que todas las muestras presentes en la zona de estudio presentan un $\text{pH} > 6$ y 9 fases minerales de óxidos/ hidróxidos de hierro posiblemente saturadas (Tabla 45), es posible que los fenómenos de adsorción de Cu^{+2} ocurran en toda la zona de estudio. El plomo presenta una tendencia similar al cobre, en donde a $\text{pH} > 6$ su porcentaje de adsorción llega casi al máximo (Figura 43).

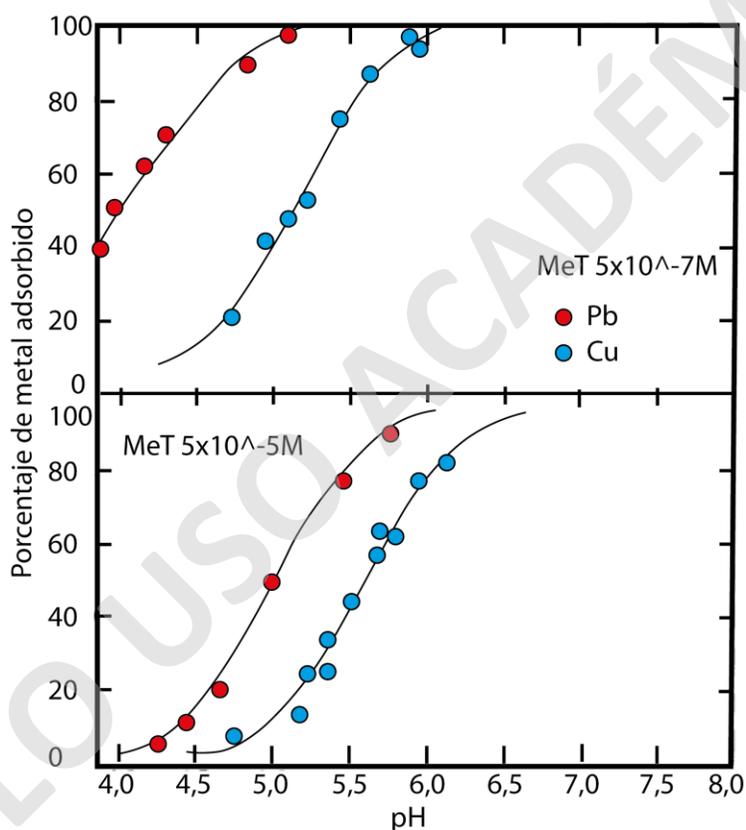


Figura 43. Porcentaje de adsorción producto de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ para el plomo y cobre a distintas concentraciones de metal total (MeT) en función de pH. Extraído y modificado de Benjamin & Leckie (1981).

En el caso del cobre, los procesos de adsorción por hidróxidos de hierro presentan un gran incremento desde un pH > 6 para el Cu⁺² (Figura 44) (Moon & Peacock, 2012), por lo que existe la posibilidad de que las concentraciones de cobre disuelto se vean disminuidas por este proceso, dado que todas las muestras presentes en la zona de estudio presentan un pH > 6 y 9 fases minerales de óxidos/ hidróxidos de hierro posiblemente saturadas (Tabla 45), es posible que los fenómenos de adsorción de Cu⁺² ocurran en toda la zona de estudio. El plomo presenta una tendencia similar al cobre, en donde a pH > 6 su porcentaje de adsorción llega casi al máximo (Figura 43).

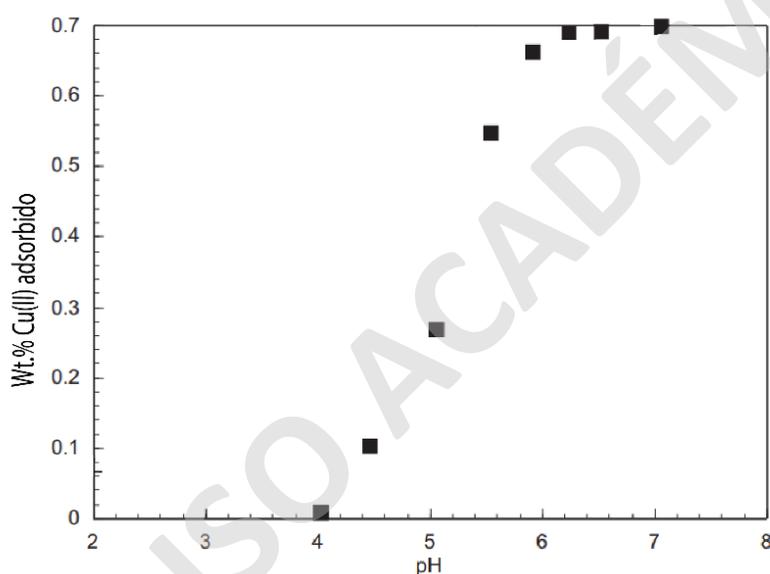


Figura 44. Porcentaje de adsorción de cobre (II) por ferrihidrita en una solución de 0.7 wt. % y 0,1 M NaNO₃ a 25°C, modificado de Moon & Peacock (2012).

Para el boro, los fenómenos de absorción por hidróxidos de hierro tendrían su peak entre los pH 7 a 9 (Goldberg & Glaubig, 1985), por lo que, dadas las condiciones de la zona de estudio, es esperable la ocurrencia de este proceso.

6.3 Variabilidad, correlación espacial y agrupamiento de parámetros

Al comparar la concentración disuelta de las muestras ubicadas al este de la zona de estudio con aquellas ubicadas en el sector oeste, se puede observar una clara tendencia al aumento en casi todos los elementos analizados: EP-0, EP-1 y HM-1 (que representan las muestras ubicadas al este) presentan una calidad hidroquímica mucho mejor que el resto de las muestras analizadas (ubicadas en el sector oeste).

Algunos de los parámetros presentes en el grupo 1 (Tabla 46) poseen características similares desde el punto de vista químico: El molibdeno, sulfato, boro y arsénico tienden a formar oxoaniones bajo las condiciones presentes en la zona de estudio, a excepción del magnesio y cloruro que se presenta como un catión libre (Takeno, 2005). Además, estos elementos (a excepción del arsénico) presentan altas concentraciones en torno al Escorial de Codelco, como se puede observar en la Figura 18 y Figura 27 para el sulfato, Figura 24 para el molibdeno, Figura 33 para el boro y en menor medida en la Figura 31 para el magnesio. Este incremento en las concentraciones disueltas puede ser la respuesta de por qué la CE y los SDT poseen una buena correlación con este grupo.

Como se mencionó anteriormente, este escorial presenta en su geoquímica los elementos anteriormente mencionados, sin embargo, es necesario una caracterización mineralógica y elemental de este escorial para determinar y cuantificar su verdadera influencia en las aguas de la zona de estudio.

Tabla 46. Grupos principales obtenidos mediante el análisis de componentes principales.

Grupo 1	Mo, SO_4^{2-} , B, As, Mg, Cl, CE, SDT, Na, K, T°
Grupo 2	Fe, Pb, Mn, Cu, Eh
Grupo 3	pH

Los parámetros conformados por el grupo 2 (Tabla 46) presentan una tendencia similar, lo que puede explicarse debido a la posible ocurrencia de procesos de absorción (que captarían Mn, Pb y Cu) y precipitación por los óxidos/hidróxidos de hierro (que removería Fe del agua) (Magati *et al.*, 1998). El hecho de que el As no se incluya en este grupo (ya que puede ser adsorbido por las fases minerales de hierro) puede deberse a que los factores fisicoquímicos mencionados anteriormente predominen por sobre la adsorción, generando una tendencia a la ocurrencia de As disuelto más que a una precipitación de este. El Eh se podría correlacionar con este grupo debido a la influencia que este posee en la ocurrencia de fases minerales que puedan adsorber ciertos elementos, como los óxidos/hidróxidos de hierro.

El último grupo corresponde al pH, el cual no presenta correlación alguna con los demás parámetros, por lo que posiblemente los cambios que ocurren en las concentraciones disueltas de los elementos analizados en este estudio no sean producidos directamente por las variaciones de pH.

6.4 Comparación con estudios previos

La muestra HM-1 es extraída en las cercanías de las muestras E2 y E3 del estudio realizado por UDPA y PUCV el 2015, presentando características similares en las concentraciones de arsénico, plomo y cobre (Tabla 47). Sin embargo, las muestras E2 y E3 se ubican en el extremo este del humedal Los Maitenes, por lo que las variaciones hidroquímicas observadas en este estudio en las muestras HM-2 y HM-3 no pueden ser comparadas con lo realizado por UDPA y PUCV (2015).

Sin embargo, el hecho de que las concentraciones de arsénico, cobre y plomo sean similares a la muestra HM-1 (Tabla 47) podría implicar que al menos desde el año 2015, las condiciones que influyen en la calidad hidroquímica de la zona este del Humedal Los Maitenes no han presentado variaciones.

Tabla 47. Comparación entre diferentes parámetros físico-químicos y elementos obtenidos en este estudio (HM-1) con los obtenidos en UDPA y PUCV (2015)

	HM-1		Verano		Otoño	
			E2	E3	E2	E3
Temperatura	12,2	15,5	24	22,52	21,55	
pH	7,1	7,2	6,6	8,3	8	
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1.371	1.141	595	3.249	1.606	
SDT (mg/L)	842	0,5	0,5	1.797	998	
Cloruro (mg/L)	232,44	425,4	354,5	425	301	
Arsénico (mg/L)	0,02	0,019	0,043	N/D	N/D	
Cobre (mg/L)	0,02	<0,05	<0,05	N/D	N/D	
Plomo (mg/L)	0,0013	<0,05	<0,05	N/D	N/D	

6.5 Comparación con otros lugares afectados por contaminación industrial

Los problemas ambientales asociados al proceso de fundición de cobre han sido observados en diversos lugares del mundo, entre los que se encuentran Estados Unidos (Crecelius & Johnson, 1974), Polonia (Rebele *et al.*, 1993), México (Carrizales *et al.*, 2006) y Zambia (Ettler *et al.*, 2011), donde el principal efecto en el ambiente tiene relación con un incremento en las concentraciones de metales como el zinc, cobre, arsénico y plomo entorno a estas (afectando principalmente a los sedimentos), además de fenómenos de lluvia acida debido a las emisiones de dióxido de azufre. Estos efectos son similares a los que se presentan las zonas cercanas a termoeléctricas, en donde existe un aumento en el material particulado y diversos metales entorno a los sedimentos presentes en sus cercanías (Tabla 48)

Tabla 48. Emisiones comunes de una planta termoeléctrica (Zuk *et al.*, 2006).

Emisiones de plantas termoeléctricas		
SO ₂	Berilio	Níquel
Antimonio	Cadmio	Mercurio
Cobalto	Cromo	Plomo

Los escoriales de cobre generan consecuencias similares a las mencionadas anteriormente, como puede apreciarse en Tennessee e Idaho, ubicados en Estados Unidos (Piatak *et al.* 2004), donde existe un enriquecimiento en diversos metales en torno al escorial. La contaminación asociada a un escorial es mucho más variable que el de una planta fundidora de cobre, dependiendo de la geoquímica y mineralogía propia de estos depósitos (Ashelford & Gore, 2020), por lo que los efectos ambientales pueden variar entre un escorial y otro. A pesar de esto, es común que en los alrededores de los escoriales se presenten altas concentraciones de cobre, plomo, zinc y sulfato.

Los sedimentos enriquecidos en los elementos anteriormente mencionados podrían ser una fuente de contaminación hidroquímica dependiendo principalmente de los parámetros físicoquímicos como el pH y el Eh que las aguas en cuestión posean, por lo que para el caso de los humedales Campiche y Los Maitenes es probable que este tipo de industrias, presentes en el CIV, sean un factor predominante de la contaminación observada en este estudio.

7. Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentarán las principales conclusiones de este estudio en base a los resultados obtenidos y la discusión anteriormente realizada:

- La concentración disuelta de cobre, molibdeno, boro, sulfato, manganeso, magnesio, hierro, arsénico, plomo y cloruro aumenta hacia el oeste de la zona de estudio, a tal punto que las aguas presentan contaminación respecto a la NCh 409 y NCh 1333.
- Los efectos directos que la actividad antrópica tiene en las aguas son aún inciertos, debido a la falta de información geoquímica y mineralógica en los sedimentos de donde fueron extraídas las muestras obtenidas en este estudio, además de las fases minerales en suspensión existentes en el agua. De manera preliminar, algunos elementos parecieran estar influenciados por el Escorial de Codelco, dada su distribución espacial concéntrica a este.
- La falta de estudios hidrológicos en los humedales Campiche y Los Maitenes no permiten aseverar o descartar que estos cuerpos de agua sean producto de un afloramiento del acuífero. Frente a dicho escenario se hace necesario evaluar el potencial impacto en los acuíferos locales, puesto que de estos se extrae agua para riego y consumo humano.
- En el marco de la creciente problemática mundial asociada al cambio climático, todo ecosistema que pueda otorgar servicios a actividades antrópicas en un futuro debería ser protegido y resguardado, sobretodo en lugares como la Región de Valparaíso la cual se enfrenta a una de las peores sequías en la historia de Chile. Estos servicios podrían variar desde consumo humano, ganadero o su uso en la agricultura, sin embargo, dada las condiciones actuales en la hidroquímica de los humedales Campiche y Los Maitenes, sería imposible su uso para actividades agrícolas, ganaderas o de consumo humano.

Además de las conclusiones anteriormente mencionadas, se sugieren las siguientes recomendaciones, con el fin de identificar las principales causas de los cambios hidroquímicos observados:

- La falta de estudios que integren el comportamiento de los contaminantes en el suelo, agua y aire (material particulado) de la zona de estudio supone un problema al momento de iniciar medidas de remediación o mitigación en las zonas aledañas al CIV debido a la incertidumbre existente sobre la interacción de los elementos entre ellos. Este estudio sienta las bases de los contaminantes presentes en el agua, por lo que futuros estudios que integren las concentraciones de los elementos presentes en las demás componentes (particularmente en los materiales en suspensión y en el lecho de los humedales estudiados) podrían ser un gran aporte al momento de generar modelos que expliquen los principales controles hidrogeoquímicos de las concentraciones elementales presentes en los humedales de la zona de estudio.
- La realización de un modelo en PHREEQC no supone necesariamente que las especies y fases minerales mencionadas a lo largo de esta investigación ocurran, por lo que la presencia de adsorción (proceso común en los humedales) se liga únicamente a la posibilidad de existencia de hidróxidos/óxidos de hierro, aunque probablemente la materia orgánica juegue un papel importante en la movilización de elementos. Debido a esto, se recomienda la realización de estudios que investiguen la mineralogía presente en la zona de estudio, así como también la cuantificación de la movilización de los elementos adsorbidos.
- La falta de información en el suelo y aire de la zona de estudio juega un papel crucial en la determinación de los controles que afectan la distribución de cada elemento, por lo que una correcta caracterización mineralógica y geoquímica de los sedimentos presentes en los suelos de los humedales es necesaria para comprender de mejor manera los procesos que puedan afectar la concentración disuelta.

- La actividad biológica no fue medida en este estudio, sin embargo, sus efectos en la calidad hidroquímica podrían ser importantes (como se mencionó en las discusiones del hierro y manganeso), por lo que es necesario un estudio detallado sobre la actividad biológica presente en los humedales, con un énfasis en las especies fitorremediadoras observadas, el contenido de materia orgánica que favorecería procesos de adsorción y posibles bacterias que ayuden con la precipitación de elementos.

SOLO USO ACADÉMICO

8. Bibliografía

- Andreae, M.O., Byrd, T.J., Froelich, O.N., 1983. Arsenic, antimony, germanium and tin in the Tejo estuary, Portugal: modelling of a polluted estuary. *Environ. Sci. Technol.* 17,731–737.
- Bajano, H., Dawidowski, L., Reich, S., Romero, C., Vicente, A., Gómez, D. (2000.). Generación Termoeléctrica y contaminación atmosférica.
- Benjamin, M. M., & Leckie, J. O. (1981). Multiple-site adsorption of Cd, Cu, Zn, and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 79(1), 209–221. doi:10.1016/0021-9797(81)90063-1.
- Berasaluce, M., Mondaca, P., Schuhmacher, M., Bravo, M., Sauvé, S., Navarro-Villarroel, C., Neaman, A. (2019). Soil and indoor dust as environmental media of human exposure to As, Cd, Cu, and Pb near a copper smelter in central Chile. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54, 156–162. doi:10.1016/j.jtemb.2019.04.006.
- Bergamini, K., Irrázabal, R., & Hernández, P. (2018). Conflicto ambiental en Ventanas: Análisis desde una perspectiva de la Doctrina Social de la Iglesia. *Revista de Historia y Geografía*, (38), 171. <https://doi.org/10.29344/07194145.38.1287>.
- Börgel, R. O. Mapa geomorfológico. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 1983. 182 p.: il. (algunas col.), diagr., mapas ; 27 cm. + 1 mapa pleg. col. en bolsillo.
- Cáceres, L., Gruttner, E., Contreras, R., 1992. Water recycling in arid regions—Chilean case. *Ambio* 21, 138–144.
- Cancino, A. 1992. Contribución a la petrología e interpretación tectónica de las rocas volcánicas triásicas y jurásicas de la región central de Chile (32°-34°S). Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, 259 p.
- Cenma. (2013). Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concon, Quintero y Puchuncaví. Santiago de Chile.

- Chazarenc, F., Gagnon, V., Comeau, Y., & Brisson, J. (2009). Effect of plant and artificial aeration on solids accumulation and biological activities in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(6), 1005–1010. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.07.008.
- Clark, D. R., Bickham, J. W., Baker, D. L., & Cowman, D. F. (2000). Environmental contaminants in Texas, USA, wetland reptiles: Evaluation using blood samples. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(9), 2259–2265. doi:10.1002/etc.5620190916.
- Clarke, A. ., & Radojevic, M. (1987). Oxidation of SO₂ in rainwater and its role in acid rain chemistry. *Atmospheric Environment* (1967), 21(5), 1115–1123. doi:10.1016/0004-6981(87)90238-1.
- Conama. (2005). Informe de Evaluación Plan de Descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas 1993-2004. 36.
- Contreras, C. (2014). Problemas de salud en Ventanas : ¿ Por qué existen si la zona cumple con la normativa ambiental ? Oportunidad para mejores regulaciones ambientales a partir de directrices OCDE Alumna : Carmen Gloria Contreras Fierro Profesor Guía : Álvaro Sapag Rajevic P.
- Cosio, F., M. Negrón, J. Gastó y J.L. Villate 2007. Distritos y sitios de la provincia templada secoestival nubosa o Valparaíso: secano de la costa. *Revista Conservación de Suelo* 7(1): 38-61.
- Covacevich, V. 1987. Faunas fósiles de la Hoja Quillota. Informe laboratorio de paleontología. Informe interno. Inédito. Santiago.
- Cowardin, L. M.1978. Wetland classification in the United States . *J. For.* 76(10) :666-668 .
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941.
- Davis, J. A., & Froend, R. (1999). Loss and degradation of wetlands in southwestern Australia: Underlying causes, consequences and solutions. *Wetlands Ecology and Management*, 7(1–2), 13–23. <https://doi.org/10.1023/A:1008400404021>.

- Dirección General de Aguas- DGA. (2006). Evaluación de los recursos hídricos superficiales de la cuencas de los ríos Petorca y la Ligua. V Región. Santiago, Chile. Disponible URL: <http://documentos.dga.cl/SUP4496.pdf>.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2007). Manual de Normas y Procedimientos del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Serie de Informes Técnicos (SIT), (132), 182.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2018). Minuta DCPRH N°22/2018: Seguimiento de la calidad del agua subterránea – Pozos APR V región de Valparaíso. 30 de Agosto de 2018.
- Escenarios hídricos 2030 Chile. (2018). Radiografía del agua, brecha y riesgo hídrico en Chile. Santiago.
- Espiñeira, D. 1989. Geología del Complejo Plutónico Papudo-Quintero: aspectos cronológicos y geoquímicos. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, 145 p. Santiago.
- Fernández Silva, J. T. (2011). Valoración del ecosistema Humedal Campiche: propuesta de líneas de acción para su conservación y uso racional. Facultad De Ciencias. Departamento De Biología Y Ciencias Ambientales, 157.
- FGDC, (Federal GeographHic Data Committee). (2013). Classification of Wetlands and Deepwater Habitats. (August), 86 pp. <https://doi.org/FGDC-STD-004-2013>.
- Froelich, P.N., Kaul, L.W., Byrd, J.T., Andreae, M.O., Roe, K.K., 1985. Arsenic, barium, germanium, tin, dimethyl-sulfide and nutrient biogeochemistry in Charlotte Harbour, Florida, a pHosphorus-enriched estuary. *Estuar. Coast. ShelfSci.* 20, 239–264.
- Fox, O. (2011). Pre humedallaguna de batuco. 1–106.
- Fundación Red de Nuevas Ideas. (2018). Informe Blooms Lago Villarrica (1993-2018). Una Contribucion Desde La Ciencia Ciudadana. 1–22.
- Fundacion Terram. (2018). La negligente realidad de la bahía de Quintero.
- Goldberg, S. (2002). Competitive Adsorption of Arsenate and Arsenite on Oxides and Clay Minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2), 413. doi:10.2136/sssaj2002.4130.

- González, S., & Bergovist, E. (1986). Contaminación Por Metales Pesados Por Influencia Industrial.Pdf. Agricultura Técnica, Vol. 46, p. 8. Retrieved from <http://porelbuenvivir.cl/wp-content/uploads/2015/12/45.-Evidencia-Contaminacion-Metales-Pesados-Suelo-Puchuncavi-1986.pdf>
- González, I., Muena, V., Cisternas, M., & Neaman, A. (2008). Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. Revista Chilena de Historia Natural, 81(2), 279–291. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2008000200010>.
- González, P. (2018). Chañaral, un problema ambiental insoslayable, intentos de solución en una ciudad bajo letargo. Planeo. Chile.
- González, Sergio; Bergovist, E. (1986). El impacto de emisiones de gases y otros productos desde chimeneas de fundiciones de minerales sobre las actividades agropecuarias. Ambiente y Desarrollo, II(3), 117–122.
- González, Sergio; Ite, R. (1992). Acumulación metálica en suelos del área bajo influencia de las chimeneas industriales de ventanas. Agricultura Técnica, pp. 214–219.
- Halim, C. E., Short, S. A., Scott, J. A., Amal, R., & Low, G. (2005). Modelling the leaching of Pb, Cd, As, and Cr from cementitious waste using PHREEQC. Journal of Hazardous Materials, 125(1-3), 45–61. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.05.046.
- Hemond, H. F., & Benoit, J. (1988). Cumulative impacts on water quality functions of wetlands. Environmental Management, 12(5), 639–653. doi:10.1007/bf01867542.
- Huiskes, A. H. L., & Rozema, J. (1993). The Impact of Anthropogenic Activities on the Coastal Wetlands of the North Sea. Pollution of the North Sea, (378), 455–473. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73709-1_25.
- Hunt, P. G., Stone, K. C., Humenik, F. J., Matheny, T. A., & Johnson, M. H. (1999). In-Stream Wetland Mitigation of Nitrogen Contamination in a USA Coastal Plain Stream. Journal of Environment Quality, 28(1), 249. doi:10.2134/jeq1999.00472425002800010030.
- Instituto Nacional de Estadísticas (2017). Censo 2017. Chile.

- Johnston, C., Detenbeck, N., & Niemi, G. (1990). The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity. A landscape approach. *Biogeochemistry*, 10(2). doi:10.1007/bf00002226.
- Koide, R., Tokoro, C., Murakami, S., Adachi, T., & Takahashi, A. (2012). A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines: Case Studies in Japan. *Mine Water and the Environment*. doi:10.1007/s10230-012-0200-x
- Konhauser, K. (2007). *Introduction to geomicrobiology*, Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Köppen W. *Climatología – con un estudio de los climas de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica, 1948 (Sección de obra de Geografía).
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153).
- Magu, M. M., Govender, P. P., & Ngila, J. C. (2016). Geochemical modelling and speciation studies of metal pollutants present in selected water systems in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 92, 44–51. doi:10.1016/j.pce.2015.08.001.
- Manheim FT & S Landergren. 1974. Molybdenum. En: Wedepohl KH (ed). *Handbook of geochemistry*, Vol. 2(3): 1-87. Springer-Verlag, New York.
- Marzio, W. Di, & McInnes, R. (2005). *Informe de Misión: Santuario Carlos Anwandter (Río Cruces), Chile*.
- Meza, V., Lillo, C., Rivera, D., Soto, E., & Figueroa, R. (2018). *Sarcocornia neei* as an Indicator of Environmental Pollution: A Comparative Study in Coastal Wetlands of Central Chile. *Plants*, 7(3), 66. <https://doi.org/10.3390/plants7030066>.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, Region de Valparaiso*.

- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Humedales en Chile. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. <https://humedaleschile.mma.gob.cl/ecosistemas/humedales/>
- Ministerio de Obras Publicas (MOP). (2012). Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021, Región de Valparaíso.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J.G. (2000). the Values of Wetlands : Landscapes and Institutional Perspectives. *Ecological Economics*, 35(200), 25–33. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00759.x>
- Montero, L. (2012). Sobreexplotación de aguas subterráneas en la cuenca del Copiapó. Los desafíos institucionales para la gobernabilidad hídrica. Santiago: Universidad de Chile.
- Moon, E. M., & Peacock, C. L. (2012). Adsorption of Cu(II) to ferrihydrite and ferrihydrite–bacteria composites: Importance of the carboxyl group for Cu mobility in natural environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92, 203–219. doi:10.1016/j.gca.2012.06.012 .
- Muezzinoglu, A., & Cizmecioglu, S. C. (2006). Deposition of heavy metals in a Mediterranean climate area. *Atmospheric Research*, 81(1), 1–16. doi:10.1016/j.atmosres.2005.10.004.
- Municipalidad de Puchuncaví. (2009). Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) 2009 – 2012.
- Muwanga, A., & Barifaijo, E. (2010). Impact of industrial activities on heavy metal loading and their physico-chemical effects on wetlands of lake Victoria basin (Uganda). *African Journal of Science and Technology*, 7(1), 51–63. <https://doi.org/10.4314/ajst.v7i1.55197>.
- Oceana Chile. (2019). <https://chile.oceana.org/zonas-de-sacrificio-el-caso-de-ventanas>. Suecia 0155, oficina 1001, Providencia, Santiago, Chile.
- OECD, O. f. (2015). Freshwater resources.
- Oyazún, I. “Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón” Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013.
- Pablo González Castillo. (2018). Chañaral, un problema ambiental insoslayable, intentos de solución en una ciudad bajo letargo. Chile.

- PNUMA, GEMS. (2007). Program Water Quality Outlook. PNUMA Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente, Programa del Agua, Instituto Nacional de Investigación sobre el Agua. Canadá.
- Prado, J., Vidal, A., & Durán, T. (2012). Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. *Revista Médica de Chile*, 140(10), 1325–1332. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872012001000014>.
- Ramsar (2012). Los humedales cuidan el agua. Chile.
- Ramsar Convention Secretariat. (2013). The Ramsar Convention Manual, 6th edition. The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971), 109.
- Rivano, S. Sepúlveda, P. Hervé, M. Puig, A. 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S, latitud sur, Chile, *Rev. Geol. Chile*, No. 21, p. 63-74.
- Rivano, S., Sepúlveda, P. 1991. Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 69, 1 mapa 1:250.000.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R.; Espiñeira, D. 1993. Hoja Quillota y Portillo. V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 73, 1 mapa escala 1:250.000. Acompaña Informe Inédito 7644.
- Rodriguez, M. (2008). Evolución de la Erosión y del Relieve del Antearco de Chile Central (33-34°s) Durante el Neógeno Mediante el Análisis de Minerales Pesados Detríticos y la Geomorfología. Santiago: Universidad de Chile.
- Sandoval Pinto, M. E. (2011). Arsénico, Propiedades y Efectos. Universidad de Guadalajara. México.
- Amemnd, J. P., Edwards, K, J., Lyons, T. W. (2004). Sulfur biogeochemistry – Past and present. Boulder, Colorado, Geological Society of America. Special Paper 379. P. 49-62.
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2006). Manual de la Convención de Ramsar, guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) 4a. edición. Irán.
- Semeniuk C A & Semeniuk V 1995 A geomorpHic approach to global classification for inland wetlands. *Vegetation* 118:103–124.

- Semeniuk, V., & Semeniuk, C. A. (1997). A geomorphic approach to global classification for natural inland wetlands and rationalization of the system used by the Ramsar Convention - A discussion. *Wetlands Ecology and Management*, 5(2), 145–158. <https://doi.org/10.1023/A:1008207726826>.
- Seyler, P., Martin, J.-M., 1991. Arsenic and selenium in a pristine river-estuarine system: the Krka, Yugoslavia. *Mar. Chem.* 34, 137–151.
- Siegel, E. y P. Siegel (1995). “ENAMI’s Ventanas smelter heavy metals pollution”, en *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 9, N° 2, pp. 79-82.
- Silvius, M. J., Oneka, M., & Verhagen, A. (2000). Wetlands: Lifeline for people at the edge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(7-8), 645–652. doi:10.1016/s1464-1909(00)00079-4.
- Smith, K. S., & Huyck, H. L. O. (1994). An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Reviews in Economic Geology*, 6A, 29–70.
- Spalletti, L.A. 1980. *Paleoambientes Sedimentarios en Secuencias Silicoclásticas*. Asociación Geológica Argentina, Serie B: 175 p. Buenos Aires.
- Takeo, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams Intercomparison of thermodynamic databases. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Tokyo, (419), 285. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Atlas+of+Eh-PH+diagrams+Intercomparison+of+thermodynamic+databases#0>
- Tchounwou, P. B., Abdelghani, A. A., Pramar, Y. V., Heyer, L. R., & Steward, C. M. (1996). Assessment of Potential Health Risks Associated with Ingesting Heavy Metals in Fish Collected from a Hazardous-Waste Contaminated Wetland in Louisiana, USA. *Reviews on Environmental Health*, 11(4). doi:10.1515/revEh.1996.11.4.191.
- Thomas, H. 1958. *Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta Barriga*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, N°2, 86p. 2 Mapas.
- Turekian, K.K. (1968). *Oceans*. New Jersey. Prentice-Hall. 151 p.

- Verhoeven, J. T., & Meuleman, A. F. (1999). Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, 12(1-2), 5–12. doi:10.1016/s0925-8574(98)00050-0.
- Vivanco Font, E. (2017). Humedales: Definiciones, Funciones y Amenazas. Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile, 1–8.
- WCS. (2019). Chile, Pais de humedales. Santiago: WCS Chile.
- White, A. F., & Blum, A. E. (1995). Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Water-Rock Interaction. Proc. Symposium, Vladivostok, 1995*, 59(9), 57–60.
- WHITEHEAD, P. G., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. W., KERNAN, M., & WADE, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101–123. doi:10.1623/hysj.54.1.101.
- Zhang, C., Nie, S., Liang, J., Zeng, G., Wu, H., Hua, S, Xiang, H. (2016). Effects of heavy metals and soil pHysicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure. *Science of the Total Environment*, 557–558, 785–790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170>.
- Zuk, M., Garibay, V., Iniestra, R., López, M., Rojas, L., Laguna, I. (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México.

9. Anexos

Anexo 1. Diferentes tablas con la ubicación de las muestras obtenidas, parámetros físico químicos y concentraciones de elementos y compuestos analizados.

Muestra	UTM X	UTM Y	Temperatura	Potencial redox	Conductividad Eléctrica	Sólidos Disueltos Totales	pH
EP - 0	272141	6375380	12,5	141	1159	624	7,34
EP - 1	270451	6374390	15,1	64	1183	782	8,12
EP - 2	268550	6373147	14	152	8283	4716	7,78
HC - 1	268604	6372595	15,8	110	5315	3926	6,99
HC - 2	268525	6372818	14	150	4499	2886	7,12
HC - 3	268385	6372763	16,5	91	11270	6996	7,79
HC - 4	268227	6372617	17,1	110	9528	6926	8,45
HC - 5	268106	6372359	14	148	5547	3911	7,79
HC - 6	267833	6372267	14,9	133	5545	3906	7,87
HC - 7	267694	6372140	13,7	118	3174	1906	8,18
HC - 8	267789	6371961	16	212	3196	1933	7,97
HM - 1	269328	6372806	12,2	88	1371	842	7,11
HM - 2	269110	6372961	13,3	120	3161	1979	7,07
HM - 3	268776	6372986	14,7	-23	4029	2371	6,95

Muestra	UTM X	UTM Y	Fluoruro	Bromuro	Cloruro	Sulfato	Nitrito-N	Nitrato-N
EP - 0	272141	6375380	0,03	0,05	128,52	85,16	0,045	0,68
EP - 1	270451	6374390	0,03	0,05	177,59	106,99	0,045	0,17
EP - 2	268550	6373147	0,03	0,05	2221,37	242,53	0,045	1,45
HC - 1	268604	6372595	0,03	0,05	749,19	1129,45	0,045	0,72
HC - 2	268525	6372818	0,03	0,05	817,57	467,2	0,045	0,72
HC - 3	268385	6372763	0,03	0,05	2402,35	2417,63	0,045	1,89
HC - 4	268227	6372617	0,03	0,05	1269,09	2049,6	0,045	0,96
HC - 5	268106	6372359	0,03	0,05	783,05	1233,74	0,045	1,39
HC - 6	267833	6372267	0,03	0,05	788,95	1053,67	0,045	1,26
HC - 7	267694	6372140	0,03	0,05	599,08	256,65	0,045	0,66
HC - 8	267789	6371961	0,03	0,05	614,83	254,11	0,045	0,5
HM - 1	269328	6372806	0,03	0,05	232,44	52,51	0,045	0,21
HM - 2	269110	6372961	0,03	0,05	824,79	72,39	0,045	0,57
HM - 3	268776	6372986	0,03	0,05	738,07	85,33	0,045	1,06

Muestra	UTM X	UTM Y	Aluminio Disuelto (Al)	Antimonio Disuelto (Sb)	Arsénico Disuelto (As)	Bario Disuelto (Ba)	Berilio Disuelto (Be)
EP - 0	272141	6375380	0,005	0,0002	0,002	0,0395	0,000005
EP - 1	270451	6374390	0,005	0,0008	0,0091	0,0165	0,000005
EP - 2	268550	6373147	0,005	0,0018	0,0162	0,0242	0,000005
HC - 1	268604	6372595	0,28	0,0061	0,0961	0,0593	0,000005
HC - 2	268525	6372818	0,005	0,0187	0,0824	0,0099	0,000005
HC - 3	268385	6372763	0,005	0,0471	0,3793	0,0573	0,000005
HC - 4	268227	6372617	0,005	0,0324	1,0413	0,064	0,000005
HC - 5	268106	6372359	0,005	0,008	0,14	0,066	0,000005
HC - 6	267833	6372267	0,005	0,0054	0,0936	0,0579	0,000005
HC - 7	267694	6372140	0,005	0,0234	0,2655	0,0779	0,000005
HC - 8	267789	6371961	0,06	0,02	0,242	0,0855	0,000005
HM - 1	269328	6372806	0,005	0,0006	0,0164	0,0473	0,000005
HM - 2	269110	6372961	0,005	0,0023	0,1132	0,0419	0,000005
HM - 3	268776	6372986	0,005	0,012	0,0667	0,0185	0,000005

Muestra	UTM X	UTM Y	Bismuto Disuelto (Bi)	Cadmio Disuelto (Cd)	Calcio Disuelto (Ca)	Cromo Disuelto (Cr)	Cobalto Disuelto (Co)
EP - 0	272141	6375380	0,00001	0,00001	75,54	0,00005	0,0002
EP - 1	270451	6374390	0,00001	0,00001	90,6	0,0013	0,0007
EP - 2	268550	6373147	0,00001	0,00161	118,36	0,0003	0,0005
HC - 1	268604	6372595	0,00001	0,00158	247,47	0,01	0,0065
HC - 2	268525	6372818	0,00001	0,0029	106,92	0,0012	0,0007
HC - 3	268385	6372763	0,00001	0,00405	309,9	0,0238	0,0068
HC - 4	268227	6372617	0,00001	0,00015	76,36	0,0015	0,0016
HC - 5	268106	6372359	0,00001	0,00135	158,11	0,0043	0,0003
HC - 6	267833	6372267	0,00001	0,00126	120,9	0,0033	0,0006
HC - 7	267694	6372140	0,00001	0,00145	88,37	0,0011	0,0008
HC - 8	267789	6371961	0,00001	0,00319	88,3	0,00005	0,0012
HM - 1	269328	6372806	0,00001	0,00008	56,9	0,00005	0,0012
HM - 2	269110	6372961	0,00001	0,00281	115,26	0,00005	0,0042
HM - 3	268776	6372986	0,00001	0,00146	70,1	0,00005	0,0002

Muestra	UTM X	UTM Y	Cobre Disuelto (Cu)	Hierro Disuelto (Fe)	Plomo Disuelto (Pb)	Litio Disuelto (Li)	Magnesio Disuelto (Mg)
EP - 0	272141	6375380	0,0132	0,254	0,0002	0,00015	21,312
EP - 1	270451	6374390	0,0306	0,115	0,0002	0,00015	28,905
EP - 2	268550	6373147	0,0767	0,292	0,0002	0,0029	133,216
HC - 1	268604	6372595	0,5321	2,836	0,0417	0,00015	131,134
HC - 2	268525	6372818	0,3058	0,188	0,0006	0,00015	75,335
HC - 3	268385	6372763	1,2891	1,049	0,0134	0,00015	232,801
HC - 4	268227	6372617	0,0162	0,271	0,001	0,00015	139,176
HC - 5	268106	6372359	0,1315	0,14	0,003	0,00015	175,895
HC - 6	267833	6372267	0,0549	0,125	0,0018	0,00015	141,822
HC - 7	267694	6372140	0,1634	1,033	0,0636	0,00015	76,478
HC - 8	267789	6371961	0,5805	1,909	0,0841	0,00015	72,819
HM - 1	269328	6372806	0,0199	1,788	0,0013	0,00015	32,387
HM - 2	269110	6372961	0,2652	5,959	0,0086	0,00015	80,701
HM - 3	268776	6372986	0,2213	0,191	0,0002	0,002	54,089

Muestra	UTM X	UTM Y	Manganeso Disuelto (Mn)	Mercurio Disuelto (Hg)	Molibdeno Disuelto (Mo)	Níquel Disuelto (Ni)	Fósforo Disuelto (P)
EP - 0	272141	6375380	0,2992	0,00005	0,0007	0,0003	2,346
EP - 1	270451	6374390	0,0912	0,00005	0,0029	0,0017	0,663
EP - 2	268550	6373147	0,1044	0,00005	0,0061	0,0007	0,274
HC - 1	268604	6372595	13,3058	0,00005	0,0947	0,011	0,905
HC - 2	268525	6372818	1,2833	0,00005	0,2995	0,0019	0,68
HC - 3	268385	6372763	7,5988	0,00005	3,0451	0,0065	0,561
HC - 4	268227	6372617	0,4048	0,00005	3,2775	0,0043	2,36
HC - 5	268106	6372359	0,0709	0,00005	0,3755	0,0045	0,411
HC - 6	267833	6372267	0,0614	0,00005	0,2971	0,0023	0,295
HC - 7	267694	6372140	0,7581	0,00005	0,0183	0,0038	1,277
HC - 8	267789	6371961	1,0202	0,00005	0,0144	0,003	1,436
HM - 1	269328	6372806	1,1748	0,00005	0,0009	0,0008	1,702
HM - 2	269110	6372961	2,7036	0,00005	0,009	0,0026	0,734
HM - 3	268776	6372986	0,0271	0,00005	0,0746	0,0013	0,353

Muestra	UTM X	UTM Y	Potasio Disuelto (K)	Selenio Disuelto (Se)	Silicio Disuelto (Si)	Plata Disuelta (Ag)	Sodio Disuelto (Na)	Estroncio Disuelto (Sr)
EP - 0	272141	6375380	10,053	0,00015	15,15	0,00001	81,11	0,4299
EP - 1	270451	6374390	12,762	0,00015	9,62	0,00001	99,18	0,5584
EP - 2	268550	6373147	42,387	0,00015	3,32	0,00001	1218,57	1,2851
HC - 1	268604	6372595	36,12	0,0018	9,8	0,00002	736,42	2,1225
HC - 2	268525	6372818	36,789	0,003	7,59	0,00036	646,86	0,9194
HC - 3	268385	6372763	77,383	0,0089	3,65	0,00088	2087,38	3,1943
HC - 4	268227	6372617	77,452	0,00015	5,8	0,00001	2076,79	1,2745
HC - 5	268106	6372359	77,371	0,00015	2,53	0,00004	848,1	1,4872
HC - 6	267833	6372267	57,593	0,00015	3,91	0,00001	739,22	1,2361
HC - 7	267694	6372140	21,504	0,00015	1,98	0,00003	413,02	1,0306
HC - 8	267789	6371961	22,709	0,0056	1,32	0,00001	449,42	0,8949
HM - 1	269328	6372806	7,833	0,00015	17,38	0,00002	132,01	0,6327
HM - 2	269110	6372961	17,353	0,00015	10,61	0,00009	478,59	1,1753
HM - 3	268776	6372986	22,328	0,0031	7,43	0,0001	409,71	0,6693

Muestra	UTM X	UTM Y	Talio Disuelto (Tl)	Estaño Disuelto (Sn)	Titanio Disuelto (Ti)	Uranio Disuelto (U)	Vanadio Disuelto (V)
EP - 0	272141	6375380	0,0001	0,00025	0,0004	0,00033	0,0007
EP - 1	270451	6374390	0,0001	0,00025	0,0007	0,0005	0,0037
EP - 2	268550	6373147	0,0001	0,00025	0,0007	0,00076	0,0041
HC - 1	268604	6372595	0,0001	0,00025	0,0407	0,00176	0,0141
HC - 2	268525	6372818	0,0001	0,00025	0,002	0,00156	0,0053
HC - 3	268385	6372763	0,0001	0,00025	0,0117	0,0218	0,0129
HC - 4	268227	6372617	0,0001	0,00025	0,0061	0,00282	0,0281
HC - 5	268106	6372359	0,0001	0,00025	0,0012	0,00125	0,002
HC - 6	267833	6372267	0,0001	0,00025	0,0019	0,00105	0,0019
HC - 7	267694	6372140	0,0001	0,00025	0,0148	0,0009	0,0162
HC - 8	267789	6371961	0,0001	0,00025	0,026	0,00075	0,0179
HM - 1	269328	6372806	0,0001	0,00025	0,0029	0,00012	0,0025
HM - 2	269110	6372961	0,0001	0,00025	0,0097	0,00054	0,0103
HM - 3	268776	6372986	0,0001	0,00025	0,0012	0,0005	0,0045

Muestra	UTM X	UTM Y	Zinc Disuelto (Zn)	Boro Disuelto (B)	Alcalinidad Total	Silice Disuelta
EP - 0	272141	6375380	0,0202	0,35	226	32
EP - 1	270451	6374390	0,0027	0,35	155	19,9
EP - 2	268550	6373147	0,0328	0,35	185	9,5
HC - 1	268604	6372595	0,085	0,87	205	11,6
HC - 2	268525	6372818	0,0386	0,73	171	16,2
HC - 3	268385	6372763	0,0394	2,91	484	6,6
HC - 4	268227	6372617	0,0117	1,68	671	8,6
HC - 5	268106	6372359	0,0879	1,48	269	6,6
HC - 6	267833	6372267	0,0751	1,13	276	5,9
HC - 7	267694	6372140	0,0864	0,35	246	2,8
HC - 8	267789	6371961	0,1616	0,35	238	1,7
HM - 1	269328	6372806	0,0077	0,35	178	23,4
HM - 2	269110	6372961	0,0938	0,35	225	18,8
HM - 3	268776	6372986	0,0416	0,35	174	15,3

Anexo 2. a) Concentraciones y valores de diferentes parámetros para las muestras obtenidas, destacando aquellos cationes y aniones que presentan concentraciones (mg/L) sobre las normas chilenas (Nch 409 y Nch 1333) existentes. Aquellas concentraciones con color verde cumplen todas las normas chilenas, las amarillas con al menos una mientras que las rojas con ninguna. b) Estadística básica de los parámetros anteriormente mencionados.

a)

Parámetro	L.D.	Normas			Muestras												
		NCh 409	NCh 1333	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Temperatura	-	-	-	12,5	15,1	14	15,8	14	16,5	17,1	14	14,9	13,7	16	12,2	13,3	14,7
pH	-	-	-	7,3	8,1	7,8	7,0	7,1	7,8	8,5	7,8	7,9	8,2	8,0	7,1	7,1	7,0
CE	-	-	-	1159	1183	8283	5315	4499	11270	9528	5547	5545	3174	3196	1371	3161	4029
ORP	-	-	-	141	64	152	110	150	91	110	148	133	118	212	88	120	-23
SDT	-	-	-	624	782	4716	3926	2886	6996	6926	3911	3906	1906	1933	842	1979	2371
Cloruro	0,08	400	200	128,52	177,59	2221,4	749,19	817,57	2402,4	1269	783,05	788,95	599	615	232,4	825	738,07
Sulfato	0,12	500	250	85,16	106,99	242,53	1129,5	467,2	2417,6	2050	1233,7	1053,7	257	254	52,51	72,4	85,33
Arsénico	0,0003	0,01	0,1	0,002	0,01	0,02	0,1	0,08	0,38	1,04	0,14	0,09	0,27	0,24	0,02	0,11	0,07
Cobre	0,0005	2	0,2	0,01	0,03	0,08	0,53	0,31	1,29	0,02	0,13	0,05	0,16	0,58	0,02	0,27	0,22
Plomo	0,0004	0,05	5	0,0002	0,0002	0,0002	0,04	0,0006	0,01	0,001	0,003	0,002	0,06	0,08	0,001	0,01	0,0002
Magnesio	0,005	125	-	21,31	28,91	133,22	131,13	75,34	232,80	139,18	175,90	141,82	76,48	72,82	32,39	80,70	54,09
Manganeso	0,0001	0,1	0,2	0,3	0,09	0,1	13,31	1,28	7,60	0,4	0,07	0,06	0,76	1,02	1,17	2,7	0,03
Molibdeno	0,0002	-	0,01	0,0007	0,003	0,006	0,09	0,3	3,05	3,28	0,38	0,3	0,02	0,01	0,001	0,01	0,07
Boro	0,7	-	0,75	0,35	0,35	0,35	0,87	0,73	2,91	1,68	1,48	1,13	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Hierro	0,006	0,3	5	0,25	0,12	0,29	2,84	0,19	1,05	0,27	0,14	0,13	1,03	1,91	1,79	5,96	0,19

b)

	Temperatura	pH	CE	ORP	SDT	Cloruro	Sulfato	Arsénico	Cobre	Plomo	Magnesio	Manganeso	Molibdeno	Boro	Hierro
Máximo	17,1	8,5	11270	212	6996	2402,35	2417,63	1,04	1,29	0,08	232,80	13,31	3,28	2,91	5,96
Mínimo	12,2	7,0	1159	-23	624	128,52	52,51	0,002	0,01	0,0002	21,31	0,03	0,0007	0,35	0,12
Promedio	14,6	7,6	4804	115	3122	881,92	679,07	0,18	0,26	0,02	99,72	2,06	0,54	0,83	1,15
Mediana	14,4	7,8	4264	119	2629	766,12	255,38	0,09	0,15	0,00	78,59	0,58	0,05	0,35	0,28

Anexo 3. Fases minerales que presentan índices de saturación positivos acorde a modelo hidroquímico de PHREEQC, separados por la ocurrencia de diferentes elementos en las muestras obtenidas en este estudio.

	EP-0	EP-1	EP-2	HM-1	HM-2	HM-3	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8
SO₄⁻²	-	-	-	-	-	-	BaSO ₄	-	BaSO ₄	BaSO ₄	BaSO ₄	BaSO ₄	BaSO ₄	BaSO ₄
As	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂
Fe	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe(OH) ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃	Fe ₃ O ₄ , CuFeO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CuFe ₂ O ₄ , FeOOH, Fe ₂ MgO ₄ , Fe(OH) ₃ , Fe ₃ (OH) ₈ , FeCO ₃
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	PbCO ₃	PbCO ₃
Mg	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	-	-	-	Fe ₂ MgO ₄ , MgCO ₃	Fe ₂ MgO ₄ , MgCO ₃ , Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄	Fe ₂ MgO ₄
Mn	-	-	-	-	MnCO ₃	-	-	-	MnCO ₃	MnCO ₃	-	-	MnCO ₃	MnCO ₃