

**ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS Y ENRIQUECIMIENTO DE METALES
PESADOS EN SEDIMENTOS DE LOS HUMEDALES CAMPICHE- LOS
MAITENES, PUCHUNCAVÍ, REGIÓN DE VALPARAÍSO**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo.

PABLO IGNACIO PÉREZ POBLETE

Profesor Guía:

CAMILO SÁNCHEZ

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

LEONARDO NAVARRO

ÓSCAR BENAVENTE

SANTIAGO, CHILE

2021

Resumen

Los humedales son áreas en donde el principal controlador del medio es el agua, al cual se le asocia una flora y fauna que se adapta a las condiciones del sistema, y además son reconocidos por importantes funciones que se les atribuye (Secretaría de la convención de Ramsar, 2013). Una de ellas es que los sedimentos de estos humedales permiten una adsorción de elementos disueltos, actuando estos sistemas como filtros naturales.

Los humedales Campiche y Los Maitenes al encontrarse en las zonas próximas a poblados e industrias pertenecientes al complejo industrial Ventanas, podrían sufrir un enriquecimiento elemental químico proveniente de las actividades antrópicas que pueden llegar a deteriorar el ecosistema. Estos elementos generalmente se encuentran disueltos en el agua o adsorbidos en materiales sólidos de los humedales, existiendo un constante intercambio de masa entre estas matrices ambientales (agua- sedimento).

Se seleccionaron 5 sitios que cuentan con datos hidroquímicos de un estudio previo. En estos sitios se midieron los parámetros fisicoquímicos de las aguas y se extrajo sedimento de fondo. Posteriormente se submuestreo en dos profundidades de interés (0 a 7 y 15 a 22 cm), y se envió la muestra al laboratorio donde se analizó mediante un ICP-OES.

A las concentraciones obtenidas en sedimentos se aplicaron índices de calidad de sedimento que comparan las concentraciones actuales respecto a concentraciones preindustriales. Los resultados indican que el Arsénico, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio se encuentran con índices clasificados de alta a extremadamente contaminados, y se encontrarían generando un efecto ecológico adverso en la flora y fauna en los humedales investigados. Igualmente, las concentraciones medidas se compararon respecto a la normativa de EE. UU. y con concentraciones naturales de la zona. El Aluminio, Arsénico, Cobalto, Hierro, Manganeso y Cromo sobrepasaron las concentraciones máximas permitidas por la normativa de EE. UU. Estos 13 elementos se seleccionaron con el fin de investigarlos a mayor profundidad y comparar con resultados de otros autores en la zona. Además del Calcio y Azufre, que presentaron las mayores variaciones de concentración dentro de la zona de estudio.

El sitio HC-4 es un sitio en contacto con el escorial Codelco. Este sitio presenta generalmente las máximas concentraciones de metales pesados entre sitios, y por lo tanto los peores índices calculados. Además, al comparar las concentraciones en profundidad se observó que el Arsénico, Manganeso, Azufre, Calcio, Cobalto y Cadmio, presentan mayores concentraciones en la profundidad de 0 a 7 cm. Entre estos elementos el Arsénico, Cobre y Azufre contienen las mayores concentraciones en sitios con un tamaño de grano definido como limo-arcilla. En cambio, el Cromo y Níquel presentó mayores concentraciones en la profundidad de 15 a 22 cm, y en lugares con un tamaño de grano definido como arena fina. Por último, para el Aluminio, Cobalto, Hierro, Plomo, Zinc, Molibdeno y Antimonio, no se observó un enriquecimiento a alguna profundidad preferencial.

Dedicatoria

Esta investigación la dedico a mis padres por haberme dado las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos superados hasta el día de hoy, y que serán la base de los nuevos desafíos que vendrán a futuro.

SOLO USO ACADÉMICO

Agradecimientos

Es difícil expresar un agradecimiento a tantas personas que me han ayudado a lo largo de los años que curse mi carrera universitaria. Partiendo por mis padres Cristina y Pedro, ya que si no fuera por mis padres lo más seguro es que no estaría estudiando en una universidad, ellos son quienes me han dado su apoyo incondicional en cada momento de dificultad. A mi querida abuelita Juana quien siempre me brindo las palabras necesarias para salir adelante, además de incontables almuerzos, conversaciones y momentos que siempre llevaré conmigo en mi corazón. No puedo dejar de nombrar en general a la familia Pérez -Poblete quienes siempre me brindaron el apoyo necesario para terminar este largo y engorroso proceso de tesis. Igualmente, agradezco a los profesores Camilo, Oscar y Leonardo quienes se tomaron el tiempo de corregir y guiarme en cada reunión de avance.

También agradecer a los cabros que hicieron agradable la vida universitaria y que vivimos inolvidables momentos de risas y ridiculeces tanto en terreno, en la universidad y carretes. Entre ellos Xavi Quevedo, Dieguito Fernández, Rodrigo Cabrera, Dario Mandriaza, Luchaco, Joaquító Vargas, Vale Ramírez, Santi Foti, Coni Mohana, Max Parrao, Gloria Díaz, Flo Atenas, Morelia Cornejo, Jorge Fernández, entre muchos otros.

También agradecer a mis amigos con quien compartí incontables momentos mientras avanzaba el escrito como al Tico, Rocio Garcia, Pablito San Martin y Seba Zúñiga.

Además, no puedo dejar de lado a mi perrito Dino, quien siempre estuvo hasta tarde acompañándome (durmiendo, pero acompañándome) mientras terminaba este escrito.

¡Por lo mencionado y mucho más... Gracias a todos!

Índice de contenido

1.	Introducción.....	18
1.1	Estado del Arte.....	20
1.1.1	Humedales	20
1.1.2	Estudios asociados al complejo industrial Ventanas en la comuna Quintero y Puchuncaví	23
1.2	Problemática	32
1.2	Hipótesis.	33
1.3	Objetivos Generales.	33
1.5	Objetivos Específicos	33
1.6	Materiales y Metodologías.....	34
1.6.1	Esquema conceptual	34
1.6.2	Metodologías ocupadas en el muestreo	35
1.6.3	Trabajo de gabinete	37
1.6.4	Análisis Geoquímico	38
1.6.5	Herramientas de interpretación de datos	38
1.6.6	Softwares utilizados.....	41
1.6.7	Background geológico y normas de referencia	41
1.7	Técnicas Analíticas.....	48
1.7.1	ICP-OES	48
1.8	Plan de muestreo.....	49
2.	Antecedentes Generales.....	52
2.1	Zona de estudio.....	52
2.2	Hidrología.....	53
2.3	Clima	56
2.4	Geomorfología.....	56
2.4.1	Geomorfología local.....	56
2.5	Marco Geológico	58
2.5.1	Estratigrafía	59
2.5.2	Depósitos	61
2.5.3	Unidades Intrusivas	61
2.6	Laboreos o piques mineros en Puchuncaví.	62
3.	Resultados.....	63
3.1	Concentraciones químicas detectadas y orden de los resultados.....	63
3.2	Elementos mayoritarios, minoritarios y trazas	63
3.3	Resultados y orden de datos en Microsoft Excel.....	64
3.3.1	Parámetros fisicoquímicos de las aguas medidos <i>in situ</i>	67
3.4	Descripción de testigos de sedimento extraídos	71

3.5 Resultados de índices calculados de calidad de los sedimentos extraídos.	77
3.5.1 Índice de geoacumulación	77
3.5.2 Factor de enriquecimiento (EF).....	78
3.5.3 Factor de contaminación (Cf).....	79
3.5.4 Grado de contaminación (CDEG)	80
3.5.5 Índice de contaminación integrado.....	81
3.6 Correlación de Pearson.....	83
3.7 Resultados de muestras por sitio y su comparación respecto a la normativa de EE. UU. y el <i>background</i> geológico.	85
3.7.1 Humedal Campiche	85
3.7.2 Humedal Los Maitenes.....	86
3.7.3 Estero Puchuncaví	87
3.8 Gráficos por Elemento.....	87
3.8.1 Elementos Mayoritarios.....	88
3.8.2 Elementos Minoritarios	96
3.8.3 Elementos Trazas.....	102
4. Discusión	118
4.1 Impactos de metales pesados en humedales y su relación con los índices de calidad de sedimentos calculados	118
4.2 Concentración de elementos químicos en sedimentos y su comparación respecto a la normativa de EE. UU. y <i>background</i> geológico de Puchuncaví	120
4.2.1 Algunos factores que influyen en las concentraciones químicas medidas en sedimentos son:	121
4.3 Concentración de elementos en los humedales investigados y su relación con la cercanía al complejo industrial Ventanas.	131
4.4 Adsorción de elementos en diferentes fracciones geoquímicas de humedales	150
4.5 Discusión entre las concentraciones químicas medidas en profundidad y su relación respecto al tamaño de grano identificado en profundidad.....	151
4.6 Discusiones de las concentraciones químicas encontradas en sedimentos y su contraste respecto a las máximas concentraciones permitidas por la normativa de EE. UU. y los índices de riesgo ecológico calculados.	153
4.7 Discusiones respecto a concentraciones químicas medidas en sedimentos y en aguas superficiales de los humedales Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví.	155
5. Conclusiones.....	158
6. Recomendaciones de estudios posteriores.....	163
7. Referencias	164
8. Anexos.....	173

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de interacciones de humedal costero en Chiloé. Extraído de: http://humedaleschiloe.cl/costeross/	20
Figura 2. Esquema sobre la metodología realizada.....	34
Figura 3. Planificación de muestreo en humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví. El datum utilizado es WGS 84.....	49
Figura 4. Ubicaciones en donde se extrajo sedimentos correspondientes al humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví. El datum utilizado es WGS 84.....	50
Figura 5. Área de estudio general con sus respectivos límites, Zapallar por el norte; Quillota y Quintero por el sur; Nogales y La Cruz por el este. El datum utilizado es WGS 84.....	52
Figura 6. Área de estudio, se logra observar la ubicación del humedal Campiche y humedal Los Maitenes que se encuentran entre la cuenca costera del estero Catapilco y río Aconcagua. El datum utilizado es WGS 84.....	54
Figura 7. Red hidrológica de la comuna de Puchuncaví (MMA, 2015). El datum utilizado es WGS 84.....	55
Figura 8. Unidades de relieve de la región de Valparaíso (Börguel, 1983).....	57
Figura 9. Geología de la zona de la bahía quintero, observándose: Jmi2: Unidad Puerto Oscuro; Jmi4: Unidad Cavilolén; Ja: Formación Ajial; Tc: Formación Confluencia; PQd: Sedimentos eólicos antiguos o Paleodunas; Th: Formación Caleta Horcón; Qel: Sedimentos eólicos y litorales; Qtm: Terrazas de depósitos marinos; Qac: sedimentos aluviales y coluviales (Extraído de Mapa Quillota – Portillo, Rivano et al., 1993). El datum utilizado fue WGS 84.....	58
Figura 10. Muestra los valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua de los diferentes sitios muestreados, exceptuando HM-1, producto a la sequía del sitio en que anteriormente se tomaron datos hidroquímicos. El datum utilizado es WGS 84.....	67
Figura 11. Muestra los datos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medidos en los cuerpos de aguas de los diferentes sitios muestreados. Exceptuando HM-1, producto a la sequía del sitio en que anteriormente se tomaron datos hidroquímicos. El datum utilizado es WGS 84.....	69
Figura 12. Testigo extraído en el sitio HC-4, se observa que presenta características homogéneas a lo largo de la muestra como color negro con zonas pardas, grano tamaño limo arcilla y con moderado contenido orgánico.....	71
Figura 13. Testigo extraído en el sitio HC-7. Los primeros 0 a 7 cm son de color negro y tamaño de grano arena fina con contenido de gastrópodos. A profundidad predomina un pardo con contenido de gastrópodos.....	72
Figura 14. Testigo extraído del sitio HM-3. Los primeros 11 cm son de color negro con pigmentación marrón, tamaño de grano limo-arcilla. Desde los 12 cm presenta una tonalidad gris, tamaño de grano limo arcilla y con gran presencia de gastrópodos.....	73
Figura 15. Sedimento extraído del Sitio HM-1. Figura (9) se observa una calicata de 30 cm de profundidad.....	74
Figura 16.) Se observa la profundidad de la calicata, junto con la profundidad demarcada de muestreo (verde: 0 a 10 cm y rojo: 15 a 30 cm).....	74
Figura 17. Testigo extraído del sitio EP-1. Se observa en los primeros 5 cm del testigo un color negro con pigmentación marrón, tamaño de grano limo-arcilla. Desde los 7 cm se observa una tonalidad marrón del sedimento del tamaño de grano limo-arcilla.....	75

Figura 18. Promedio máximo en 24 h para material particulado MP 2,5 en la Región de Valparaíso, proveniente de las termoeléctricas de Puchuncaví.....	125
Figura 19. Distribución de concentración de Arsénico en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).....	131
Figura 20. Planificación de muestreo, con la dirección SW-NE representada por la traza A-A' y en el extremo inferior izquierdo se observa el polígono que representa el complejo industrial Ventanas.....	133

SOLO USO ACADÉMICO

Índice de Tablas

Tabla 1. Extraída y modificada de Chiang, 1989. Muestra los promedios de elementos químicos encontrados en material particulado precipitado desde la atmosfera sedimentando en muestreadores localizados en pueblos en la región de Valparaíso.	24
Tabla 2. Concentraciones de Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc presentes en muestras de suelo de hasta 20 cm de profundidad en Puchuncaví. Los resultados (ppm) son comparados con un “testigo” (concentración de metales pesados en suelos sin presencia de contaminación) (González & Bergqvist, 1986).	26
Tabla 3. Concentración de metales en aguas superficiales. Base de datos CENMA. Medidas de tendencia central y de dispersión para los datos disponibles debido a los pocos datos tomados, no fueron calculados percentiles. En rojo se puede observar la superación de la normativa chilena vigente (Extraída de: Pontificia universidad católica de Valparaíso & universidad de Playa Ancha, 2014).	29
Tabla 4. Elementos y/o compuestos sobre las Normas Chilenas Nro 409 y 1.333 para cada muestra obtenida.	31
Tabla 5. Interpretación de correlación de Pearson.	40
Tabla 6. Background realizado en la comuna de Puchuncaví, por la PGS (2015) (Anexo 6).....	42
Tabla 7. Clasificación de los valores obtenidos según el índice de geoacumulación (Müller, 1979).	43
Tabla 8. Clasificación de factor de enriquecimiento Sutherland (2000).	44
Tabla 9. Clasificación del Factor de Contaminación (Hakanson, 1980).	46
Tabla 10. Clasificación de grado de contaminación (CDEG) definido por Hakanson (1980).	46
Tabla 11. Clasificación de índice de contaminación integrado (IPI), según Wei & Yang (2010).	47
Tabla 12. Información de sitios definidos para realizar el muestreo.	51
Tabla 13. Resumen de los datos obtenido tras analizar la concentración química de los sedimentos mediante ICP-OES. Las concentraciones químicas observadas en la tabla se encuentran en unidades de mg/kg.	65
Tabla 14. Se observa los sitios en que se extrajo los testigos de sedimentos y los respectivos valores de pHs medidos en cada sitio. El datum utilizado es WGS 84.	68
Tabla 15. Se observan los sitios en que se extrajo sedimento con los valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivos:	70
Tabla 16. Resumen de las principales características de los testigos recuperados.	76
Tabla 17. Índices resultantes al aplicar el índice de geoacumulación a las concentraciones de elementos encontradas en los sitios investigados. Además, en la zona inferior se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Müller (1979).	77
Tabla 18. Resultados obtenidos al aplicar el factor de enriquecimiento a las concentraciones encontradas en los sitios investigados, y estandarizados respecto a un elemento inmóvil (Titanio). En el cuadro inferior se presenta la clasificación de Sutherland (2000).	78
Tabla 19. Resultados obtenidos al aplicar el factor de contaminación (Cf) a las concentraciones medidas en sitios investigados. En la zona inferior se observa la clasificación de Hakanson (1980) para cada índice calculado.	79

Tabla 20. Índices resultantes al sumar los índices calculados para cada elemento en cada sitio investigado. Además, en la zona inferior se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Hakanson (1980).	80
Tabla 21. Se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Wei & Yang (2010).	81
Tabla 22. Resumen de los elementos clasificados, según el grado de contaminación para los diferentes índices máximos calculados de calidad de sedimentos en la presente investigación (selección de elementos de interés).	82
Tabla 23. Se observa la correlación de Pearson realizada entre la movilidad de metales estudiados (mmol/kg).	83
Tabla 24. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Aluminio... ..	89
Tabla 25. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Hierro.....	90
Tabla 26. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Azufre.	93
Tabla 27. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Calcio.....	95
Tabla 30. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Manganeseo.97	
Tabla 31. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Cobre.	99
Tabla 33. Estadística básica realizada para el Zinc.	101
Tabla 28. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Arsénico..	102
Tabla 29. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Cromo.	104
Tabla 32. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Plomo.....	107
Tabla 34. Estadística básica realizada para el Níquel.....	109
Tabla 35. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Cobalto.	111
Tabla 36. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Antimonio.	113
Tabla 37. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Molibdeno.	114
Tabla 38. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Cadmio.	117
Tabla 39. Resumen de las concentraciones obtenidas que se encuentran sobre la normativa de EE. UU. y/o con un índice clasificado de alta a extrema contaminación.....	154
Tabla 40. Resumen de las concentraciones disueltas encontradas en las aguas, y concentraciones medidas en sedimentos del humedal Campiche y Los Maitenes. Para el sedimento, se marcan en gris las concentraciones que sobrepasaron la normativa de EE.UU. En cambio, para las concentraciones disueltas que sobrepasaron una normativa chilena para aguas, se marco en amarillo, y rojo si sobrepasa dos normativas chilenas para agua (Nro 409 o 1333).	157

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula matemática utilizada para calcular la correlación de Pearson.....	39
Ecuación 2. Índice de geoacumulación definido por Müller (1979).	43
Ecuación 3. Fórmula utilizada para calcular el factor de enriquecimiento (EF).	44

SOLO USO ACADÉMICO

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Boxplot de las concentraciones logarítmicas de los 31 elementos medidos.	64
Gráfico 2. Índice de contaminación integrado, este índice indica la contaminación presente en los sitios muestreados, calculado como el promedio de los factores de contaminación individuales para cada elemento.	81
Gráfico 3. Concentración de Aluminio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Aluminio en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003).	88
Gráfico 4. Concentración de Hierro en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Hierro natural de la zona (PGS, 2015).	90
Gráfico 5. Concentración de Azufre en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Azufre en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003)....	92
Gráfico 6. Concentración de Calcio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Calcio en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003). ...	94
Gráfico 9. Concentración de Manganeso en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Manganeso natural de la zona (PGS, 2015).	96
Gráfico 10. Concentración de Cobre en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cobre permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Cobre natural de la zona (PGS, 2015).	98
Gráfico 12. Concentración de Zinc en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Zinc permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Zinc natural de la zona (PGS, 2015).....	100
Gráfico 7. Concentración de Arsénico en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Arsénico natural de la zona (PGS, 2015).	102
Gráfico 8.. Concentración de Cromo en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Arsénico natural de la zona (PGS, 2015).	104
Gráfico 11. Concentración de Plomo en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Plomo permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Plomo natural de la zona (PGS, 2015).....	106
Gráfico 13. Concentración de Níquel en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Níquel permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Níquel natural de la zona (PGS, 2015).	108
Gráfico 14. Concentración de Cobalto en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cobalto permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración promedio de Cobalto medido en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003).....	110

Gráfico 15. Concentración de Antimonio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Antimonio permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Antimonio natural de la zona (PGS, 2015).....	112
Gráfico 16. Concentración de Molibdeno en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Molibdeno permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración natural de Molibdeno en la zona (PGS, 2015).....	114
Gráfico 17. Concentración de Cadmio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cadmio permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Cadmio natural de la zona (PGS, 2015).....	116
Gráfico 18. Comparación de concentración metálica en suelos de localidades en donde hay una fundidora de Cobre cercana. (Jafari et al., 2020).....	128

SOLO USO ACADÉMICO

Índice Anexo

Anexo. 1 Dirección NE de Pluma de SO ₂ , medida cada 5 horas (CENMA, 2013).....	173
Anexo. 2 Dirección Norte de Pluma de SO ₂ , medida cada 5 horas (CENMA, 2013).....	173
Anexo. 3 Distribución de concentración de SO ₂ de la pluma emitida por el CIV (CENMA, 2013).	174
Anexo. 4 Presencia de metales en suelos y sedimentos de humedales, comparado a la normativa italiana y Norteamérica, Extraído de Pontifica Universidad Católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha, 2014.	174
Anexo. 5 Distribución del enriquecimiento de Arsénico en suelos de Quintero y Puchuncaví (Poblete, 2015).	175
Anexo. 6 Comparación valores Background en suelos geológicos y agrologicos. Extradida de PGS, 2015.....	175
Anexo. 7 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Fe (%) y V (mg/kg), respecto a la norma canadiense (PGS, 2015).	176
Anexo. 8 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Cu (mg/kg) y As (mg/kg), respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).	176
Anexo. 9 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Pb (mg/kg) y Sb (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).	177
Anexo. 10 Mapas de distribución espacial y enriquecimiento de Hg (Mg/kg) y Mo (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).	177
Anexo. 11. Mapa de distribución espacial de Ni (mg/kg) y Mn (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).....	178
Anexo. 12 Mapas de distribución espacial de pH de suelos y enriquecimiento de Materia Orgánica (%), (PGS, 2015).....	178
Anexo. 13 Porcentaje de muestras que superan la norma canadiense, (PGS, 2015).....	179
Anexo. 14 Parámetros Físicoquímicos y concentraciones medidas en aguas superficiales del humedal Campiche y Los Maitenes (Cabrera, 2021).	179
Anexo. 15 Tabla de concentraciones naturales y normativa de referencia utilizadas en el presente estudio. Los datos de concentraciones naturales fueron extraídos de los estudios de la PGS (2015) y Rudnick y Gao (2003). Además, de la normativa de EE. UU. (USEPA, 2018).....	180
Anexo. 16 Distribución de concentración de Antimonio en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	181
Anexo. 17 Distribución de concentración de Antimonio en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	181
Anexo. 18 Distribución de concentración de Cobre en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	182
Anexo. 19 Distribución de concentración de Cobre en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	182
Anexo. 20 Distribución de concentración de Arsénico en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	183
Anexo. 21 Distribución de concentración de Arsénico en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	183

Anexo. 22 Distribución de concentración de Cromo en a profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	184
Anexo. 23 Distribución de concentración de Cromo en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	184
Anexo. 24 Distribución de concentración de Cadmio en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).	185

SOLO USO ACADÉMICO

Lista de Abreviaturas

- CIV: Complejo industrial ventanas.
- Cm: Centímetro.
- CENMA: Centro nacional del medio ambiente.
- NCh: Normativa chilena.
- Mg/kg: Microgramo por kilogramo.
- mg/kg: Miligramo por kilogramo.
- Km: Kilometro.
- m: Metro.
- NS: Norte Sur.
- NNE: Nor Este.
- Ppt: Parte por trillón.
- Ppm: Parte por millón.
- Ppb: Parte por billón.
- Cu: Cobre.
- As: Arsénico.
- Fe: Hierro.
- Zn: Zinc.
- Pb: Plomo.
- Cd: Cadmio.
- Mn: Manganeso.
- Sb: Antimonio.
- SO₂: Dióxido de azufre.
- MP10: Material particulado <.
- MP2,5: Material particulado <.
- GEC: Gestión de episodios críticos.
- PPDV: Plan de descontaminación ventanas.
- NE: Nor- Este.
- V: Vanadio.
- Ni: Níquel.
- Se: Selenio.
- Mo: Molibdeno.
- Hg: Mercurio.
- SAG: Servicio Agrícola Ganadero.
- MMA: Ministerio del Medio ambiente.
- PEL: Nivel de probables efectos.
- NO₂: Óxido de nitrógeno.
- O₃: Ozono.
- CO: Monóxido de carbono.
- T°: Temperatura.
- °C: Grados celsius.
- Ha: Hectáreas.
- SW: Sur Oeste.
- EE. UU: Estados Unidos.
- U.S-EPA: Agencia de protección ambiental de EE. UU.
- BCR: Método de extracción secuencial.
- PCA: Análisis de componentes principales.
- ICP-OES: Espectrometría de emisión óptica.
- DRX: Difracción de rayos x.
- Gr: Gramo.
- MOT: Materia orgánica total.

- HC: Humedal Campiche.
- HM: Humedal Maitenes.
- EP: Estero Puchuncaví.
- PUCV: Pontifica universidad católica.
- UPA: Universidad de playa ancha.

SOLO USO ACADÉMICO

1. Introducción

Los humedales son zonas donde el principal factor controlador del sistema es el agua, al cual les es asociado una flora y fauna que se adaptan a las condiciones del medio, siendo sitios de abundante biodiversidad (Ramsar, 1971). Además, estos cuerpos de agua dependiendo de sus características geomorfológicas, hidrológicas y biológicas, pueden generar una disminución en la velocidad de las aguas de escorrentía, permitiendo una infiltración de aguas superficiales a acuíferos y dando las condiciones para una precipitación de elementos desde la columna de agua hacia los sedimentos (Cortés, 2017; WCS, 2019; Espinoza *et. al*, 2011).

De manera que los humedales cumplen importantes funciones como almacenadores de agua, zonas de recarga de acuíferos, fuentes de alimento y materias primas, zona de descanso y alimento para aves migratorias, disminuyen impactos provocados por inundaciones, ayudan en la estabilización de la línea de costa, influyen directamente sobre el clima a nivel local y global, y controlan la calidad del agua, actuando como trampas de sedimentación y como filtros naturales a través de los mismos sedimentos. (WCS, 2019; Olivares, 2009).

Los sedimentos de medios acuáticos reflejan la calidad del agua de los humedales al encontrarse en un constante intercambio de masa con la columna de agua. Estos sedimentos se encuentran conformados por una fracción orgánica (materia orgánica) y una fracción inorgánica (fases sólidas cristalinas y fases sólidas de nula cristalinidad). En la totalidad de estudios que han realizado otros autores ha sido observado que los metales y metaloides asociados a sedimentos tienen una mayor afinidad principalmente en la fracción fina de arcillas (2- 63 μm), de materia orgánica o óxidos e hidróxidos de Hierro y Manganeso. De manera que la composición de los sedimentos del lecho es básicamente controlada por su composición natural y por las fases sólidas precipitada posteriormente desde la columna sedimentable del agua o material suspendido (Stevenson, 2001; Zhou, 2004; Contreras *et. al*, 2004).

Por lo tanto, los sedimentos y roca del lecho actúan como un buffer natural al fijar elementos químicos en las fracciones que lo conforman, pero a su vez estos metales pueden ser liberados a la columna de agua, debido a un cambio en las condiciones físico, químicas o biológicas del sistema, generando la infiltración de estos elementos hacia capas inferiores, esto dependiendo de la porosidad, permeabilidad y fracturas del lecho de roca y sedimentos. De manera que pone en contacto directo la composición del agua de escorrentía superficial con la composición del agua

subterránea, que generalmente es utilizada por comunidades aledañas y los mismos organismos que viven en el medio natural (Tarbuck & Lutgens, 2010). Por motivo de esta disolución de elementos desde los sedimentos y/o precipitación de elementos hacia los sedimentos, estos son conocidos como reservorios y también como fuentes de liberación de elementos (Valdés & Castillo, 2014).

En la actualidad muchas industrias y ciudades han sido construidas en zonas aledañas a humedales o incluso en sitios que antes pertenecieron a humedales (Rojas, 2015). De manera que pueden enriquecer estos sistemas con diferentes elementos químicos como metales y metaloides, los que pueden ocasionar un deterioro de estos sistemas, al aportar una concentración extra de elementos químicos a estos humedales. (Estrada, 2010)

Durante décadas ha existido un aporte de elementos químicos de origen industrial en la comuna de Puchuncaví, esto respecto a un “*background* geológico” realizado por la PGS Chile (2015), en la zona de Quintero y Puchuncaví. Evidenciando junto a otros estudios, un enriquecimiento de elementos químicos en diferentes matrices ambientales como en aire, agua, suelo y sedimentos en zonas aledañas (Centro nacional del medio ambiente, 2013; Pontificia Universidad católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha, 2014). Estos estudios fueron motivados producto de una gran disminución de producción de la comuna en las principales actividades económicas de ese tiempo como lo fue la pesca, ganadería y agricultura. Además de un progresivo aumento del rubro industrial del complejo industrial Ventanas desde los años 60 (Folchi, 2006).

Otra zona donde se evidencia la degradación del ecosistema es el humedal Campiche y el humedal Los Maitenes, los cuales son lugares que contiene una gran biodiversidad de especies, pero que ha sido afectado y esto ha sido manifestado en la reducción de especies de flora y fauna (Pavón T., 2017). Además, tanto el humedal Campiche y humedal Los Maitenes son ecosistemas que se encuentran vinculados a los acuíferos de la zona, los que pueden tener contacto directo con las fuentes de almacenamiento de agua utilizadas por las comunidades del sector (Fernández, 2011).

1.1 Estado del Arte

1.1.1 Humedales

Los humedales son zonas de dimensión variable que ocupan desde unas pocas a millones de hectáreas, donde el agua es el principal factor controlador de la vida vegetal y animal que se adapta a las condiciones asociadas a él (Figura 1), Ramsar (1971), ha definido a los humedales como:

“Las extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de aguas, sean 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”.

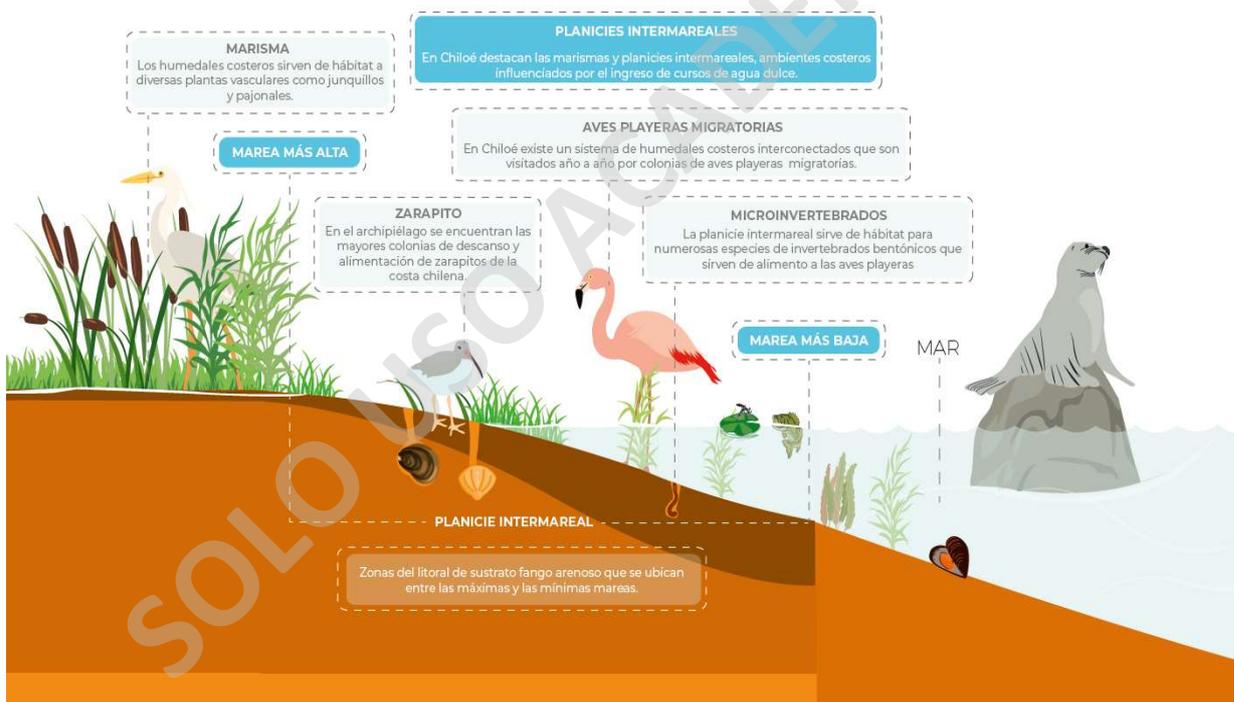


Figura 1. Esquema de interacciones de humedal costero en Chiloé. Extraído de: <http://humedaleschiloe.cl/costeross/>.

Además, se les atribuyen importantes funciones como almacenadores de agua, zonas de recarga de acuíferos, fuente de alimento y materias primas, zona de descanso y alimento para aves migratorias, disminuyen impactos provocados por inundaciones, ayudan en la estabilización de la línea de costa, influyen directamente sobre el clima a nivel local y global (según la tasa de evapotranspiración), controlan la calidad del agua actuando como trampas de sedimentación y como filtros naturales (buffers)(WCS, 2019; Richardson, 1994).

Los sedimentos de medios acuáticos están conformados por una fracción orgánica que corresponde a materia orgánica, que se subdividen en sustancias húmicas y no húmicas. Además de una fracción inorgánica que son conformadas por fases sólidas cristalinas y fases sólidas de nula cristalinidad (Appelo, 2005)

Según la bibliografía consultada la totalidad de autores ha mencionado que los metales y metaloides asociados a sedimentos tienen una mayor afinidad principalmente en la fracción fina de arcillas (2 – 63 μm), de materia orgánica o óxidos e hidróxidos de Fe y Mn (Förstner & Salomons, 1980, Förstner & Wittmann, 1981). De manera que la composición de los sedimentos del lecho es básicamente controlada por su composición natural y por las fases sólidas precipitadas posteriormente desde la columna sedimentable del agua o material suspendido (Stevenson, 2001; Zhou, 2004; Contreras *et. al*, 2004).

El sedimento es compuesto por distintos componentes como arcillas, materia orgánica, óxidos de Hierro y Manganeseo, carbonatos y fracción residual. A la vez estas fracciones del sedimento pueden adsorber o absorber otros elementos químicos presentes en el sistema, dependiendo de la afinidad entre ambos, como metales pesados, fosforo, nitrógeno, azufre, silicatos, carbonatos, entre otros (Boluda & Egea, 2017).

En el fondo de estos cuerpos de agua en la conocida interfaz agua-sedimento y en la columna sedimentaria, existen diferentes procesos que controlan la adsorción o desorción de elementos de las fracciones que conforman sedimento como procesos de adsorción-desorción y absorción (inclusión a estructura cristalina), pero a la vez la fijación, precipitación o disolución de elementos son dependientes de las condiciones del medio como pH, salinidad, potencial oxidación-reducción, concentración de materia orgánica e intermediación microbiana y de la variación de este elemento en el tiempo (Rodríguez, 2010). Además, existe otro factor que controla el comportamiento de contaminantes como lo es el tamaño, forma de la estructura

molecular, solubilidad, distribución de cargas y naturaleza ácido- base de la molécula. (Gevao y Jones, 2000).

1.1.1.1 Amenazas de humedales

Los humedales en el siglo XX debido a fuentes antrópicas principalmente han disminuido su calidad y extensión, esta última entre un 64 a 71% a nivel mundial. Los humedales continentales han sido los más afectados, perdiendo entre un 69 a 75%, mientras que la extensión de los humedales costeros se aproxima a un 62%, llegando a alcanzar tasas de hasta 1,5% en las disminuciones del área total de humedales anualmente. (Ministerio del medio ambiente, 2018).

Los humedales están desapareciendo por factores como la caza ilegal, la sequía, contaminación por desechos domésticos, expansión inmobiliaria en áreas costeras, introducción de especies y sobreexplotación de agua, convirtiendo a gran cantidad de estos ambientes ricos en biodiversidad en bancos de arena, planicies desiertas e incluso basurales (Ministerio del medio ambiente, 2011; WCS, 2019).

Las amenazas a los humedales son clasificados en 3 grandes grupos, según la WCS, 2019:

- Físicas: Extracción o modificación del caudal de alimento, quema de vegetación, extracción de agua subterránea, drenaje, deforestación de la cuenca, aumento de la sedimentación, etc.
- Químicas: Contaminación por fertilizantes, pesticidas y descarga de riles con alta concentración de químicos o nutrientes.
- Biológicas: Pastoreo no sustentable, depredadores domésticos no controlados (perros y gatos), colecta de vegetación u otro recurso biótico, introducción de otras especies en el ecosistema.

1.1.2 Estudios asociados al complejo industrial Ventanas en la comuna Quintero y Puchuncaví
La comuna de Puchuncaví ha sido afectada por una progresiva degradación ambiental debido a las actividades industriales de la zona. Según los antecedentes revisados, no existirían estudios sobre la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las aguas y concentraciones químicas medidas en los sedimentos de fondo de las aguas de los humedales Campiche y Los Maitenes. Sin embargo, diferentes autores han caracterizado geoquímicamente diferentes matrices ambientales como aire, suelo, sedimentos y agua en la zona con el fin de determinar el enriquecimiento de elementos que ha aportado el sector industrial a sectores de la comuna de Puchuncaví y Quintero.

1.1.2.1 Aire

Chiang *et. al*, (1985) propuso un modelo de deposición de metales pesados como Cadmio, Cobre, Manganeso, Plomo, Hierro, Zinc y Arsénico desde la pluma emitida por la chimenea de la refinería Ventanas, el cual indica que existe un aumento en la concentración de partículas y metales pesados de manera inversamente proporcional a la distancia desde la refinería. El estudio concluye que la fuente contaminante es la refinería, y que tanto las características topográficas como las condiciones climáticas del sector, influyen sobre la distribución de material particulado emitido por esta instalación.

De esta manera Chiang (1989) midió la concentración de elementos que precipitan desde la atmósfera a la superficie terrestre como Zinc, Cobre, Plomo, Cadmio, Manganeso y Arsénico, a través de muestreadores que situó en pueblos cercanos como La Greda, Campiche, Rungue y Peñuelas (Tabla 1).

Tabla 1.Extraída y modificada de Chiang, 1989. Muestra los promedios de elementos químicos encontrados en material particulado precipitado desde la atmosfera sedimentando en muestreadores localizados en pueblos en la región de Valparaíso.

Pueblo	Elementos químicos recolectados en la región de Ventana ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día) (Chiang,1989).						
	Promedio de Zn	Promedio de Sulfato	Promedio de Cu	Promedio de Pb	Promedio de Cd	Promedio de Mn	Promedio de As
La Greda	504,95	1.435,60	1.012,45	96,85	8,8	48,05	266,55
Campiche	450,46	740	606,66	62,9	6,7	26,57	196,34
Rungue	340,07	631,8	386,64	54,27	4,8	14,67	109,7
Peñuelas	C.N.D.	12,6	2,22	2,22	0,07	C.N.D.	0,63

C.N.D: Cantidad bajo el límite de detección.

Fuente: Chiang (1989).

El centro nacional del medio ambiente (2013) evaluó la exposición a la presencia de sustancias potencialmente contaminantes en aire y polvo en Puchuncaví, destinado a establecer mecanismos y herramientas de gestión integradas, eficientes y ambientalmente sustentables para proteger la salud de la población y ecosistemas presentes.

Los datos los obtienen a través de una red de estaciones de monitoreo de calidad de aire de la zona, y mediante la instalación de nuevas estaciones adicionales ubicadas en Puchuncaví, Los Maitenes Sur, La Greda y Quintero.

En el estudio modelan las concentraciones de SO_2 presentes en la zona del complejo industrial Ventanas, mencionando la variabilidad de la concentración de SO_2 respecto de la hora, los resultados indican una concentración máxima de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por día, y con una dirección norte que fluctuó entre NE y NW (Anexo 1; Anexo 2; Anexo 3).

1.1.2.2 Suelos y sedimentos

González & Bergqvist (1986), estudiaron las concentraciones de metales pesados como Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc en suelos de 0 a 20 cm de profundidad (Tabla 2) y en hojas de eucaliptus en sectores de la comuna de Puchuncaví de manera que calculan la variación porcentual de estos elementos en suelos respecto a una muestra de referencia.

Al contrastar los autores las muestras de suelos que extrajeron en las cercanías del CIV respecto a la muestra de referencia tomada en Quintero, encontraron enriquecimientos en la concentración de Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc de hasta 8.623 veces más en Los Maitenes que en Quintero (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

De igual manera los investigadores dan cuenta de una distribución espacial similar de los metales en suelos estudiados, atribuyéndole su proveniencia a una misma fuente común ubicadas en las cercanías del CIV, lugar donde se encontraron las máximas concentraciones, además de los sectores ubicados al NE del complejo industrial debido a la preferencia de los vientos que actúan sobre las emisiones emitidas.

Tabla 2. Concentraciones de Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc presentes en muestras de suelo de hasta 20 cm de profundidad en Puchuncaví. Los resultados (ppm) son comparados con un “testigo” (concentración de metales pesados en suelos sin presencia de contaminación) (González & Bergqvist, 1986).

Tabla 5. Contenido de metales pesados en muestras de suelos (0-20 cm) en Puchuncaví y su variación porcentual con respecto a una muestra testigo.

N°	Sitio de muestreo Nombre	Cadmio		Cobre		Plomo		Cinc	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
AL OESTE DE VENTANAS									
S/n	Testigo (Quintero)	<LMD2	-	9,5	-	3,7	-	4,4	-
AL SUR DE VENTANAS									
1	ENAP	0,3	500	265,8	2.698	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	-61	2,9	-34
AL ESTE DE VENTANAS									
5	Los maitenes A	2	3.900	828,7	8.623	116,3	3.043	41,8	850
6	Los Maitenes B	0,8	900	198,5	1.989	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	4,6	4
AL NORTE DE VENTANAS									
11	Campiche	<LMD	0	137,4	1.346	54,2	1.365	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	1.165	26,1	493
20	Runge	<LMD	0	125	1.216	45,4	1.127	28	536
22	Potrerosillos	<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 mg Cd/kg suelo; valor considerado para cálculo de porcentaje, en casos de contenidos menores

Fuente: González & Bergqvist (1986).

González & Ite (1992) prosiguieron con las investigaciones realizadas por INIA (1983) y González & Bergqvist (1986), de manera que llevan a cabo un muestreo de suelo superficial (0 a 20 cm) dentro del área bajo influencia de las emisiones atmosféricas de las industrias ubicadas en el complejo industrial Ventanas para contrastar las diferencias del contenido total de metales como Cadmio, Cobre, Plomo, Zinc y Arsénico en suelos después de 8 años (1983 a 1991).

Los autores reportaron un aumento en el contenido de metales en suelos de manera inversamente proporcional a la distancia del complejo industrial, y encontraron un enriquecimiento de hasta 330 veces para el Cobre, 48 veces el Plomo y Cadmio, y 13 veces para el Zinc. Los contenidos de Arsénico en suelos no se investigaron en el estudio realizado por INIA (1983), por lo que lo compararon con el valor de Arsénico de la zona (3 mg /kg), además encontraron aumentos de hasta 241 veces de Arsénico en un sitio del estudio.

De igual manera el estudio dio cuenta de una similitud en la distribución espacial de Cobre, Plomo, Zinc y Cadmio, por lo que infirieron un origen común, definiendo un mayor aporte de

metales desde la fundición de minerales cúpricos, con una participación secundaria de la planta termoeléctrica.

El ministerio del medio ambiente (2014) conformó un informe final sobre “Evaluación de riesgos para la salud de personas y biota terrestre por la presencia de contaminantes, en el área de influencia industrial y energética de las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví”. Las actividades planificadas en la consultoría que evaluó los riesgos asociados abarcaron 4 etapas: Identificación del peligro, evaluación dosis- respuesta, evaluación de la exposición y evaluación de riesgo, adicionalmente contó con una etapa previa denominada “evaluación preliminar”, donde recopilaron información existente que les permitió seleccionar los contaminantes de interés (Cobre, Zinc, Arsénico, Plomo, Cadmio, Níquel, Mercurio, Antimonio y Vanadio).

Los autores realizaron un análisis comparativo de los percentiles 98 de concentraciones de metales y lo compararon respecto a la norma italiana (Ministerio del medio ambiente, 2014). A partir de los resultados, mencionaron que las concentraciones de Cobre, Arsénico, Plomo, Cadmio y Zinc superaron los valores límites para áreas residenciales, indicando que en algún punto de la zona investigada la norma italiana se ve superada. Por el contrario, Mercurio, Cromo, Níquel y Antimonio no superaron los límites, y el Manganeso no lo comparan debido a que la norma italiana no regula este analito (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), concluyendo que la principal problemática es la “existencia de riesgo de salud y biota en la zona de estudio”.

Poblete *et. al*, (2015) llevan a cabo un estudio sobre el enriquecimiento y distribución de Arsénico en las comunas de Quintero y Puchuncaví. Los autores recolectaron un total de 466 muestras en suelos entre los primeros 0 a 45 cm, dividiéndolos en tres rangos de profundidad (0 a 15; 15 a 30 y 30 a 45 cm) y determinaron las concentraciones naturales de elementos traza en el suelo, de manera que generaron mapas de distribución de Arsénico mediante la interpolación de los datos obtenidos.

Los autores encontraron una concentración que varió entre 0,1 a 68 mg/kg de Arsénico en los suelos de Quintero y Puchuncaví, con una máxima concentración (68 mg/kg) en la zona del complejo industrial Ventanas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5**), y destacaron que dentro de la geología de la Formación Ajial encontraron las mayores concentraciones naturales de Arsénico con un máximo de 13,8 (mg/kg).

El ministerio del medio ambiente solicitó elaborar un estudio de suelos a la empresa PGS Chile para las comunas de Quintero y Puchuncaví para obtener información complementaria a la existente para evaluar el riesgo ambiental de la zona. Como primer paso, realizaron un “background” de suelos no contaminados agrológicos y geológicos de elementos como Vanadio, Manganeso, Hierro, Níquel, Cobre, Zinc, Arsénico, Selenio, Molibdeno, Cadmio, Antimonio, Plomo y Mercurio, de forma que estimaron el valor “background” como el límite superior del intervalo de confianza del 95% de la concentración media del elemento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6**).

El estudio realizado por la PGS (2015) analizó 582 muestras de suelo, y a través de interpolación de la concentración de elementos que los comparan respecto a la norma canadiense de suelos y sedimentos, generaron mapas de la distribución de concentraciones de los elementos que estudiaron como Hierro, Vanadio, Cobre, Arsénico, Zinc, Antimonio, Plomo, Selenio y Mercurio. Los autores reportaron que las concentraciones máximas fueron encontradas en y alrededor del CIV (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7; 8; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9; 10; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.11**), y en zonas que corresponden a centros poblados como Maitencillo y Concón, no obstante, elementos como Níquel y Manganeso fueron medidos sus máximas concentraciones hacia el NE del CIV (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.11**).

Además, la PGS (2015) creó mapas de distribución espacial de pH y concentración de materia orgánica que encontraron en los suelos que fueron analizados en Quintero y Puchuncaví (Anexo 12). Por último, mencionan que el porcentaje de muestras de los elementos que estudiaron como, 61% de las muestras que contienen Hierro, 81% de las muestras que contienen Vanadio, 93% de las muestras que contienen Cobre, 71% de las muestras que contienen Arsénico y otros, sobrepasaron el límite máximo de concentración de estos elementos en suelos permitidos por la normativa canadiense (Anexo 13).

1.1.2.3 Aguas superficiales

El centro nacional del medio ambiente (2014) en el estudio llevado a cabo por la Pontificia universidad católica de Valparaíso & universidad de Playa Ancha, (2014), realizó mediciones de parámetros en los principales cauces naturales de Quintero y Puchuncaví. Los resultados medidos los compararon con la normativa chilena vigente para aguas de riego (NCh 1.333), mencionando que el Cobre, Zinc y Manganeso fueron superados en algún punto del curso de agua, especificando que existen valores que exceden en 3 de los 15 cursos de agua evaluados y encuentran valores como Cobre y Manganeso en el estero Puchuncaví que superan la normativa chilena (Tabla 3)

Tabla 3. Concentración de metales en aguas superficiales. Base de datos CENMA. Medidas de tendencia central y de dispersión para los datos disponibles debido a los pocos datos tomados, no fueron calculados percentiles. En rojo se puede observar la superación de la normativa chilena vigente (Extraída de: Pontificia universidad católica de Valparaíso & universidad de Playa Ancha, 2014).

Contaminantes	N° de datos de concentración del contaminante en aguas superficiales.	Rango de valores (mg/L)	Media (mg/l)	Mediana (mg/L)	Norma chilena 1333 (riego) (mg/L)	D.S 143 (recreacional) (mg/L)
Cu	15	0,009- 0,21	0,13	0,16	0,2	-
As	15	B.L.D (<0,041)			0,1	0,11
Zn	15	B.L.D (<0,022)			2	-
Pb	15	B.L.D. (<0,023)			5	0,11
Cd	15	B.L.D (<0,013)			0,01	0,033
Ni	15	B.L.D (<0,027)			0,2	-
Cr	15	B.L.D (<0,017)				0,55
V	15	B.L.D (<0,022)			0,1	-
Mn	15	0,041- 2,1	0,41	0,138	0,2	-
Hg	15	B.L.D (<0,00012)			0,001	0,011
Se	15	B.L.D (<0,130)			0,02	-

Fuente: Centro nacional del medio ambiente (2014).

Cabrera (2020) estudió la calidad hidroquímica del agua de los humedales Campiche, Los Maitenes y el estero Puchuncaví en la comuna de Puchuncaví, y comparó las concentraciones que

encontró en estos cuerpos de agua respecto a la normativa de Chile Nro. 409 para aguas de consumo humano y normativa de Chile Nro. 1.333 para aguas de uso recreacional.

Los resultados de las muestras que analizó Cabrera (2020) en el estero Puchuncaví, solo el sitio EP-1 no presenta elementos o compuestos sobre las normas anteriormente mencionadas, mientras que EP-0 y EP-2 presentan concentraciones sobre las normas nacionales de manganeso para la primera, y cloruro para la segunda.

Por otro lado, las muestras recolectadas y analizadas en el estudio de Cabrera (2020) en el sector del humedal Los Maitenes correspondientes a HM-1, HM-2 y HM-3 presentaron elementos fuera de norma como el Arsénico, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Cobre y Cloruro (Tabla 4 y Anexo 14).

Mientras que las muestras que obtuvo en el humedal Campiche tales como HC-1, HC-2, HC-3, HC4, HC-5, HC-6, HC-7 y HC-8 presentaron al 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 4 y Anexo 14).

Por lo tanto, en el estudio de calidad hidroquímica llevado a cabo por Cabrera (2021) se observó que los humedales Campiche, Los Maitenes y el estero Puchuncaví poseen concentraciones variables con amplios rangos en las concentraciones en los elementos analizados, principalmente para el Arsénico, Cobre, Molibdeno, Manganeso, Cloruro, Hierro, Magnesio, Boro, Plomo y Sulfato (Anexo 14). Además, de mencionar que los factores que inciden en la concentración de elementos en el agua son principalmente el clima, litología, vegetación, topografía, actividad biológica y tiempo (Smith & Huyck, 1994), e inclusivamente del Eh y pH.

Tabla 4. Elementos y/o compuestos sobre las Normas Chilenas Nro 409 y 1.333 para cada muestra obtenida.

Muestras	Norma chilena 409	Norma chilena 1.333
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	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , B, Cu, As, 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	Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , As, Mn, Mo
HC-8	Cl ⁻ , As, Pb, Mn	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	Cl ⁻ , Cu, Mo

Fuente: Cabrera, 2020.

El autor también midió los parámetros fisicoquímicos de las aguas superficiales de los humedales tales como temperatura, la cual varió entre 12,2 ° C (HM-1) a 17,1°C (HC-4). El pH en la zona de estudio varió entre pH 7 (HM-3) - pH 8,5 (HC-4), y el potencial redox (ORP) medido mostró un predominio de condiciones principalmente oxidantes con un valor máximo de 212 mV (HC-8) y un mínimo de -23 mV (HM-3). Además, menciona que estas condiciones de pH y Eh no favorecía a nuevas especiaciones o reacciones. Por último, la concentración de sólidos disueltos totales varió entre 624 mg/L (EP-0), a 6.996 mg/L (HC-3), observándose una tendencia de aumento hacia el oeste.

Es importante mencionar que en el estudio realizado por Cabrera (2020) menciona que aunque se ve una tendencia al incremento de elementos disueltos como Cobre, Molibdeno, Boro, Sulfato, Manganeso, Magnesio, Hierro, Arsénico, Plomo y Cloruro en las zonas aledañas al CIV, los datos recopilados por este estudio son insuficientes para aseverar algún efecto directo de este CIV en las aguas de estos humedales, esto debido a la falta de información geoquímica y mineralógica en los sedimentos, además de fases minerales en suspensión existentes en el agua.

1.2 Problemática

Los humedales Campiche y Los Maitenes se encuentran en zonas con gran influencia antrópica, al encontrarse en el mismo territorio con industrias de diversos rubros que en su actividad podrían aportar un enriquecimiento de elementos tales como Aluminio, Hierro, Arsénico, Cobre, Cromo, Manganeso, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio, Cobalto y Cadmio en la zona superior de suelos, según los antecedentes registrados por los autores anteriormente mencionados.

Dado lo anterior, se considera necesario caracterizar la composición química de los sedimentos y medir propiedades fisicoquímicas de las aguas que conforman los humedales estudiados, con el fin de responder: ¿Cuáles son los elementos que presentan variaciones de concentración significativas en sedimentos entre sitios y en las profundidades investigadas? y ¿Existe un aporte significativo de elementos químicos desde el sector industrial a los sedimentos de los humedales investigados?

1.2 Hipótesis.

- La química de los sedimentos depositados debajo de las aguas que conforman los humedales estará reflejando la actividad industrial del sector.
- Existen ciertos compuestos de origen antrópico que no están disueltos en las aguas de los humedales, permaneciendo precipitados u adsorbidos.
- Algunos elementos medidos presentan variaciones de concentración significativas al comparar entre las profundidades estudiadas y distancia desde el sitio investigado al complejo industrial Ventanas.

1.3 Objetivos Generales.

- Evaluar la calidad actual de los sedimentos presentes en los humedales Campiche y Los Maitenes con respecto a metodologías validadas y normativas internacionales.

1.5 Objetivos Específicos

- Determinar parámetros fisicoquímicos de los cuerpos de agua en donde se extraerán sedimentos.
- Determinar la composición química elemental de los sedimentos y su variación de concentración en profundidad y respecto a la distancia del complejo industrial Ventanas.
- Definir tendencias de movilidad de elementos.
- Clasificar la contaminación presente en los diferentes sitios, y seleccionar elementos de interés.
- Contrastar las concentraciones medidas respecto a normativas internacionales o concentraciones de referencia.

1.6 Materiales y Metodologías.

1.6.1 Esquema conceptual

Los objetivos mencionados anteriormente se cumplieron a través de las siguientes metodologías, las que son resumidas en el siguiente diagrama (Figura 2):

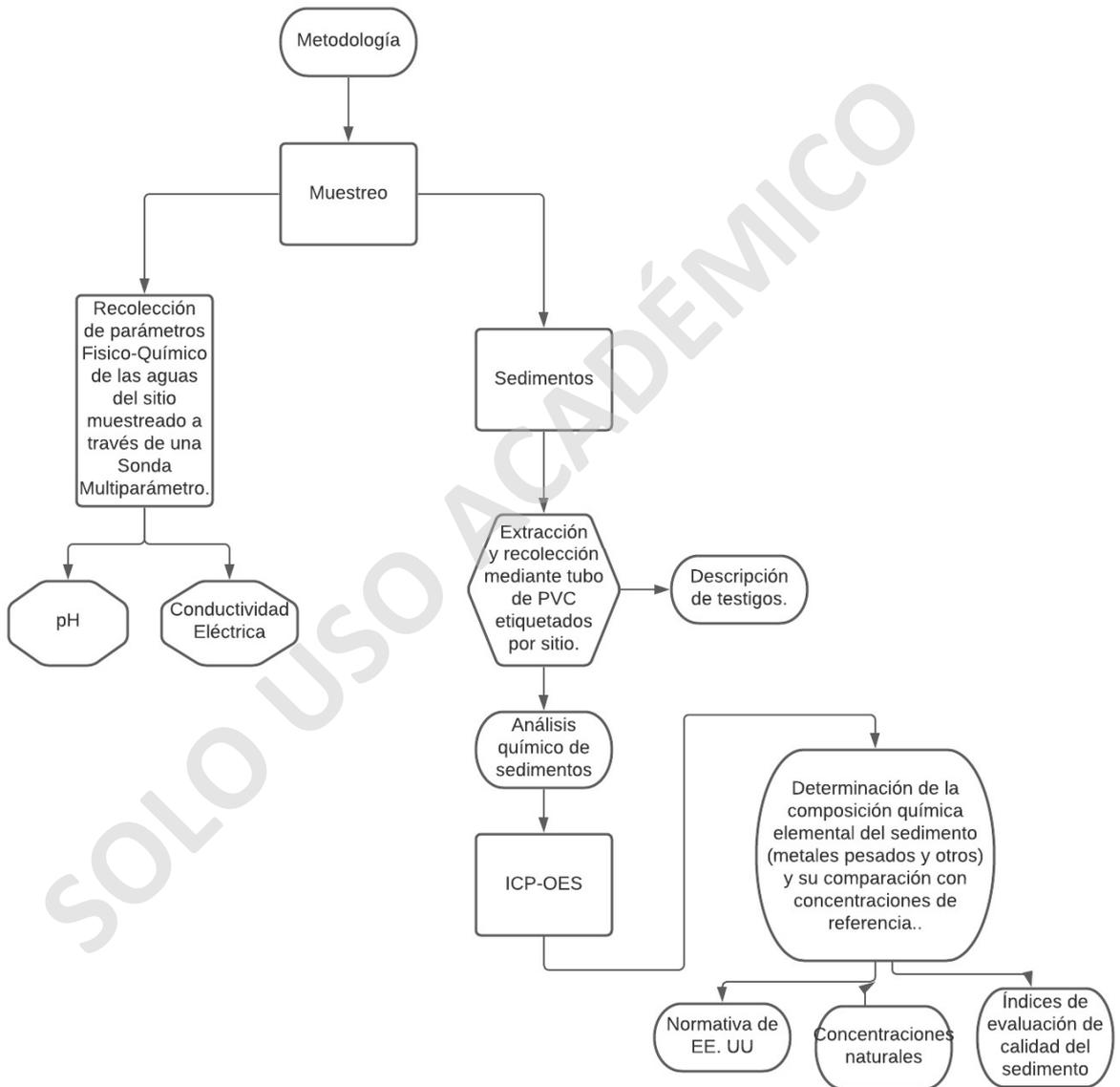


Figura 2. Esquema sobre la metodología realizada.

1.6.2 Metodologías ocupadas en el muestreo

1.6.2.1 Parámetros fisicoquímicos de las aguas

Una vez identificado el lugar seleccionado para extraer el sedimento, se utilizó una sonda multiparámetros Sanxin Modelo SX-751 para medir parámetros fisicoquímicos de las aguas del sitio, tales como pH y conductividad eléctrica. Esta sonda fue calibrada con tres estándares de calibración de pH (4, 7 y 10) y un estándar de calibración para la conductividad eléctrica 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Cabe mencionar que el dato de pH y conductividad eléctrica obtenido es un promedio de 5 datos medidos de cada parámetro de interés, dentro de un radio de 5 metros alrededor de la zona en que fue muestreado sedimento.

1.6.2.2 Sedimentos

Para llevar a cabo una caracterización química del sedimento se analizó la composición química elemental de los sedimentos. De manera que fueron extraídas 4 muestras de sedimentos a través de un tubo de PVC en cada sitio definido, el cual fue ambientado y adaptado para que cumpla la función de un tubo Auger en cada uno de los 5 sitios propuestos en la sección “Plan de muestreo”.

Posteriormente, el tubo de PVC fue envuelto con Aluplast en los extremos con el fin de mantener aislada cada muestra y no mezclar, ni perder material de cada sitio. Por último, las muestras se almacenaron en un cooler a baja temperatura (4°C) para su posterior análisis químico mediante el uso de ICP-OES con el fin de medir la concentración de metales y metaloides de los sedimentos, mediante una digestión de 4 ácidos (ácido clorhídrico, ácido nítrico, ácido fluorhídrico y ácido perclórico).

1.6.2.3 Extracción de la muestra

A continuación, se resume la metodología aplicada para la extracción de los testigos en cada sitio, con la finalidad de hacer un muestreo organizado y estandarizado, en cada parada se siguió el siguiente procedimiento:

1. Primero, se identificaron los sitios en donde anteriormente Cabrera (2020) realizó un muestreo de aguas, y se escogieron los puntos en que se extraerá sedimento.
2. Fueron medidos parámetros físico- químicos como pH y CE.
3. Se fotografió el sector, se tomó el punto GPS y se traspasaron los datos recopilados a una libreta en cada sitio.
4. Se muestreó en 4 sitios diferentes en un mismo punto a través de un tubo de PVC de aproximadamente 70 cm de largo (previamente ambientado).
5. Se introdujo el PVC en el sedimento con ayuda de un martillo (15- 60 cm), dependiendo de las características litológicas de cada sitio.
6. Se removió el sedimento de los costados del tubo de PVC y se retiró el tubo del agua tapando la parte inferior y superior.
7. Se selló el tubo con Aluplass, y posteriormente fue puesto el código de identificación de la muestra.
8. Por último, se transportó a un cooler a baja temperatura al laboratorio.

1.6.3 Trabajo de gabinete

1.6.3.1 Preparación de muestra de sedimento para análisis a través de ICP-OES

En trabajo de gabinete, las muestras fueron extraídas de los tubos de PVC mediante la ayuda de un dremel, el cual fue utilizado para cortar en 3 partes paralelas el tubo de forma longitudinal para posteriormente extraer el testigo.

Una vez que el testigo fue extraído, este fue puesto en una “bandeja de sondajes” previamente descontaminada. En la bandeja de sondajes, el testigo fue descrito, medido, fueron tomadas fotografías, se retiró la macrobiota y finalmente fueron tomadas submuestras en dos zonas de cada testigo correspondientes a la profundidad superior de 0 a 7 cm e inferior de 15 a 22 cm. Por último, el sedimento seleccionado fue guardado en bolsas de polietileno y etiquetados para ser enviado al laboratorio AGQ Chile.

El etiquetado se basó en el nombre del sitio: HC (humedal Campiche), HM (humedal Los Maitenes) y EP (estero Puchuncaví), y el respectivo número del sitio, los cuales se definieron por ser sitios que cuentan con datos de calidad hidroquímica del agua en el estudio de Cabrera (2020). Por último, se le asignó el rango de profundidad al que pertenece la muestra extraída (0-7 cm o 15-22 cm).

Etiqueta: HC-HM-EP + Nro. del sitio + profundidad de sedimento correspondiente (0-7cm o 15-22 cm).

A continuación, se resume los procesos realizados para la extracción del tubo de muestreo y preparación de la muestra para ser enviada al laboratorio:

1. Antes de preparar las muestras los tubos de PVC fueron conservados a baja temperatura por 24-48 horas.
2. En el trabajo de gabinete los tubos de PVC fueron previamente lavados por la zona externa, y se procedió a recuperar el testigo de dentro de los tubos mediante un dremel.
3. Se tomaron datos del testigo recuperado tales como longitud, y su descripción (color, tamaño de grano, selección del grano, contenido de materia orgánica y contenido de restos de

organismos). Además, se tomó foto de cada testigo recuperado y fueron recolectados datos de las partes sub-muestreada (0 a 7 cm y 15 a 22 cm).

4. Con los 4 testigos recuperados en cada sitio, se recolectó un peso mínimo por submuestra de 400 gr por sitio. Posteriormente, fue etiquetada cada bolsa de polietileno con el nombre del lugar correspondiente (HM- HC o EP + Nro. del sitio + profundidad correspondiente 0-7 cm o 15-22 cm).

5. Por último, se mantuvo la muestra en frío mediante un cooler, y fue llevado al laboratorio.

1.6.4 Análisis Geoquímico

Los análisis geoquímicos se realizaron en el laboratorio AGQ Chile, donde se analizaron un total de 10 muestras de sedimento. Se ocupó el método de digestión 4 ácidos a través de un ICP-OES, con el fin de medir los metales y metaloides presentes en los sedimentos, midiendo un total de 50 concentraciones químicas de 25 elementos diferentes, además de 6 elementos que se encuentran por debajo del límite de detección (Berilio, Bismuto, Estaño, Lantano, Plata y Wolframio).

1.6.5 Herramientas de interpretación de datos

1.6.5.1 Base de datos e información del sitio de muestreo

Los datos obtenidos se organizaron en Microsoft Excel, esta incluye los parámetros fisicoquímicos analizados como pH, conductividad eléctrica y los elementos que se encuentran en los sedimentos, junto a su concentración. De esta manera, se generó un mapa de la zona con los sitios muestreados con los respectivos datos sobre la información recopilada de sedimentos. Además, se complementó la información recolectada de los sedimentos con los datos reportados de una investigación previa sobre calidad hidroquímica del agua en el estudio de Cabrera (2020).

1.6.5.2 Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r) cuantifica la dependencia lineal entre 2 variables definidas como X e Y. Matemáticamente el coeficiente de correlación de Pearson es definido por la siguiente fórmula matemática, según Peiró, 2015:

$$r_{xy} = \frac{\sum Cov_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Ecuación 1. Fórmula matemática utilizada para calcular la correlación de Pearson.

Donde:

r_{xy} : Correlación de Pearson

Cov_{xy} : Covarianza entre el valor “X” e “Y”

σ_x : Desviación típica de X

σ_y : Desviación típica de Y.

El resultado del coeficiente de correlación de Pearson se encuentra entre $-1 \leq r_{xy} \leq 1$, ya que este es medido es valor absoluto. Aunque el signo (-) o (+) indica el tipo de relación que presentan las dos variables investigadas (Peiro, 2015):

Tabla 5. Interpretación de correlación de Pearson.

Tipo de relación	Valor	¿Qué significa?
Correlación perfectamente negativa	-1	A medida que el valor de X aumenta, Y disminuye
No existe correlación	0	No hay correlación entre variables
Correlación perfectamente positiva	+1	A medida que el valor de X aumenta, Y aumenta.

1.6.5.3 Mapas de distribución de metales pesados

Se generaron mapas de distribución de concentración de metales pesados en la zona delimitada como “límite de humedales” (Figura 4), a través de ArcGis con su herramienta de interpolación *B-Spline*. Esto nos permite observar de mejor forma las concentraciones medidas respecto a la distancia del CIV e incluso nos permite observar diferencias de concentración en profundidad al comparar los mapas generados en la profundidad de 0 a 7 y 15 a 22 cm para cada elemento de interés.

1.6.6 Softwares utilizados

- Excel: Ordenar y analizar los datos obtenidos a través de gráficos, comparando los datos obtenidos con un *background* y normas de EE. UU. para suelos.
- ArcGIS: Creación de imágenes y base de datos dinámica.
- Rstudio: Generación de gráficos.
- Illustrator: Edición de imágenes.

1.6.7 *Background* geológico y normas de referencia

Los resultados obtenidos se compararon con un *background* geológico de la comuna de Puchuncaví, realizado por PGS Chile en el año 2015. Este *background* contiene las concentraciones naturales de elementos como Vanadio, Manganeso, Hierro, Níquel, Cobre, Zinc, Arsénico, Molibdeno, Cadmio, Plomo y Antimonio.

La PGS Chile (2015), determinó la concentración natural de metales y metaloides en suelos (Tabla 6), y calculo el *background* geológico como el límite superior del intervalo de confianza del 95% de la concentración media del elemento en sitios no contaminados. De esta manera, asegura que las diferencias producto a la variabilidad natural estén incorporadas dentro de la estimación del *background*.

Tabla 6. Background realizado en la comuna de Puchuncaví, por la PGS (2015) (Anexo 6).

	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Pb	Hg
	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
Background geológico	133.90	917.40	5.48	11.08	89.44	95.08	7.64	0.95	1.54	0.18	0.90	13.60	36.79

Fuente: PGS (2015).

Por otro lado, se comparó con la normativa de suelos de EE. UU. (*USEPA*), esto debido a la recomendación del MMA en la “Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes”, al ser un país que posee más experiencia y desarrollo en relación con la evaluación de riesgo de la salud (Ministerio del medio ambiente, 2012). Además, en la normativa de EE. UU. se encuentran referenciadas la mayoría de los elementos de interés para este estudio, permitiendo comparar la concentración de elementos en cada sitio y en cada profundidad investigada respecto a la concentración máxima de cada elemento permitida en suelos de EE. UU., (Anexo 15).

Chile no cuenta con una normativa límite para suelos y sedimentos. Por lo tanto, se utilizó la normativa de EE. UU. como referencia de las concentraciones máximas permitidas en suelos, según la recomendación de la “Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes”. Las concentraciones naturales de los elementos químicos del suelo son derivados de procesos no antrópicos, por lo que un entendimiento de la geología y sobre los procesos formadores de suelo, permite generar metodologías para obtener una aproximación de las concentraciones de suelos derivados del material parental (PGS, 2015).

1.6.8 Índices de calidad de sedimentos

Como se mencionó anteriormente, Chile no cuenta con una normativa que permita evaluar el impacto ambiental de los metales pesados presentes en los sedimentos en el fondo de diversos cuerpos de agua. Autores han realizado comparaciones de las concentraciones de diferentes elementos medidos respecto a concentraciones naturales calculadas dentro de la zona investigada e incluso es comparado utilizando el promedio de la concentración de elementos medidos en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003), según 4 índices comparables entre sí que muestran la calidad actual de los sedimentos (Müller, 1979; Sutherland, 2000; Hakanson, 1980; Wei & Yang, 2010).

1.6.8.1 Índice de Geoacumulación (Igeo)

El índice de geoacumulación es evaluado cuantitativamente la contaminación en sedimentos por metales pesados. Este índice estima la contaminación mediante la comparación de las concentraciones de metales preindustriales y recientes en los suelos (Weisse, 2015). Müller (1979), definió el índice de geoacumulación con la siguiente fórmula matemática:

$$Log_2 \frac{Cn}{1,5 \times Bn}$$

Ecuación 2. Índice de geoacumulación definido por Müller (1979).

Donde:

- Cn: Concentración medida del metal en la muestra de sedimento extraída.
- Bn: Valor *background* geoquímico en la corteza terrestre superior (Wedepohl, 1995)
- 1,5: Factor de corrección por fluctuaciones naturales (Valor Constante).

Müller (1979) clasificó el índice de geoacumulación en 7 grupos (Tabla 7), entre valores que van desde Igeo <0 definidos como no contaminados, y valores de Igeo > 5 definido como extremadamente contaminados.

Tabla 7. Clasificación de los valores obtenidos según el índice de geoacumulación (Müller, 1979).

Índice Igeo	Interpretación
<0	No contaminado
0 a 1	No contaminado a moderadamente contaminado
1 a 2	Moderadamente contaminado

2 a 3	Moderadamente a altamente contaminado
3 a 4	Altamente contaminado
4 a 5	Altamente a extremadamente contaminado
>5	Extremadamente contaminado

1.6.5.2 Factor de Enriquecimiento (EF)

El factor de enriquecimiento es basado en la estandarización de la concentración de un elemento muestreado contra un elemento de referencia inmóvil que suele ser Hierro, Escandio, Titanio, Aluminio, Calcio o Manganeso (Weisse, 2015). El valor EF informa acerca del origen natural o antropogénico de acuerdo con la escala propuesta por Sutherland (2000). La fórmula que representa matemáticamente al factor de enriquecimiento es:

$$EF = \left(\frac{Me}{X} \text{ Muestra} \Big/ \frac{Me}{X} \text{ Background} \right)$$

Ecuación 3. Fórmula utilizada para calcular el factor de enriquecimiento (EF).

Donde:

- Me (muestra): Es la concentración del elemento N en la muestra extraída.
- X (Muestra): Es la concentración del elemento de referencia utilizado en la muestra evaluada (elemento inmóvil).
- Me (*Background*): Concentración del elemento N en la corteza cortical o *background* geológico (Wedepohl, 1995).
- X (*Background*): Concentración del elemento de referencia en la corteza cortical (elemento inmóvil) (Rudnick & Gao, 2003).

El factor de enriquecimiento se clasificado en 4 categorías (Tabla 8), según Sutherland (2000):

Tabla 8. Clasificación de factor de enriquecimiento Sutherland (2000).

EF	Interpretación
<2	Deficiencia de enriquecimiento mínimo
2 a 5	Moderado enriquecimiento
5 a 20	Enriquecimiento significativo
20 a 40	Muy alto enriquecimiento
>40	Enriquecimiento extremadamente alto

Para determinar el factor de enriquecimiento se necesita definir un elemento inmóvil. Estos elementos son componentes de minerales resistentes a la meteorización química, por lo que son elementos que no participan activamente en los ciclos geoquímicos y tampoco tienen un aporte antropogénico significativo (Boës *et. al*, 2011).

En este estudio fue utilizado el Titanio como elemento inmóvil, este elemento se seleccionó por ser el elemento que se encuentra con una menor variación de concentración en los sitios investigadas y sin un aporte antropogénico significativo (Navarro *et. al*, 2006; Weisse, 2015).

Además, se utilizó de concentración natural de referencia el *background* medido en la comuna de Puchuncaví por la PGS (2015) y para los elementos de interés faltantes se calculó mediante la concentración promedio del elemento en la corteza terrestre en el estudio realizado por Rudnick & Gao (2003).

SOLO USO ACADÉMICO

1.6.5.3 Factor de contaminación y Grado de contaminación

El factor de contaminación (C_f) es la razón de la concentración medida del elemento sobre el valor *background* de la corteza (Wedephol, 1995).

Hakanson (1980) clasifica el factor de contaminación en 4 grupos (Tabla 9) desde $C_f < 1$ (baja contaminación) a $C_f > 6$ (muy alta contaminación).

Tabla 9. Clasificación del Factor de Contaminación (Hakanson, 1980).

C_f	Interpretación
<1	Baja contaminación
1 a 3	Moderada contaminación
3 a 6	Considerable contaminación
> 6	Muy alta contaminación

Este índice deriva en el grado de contaminación (C_{DEG}) que corresponde a la suma de los factores de contaminación calculados para cada elemento. C_{DEG} es clasificado en 4 grupos (Tabla 10) desde $C_{DEG} < 8$ (baja contaminación) a $C_{DEG} > 32$ (muy alta contaminación).

Tabla 10. Clasificación de grado de contaminación (C_{DEG}) definido por Hakanson (1980).

C_{DEG}	Interpretación
<8	Baja contaminación
8 a 16	Moderada contaminación
16 a 32	Considerable contaminación
> 32	Muy alta contaminación

Por último, a través del cálculo del grado de contaminación (C_{DEG}), puede ser calculado el índice integrado de contaminación (IPI) que es la media de la suma de los factores calculados (Weisse, 2015). Wei & Yang (2010) utilizan el índice IPI y clasifican el índice integrado de contaminación desde $IPI < 1$ (baja contaminación) a $IPI > 5$ (contaminación extremadamente alta).

Tabla 11. Clasificación de índice de contaminación integrado (IPI), según Wei & Yang (2010).

IPI	Interpretación
<1	Nivel de contaminación bajo
1 a 2	Nivel de contaminación moderado
2 a 5	Nivel de contaminación alto
> 5	Nivel de contaminación extremadamente alto

1.7 Técnicas Analíticas

A continuación, se presenta información sobre la técnica analítica utilizada en la presente investigación para medir la concentración elemental en sedimentos:

1.7.1 ICP-OES

El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización a presión atmosférica que junto a un espectrómetro de emisión óptica (OES) constituye el equipo ICP-OES. Esta técnica de análisis multielemental es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica, a excepción de C, N, O, H, F, gases nobles, algunas tierras raras y otros elementos poco frecuentes, en concentraciones que van desde % hasta ppb ($\mu\text{g}/\text{kg}$) (Espectroscopía de emisión atómica ICP-OES, 2019).

La muestra en forma líquida se transporta por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador, donde es transportado en forma de aerosol. Este aerosol, es transportado a la zona de ionización que consiste en un plasma altamente energético y eléctricamente neutro, compuesto por iones, electrones y partículas neutras, comúnmente de argón (Jiménez *et. al*, 2020).

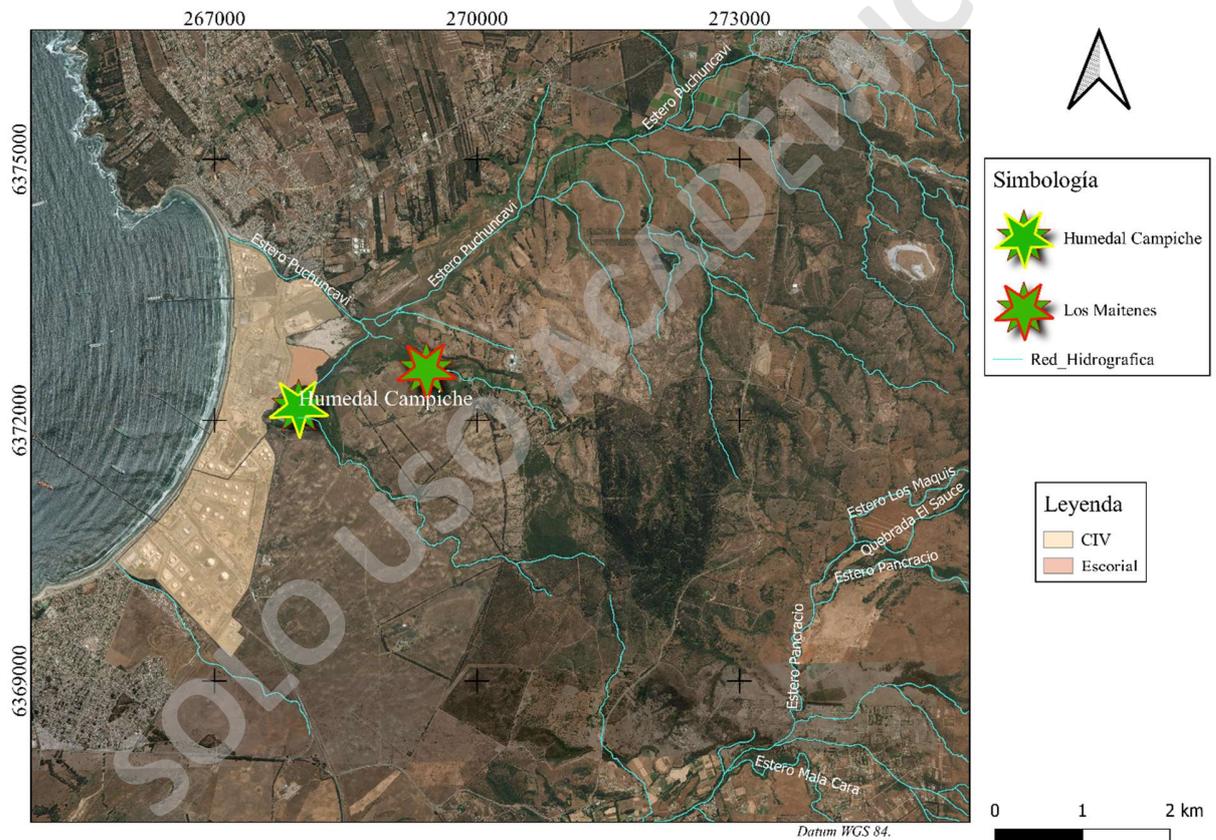
El flujo de gas argón al ser sometido a la acción de un campo electromagnético alta frecuencia de una corriente continua, llega a alcanzar temperaturas de hasta $8.000\text{ }^\circ\text{K}$, de manera que los átomos presentes en la muestra son excitados (ionizados) (Jiménez *et. al*, 2020).

Los iones tienden a volver a su estado fundamental, de manera que emiten radiaciones de una longitud de onda que caracteriza a cada elemento. La radiación pasa a través de un sistema óptico que separa la radiación según su longitud de onda. Por último, un detector mide la intensidad de cada radiación relacionando esta con la concentración de cada elemento en la muestra (Jiménez *et. al*, 2020).

1.8 Plan de muestreo

En la Figura 3 se presentan los lugares definidos en que se extrajo sedimentos contenidos debajo de los cuerpos de agua del humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví. Dichos lugares han sido seleccionados pues cuentan con datos hidroquímicos levantados el año 2019. Para esto fueron elegidos 5 de los 14 sitios con datos hidroquímicos del estudio de Cabrera (2020), fijándose principalmente en características como la cercanía al CIV, variación de la concentración de elementos disueltos en el agua y variación de pH entre puntos.

Figura 3. Planificación de muestreo en humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví. El *datum* utilizado es



WGS 84.

Los lugares seleccionados para el muestreo, se encuentran ubicados específicamente 2 sitios en el humedal Campiche, 2 sitios en el humedal Los Maitenes y 1 sitio en el estero Puchuncaví, donde serán extraídas un conjunto de muestras de sedimento (Figura 4). Por cada sitio se muestreo 4 veces con el fin de obtener el peso requerido de muestras para el análisis a través de ICP-OES (400 gr. aproximadamente). El primer lugar seleccionado, corresponde al humedal Campiche (HC) en las cercanías del escorial, donde serán recolectadas 2 muestras de sedimento (HC-4 y HC-7), representado en la Figura 4 por la simbología hexagonal “Muestreo sedimento”.

El segundo lugar seleccionado es el humedal Los Maitenes (HM) donde se pretende recolectar 2 muestras de sedimento (HM-1 y HM-3), representado en la Figura 4 por la simbología hexagonal de color naranja.

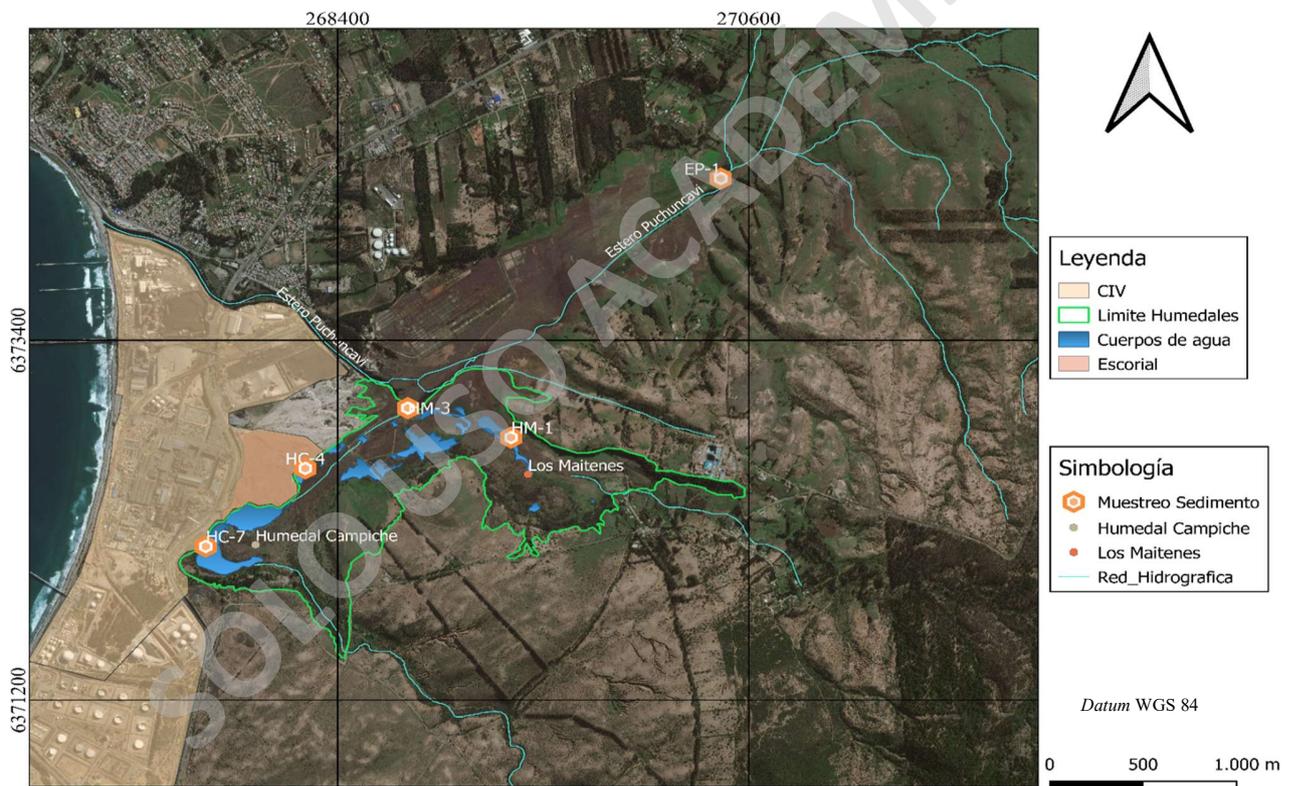


Figura 4. Ubicaciones en donde se extrajo sedimentos correspondientes al humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví. El datum utilizado es WGS 84.

Por último, se definió el sitio EP-1 en la zona de influencia del estero Puchuncaví, con el fin de comparar las concentraciones en la zona aledaña del CIV con una zona más distal dentro de la comuna de Puchuncaví donde anteriormente fueron tomados datos sobre la calidad hidroquímica de aguas.

Tabla 12. Información de sitios definidos para realizar el muestreo

Sitio	Nombre	Lugar (HC/HM/EP)	Datum/ Huso	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
Sitio 1	HC-4_0-7	Humedal Campiche	WGS 84 / 19 S	268227	6372617
Sitio 1	HC-4_15-22	Humedal Campiche	WGS 84 / 19 S	268227	6372617
Sitio 2	HC-7_0-7	Humedal Campiche	WGS 84 / 19 S	267694	6372140
Sitio 2	HC-7_15-22	Humedal Campiche	WGS 84 / 19 S	267694	6372140
Sitio 3	HM-1_0-7	Humedal Los Maitenes	WGS 84 / 19 S	269328	6372806
Sitio 3	HM-1_15-22	Humedal Los Maitenes	WGS 84 / 19 S	269328	6372806
Sitio 4	HM-3_0-7	Humedal Los Maitenes	WGS 84 / 19 S	268776	6372986
Sitio 4	HM-3_15-22	Humedal Los Maitenes	WGS 84 / 19 S	268776	6372986
Sitio 5	EP-1_0-7	Esteros Puchuncaví	WGS 84 / 19 S	270451	6374390
Sitio 5	EP-1_15-22	Esteros Puchuncaví	WGS 84 / 19 S	270451	6374390

2. Antecedentes Generales

2.1 Zona de estudio

El humedal Campiche y el humedal Los Maitenes se encuentran ubicados en la zona norte de la región de Valparaíso, más específicamente en la comuna de Puchuncaví aledaño a la carretera F-30-E (Figura 5). Puchuncaví se encuentra limitado hacia el sur por Quintero y Quillota, hacia el norte por Zapallar, al este por las comunas de Nogales y La Cruz, y al oeste por el Océano Pacífico, presentando una superficie de 300 km² y dividiéndose en 22 localidades, en donde se distribuyen 18.546 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017).

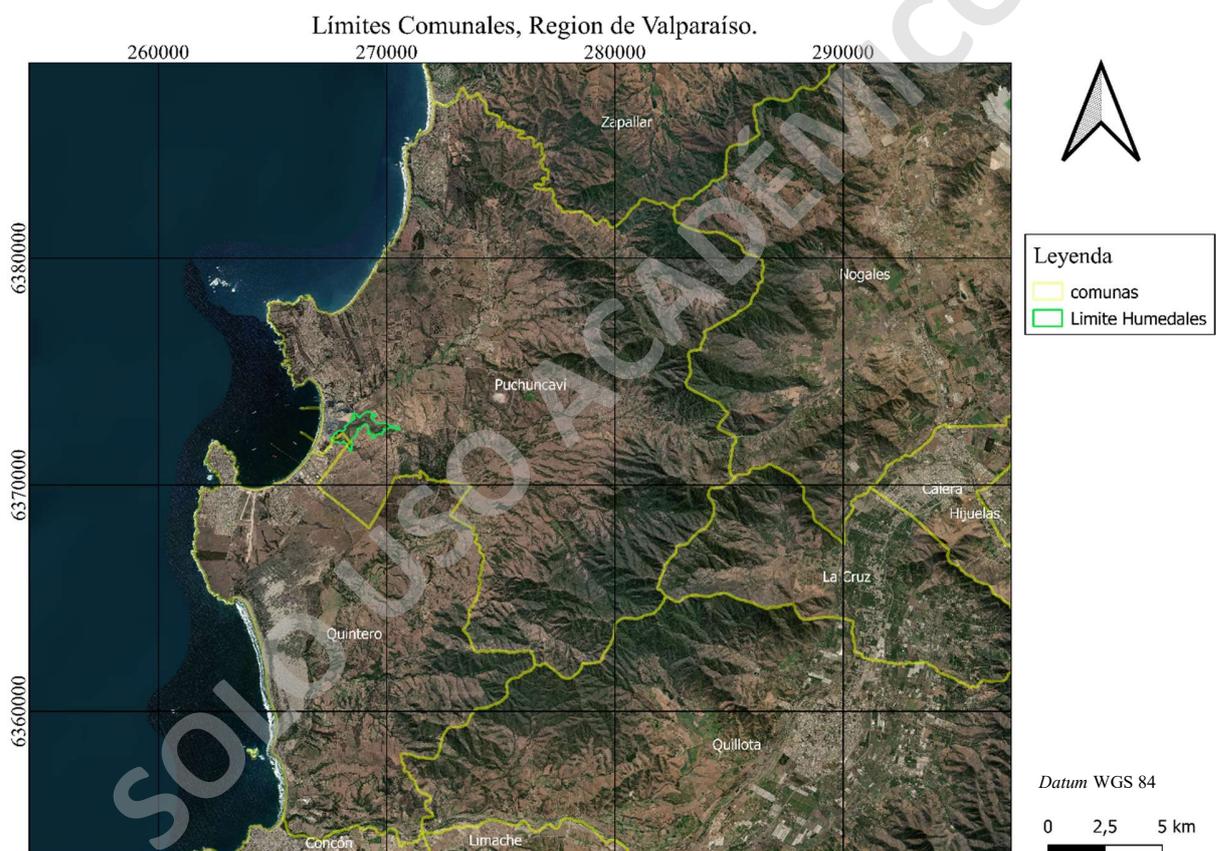


Figura 5. Área de estudio general con sus respectivos límites, Zapallar por el norte; Quillota y Quintero por el sur; Nogales y La Cruz por el este. El datum utilizado es WGS 84.

Desde sus orígenes la principal actividad económica de la zona fue basada en la agricultura, ganadería y pesca artesanal en las zonas costeras, posteriormente con la construcción del ramal ferroviario San Pedro-Quintero y la construcción de caminos se originó una actividad turística básica. En 1958 comienza un foco industrial con la llegada de Chilectra y posteriormente en 1964 con la inauguración de la fundición y refinería de Ventanas, con el pasar de los años ha ido creciendo el número de empresas en la zona costera, contando actualmente con al menos 15 industrias de diferente tipo en el área (Folchi, 2006; PGS, 2015).

2.2 Hidrología

La hidrología de la comuna Puchuncaví se encuentra dentro de las subcuencas costeras entre el estero Catapilco y río Aconcagua (Figura 6), dentro de la comuna se destaca el sistema de escorrentía superficial alimentado en su totalidad por las lluvias del sector que es conocido como estero Puchuncaví, que tiene una longitud de 15.314 m (DGA, 2015). Este estero se distribuye en las zonas aledañas al CIV formando hacia el SW de su desembocadura, sitios con una gran biodiversidad de especies como lo es el humedal Campiche y humedal Los Maitenes (Figura 6 y Figura 7).

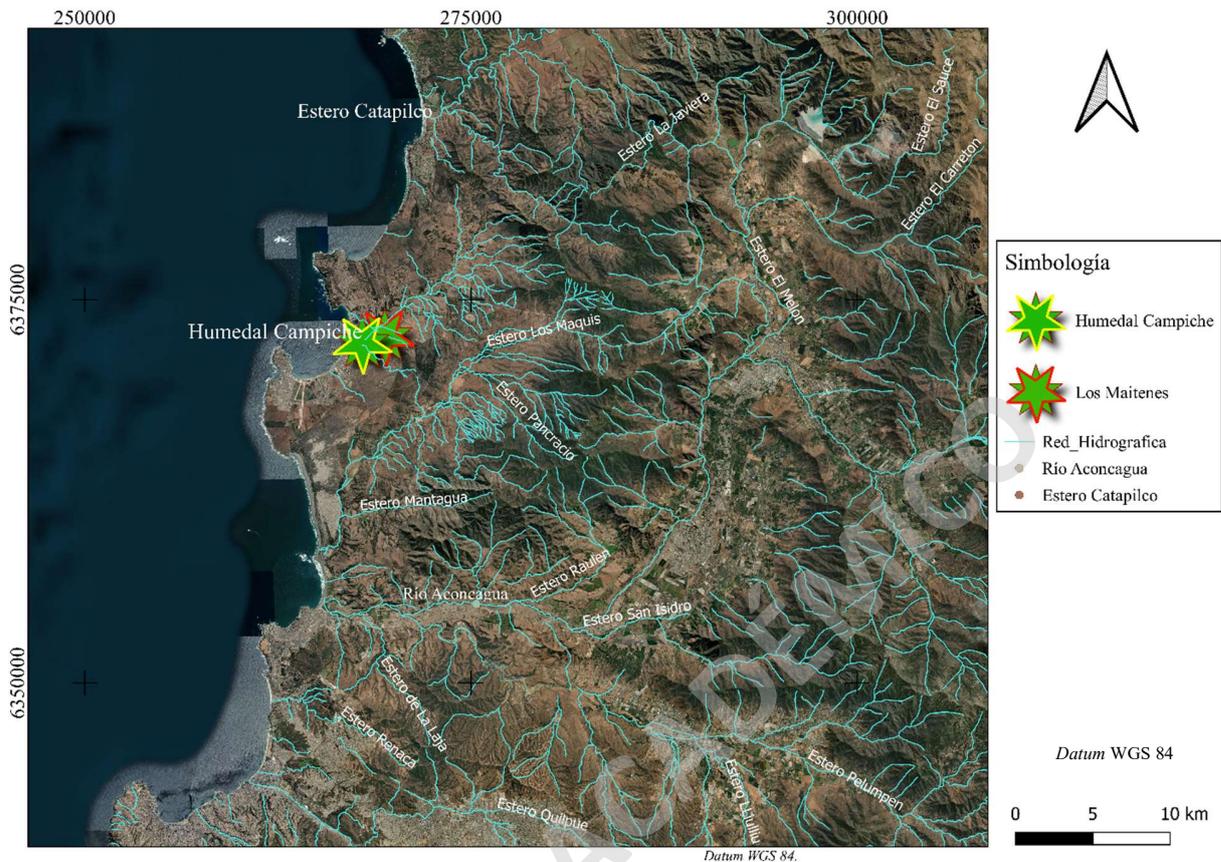


Figura 6. Área de estudio, se logra observar la ubicación del humedal Campiche y humedal Los Maitenes que se encuentran entre la cuenca costera del estero Catapilco y río Aconcagua. El datum utilizado es WGS 84.

El humedal Campiche es un ecosistema permanente con variaciones hidrométricas, con aporte de aguas provenientes de la cuenca sur y del estero Puchuncaví, de alimentación de forma pluvial y escorrentía superficial, este se encuentra formado por 3 espejos de agua que se encuentran separados entre sí por acumulaciones de escorias provenientes de procesos mineros (Fernández, 2011). Este sitio tiene una superficie aproximada de 8 ha en verano y se han llegado a reconocer cerca de 60 especies de aves migratorias y residentes en este sitio de gran riqueza ecológica (Fernández, 2011). Por último, es importante mencionar que el humedal se encuentra sobre un cuerpo de agua subterráneo de aproximadamente 6 km² (Pavón, 2017).

Por su parte, el humedal Los Maitenes es un cuerpo de agua de menor dimensión que se encuentra adyacente al humedal Campiche, este sitio se encuentra en fase de evaluación para ser declarado santuario de la naturaleza, se han registrado 115 especies de flora, 24% endémicos y 36% nativos, además de registrar 68 tipos diferentes de especies entre aves, mamíferos, anfibios y reptiles, 9% endémicos y 19% en alguna categoría de conservación (Negrete, 2015).

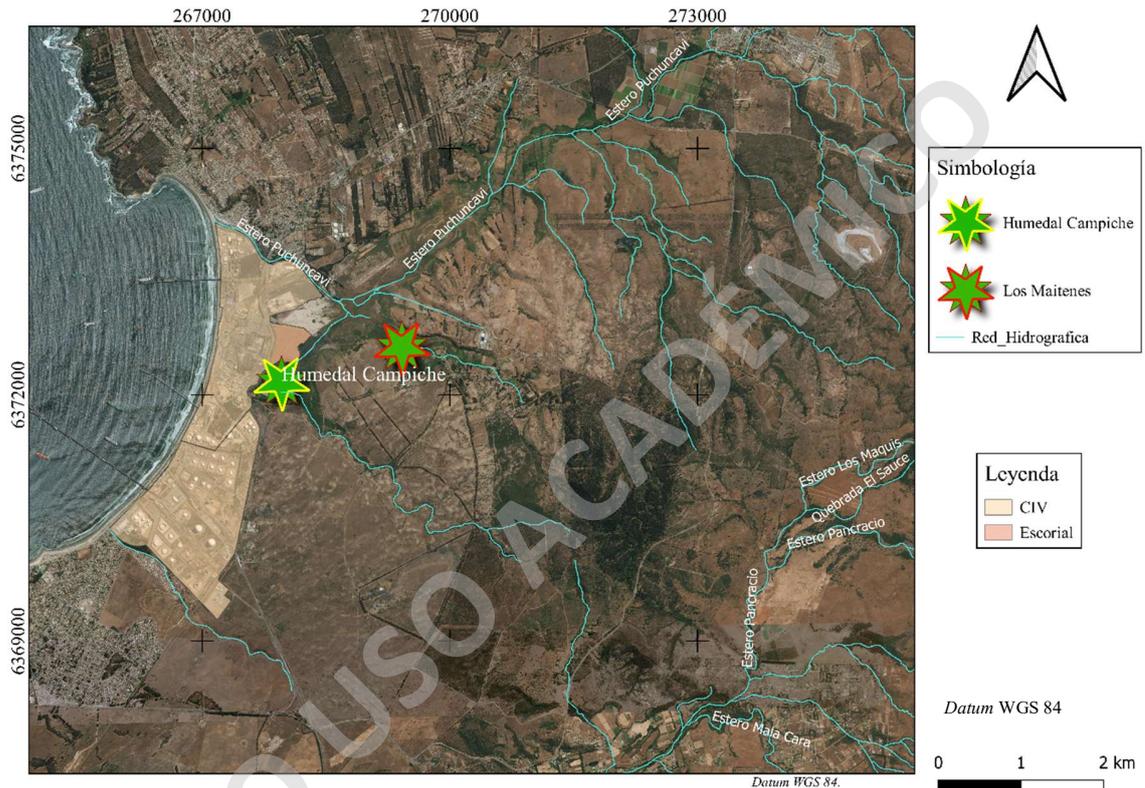


Figura 7. Red hidrológica de la comuna de Puchuncaví (MMA, 2015). El datum utilizado es WGS 84.

2.3 Clima

El clima de la zona de Puchuncaví ha sido clasificado como un clima templado cálido con influencia mediterránea (Csc), influyendo en gran medida la corriente fría de Humboldt en el comportamiento de las temperaturas, humedad y precipitaciones del sector, estas últimas son concentradas en los meses de invierno, con un promedio de 349 mm al año y entre 6 a 8 meses estaciones seca. Las oscilaciones térmicas son pequeñas por la influencia reguladora del océano, existiendo una temperatura promedio aproximadamente de 15°C. (Köppen, 1948; Vera, 2012).

2.4 Geomorfología

2.4.1 Geomorfología local

El área de estudio se encuentra dentro de las planicies litorales y cuencas del sistema cordillerano costero, morfológicamente pueden ser distinguidos tres zonas (Municipalidad de Puchuncaví, 2017):

Sector litoral: Abarca las playas y arenales entre el límite comunal con Quintero y la desembocadura del estero Campiche y estero Catapilco, reconociéndose formaciones de dunas del cuaternario, las que evidencian la acción del viento SW que afecta la zona.

Planicie: se presenta desde el litoral hasta aproximadamente la cota 200 (m), lo constituyen suaves colinas, las cuales pertenecen a la Fm Horcón, que fue una de las últimas disposiciones originadas en el terciario hacia el interior del continente.

La cordillera de la costa que limita la comuna por el oriente y sur, y posee una altura máxima de 1.135 metros en el cerro Puntas Trepadas. Por el norte, existe una planicie correspondiente al valle La Canela, dando inicio al estero de su mismo nombre.

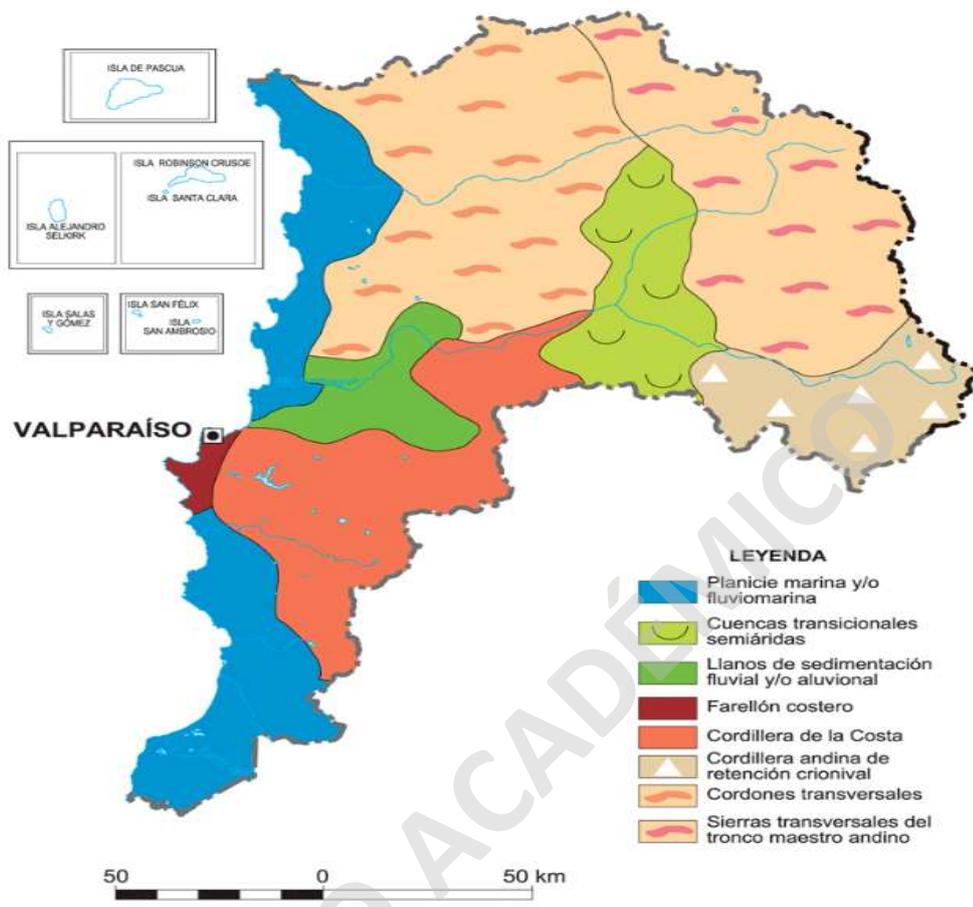
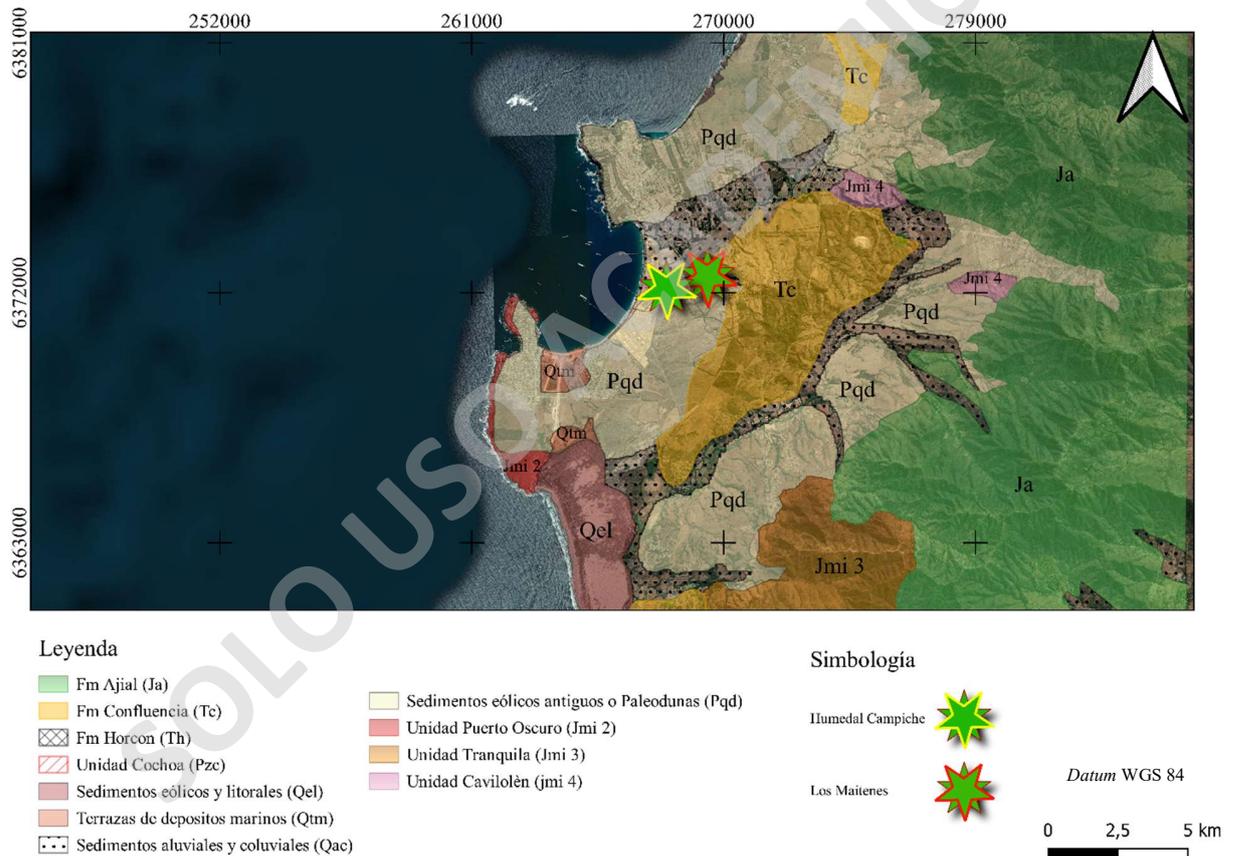


Figura 8. Unidades de relieve de la región de Valparaíso (Börgel, 1983).

2.5 Marco Geológico

La geología de la zona se caracteriza por aflorar 3 formaciones principalmente: Una intrusiva, volcano-sedimentaria y sedimentaria. La primera unidad corresponde a la Superunidad Mincha, este se encuentra compuesto por dioritas, tonalitas y granodioritas, entre otras. Una segunda unidad presente en la zona es la Fm Ajjal, la cual es una formación volcano-sedimentaria, compuesta por lavas, tobas, brechas y rocas sedimentarias lenticulares. Por último, se encuentra la Fm Confluencia, la cual es una formación sedimentaria, compuesta por conglomerados, areniscas, brechas y limonitas poco consolidadas (Figura 9).

Figura 9. Geología de la zona de la bahía quintero, observándose: Jmi2: Unidad Puerto Oscuro; Jmi4: Unidad



Cavilón: Ja: Formación Ajjal; Tc: Formación Confluencia; Pqd: Sedimentos eólicos antiguos o Paleodunas; Th: Formación Caleta Horcón; Qel: Sedimentos eólicos y litorales; Qtm: Terrazas de depósitos marinos; Qac: sedimentos aluviales y coluviales (Extraído de Mapa Quillota – Portillo, Rivano et al., 1993). El datum utilizado fue WGS 84.

2.5.1 Estratigrafía

2.5.1.1 Formación Ajial (Ja)

Thomas, 1958; Piráces & Maksaev, 1977

Sus afloramientos se extienden desde el cerro Imán hasta el sector de Olmué por el sur, con una potencia de 1405 m (Cancino, 1992). Aparece como una franja elongada NS y se encuentra sobreyaciendo en contacto concordante a la Fm Quebrada del Pobre, e infrayace de manera concordante a la Fm Cerro Calera. Se encuentra intruida por granitoides Jurásicos (prolongación sur de la Superunidad Mincha).

La Fm Ajial este compuesto por tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas y riódacíticas, asociadas a pórfidos andesítico- dacíticos y escasas intercalaciones sedimentarias de conglomerados, areniscas y pelitas calcáreas siendo los más importantes las que afloran al norte del río Petorca.

Las tobas son de color gris a pardo, con fragmentos pumíceos entre 5 a 45%, no mayores a 1 cm de diámetro inmersos en una matriz cuarzo feldespática, esta matriz presenta una alteración a clorita- epidota – sericita. Además, fue reconocida la presencia de calcita.

Las brechas volcánicas presentan color pardo rojizo con clastos que alcanzan los 10 cm de diámetro de composición andesítica (fragmentos presentan textura porfírica y hialopíliticas), riódacíticas (fragmentos pumíceos y riódacitas) y en menor proporción se encuentran clastos sedimentarios.

Por la abundancia relativa de los clastos volcánicos se pueden diferenciar entre brechas volcánicas máficas o félsicas; variando los clastos entre el 10 a 40% del volumen de las brechas.

Las lavas andesítico- basálticas presentan un color pardo oscuro a pardo rojizo, textura porfírica con fenocristales de plagioclasa (5 a 30%), subhedral (algunas lavas presentan cristales de 2 a 3 cm variedades ocoíticas), clinopiroxenos (1 a 10%), principalmente augita- diópsido. Además, la matriz se encuentra parcialmente desvitrificada.

Los flujos dacíticos son de color gris rojizo a rosado con textura pórfiro- volcanoclastica (Cancino, 1992); se presentan clastos pumíceos alargados, los cristales corresponden a plagioclasa (albita), feldespato potásico y cuarzo, además de escasos pseudomorfos de anfíboles (<0.1%)-La masa fundamental es un agregado criptocristalino con líneas con presencia de alteraciones a sericita, clorita y epidota.

Los conglomerados presentan un color amarillento con clastos volcánicos que alcanzan los 10 cm (andesitas, dacitas y riolitas), la matriz es arena fina a limolita con cemento calcáreo.

Las areniscas presentes son de color amarillento a ocre, variando desde subarcosas a grauvacas, y frecuentemente contienen cemento calcáreo.

Las rocas pelíticas (fangolitas), son principalmente lutitas calcáreas que gradan a veces a calcilutitas y calcoarenitas.

2.5.1.2 Formación Confluencia (Tc)

Rivano & Sepúlveda, 1991

En los valles de la Ligua, Catapilco, Limache y Valle del río Aconcagua se observa aflorar la Fm Confluencia, se distribuyen en terrazas altas y un espesor entre 50 a 100 m. Estas terrazas muestran una distribución superficial parcialmente similar al sistema hidrográfico actual. La Fm Confluencia sobreyace de manera discordante las unidades Jurásicas y Paleozoicas que afloran en la costa, y lateralmente se encuentra interdigitada con la Formación Caleta Horcón (Plioceno), en este sector son cubiertos por sedimentos de origen eólico y aluvial.

La Fm Confluencia es una unidad sedimentaria fluvio-aluvial, poco consolidada. Se encuentra principalmente conformada por gravas y ripios con intercalaciones de arenisca. Se le otorgo una edad del Cenozoico (Mio- Plioceno; 3.5 Ma).

2.5.2 Depósitos

2.5.2.1 Sedimentos eólicos antiguos (Paleodunas- Pqd)

Rivano & Sepúlveda, 1991.

Las paleodunas se encuentran a lo largo de la costa desde el norte del río Quilimarí hasta Concón por el sur. Forman superficies suavemente onduladas que cubren parcialmente las terrazas costeras, depositándose sobre depósitos de la Fm Horcón y los granitoides de la Superunidad Cochoa (Concón) y Mincha (Sector de Quintero). Corresponden a depósitos de areniscas poco consolidadas y bien seleccionadas. Sé le asigno una edad del Plioceno – Pleistoceno.

2.5.2.2 Sedimentos eólicos y litorales recientes (Qel (a))

Spalleti, 1980

Corresponden a acumulaciones costeras actuales, expuestas bajo la forma de playas actuales y dunas respectivamente, se ubican de forma adyacente a la franja costera y su desarrollo es relacionado con los rasgos morfológicos actuales, las playas siempre se desarrollan al norte de puntas con acantilados desarrollados, que crean bahías protegidas de los vientos NNE y de las corrientes costeras en dirección norte, permitiendo la acumulación de arena y siempre a las salidas de las vías de agua que aportan material para la construcción de las playas. Las acumulaciones eólicas comienzan siempre al norte de las playas, de acuerdo con los vientos predominantes NNE, los que transportan desde las playas y 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 observar la clásica forma de medialuna, parabólicas, de tipo barján, características de las dunas crecientes.

2.5.3 Unidades Intrusivas

2.5.3.1 Superunidad Mincha (Jmi3- Jmi4)

Rivano *et al.*, 1985

Constituye gran parte de la cordillera de la costa y planicies litorales. Presenta una orientación NS con un ancho promedio entre los 15 a un máximo de 35 km en el límite sur de la carta de Quillota. La Superunidad Mincha intruye a rocas paleozoicas, rocas triásico- Jurásico Medio. Es principalmente conformado por 3 unidades presentes en la carta de Quillota: Unidad Puerto Oscuro (Jmi-3) compuesto por cuarzodioritas, cuarzomonzodioritas, dioritas y tonalitas; Unidad Tranquilla (leucotonalitas) y Unidad Cavilolén (Jmi-4) compuesto por granodioritas, tonalitas, monzogranitos.

2.6 Laboreos o piques mineros en Puchuncaví.

Según la bibliografía consultada en la zona de Puchuncaví no existen depósitos minerales de mediana o gran minería. Los piques mineros más cercanos se encuentran a aproximadamente a 12 km al este del complejo industrial Ventanas. Los laboreos corresponden a Socavón S/N (sector la Canela), Mina Blanca (localidad Pucalán), La Turca del Cobre y Raíz del Cobre (Muñoz, 2021).

La mineralización existente sería la continuación de la franja metalogénica del Jurásico con depósitos estratoligado de Cobre hospedados en rocas volcánicas, y por depósitos de Cobre- Oro, Oro asociado a vetas en cuerpos plutónicos (Siltoe, 2003).

1. Mina Socavón: La roca caja corresponde a andesitas, esta contiene oxidados de Cobre (malaquita y atacamita) y sulfuros de Cobre (bornita, calcopirita) asociados a vetas de cuarzo, specularita y piritita (Muñoz, 2021).
2. Mina Blanca: La mineralización se alberga en andesitas. Esta presenta oxidados de Cobre (brocantita y crisocola) y oxidados de Hierro (jarosita y hematita) (Muñoz, 2021).
3. Mina Turca del Cobre: La roca caja corresponde a andesitas afaníticas y brechas volcánicas pardo rojizas con crisocola y malaquita (oxidados de Cobre) (Muñoz, 2021).
4. Mina Raíz del Cobre: La roca caja corresponde a lavas andesíticas afaníticas y a esquistos micáceos. Esta se encuentra asociada a una mineralización de calcopirita, bornita, calcopirita. Se identificaron en el desmonte crisocola, brocantita, cuarzo, hematita, calcopirita y bornita (Muñoz, 2021).

3. Resultados

3.1 Concentraciones químicas detectadas y orden de los resultados

Una vez recibida la base de datos de las concentraciones detectadas y cuantificadas a través del método analítico ICP-OES mediante la digestión 4 ácidos. La base de datos se revisó, se ordenó y trabajo en el *software* Microsoft Excel clasificando los 31 elementos detectados.

La clasificación se llevó a cabo por medio de la generación de gráficos de la concentración logarítmica equivalente (Log10) de los 26 elementos en *boxplots*, esto permite ordenar la información en elementos mayoritarios, minoritarios y trazas.

3.2 Elementos mayoritarios, minoritarios y trazas

Entre los 31 elementos detectados, 6 elementos se encontraron bajo el límite de cuantificación. Por lo tanto, se creó un *boxplot* de las concentraciones logarítmicas equivalente (log10) de los 26 elementos medidos (Gráfico 1). De manera que se puede apreciar los elementos mayoritarios (> 1% del peso de la muestra) que sobresalen por su concentración dentro de las muestras analizadas, los cuales son Azufre, Calcio, Sodio, Titanio, Potasio, Magnesio, Aluminio y Hierro. Igualmente se definió los elementos minoritarios (0,1 a 1% del peso de la muestra) que son Bario, Cobre, Estroncio, Fosforo, Manganeso y Zinc. Por último, se clasificaron los elementos traza (< 0,1% del peso de la muestra) que son Arsénico, Cromo, Cobalto, Níquel, Plomo, Vanadio, Molibdeno, Litio, Escandio, Antimonio y Cadmio.

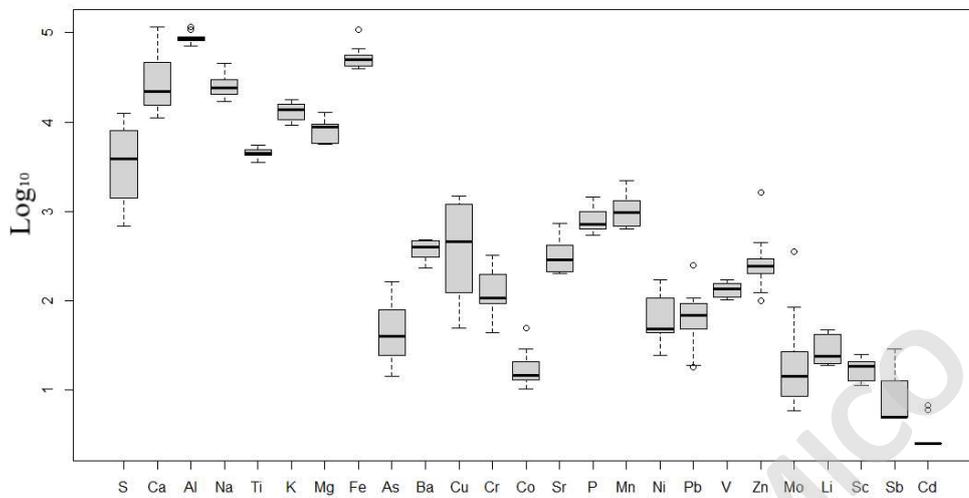


Gráfico 1. Boxplot de las concentraciones logarítmicas de los 31 elementos medidos.

3.3 Resultados y orden de datos en Microsoft Excel.

Las concentraciones obtenidas se ordenaron en la Tabla 13 elaborada en el *software* Microsoft Excel, la cual contiene concentraciones de 23 elementos medidos en la totalidad de los sitios muestreados como: S, Ca, Sc, Na, Ti, K, Mg, Al, As, Ba, Co, Cu, Cr, Sr, P, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, V y Zn. El Cd y Sb presentan concentraciones bajo el límite de cuantificación en algún punto de muestreo.

Tabla 13. Resumen de los datos obtenido tras analizar la concentración química de los sedimentos mediante ICP-OES. Las concentraciones químicas observadas en la tabla se encuentran en unidades de mg/kg.

Tipo de elemento	Muestras recolectadas										
	Elemento	mg/kg									
		HC-7_0-7	HC-7_15-22	HC-4_0-7	HC-4_15-22	HM-3_0-7	HM-3_15-22	HM-1_0-7	HM-1_15-22	EP-1_0-7	EP-1_15-22
Mayoritarios	S	4.322	690	8.026	3.060	10.519	3.491	12.488	5.051	1.427	790
	Ca	47.241	21.450	19.357	11.255	59.144	118.204	22.256	22.354	15.606	13.899
	Na	27.106	29.182	17.332	16.900	23.978	20.552	45.306	33.959	23.942	23.044
	Ti	4.269	4.778	4.409	4.554	4.282	3.513	4.912	4.148	5.270	5.510
	K	15.869	17.871	13.403	13.710	13.829	12.744	10.834	17.067	9.449	9.273
	Mg	5.634	5.699	12.880	9.639	9.615	8.351	8.728	5.613	9.628	9.186
	Al	78.109	83.444	118.031	108.285	84.193	70.852	81.635	87.653	86.618	88.149
	Fe	42.963	48.570	66.692	110.508	48.736	39.375	55.892	42.648	51.763	54.736
Minoritarios	As	75,4	19,1	162	142	79,9	24,5	45,6	14,4	29,9	35,7
	Ba	453	483	399	479	309	235	297	473	396	384
	Cu	1.360	100	1.204	1.487	623	122	454	49,7	454	327
	Cr*	241	323	43,2	156	93	93,1	48,6	198	114	99
	Sr	456	370	246	206	421	742	209	333	220	212
	P	785	639	1.460	1.426	750	657	632	538	1.008	677
	Mn	894	688	2.178	1.488	1.312	654	640	919	1.124	1.058
	Ni	129	173	31,7	78,9	44,6	43,3	24,8	106	52,8	45,6
	Pb	77,1	18,1	108	251	66	94,1	71,4	19	57,8	49,5
	V	114	109	144	146	129	103	143	104	168	175
Zn	296	124	451	1.624	267	292	218	101	205	217	
Trazas	Mo	26	27,1	84,5	358	13	8,47	5,95	16,3	9,96	7,92
	Sb	13	10	17,3	29	5	5	5	5	5	5
	Co	11,3	13,1	28,8	49,9	15,8	10,3	13,9	13,5	19,9	20,8
	Li	19,9	20,1	47,1	41,9	36,3	42,3	26,8	19	19,9	20,8
	Cd	6,07	2,5	6,72	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Sc	11,3	12	25	21	18,6	16	18,8	12,6	20,9	21,8
Parámetros Fco-Qcos	pH	9,21		9,8		9,66		s / d		4,3	
	CE (µS/cm)	2.223		10.000		32.510		s / d		2.440	

Dentro de los elementos detectados, 6 elementos se encontraron en su totalidad bajo el límite de cuantificación dentro de la zona de estudio, los cuales son: Berilio, Bismuto, Estaño, Lantano, Plata y Wolframio. Además, en la zona inferior de la Tabla 13 se observan los parámetros fisicoquímicos obtenidos in situ, como pH y conductividad eléctrica.

Como se mencionó anteriormente en la sección metodológica, las muestras analizadas, se compararon con el *background* de Puchuncaví realizado por PGS (2015), donde se muestran las concentraciones naturales de la zona de elementos como: Antimonio, Arsénico, Cadmio, Cobre, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plomo, Vanadio y Zinc. Además, los elementos medidos se contrastaron respecto a la normativa de EE. UU. (*USEPA*), según las recomendaciones del ministerio del medio ambiente (2012), la cual contiene elementos de referencia como: Al, As, Ba, Cd, Sb, Co, Cu, Cr, Sr, P, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, V y Zn. Por lo que elementos como el S, Ca, Sc, Na, Ti, K, Mg, Be, Bi, Sn, La, Ag y W, no tienen una concentración de referencia para ser comparados.

3.3.1 Parámetros fisicoquímicos de las aguas medidos *in situ*

3.3.1.1 pH

En la Figura 10, se observa la distribución espacial de los sitios en que se midió el pH y el valor de cada pH medido. Los lugares analizados varían entre un rango de pH de 4,3 en el sitio EP-1 hasta un pH de 9,8 en el sitio HC-4. La mediana de los datos obtenidos es de 9,4 y con un promedio de 8,2 en los sitios investigados.

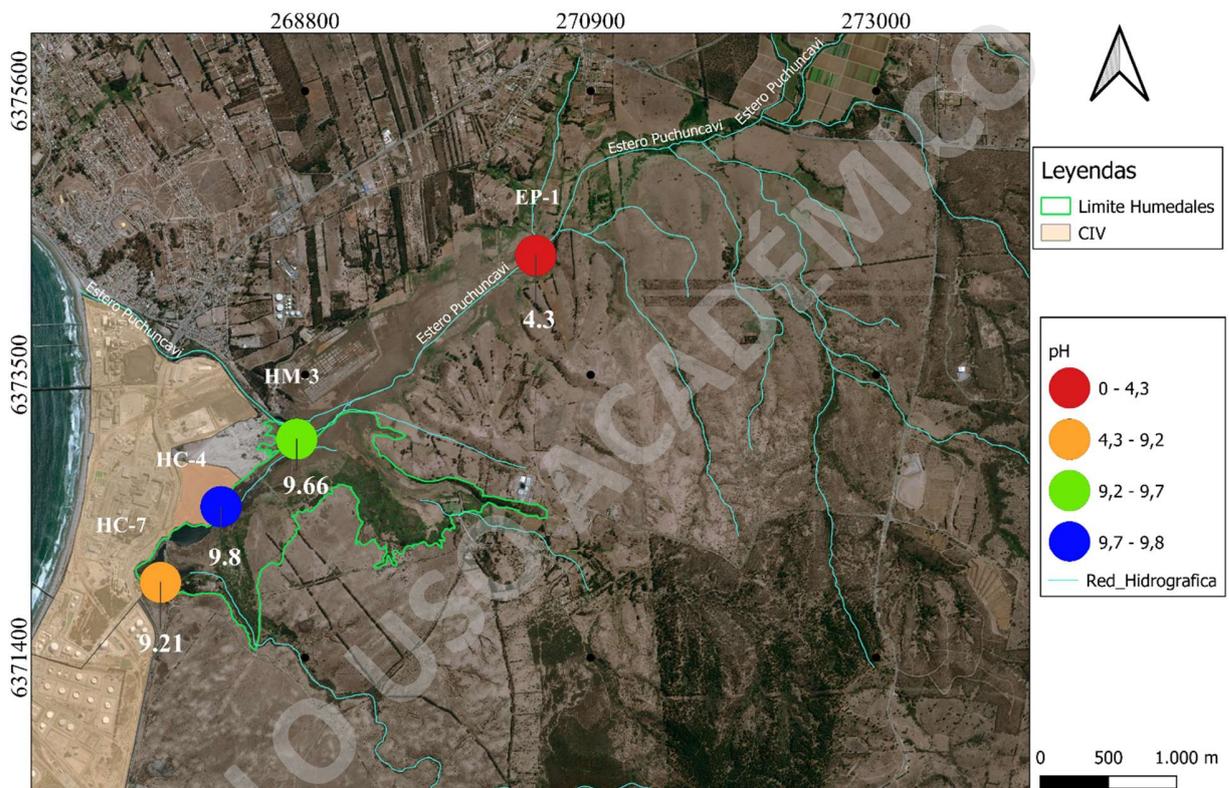


Figura 10. Muestra los valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua de los diferentes sitios muestreados, exceptuando HM-1, producto a la sequía del sitio en que anteriormente se tomaron datos hidroquímicos. El datum utilizado es WGS 84.

Tabla 14. Se observa los sitios en que se extrajo los testigos de sedimentos y los respectivos valores de pHs medidos en cada sitio. El *datum* utilizado es WGS 84.

Sitio	COORDX	COORDY	Parámetros Fco-Qco
			pH
HC-4_0-7	268182	6372524	9,8
HC-4_15-22			
HC-7_0-7	267737	6371957	9,21
HC-7_15-22			
HM-3_0-7	268739	6373024	9,66
HM-3_15-22			
HM-1_0-7	269351	6372900	s / d
HM-1_15-22			
EP-1A_0-7	270496	6374383	4,3
EP-1_15-22			

3.3.2.1 Conductividad Eléctrica

En la Figura 11, se observa la distribución espacial de la conductividad eléctrica y el valor medido en los diferentes puntos analizados. La conductividad eléctrica medida en los 5 sitios oscila entre un mínimo de 2.230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en HC-7 hasta un máximo de 32.510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la muestra HM-3. La concentración media de la zona de estudio es de 11.795 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la cual es superior a la mediana calculada de (6.220 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Es importante destacar los sitios HC-7, HC-4 y HM-3 que se encuentran cercanos entre sí y presentan una significativa variación de conductividad eléctrica entre ellos.

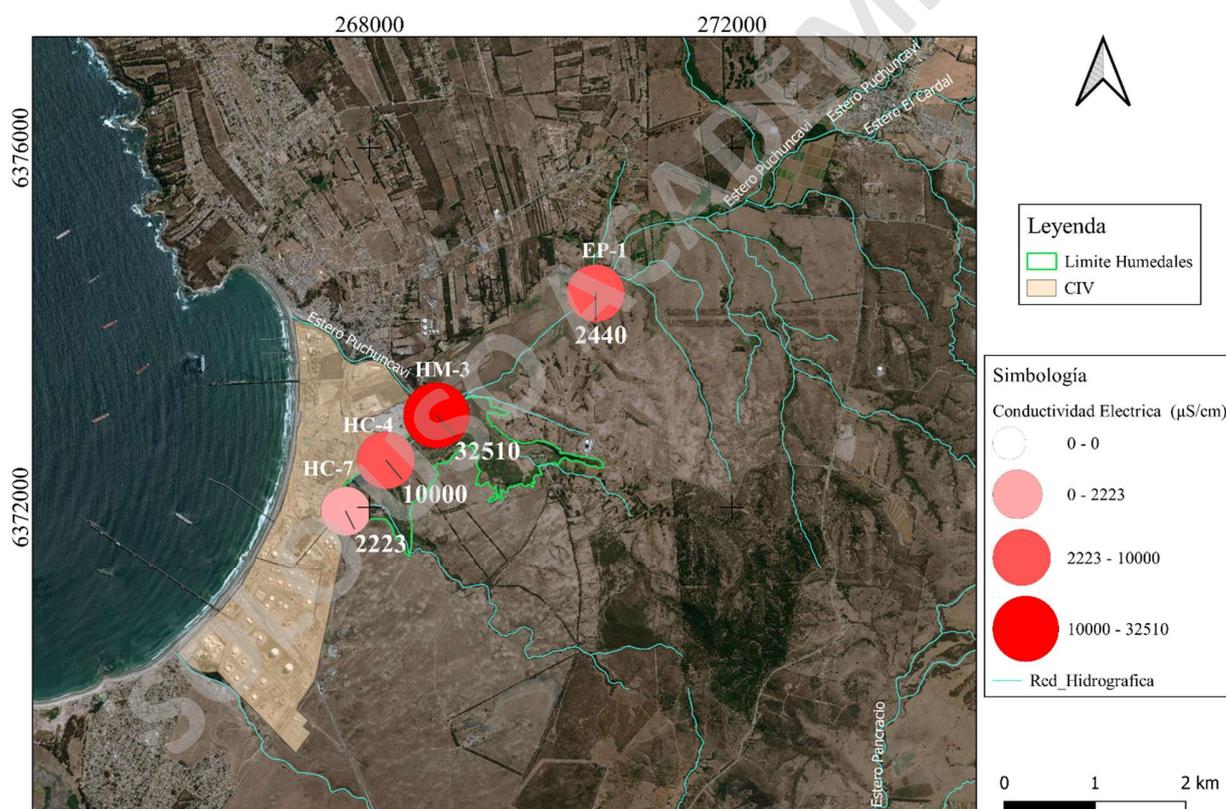


Figura 11. Muestra los datos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medidos en los cuerpos de aguas de los diferentes sitios muestreados. Exceptuando HM-1, producto a la sequía del sitio en que anteriormente se tomaron datos hidroquímicos. El datum utilizado es WGS 84.

Tabla 15.. Se observan los sitios en que se extrajo sedimento con los valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivos:

Sitio	COORDX	COORDY	Parámetros Fco-Qco
			CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
HC-4_0-7	268182	6372524	10.000
HC-4_15-22			
HC-7_0-7	267737	6371957	2.230
HC-7_15-22			
HM-3_0-7	268739	6373024	32.510
HM-3_15-22			
HM-1_0-7	269351	6372900	s / d
HM-1_15-22			
EP-1A_0-7	270496	6374383	2.440
EP-1_15-22			

3.4 Descripción de testigos de sedimento extraídos

En trabajo de gabinete cada muestra extraída en terreno, se submuestreo en dos profundidades 0 a 7 cm y de 15 a 22 cm. Posteriormente, se realizó una descripción de los testigos extraídos, destacando características como color, tamaño de grano, matriz o clasto soportado, selección de grano (mala-moderada-buena), componentes minerales, restos de organismos y material orgánico.

En las fotos se delimitó el testigo de sedimento extraído dependiendo de variaciones significativas observadas en el mismo como color, tamaño de grano, etc. Esta delimitación se realizó con una línea de color verde o rojo.



Figura 12. Testigo extraído en el sitio HC-4, se observa que presenta características homogéneas a lo largo de la muestra como color negro con zonas pardas, grano tamaño limo arcilla y con moderado contenido orgánico.

- HC-4_0-7: Sedimento color negro con zonas de color marrón (muy viscoso), tamaño de grano limo – arcilla (100%), matriz soportada, buena selección y con moderado contenido de material orgánico vegetal como restos de raíces.
- HC-4_15-22: Sedimento color negro con zonas de color marrón (muy viscoso), tamaño de grano limo – arcilla (100%), matriz soportada, buena selección, y con moderado contenido de material orgánico vegetal (raíces).

- HC-7_0-7: En los primeros 15 cm del sedimento presenta un color negro y en profundidad fue observado zonas de color pardo, tamaño de grano arena fina, matriz soportada, buena selección, moderado contenido de material orgánico vegetal como raíces y ramas, y además con restos de animales como gastrópodos < 0.7 mm (1-3%).
- HC-7_15-22: Sedimento de color negro, tamaño de grano arena fina, matriz soportada, buena selección, presenta gran cantidad de material orgánico vegetal como raíces y ramas, y además con restos de animales como gastrópodos < 0.7 mm (1%)



Figura 13. Testigo extraído en el sitio HC-7. Los primeros 0 a 7 cm son de color negro y tamaño de grano arena fina con contenido de gastrópodos. A profundidad predomina un pardo con contenido de gastrópodos.

- HM-3_0-7: Sedimento color negro con zonas de color marrón, tamaño de grano limo-arcilla (100%), matriz soportada, buena selección, presenta una moderada cantidad de material orgánico vegetal como raíces pequeñas, y con restos de animales como gastrópodos < 0.4mm (15%) (gastrópodos).
- HM-3_15-22: Sedimento color gris, tamaño de grano limo arcilla (100%), matriz soportada, buena selección, se observa bajo contenido de material orgánico vegetal como raíces, y gran contenido de restos de animales como gastrópodos < 1 cm (70%) (gastrópodos).



Figura 14. Testigo extraído del sitio HM-3. Los primeros 11 cm son de color negro con pigmentación marrón, tamaño de grano limo-arcilla. Desde los 12 cm presenta una tonalidad gris, tamaño de grano limo arcilla y con gran presencia de gastrópodos.

Para la extracción de las muestras en los sitios HM-1_0-7 y HM-15_22 se ocupó un método de muestreo por calicata y se muestreo directamente desde el suelo entre los primeros 0-10 cm y de 15-30 cm de profundidad.

- HM-1_0-7: Sedimento color marrón, presenta cristales de minerales evaporíticos (sales) observados en la zona superficial, tamaño de grano limo – arcilla (100%), matriz soportada, buena selección, bajo contenido de materia orgánica vegetal como raíces y ramas.
- HM-1_15-22: Sedimento color marrón, tamaño de grano arena fina con minerales como cuarzo y feldespato-k, matriz soportada, buena selección, bajo contenido de materia orgánica vegetal como raíces.



Figura 15. Sedimento extraído del Sitio HM-1. Figura (9) se observa una calicata de 30 cm de profundidad.

Figura 16.) Se observa la profundidad de la calicata, junto con la profundidad demarcada de muestreo (verde: 0 a 10 cm y rojo: 15 a 30 cm).

- EP-1_0-7: Sedimento color negro, tamaño de grano limo- arcilla (100%), matriz soportada, buena selección y fue observado un moderado contenido de materia orgánica vegetal como raíces.
- EP-1_15-22: Sedimento color marrón, tamaño de grano limo-arcilla (100%), matriz soportada, buena selección y fue observado un moderado contenido de materia orgánica vegetal como raíces.



Figura 17. Testigo extraído del sitio EP-1. Se observa en los primeros 5 cm del testigo un color negro con pigmentación marrón, tamaño de grano limo-arcilla. Desde los 7 cm se observa una tonalidad marrón del sedimento del tamaño de grano limo-arcilla.

Tabla 16. Resumen de las principales características de los testigos recuperados.

Sitio	Color	Tamaño de Grano	Restos de Organismos	t. Mat. Organica (Raices-Ramas)
HC-7 0-7	Negro y en profundidad	Arena Fina (100%)	Gastropodos < 0.7 mm (1-3%)	Moderado
HC-7 15-22	Negro	Arena Fina (100%)	Gastropodos < 0.7 mm (1%)	Alto
HC-4 0-7	Negro con zonas Marron	Limo-Arcilla (100%)		Moderado
HC-4 15-22				Moderado
HM-3 0-7	Negro con zonas Marron	Limo-Arcilla (100%)	Gastropodos < 0.4 mm (15%)	Moderado
HM-3 15-22	Gris	Limo-Arcilla (100%)	Gastropodos <1cm (65%)	Bajo
HM-1 0-7	Marron con zonas blancas	Limo-Arcilla (100%)		Bajo
HM-1 15-22	Marron	Arena Fina (100%)		Bajo
EP-1A 0-7	Negro	Limo-Arcilla (100%)		Moderado
EP-1 15-22	Marron	Limo-Arcilla (100%)		Moderado

3.5 Resultados de índices calculados de calidad de los sedimentos extraídos.

Los sedimentos fueron evaluados con 4 índices comparables entre sí, que comparan las concentraciones de metales preindustriales de la zona respecto a las concentraciones encontradas en la actualidad (Weisse, 2015).

3.5.1 Índice de geoacumulación

A continuación, se observan en la Tabla 17 los resultados obtenidos al aplicar el índice de geoacumulación definido por Müller en 1979:

Tabla 17. Índices resultantes al aplicar el índice de geoacumulación a las concentraciones de elementos encontradas en los sitios investigados. Además, en la zona inferior se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Müller (1979).

Sitio	Índice de Geoacumulación														
	Al	Fe	As	Cu	Cr*	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Mo	Sb	Co	Ba	Cd
HC-4 0-7	-0,10	-0,30	3,82	3,17	-2,23	0,66	0,93	2,40	-0,48	1,66	5,23	3,68	-0,47	-0,78	5,81
Hc-4 15-22	-0,22	0,43	3,63	3,47	-0,38	0,11	2,25	3,62	-0,46	3,51	7,31	4,43	0,32	-0,51	
HC-7 0-7	-0,69	-0,94	2,72	3,34	0,25	-0,62	2,96	1,92	-0,82	1,05	3,53	3,27	-1,82	-0,59	5,66
HC 7 15-22	-0,60	-0,76	0,74	-0,42	0,67	-1,00	3,38	-0,17	-0,88	-0,20	3,59	2,89	-1,61	-0,50	
HM-3 0-7	-0,58	-0,75	2,80	2,22	-1,12	-0,07	1,42	1,69	-0,64	0,90	2,53		-1,34	-1,15	
HM-3 15-22	-0,83	-1,06	1,10	-0,14	-1,12	-1,07	1,38	2,21	-0,96	1,03	1,91		-1,95	-1,54	
HM-1 0-7	-0,63	-0,56	1,99	1,76	-2,06	-1,10	0,58	1,81	-0,49	0,61	1,40		-1,52	-1,20	
HM-1 15-22	-0,53	-0,95	0,33	-1,43	-0,03	-0,58	2,67	-0,10	-0,95	-0,50	2,86		-1,56	-0,53	
EP-1 0-7	-0,54	-0,67	1,38	1,76	-0,83	-0,29	1,67	1,50	-0,26	0,52	2,15		-1,00	-0,79	
EP-1 15-22	-0,52	-0,59	1,64	1,29	-1,03	-0,38	1,46	1,28	-0,20	0,61	1,82		-0,94	-0,83	

Índice Igeo	Interpretación
<0	No contaminado
0 a 1	No contaminado a moderadamente contaminado
1 a 2	Moderadamente contaminado
2 a 3	Moderadamente a altamente contaminado
3 a 4	Altamente contaminado
4 a 5	Altamente a extremadamente contaminado
>5	Extremadamente contaminado

Los resultados del índice de geoacumulación indican un aumento en los índices calculados a medida que nos acercamos a los puntos de muestreo ubicados en la zona oeste de Puchuncaví. Según el índice de geoacumulación calculado, elementos como el Aluminio, Vanadio y Bario medidos en los sitios investigados, presentan índices clasificados como no contaminados. El Hierro, Cromo, Manganeso y Cobalto presentan índices clasificados como moderadamente contaminados en al menos un sitio investigado. Otros elementos como Arsénico, Cobre, Plomo, Zinc, Níquel y Antimonio presentan índices clasificados como altamente contaminados en al

menos un sitio. Por último, el Molibdeno y Cadmio presentan índices clasificados como extremadamente contaminados en los sitios más cercanos a la zona oeste de estudio (sitios HC-4 y HC-7).

3.5.2 Factor de enriquecimiento (EF)

Los resultados del factor de enriquecimiento (EF) señalan un notorio aumento en los índices calculados para los diferentes elementos hacia la zona oeste de estudio (Tabla 18). Para calcular el factor de enriquecimiento se definió un elemento inmóvil como lo es el Titanio, debido a que este elemento no presentó grandes variaciones en los sitios investigados y no se observa un enriquecimiento antropogénico para este elemento en la zona (Navarro *et. al*, 2006; Weisse, 2015). El Titanio es típicamente un elemento inmóvil en el ambiente y es transportado exclusivamente en forma cristalina en el agua de los ríos (Devok *et. al*, 1998; Navarro *et. al*, 2006; Weisse, 2015; Tejeda *et. al*, 2012)

Tabla 18. Resultados obtenidos al aplicar el factor de enriquecimiento a las concentraciones encontradas en los sitios investigados, y estandarizados respecto a un elemento inmóvil (Titanio). En el cuadro inferior se presenta la clasificación de Sutherland (2000).

Sitio	Factor de Enriquecimiento																Ti
	Al	Fe	As	Cu	Cr*	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Mo	Sb	Co	Ba	Cd		
HC-4 0-7	1,37	1,19	20,75	13,17	0,31	2,32	2,80	7,77	1,05	4,64	55,13	18,81	1,06	0,86	82,21	4409	
Hc-4 15-22	1,22	1,91	17,61	15,75	1,09	1,54	6,75	17,49	1,03	16,18	226,14	30,53	1,78	1,00		4554	
HC-7 0-7	0,94	0,79	9,98	15,37	1,80	0,98	11,77	5,73	0,86	3,15	17,52	14,60	0,43	1,00	76,69	4269	
HC 7 15-22	0,90	0,80	2,26	1,01	2,16	0,68	14,10	1,20	0,74	1,18	16,32	10,03	0,44	0,96		4778	
HM-3 0-7	1,01	0,90	10,54	7,02	0,69	1,44	4,06	4,89	0,97	2,83	8,73		0,60	0,68		4282	
HM-3 15-22	1,03	0,88	3,94	1,68	0,85	0,88	4,80	8,50	0,94	3,77	6,94		0,48	0,63		3513	
HM-1 0-7	0,85	0,90	5,24	4,46	0,32	0,61	1,97	4,61	0,94	2,01	3,48		0,46	0,57		4912	
HM-1 15-22	1,08	0,81	1,96	0,58	1,53	1,04	9,95	1,45	0,81	1,11	11,30		0,53	1,08		4148	
EP-1 0-7	0,84	0,77	3,20	4,16	0,69	1,00	3,90	3,48	1,03	1,77	5,44		0,61	0,71		5270	
EP-1 15-22	0,82	0,78	3,66	2,86	0,57	0,90	3,22	2,85	1,02	1,79	4,13		0,61	0,66		Ti	

EF	Interpretacion
<2	Deficiencia de enriquecimiento minimo
2 a 5	Moderado enriquecimiento
5 a 20	Enriquecimiento significativo
20 a 40	Muy alto enriquecimiento
>40	Enriquecimiento extremadamente alto

Al aplicar la fórmula del factor de enriquecimiento a las concentraciones obtenidas en los sitios investigados, elementos como Aluminio, Hierro, Vanadio y Cobalto presentaron índices máximos clasificados como con deficiencia de enriquecimiento mínimo. Cromo, Manganeso y Bario presentaron índices máximos clasificados con un enriquecimiento moderado. Otros elementos como Cobre, Níquel, Plomo y Zinc presentaron índices máximos clasificados con un enriquecimiento significativo. El Arsénico y Antimonio presentaron índices máximos clasificados como con muy alto enriquecimiento. Por último, el Molibdeno y Cadmio presentaron los índices máximos del estudio, los que se clasificaron con un enriquecimiento extremadamente alto.

3.5.3 Factor de contaminación (Cf)

El factor de contaminación se calculó como la razón entre la concentración medida de los elementos químicos en la muestra obtenida y el valor *background* del elemento en la zona de estudio (Puchuncaví). En general se observa que los índices presentan un aumento en sus valores en sitios cercanos a la zona oeste de estudio (aledaño al complejo industrial Ventanas).

Tabla 19. Resultados obtenidos al aplicar el factor de contaminación (Cf) a las concentraciones medidas en sitios investigados. En la zona inferior se observa la clasificación de Hakanson (1980) para cada índice calculado

Sitio	Datos	Al	Fe	As	Cu	Cr*	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Mo	Sb	Co	Ba	Cd
HC-4 0-7	Cf	1,40	1,22	21,20	13,46	0,32	2,37	2,86	7,94	1,08	4,74	56,33	19,22	1,08	0,88	84,00
HC-4 15-22	Cf	1,29	2,02	18,59	16,63	1,16	1,62	7,12	18,46	1,09	17,08	238,67	32,22	1,88	1,05	31,25
HC-7 0-7	Cf	0,93	0,78	9,87	15,21	1,79	0,97	11,64	5,67	0,85	3,11	17,33	14,44	0,42	0,99	75,88
HC 7 15-22	Cf	0,99	0,89	2,50	1,12	2,39	0,75	15,61	1,33	0,81	1,30	18,07	11,11	0,49	1,06	
HM-3 0-7	Cf	1,00	0,89	10,46	6,97	0,69	1,43	4,03	4,85	0,96	2,81	8,67		0,59	0,68	
HM-3 15-22	Cf	0,84	0,72	3,21	1,36	0,69	0,71	3,91	6,92	0,77	3,07	5,65		0,39	0,52	
HM-1 0-7	Cf	0,97	1,02	5,97	5,08	0,36	0,70	2,24	5,25	1,07	2,29	3,97		0,52	0,65	
HM-1 15-22	Cf	1,04	0,78	1,88	0,56	1,47	1,00	9,57	1,40	0,78	1,06	10,87		0,51	1,04	
EP-1 0-7	Cf	1,03	0,94	3,91	5,08	0,84	1,23	4,77	4,25	1,25	2,16	6,64		0,75	0,87	
EP-1 15-22	Cf	1,05	1,00	4,67	3,66	0,73	1,15	4,12	3,64	1,31	2,28	5,28		0,78	0,84	

Cf	Interpretación
<1	Baja contaminación
1 a 3	Moderada contaminación
3 a 6	Contaminación considerable
> 6	Muy alta contaminación

En la Tabla 19 se observan todos los elementos en que se aplicó el factor de contaminación (Cf) con un índice máximo clasificado con cierto grado de contaminación. Elementos como Aluminio, Hierro, Cromo, Manganeso, Vanadio, Cobalto y Bario presentaron un índice máximo clasificado con una baja a moderada contaminación. Otros elementos como Arsénico, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio presentaron índices máximos clasificados como con muy alta contaminación. El factor de contaminación deriva en el grado de contaminación que será analizado a continuación.

3.5.4 Grado de contaminación (CDEG)

El grado de contaminación permite evaluar y clasificar el enriquecimiento elemental de cada sitio investigado, a través de la suma de los factores individuales de contaminación para cada elemento evaluado en cada sitio investigado.

Tabla 20. Índices resultantes al sumar los índices calculados para cada elemento en cada sitio investigado. Además, en la zona inferior se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Hakanson (1980).

Sitio	Cf	Factor de contaminación (Cf)													Cdeg		
		Al	Fe	As	Cu	Cr*	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Mo	Sb	Co		Ba	Cd
		Datos													Sumatoria F. indiv.		
HC-4 0-7	Cf	1,40	1,22	21,20	13,46	0,32	2,37	2,86	7,94	1,08	4,74	56,33	19,22	1,08	0,88	84,00	218,11
He-4 15-22	Cf	1,29	2,02	18,59	16,63	1,16	1,62	7,12	18,46	1,09	17,08	238,67	32,22	1,88	1,05	31,25	390,11
HC-7 0-7	Cf	0,93	0,78	9,87	15,21	1,79	0,97	11,64	5,67	0,85	3,11	17,33	14,44	0,42	0,99	75,88	159,89
HC 7 15-22	Cf	0,99	0,89	2,50	1,12	2,39	0,75	15,61	1,33	0,81	1,30	18,07	11,11	0,49	1,06		58,43
HM-3 0-7	Cf	1,00	0,89	10,46	6,97	0,69	1,43	4,03	4,85	0,96	2,81	8,67		0,59	0,68		44,02
HM-3 15-22	Cf	0,84	0,72	3,21	1,36	0,69	0,71	3,91	6,92	0,77	3,07	5,65		0,39	0,52		28,75
HM-1 0-7	Cf	0,97	1,02	5,97	5,08	0,36	0,70	2,24	5,25	1,07	2,29	3,97		0,52	0,65		30,08
HM-1 15-22	Cf	1,04	0,78	1,88	0,56	1,47	1,00	9,57	1,40	0,78	1,06	10,87		0,51	1,04		31,94
EP-1 0-7	Cf	1,03	0,94	3,91	5,08	0,84	1,23	4,77	4,25	1,25	2,16	6,64		0,75	0,87		33,72
EP-1 15-22	Cf	1,05	1,00	4,67	3,66	0,73	1,15	4,12	3,64	1,31	2,28	5,28		0,78	0,84		30,51

Cdeg	Interpretacion
<8	Baja contaminación
8 a 16	Moderada Contaminación
16 a 32	Considerable Contaminación
> 32	Muy alta Contaminación

En general, la totalidad de sitios muestreados se encuentran clasificados desde un índice de contaminación considerable a muy alta contaminación (Tabla 20). Observando un notorio aumento de los índices calculados hacia la zona oeste del estudio, presentando los máximos índices en el sitio HC-4 en ambas profundidades investigadas 0 a 7 cm (218,11) y 15 a 22 cm (390,11).

3.5.5 Índice de contaminación integrado

Es el promedio de la suma de los factores individuales calculados para cada elemento y muestra la contaminación por sitio en cada una de las profundidades investigadas. En general se observa una disminución de los índices de contaminación a medida que nos alejamos de la zona oeste. Los índices máximos calculados son de 27,86 en el sitio HC-4_15-22 y un valor de 15,58 en el sitio HC-4_0-7 (Gráfico 3).

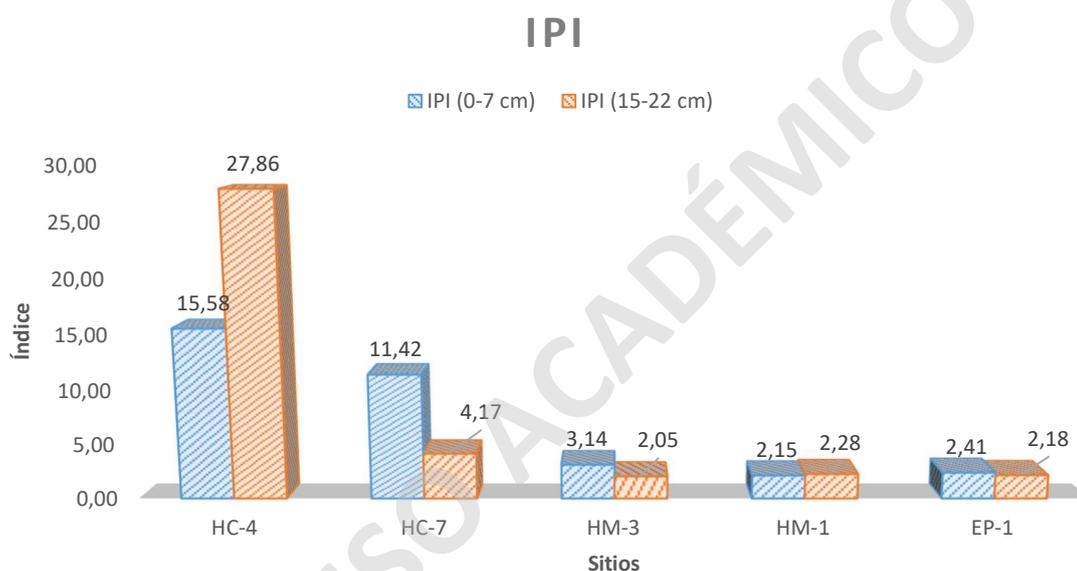


Gráfico 2. Índice de contaminación integrado, este índice indica la contaminación presente en los sitios muestreados, calculado como el promedio de los factores de contaminación individuales para cada elemento.

Tabla 21. Se aprecia la clasificación asignada para cada índice calculado, según Wei & Yang (2010).

IPI	Interpretación
<1	Nivel de contaminación bajo
1 a 2	Nivel de contaminación moderado
2 a 5	Nivel de contaminación alta
> 5	Nivel de contaminación extremadamente alta

A continuación, se presenta la Tabla 22 que resume los elementos evaluados y son clasificados según el grado de contaminación a partir de sus respectivos índices máximos calculados de calidad de sedimentos en la presente investigación (bajo- moderado, alto y extrema contaminación).

Tabla 22. Resumen de los elementos clasificados, según el grado de contaminación para los diferentes índices máximos calculados de calidad de sedimentos en la presente investigación (selección de elementos de interés).

Índice	No Contaminado	Baja- Mod. Contaminado	Altamente Contaminado	Extremadamente contaminado
Igeo	Al, V y Ba	Fe, Cr, Mn y Co	As, Cu, Pb, Zn, Ni, y Sb	Mo y Cd
EF	Al, Fe, V y Co	Cr, Mn y Ba	As, Cu, Pb, Zn, Ni y Sb	Mo y Cd
Cf		Al, Fe, Cr, Mn, Ba, V y Co		As, Cu, Ni, Pb, Zn, Mo, Sb y Cd

Los elementos que presentaron índices clasificados de altamente a extremadamente contaminados como Arsénico, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio se seleccionaron como elementos de interés para ser investigados en mayor detalle (Tabla 22).

3.6 Correlación de Pearson

La correlación de Pearson se realizó a través de una base de datos en donde las concentraciones obtenidas (mg/kg), se dividieron en 1.000 para obtener la unidad de (g/kg) y posteriormente se dividieron por el peso atómico de cada elemento correspondiente (g/mol), obteniendo una unidad de (mol/kg). El resultado se dividió en la concentración de un elemento inmóvil seleccionado como el Titanio (g/ mol). De manera que la correlación de Pearson estaría correlacionando datos de concentración de elementos respecto a un elemento inmóvil, correlacionando la movilidad entre elementos en la fracción fina del sedimento (2 a 63 μm).

Para llevar a cabo la correlación de Pearson, se correlacionaron 17 elementos (variables) entre sí, estos elementos pueden ser observados en la Tabla 23. Dentro de los elementos estudiados se encuentran metales pesados y elementos con variaciones de concentración significativas entre sitios investigados (Azufre y Calcio).

Estos elementos son clasificados en 3 categorías, amarillo para una baja correlación ($< 0,5$); una correlación moderada entre $|0,5|$ a $|0,75|$ representada en color rojo y una correlación significativamente buena ($> 0,75$) en tonalidad verde.

Tabla 23. Se observa la correlación de Pearson realizada entre la movilidad de metales estudiados (mmol/kg).

Variables	S	Ca	Al	Fe	As	Ba	Cu	Cr*	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Mo	Sb	Co	Cd
S	1,00	0,16	0,27	0,02	0,09	-0,30	0,17	-0,47	0,28	-0,43	0,05	0,13	-0,08	-0,14	-0,10	-0,08	0,23
Ca		1,00	0,04	-0,20	-0,01	-0,31	-0,19	-0,01	-0,14	-0,05	0,13	-0,07	-0,09	-0,25	-0,21	-0,31	0,10
Al			1,00	0,66	0,14	0,42	0,54	-0,14	0,87	-0,08	0,60	0,29	0,56	0,58	0,70	0,67	0,54
Fe				1,00	0,67	0,30	0,64	-0,13	0,54	-0,12	0,92	0,44	0,97	0,98	0,90	0,97	0,05
As					1,00	0,19	0,63	0,10	0,12	0,06	0,72	0,22	0,77	0,71	0,60	0,59	-0,08
Ba						1,00	0,34	0,74	0,22	0,78	0,13	-0,48	0,29	0,42	0,54	0,30	0,33
Cu							1,00	-0,05	0,62	-0,02	0,69	0,40	0,66	0,64	0,81	0,64	0,64
Cr*								1,00	-0,36	0,99	-0,19	-0,84	-0,05	0,03	0,14	-0,19	0,04
Mn									1,00	-0,30	0,47	0,55	0,43	0,45	0,58	0,63	0,58
Ni										1,00	-0,20	-0,85	-0,06	0,03	0,17	-0,18	0,11
Pb											1,00	0,52	0,96	0,89	0,84	0,86	0,16
V												1,00	0,42	0,34	0,24	0,54	0,07
Zn													1,00	0,98	0,89	0,93	0,03
Mo														1,00	0,92	0,96	0,01
Sb															1,00	0,87	0,39
Co																1,00	0,06
Cd																	1,00

El Azufre y Calcio presentó bajas correlaciones con todos los elementos seleccionados. El Plomo presenta una correlación significativa ($>0,75$) con elementos como Hierro, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cobalto. Inclusive elementos como el Molibdeno, Hierro y Zinc presentan una excelente correlación positiva entre ellos ($>0,80$)

El Arsénico presenta una correlación significativa ($>0,77$) con el Zinc. El Cobre con el Antimonio presentan una correlación significativa ($>0,81$). Al igual que la correlación del Níquel con el Cromo que presentan una excelente correlación ($>0,99$).

En general, los elementos asociados con una correlación significativa o excelente correlación, se observan con un aumento de sus concentraciones con un comportamiento de manera directamente proporcional (Tabla 23).

3.7 Resultados de muestras por sitio y su comparación respecto a la normativa de EE. UU. y el *background* geológico.

3.7.1 Humedal Campiche

Las muestras analizadas del sitio HC-4 (HC-4_0-7 y HC-4_15-22), presenta 6 elementos con concentraciones que sobrepasan la normativa de EE. UU. en ambas profundidades estudiadas, estos son el Aluminio, Arsénico, Cromo, Hierro y Cobalto. Además, del Manganese solo en la profundidad de 0 a 7 cm en el sedimento extraído. Al comparar los elementos investigados respecto al *background* geológico de Puchuncaví, se observó 11 elementos que se encuentran sobre las concentraciones geoquímicas naturales en alguna profundidad investigada como el Arsénico, Antimonio, Cobre, Hierro, Manganese, Molibdeno, Níquel, Plomo, Azufre y Zinc. Además, las concentraciones de Cadmio medidas en la profundidad de 0 a 7 cm, superan las concentraciones naturales definidas en la zona.

Por su parte, el sitio HC-7_0-7 y HC-7_15-22, contiene 3 elementos con concentraciones que se encuentran sobre la normativa de EE. UU., en las profundidades estudiadas, destacándose el Aluminio, Arsénico y Cromo.

Al comparar el sitio HC-7 con el *background* geológico, se observaron 10 elementos que superan las concentraciones naturales medidas por la PGS (2015), tales como Arsénico, Cromo, Antimonio, Cobre, Molibdeno, Níquel, Plomo, Azufre y Zinc. Por otro lado, las concentraciones de Cadmio supera las concentraciones naturales de la zona solo en la profundidad superior de 0 a 7 cm. Además, las concentraciones de Calcio en la profundidad de 0 a 7 cm que superan la concentración promedio de Calcio medidas en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003).

Es importante mencionar que el sitio HC-4 presenta 11 elementos con sus máximas concentraciones medidas en la totalidad de lugares analizados (Cadmio, Plomo, Cobre, Zinc, Molibdeno, Antimonio, Aluminio, Hierro, Arsénico, Cobalto, y Manganese).

3.7.2 Humedal Los Maitenes

Las muestras analizadas del sitio HM-3 (HM-3_0-7 y HM-3_15-22), al compararse con las concentraciones químicas medidas con la normativa de EE. UU, consta con 3 elementos fuera de norma como el Arsénico y Cromo. Además, del Aluminio en la zona superior del sedimento estudiado en la profundidad de 0-7 cm.

Al comparar los elementos medidos con el *background* geológico de Puchuncaví, se observó 7 elementos que exceden las concentraciones naturales de la zona evaluadas, estos son Arsénico, Cobre, Molibdeno, Níquel, Plomo y Zinc, incluyendo al Manganeso medido en la zona superior del sedimento (0-7 cm). Además, las concentraciones medidas de elementos como el Aluminio, superan las concentraciones naturales promedio de la corteza cortical definidas por Rudnick & Gao (2003) en la zona superior de sedimento extraído.

Por su parte, las concentraciones medidas de Aluminio, Arsénico y Cromo en el sitio HM-1 (HM-1_0-7 y HM-1_15-22), sobrepasan la normativa de referencia. Al igual que las concentraciones medidas de Hierro en la profundidad superior (0-7 cm) y de Manganeso en la profundidad inferior (15-22cm) de sedimento extraído que también exceden las máximas concentraciones permitidas por la normativa de EE. UU.

Al contrastar la información obtenida con las concentraciones geológicas de la zona de Puchuncaví reportado por la PGS (2015), se aprecian 5 elementos que superan al *background* geológico en ambas profundidades estudiadas como el Arsénico, Molibdeno, Níquel, Plomo y Zinc. Igualmente, el Hierro, Fosforo y Cobre superan el *background* geológico en la profundidad superior de 0-7 cm, asimismo que las concentraciones de Manganeso en la profundidad inferior de 15 a 22 cm. Además, las concentraciones de Aluminio en ambas profundidades estudiadas, sumado a las concentraciones de cromo a una profundidad de 15 a 22 cm exceden las concentraciones promedio medidas en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003).

3.7.3 Estero Puchuncaví

Las concentraciones de las muestras analizadas del sitio EP (EP-1_0-7 y EP-1_15-22), se observan 3 elementos fuera de las concentraciones máximas permitidas por la normativa de EE. UU., los cuales son Aluminio, Arsénico y Cromo.

Al contrastar las concentraciones químicas obtenidas en el sitio EP con el *background* geológico de Puchuncaví, se aprecian 7 elementos que lo superan, los cuales son: Arsénico, Cobre, Molibdeno, Níquel, Plomo, Manganeso y Zinc. Por último, tanto el Aluminio y Fósforo superan las concentraciones promedio de la corteza cortical definidos por Rudnick & Gao (2003), en ambas profundidades investigadas.

3.8 Gráficos por Elemento

Finalmente, a los elementos de interés seleccionados anteriormente por presentar un índice máximo clasificado desde altamente a extremadamente contaminado (Arsénico, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio) y elementos que presentaron una variación significativa entre sitios investigados como Azufre y Calcio. Se adicionarán elementos que presentaron en los sitios investigados una concentración sobre la normativa de EE. UU. (Aluminio, Hierro, Arsénico, Cromo, Manganeso y Cobalto). Esto con el fin de ser estudiados y discutidos con mayor detalle.

3.8.1 Elementos Mayoritarios

3.8.1.1 Aluminio (Al)

Las concentraciones medidas de Aluminio en los sedimentos analizados varió entre un mínimo 70.852 mg/kg (HM-3_15-22) a un máximo de 118.031 mg/kg (HC-4_0-7). El sitio de máxima concentración dentro de las muestras analizadas se encontró enriquecido 1,66 veces a comparación del sitio de mínima concentración. El promedio entre los sitios medidos es de 88.696,9 mg/kg, el cual superó a la mediana calculada de 85.405,5 mg/kg. Las máximas concentraciones encontradas de Aluminio corresponden al sitio HC-4 en ambas profundidades analizadas (0-7 cm y 15-22 cm) (Gráfico 4).

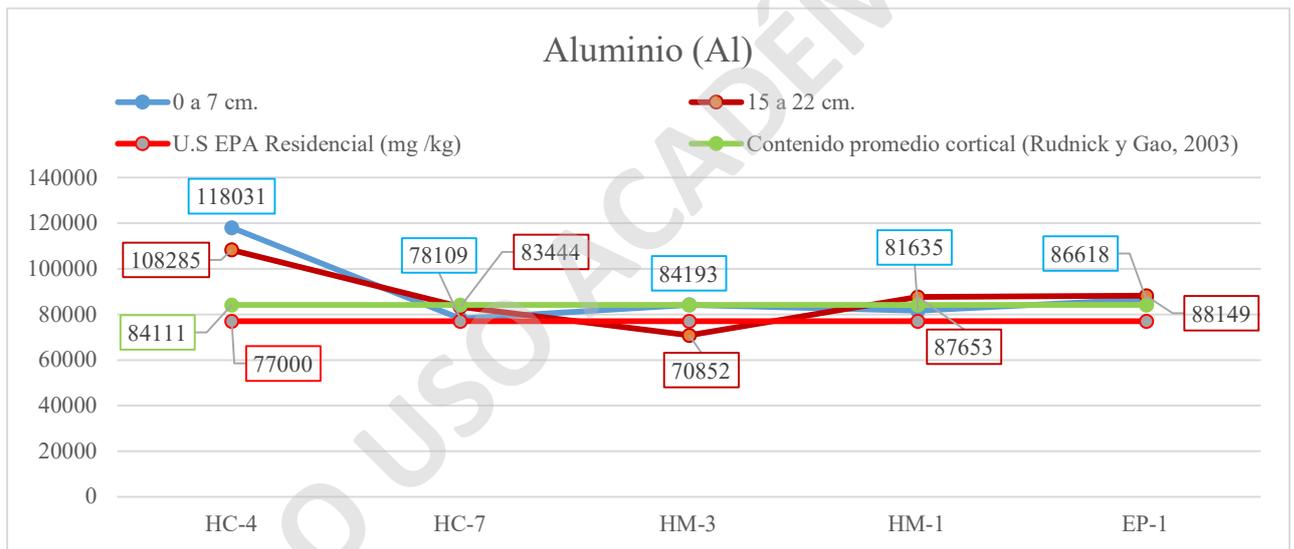


Gráfico 3. Concentración de Aluminio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Aluminio en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003).

Tabla 24. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Aluminio.

Sitios	Al_0-7 (mg/kg)	Al_15-22 (mg/kg)
HC-4	118.031	108.285
HC-7	78.109	83.444
HM-3	84.193	70.852
HM-1	81.635	87.653
EP-1	86.618	88.149
Estadística	Al_0-7 (mg/kg)	Al_15-22 (mg/kg)
Mínimo	78.109	70.852
Máximo	118.031	108.285
Max/Min	1,51	1,53
Promedio	89.717,2	87.676,6
Mediana	84.193	87.653
Normativa de EE. UU.	1,53	1,41

El sitio HM-3_15-22 es el único sitio que presentó concentraciones de Aluminio bajo la normativa de EE. UU. residencial (referencia: 77.000) con una concentración de 70.852 mg/kg. El sitio HC-4 que limita con el CIV (aledaño al escorial Codelco) presentó las máximas concentraciones de Aluminio en ambas profundidades del sedimento analizadas (superior e inferior), superando la normativa de referencia 1,53 veces en el sitio HC-4_0-7 (Tabla 24).

3.8.1.2 Hierro (Fe)

El Hierro medido varió entre un mínimo de 39.375 mg/kg (HM-3_15-22) y un máximo de 110.508 mg/kg (HC-4_15-22). La máxima concentración medida supera 2,80 al sitio de mínima concentración. El promedio de los datos obtenidos por sitios para el Hierro es de 56.188,3 mg/kg. Es importante destacar que en el punto HC-4 se observó las máximas concentraciones en ambas profundidades del sedimento estudiado (0 a 7 cm y 15 a 22 cm) (Gráfico 5).

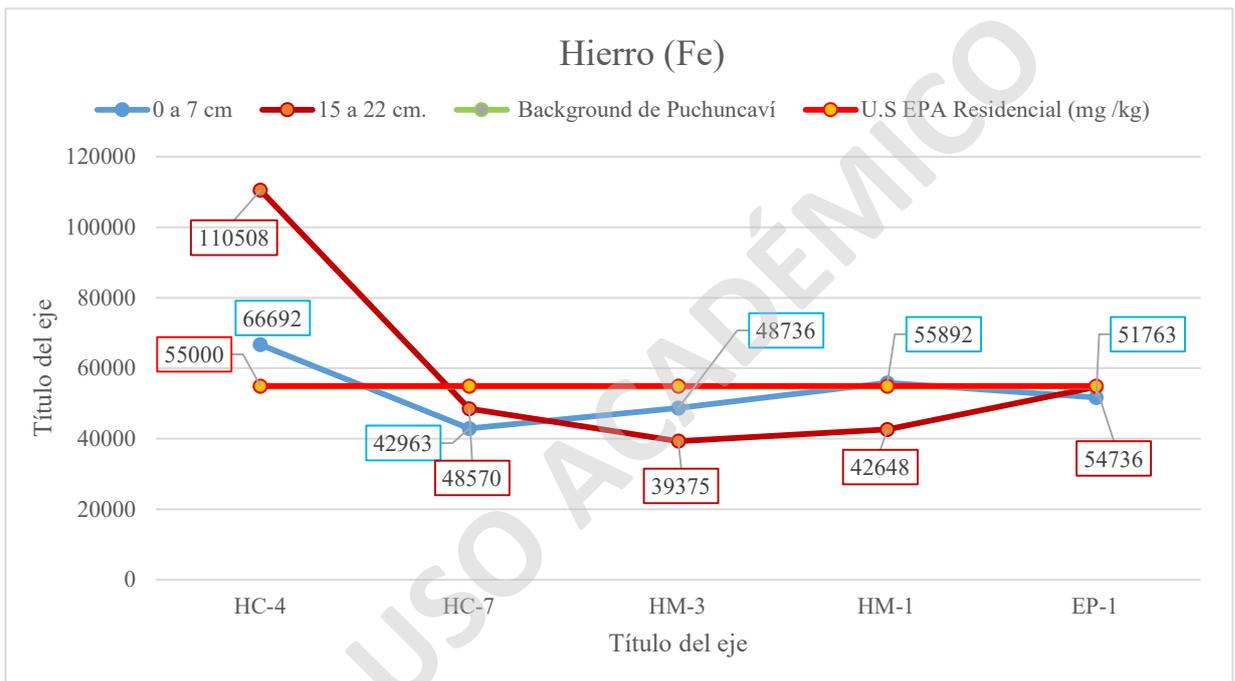


Gráfico 4. Concentración de Hierro en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Hierro natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 25. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Hierro.

Sitios	Fe_0-7 (mg/kg)	Fe_15-22 (mg/kg)
HC-4	66.692	110.508
HC-7	42.963	48.570
HM-3	48.736	39.375
HM-1	55.892	42.648
EP-1	51.763	54.736

Estadística	Fe_0-7 (mg/kg)	Fe_15-22 (mg/kg)
Mínimo	42.963	39.375
Máximo	66.692	110.508
Max/Min	1,55	2,81
Promedio	53.209,2	59.167,4
Mediana	51.763	48.570
Normativa de EE. UU.	1,21	2,01
Background Geológico	1,22	2,02

En el caso del Hierro, tres muestras analizadas sobrepasaron el límite establecido por la normativa de EE. UU. residencial (Ref.: 54.800 mg/kg). El sitio HC-7, HM-3 Y EP-1 presentan en ambas profundidades concentraciones bajo el *background* y bajo la normativa de EE. UU. Dentro de los sitios distales al CIV (HM-1 y EP-1) solo HM-1_0-7 presentó una concentración de 55.892 mg/kg, levemente superior al *background* geológico y normativa de EE. UU. Por último, en ambas profundidades analizadas del sitio HC-4, se observó un enriquecimiento mayor que en el resto de los sitios investigados, sobretodo en la profundidad inferior (HC-4_15-22) donde presenta 1,65 veces más Hierro que en la profundidad superior (HC-4_0-7) (Tabla 25).

3.8.1.3 Azufre (S).

El Azufre varió entre un mínimo de 690 mg/kg en el sitio (HC-7_15-22) y un máximo de 12.488 mg/kg (HM-1_0-7). La máxima concentración medida supera 8,75 veces a la concentración mínima obtenida (Tabla 26). La media de los datos obtenidos por sitio para el Azufre es de 7.356,4 mg/kg, el cual es menor que la mediana calculada de los datos de 8.026 mg/kg en la profundidad de 0 a 7 cm. Las máximas concentraciones se presentan en la profundidad de 0 a 7 cm del sedimento extraído, específicamente en el sitio HM-3 y HM-1 con 10.519 mg/kg y 12.488 mg/kg respectivamente (Gráfico 6).

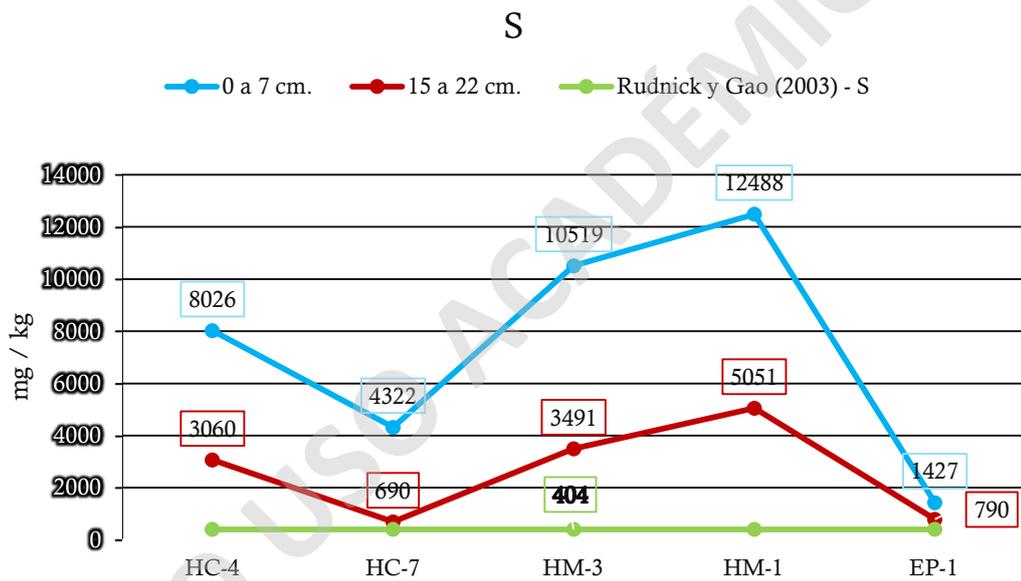


Gráfico 5. Concentración de Azufre en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Azufre en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003).

Tabla 26. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Azufre.

Sitios	S_0-7 (mg/kg)	S_15-22 (mg/kg)
HC-4	8.026	3.060
HC-7	4.322	690
HM-3	10.519	3.491
HM-1	12.488	5.051
EP-1	1.427	790
Estadística	S_0-7 (mg/kg)	S_15-22 (mg/kg)
Mínimo	1.427	690
Máximo	12.488	5.051
Max/Min	8,75	7,32
Promedio	7.356,4	2.616,4
Mediana	8.026	3.060

Las concentraciones de Azufre medidas superan en todos los sitios investigados las concentraciones naturales promedio medidas en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003). Además, no se pudo comparar con la normativa de EE. UU., debido a que esta normativa no presenta una concentración límite para el Azufre en suelos y sedimentos.

3.8.1.4 Calcio (Ca)

Las concentraciones de Calcio se encontraron entre un valor mínimo de 11.255 mg/kg en el sitio HC-4 en a profundidad de 15 a 22 cm y un valor máximo obtenido en el sitio HM-3 de 118.204 mg/kg (Gráfico 7). Las máximas concentraciones de Calcio sobrepasan 10,50 veces las concentraciones mínimas obtenidas (Tabla 27). El promedio de las concentraciones obtenidas en la profundidad de 0 a 7 y 15 a 22 cm es de 11.255 y 32.720,8 mg/kg.

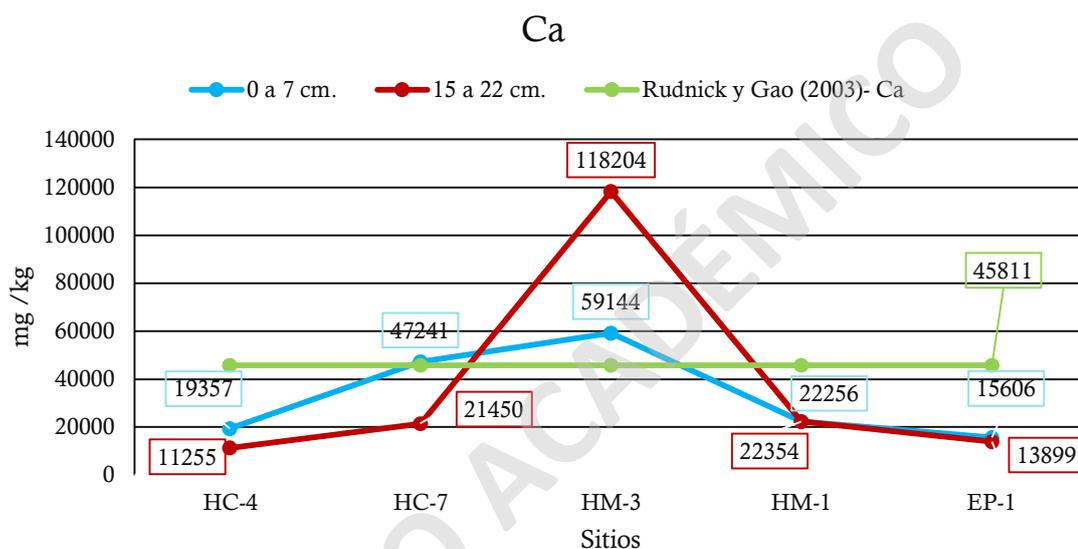


Gráfico 6. Concentración de Calcio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU., y la línea verde delimita las concentraciones naturales promedio de Calcio en la corteza cortical (Rudnick & Gao, 2003).

Tabla 27. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Calcio.

Sitios	Ca_0-7 (mg/kg)	Ca_15-22 (mg/kg)
HC-4	19.357	11.255
HC-7	47.241	21.450
HM-3	59.144	118.204
HM-1	22.256	22.354
EP-1	15.606	13.899
Estadística	Ca_0-7 (mg/kg)	Ca_15-22 (mg/kg)
Mínimo	15.606	11.255
Máximo	59.144	118.204
Max/Min	3,78982443	10,50
Promedio	32.720,8	11.255
Mediana	22.256	11.255

La concentración promedio de Calcio en la corteza cortical obtenida por Rudnick & Gao (2003) es de 45811 mg/kg, esta concentración es sobrepasada en el sitio HC-7 y HM-3 en la profundidad de 0 a 7 cm estudiada. Al observar las concentraciones obtenidas en la profundidad de 15 a 22 cm, solo es posible identificar el sitio HM-3 que supera las concentraciones de Calcio obtenidas por Rudnick & Gao (2003). Por último, no se comparó con la normativa de EE. UU, dado que esta normativa no presenta una concentración límite para el Calcio en suelos y sedimentos.

3.8.2 Elementos Minoritarios

3.8.2.1 Manganeseo (Mn)

El Manganeseo en los sitios analizados, se observó con una concentración mínima de 640 mg/kg en el sitio HM-1_0-7 hasta un máximo de 2.178 mg/kg en HC-4_0-7 (Gráfico 10). El sitio HC-4_0-7 se encuentra 3,40 veces más enriquecido que HM-1_0-7 (Tabla 33). El promedio calculado de la concentración de Manganeseo es 1.095,5 mg/kg, el cual es mayor a la mediana de los datos de 988,5 mg/kg. El sitio HC-4_0-7 y HC-4_15-22 son los lugares que presentan las máximas concentraciones de Manganeseo medido con 2.178 y 1.488 mg/kg respectivamente.

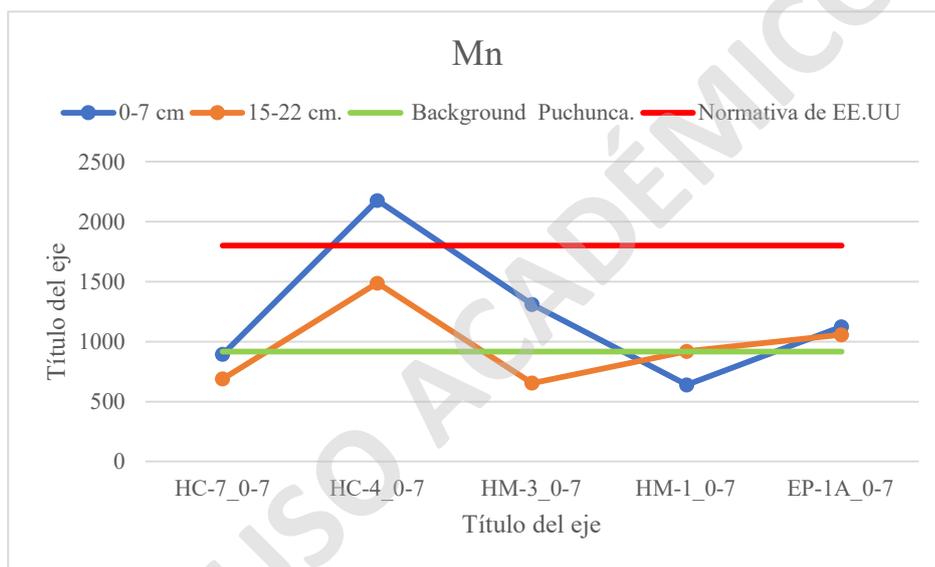


Gráfico 7. Concentración de Manganeseo en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Manganeseo natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 28. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Manganeso.

Sitios	Mn_0-7 (mg/kg)	Mn_15-22 (mg/kg)
HC-4_0-7	2.178	1.488
HC-7_0-7	894	688
HM-3_0-7	1.312	654
HM-1_0-7	640	919
EP-1A_0-7	1.124	1.058
Estadística	Mn_0-7 (mg/kg)	Mn_15-22 (mg/kg)
Mínimo	640	654
Máximo	2.178	1.488
Max/Min	3,40	2,28
Promedio	1.229,6	961,4
Mediana	1.124	919
Normativa de EE. UU.	1,21	0,83
<i>Background</i> Geológico	2,37	1,62

En el caso del Manganeso, solo la muestra HC-4_0-7 que presentó una concentración de 2.178 mg/kg, sobrepasa 1,21 veces la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. para suelos (Ref.: 1.800 mg/kg). Los Sitios HC-7, HM-3, HM-1, EP-1 en ambas profundidades se encuentran por debajo de la normativa de EE. UU. para Manganeso. Además, del sitio HC-4_15-22, lugar que presentó una concentración de 1.488 mg/kg, la cual es la segunda mayor concentración entre los sitios investigados. Además, se encuentra dentro del límite establecido por la normativa de EE. UU., y sobre el *background* geológico de Puchuncaví (ref.: 917,4). Por último, se observó que las concentraciones obtenidas de Manganeso aumentan a medida que nos acercamos al complejo industrial Ventanas.

3.8.2.2 Cobre (Cu)

El cobre en los sitios analizados presenta una concentración mínima de 49,7 mg/kg en el sitio HM-1_15-22 hasta un máximo de 1.487 mg/kg encontrado en el punto HC-4 en la profundidad de 15 a 22 cm. El sitio HC4_15-22 se presenta 29,92 veces más enriquecido que el sitio de mínima concentración de cobre obtenido (HM-1_15-22). La media es de 819 mg/kg y 417,14 mg/kg en las profundidades de 0 a 7 y 15 a 22 cm investigadas, valores que superan a las medianas de 623 y 122 mg/kg obtenidos en las profundidades respectivas (Tabla 34). Los sitios HC-4_15-22 y HC-7_0-7 presentan las máximas concentraciones de Cobre medidas de 1.487 mg/kg y 1.360 mg/kg respectivamente. En general, se observó una tendencia de aumento en las concentraciones en la profundidad de 0 a 7 cm. Además, de un aumento en las concentraciones a medida que nos acercamos a la zona oeste (muestras HC-4 Y HC-7) (Gráfico 11).

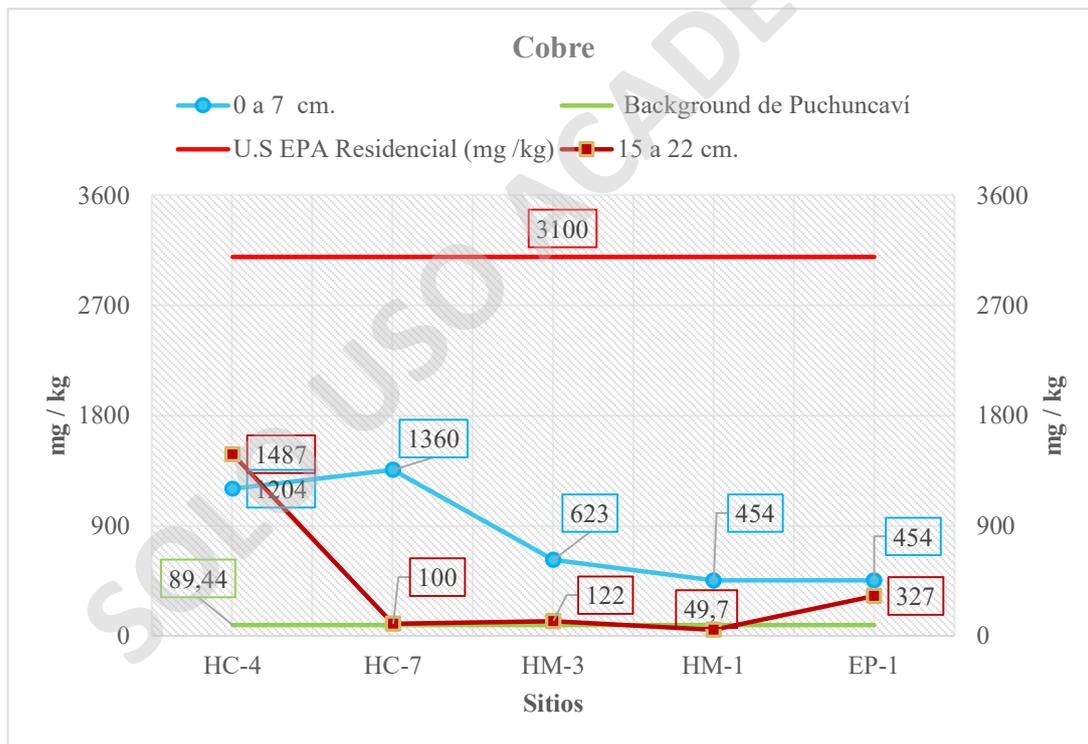


Gráfico 8. Concentración de Cobre en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cobre permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Cobre natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 29. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Cobre.

Sitios	Cu_0-7 (mg/kg)	Cu_15-22 (mg/kg)
HC-4	1.204	1.487
HC-7	1.360	100
HM-3	623	122
HM-1	454	49,7
EP-1	454	327
Estadística	Cu_0-7 (mg/kg)	Cu_15-22 (mg/kg)
Mínimo	454	49,7
Máximo	1.360	1.487
DESV esta	431,7904584	607,3349965
Max/Min	3,00	29,92
Promedio	819	417,14
Mediana	623	122
Normativa de EE. UU.	0,44	0,48
Background Geológico	15,21	16,63

Las concentraciones de Cobre no sobrepasaron la concentración límite de referencia de EE. UU. para suelos (Ref.: 3.100 mg/kg) en ninguna muestra analizada. Por otro lado, las concentraciones naturales de Cobre reportadas por la PGS (2015) son superadas en todos los sitios investigados, excepto en el sitio HM-1 en la profundidad de 15 a 22 cm.

3.8.2.3 Zinc (Zn)

El Zinc presentó una concentración mínima de 101 mg/kg en el sitio HM-1_15-22 y una concentración máxima de 1.624 mg/kg en el sitio HC-4_15-22 (Gráfico 13). La máxima concentración de Zinc se encuentra 16,07 veces más enriquecida que el sitio HM-1_15-22. La media calculada para las concentraciones medidas en la profundidad de 0 a 7 cm es de 287,4 mg/kg y una concentración de 471,6 mg/kg en la profundidad de 15 a 22 cm (Tabla 33). Se observa un gradiente de concentración de Zinc que aumenta a medida que nos acercamos a la zona oeste de Puchuncaví (HC-4).

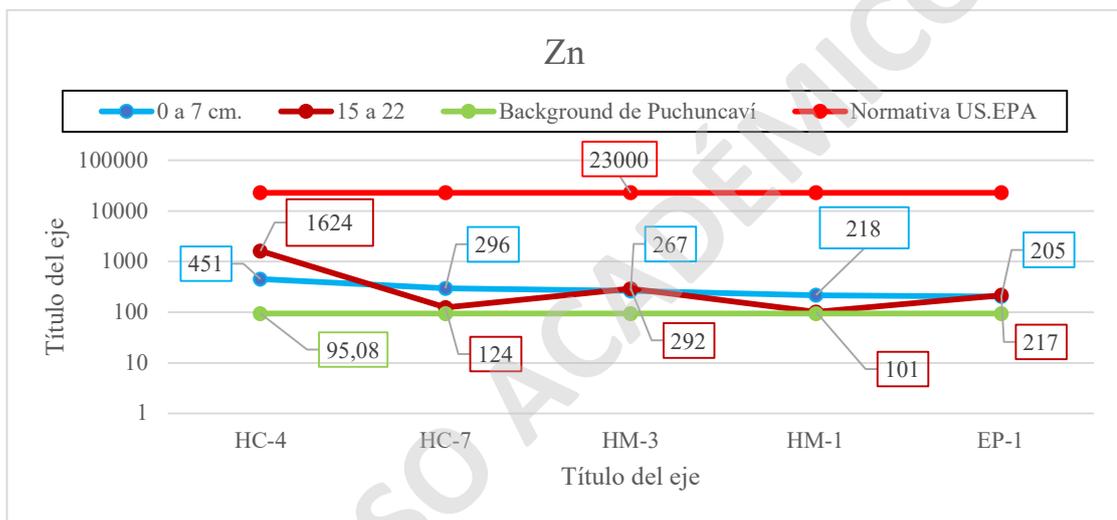


Gráfico 9. Concentración de Zinc en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Zinc permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Zinc natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 30. Estadística básica realizada para el Zinc.

Sitios	Zn_0-7 (mg/kg)	Zn_15-22 (mg/kg)
HC-4	451	1.624
HC-7	296	124
HM-3	267	292
HM-1	218	101
EP-1	205	217
Estadística	Zn_0-7 (mg/kg)	Zn_15-22 (mg/kg)
Mínimo	205	101
Máximo	451	1.624
Max/Min	2,20	16,08
Promedio	287,4	471,6
Mediana	267	217

Las concentraciones de Zinc cuantificadas no sobrepasan la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. (Ref.: 23.000 mg/kg). Además, la totalidad de las concentraciones medidas en los sitios estudiados, sobrepasan las concentraciones de Zinc naturales reportadas en el *background* geológico realizado en Puchuncaví por la PGS (2015) de 95,08 mg/kg.

3.8.3 Elementos Trazas

3.8.3.1 Arsénico (As)

Las concentraciones de Arsénico variaron entre un mínimo de 14,4 mg/kg en el sitio HM-1_15-22 a un máximo de 162 mg/kg en el sitio HC-4_0-7. La máxima concentración de Arsénico excede 11,25 veces el mínimo medido. La media de las concentraciones medidas corresponde a 62,85 mg/kg, siendo mayor que la mediana calculada de los datos de 40,65. Al observar la distribución espacial de Arsénico, se logra identificar una convergencia de las máximas concentraciones hacia el complejo industrial Ventanas, específicamente en el sitio HC-4 (Gráfico 8).

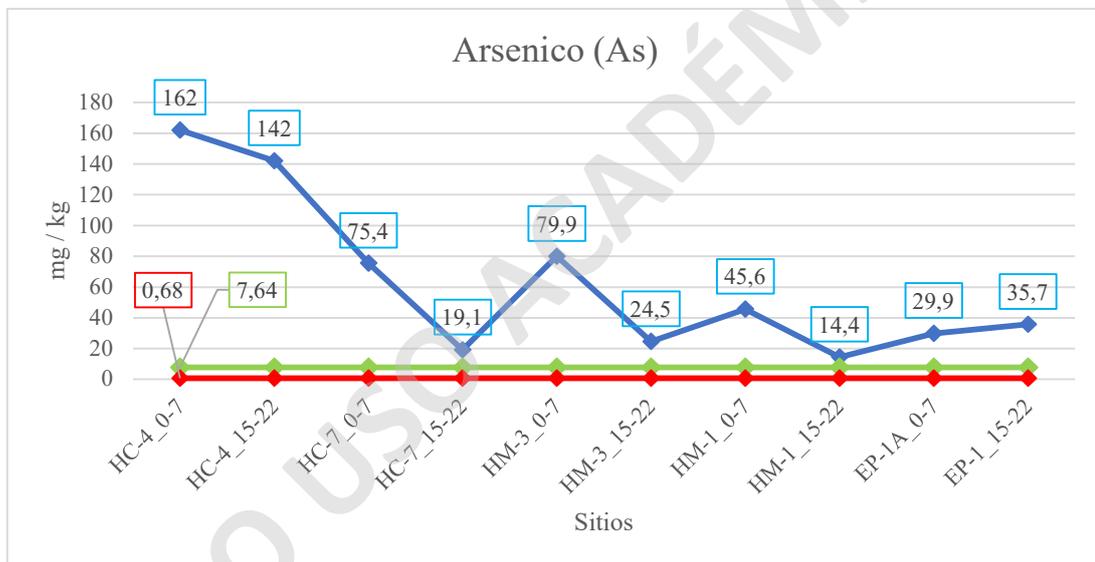


Gráfico 10. Concentración de Arsénico en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Arsénico natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 31. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Arsénico.

Sitios	As_0-7 (mg/kg)	As_15-22 (mg/kg)
HC-4	162	142
HC-7	75,4	19,1
HM-3	79,9	24,5
HM-1	45,6	14,4
EP-1	29,9	35,7
Estadística	As_0-7 (mg/kg)	As_15-22 (mg/kg)
Mínimo	29,9	14,4

Máximo	162	142
Max/Min	5,42	9,86
Promedio	78,56	47,14
Mediana	75,4	24,5
Normativa de EE. UU.	238,24	208,82
Background Geológico	21,20	18,59

El Arsénico, en la totalidad de los sitios analizados supera tanto la normativa de EE. UU. (ref.: 0,68 mg/kg) y el *background* geológico de Puchuncaví (7,64 mg/kg). El sitio HC-4 es el lugar que presenta las mayores concentraciones tanto en la profundidad superior (0-7 cm) e inferior (15-22 cm). La concentración de Arsénico de la zona superior muestreada sobrepasa 238,2 veces a la normativa de EE. UU., y 21,2 veces el *background* geológico de Puchuncaví (Tabla 28).

3.8.3.2 Cromo (Cr)

El Cromo dentro de los sitios analizados presentó un mínimo de 43,2 mg/kg en el sitio HC-4_0-7 y un máximo en la muestra HC-7_15-22 de 323 mg/kg (Gráfico 9), presentando un enriquecimiento de 7,47 veces al comparar el sitio de menor y mayor concentración. El promedio de Cromo es de 140,89 mg/kg, el cual supera a la mediana calculada de 106,5 mg/kg (Tabla 29). El sitio HC-7 es el lugar que presenta las máximas concentraciones de Cromo en ambas profundidades investigadas de 241 mg/kg en la profundidad superior (0-7 cm), y una concentración de 323 mg/kg la profundidad inferior (15-22 cm).

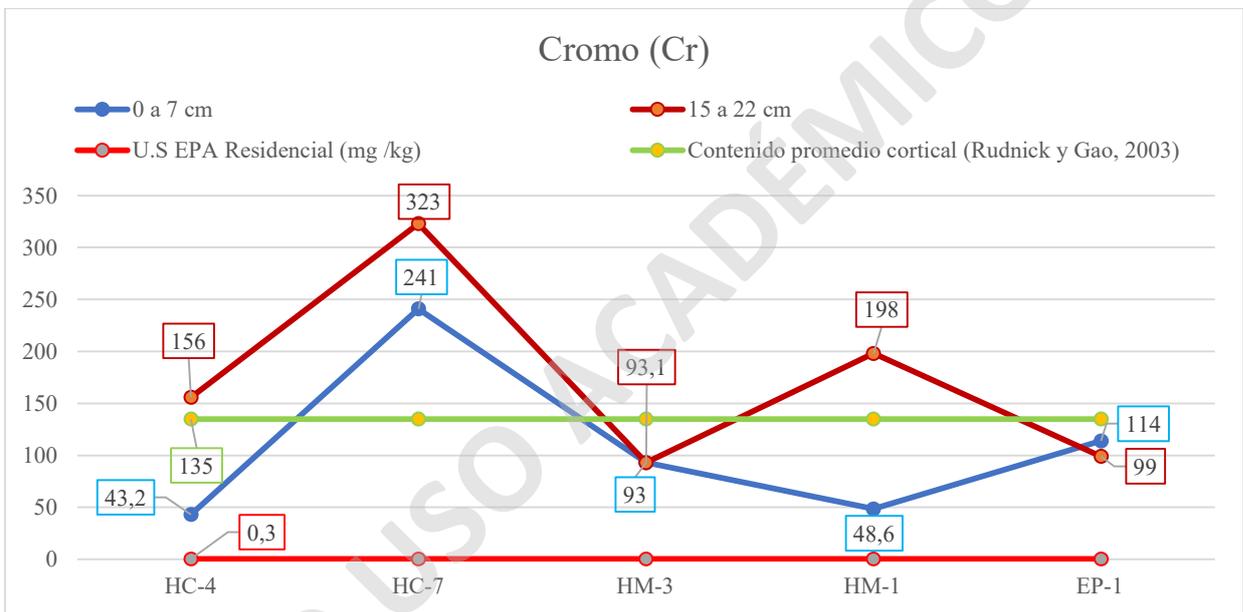


Gráfico 11.. Concentración de Cromo en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Arsénico natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 32. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Cromo.

Sitios	Cr_0-7 (mg/kg)	Cr_15-22 (mg/kg)
HC-4	43,2	156
HC-7	241	323
HM-3	93	93,1
HM-1	48,6	198
EP-1	114	99
Estadística	Cr_0-7 (mg/kg)	Cr_15-22 (mg/kg)
Mínimo	43,2	93,1

Máximo	241	323
Max/Min	5,58	3,47
Promedio	107,96	173,82
Mediana	93	156
Normativa de EE. UU.	803,33	1076,67
Background Geológico	?	?

La totalidad de muestras analizadas se observa sobre la normativa de EE. UU., (ref.: 0,3 mg/kg). El sitio de máxima concentración (HC-7_15-22), se encuentra enriquecido 1076,6 veces respecto a la normativa EE. UU., (Tabla 29).

La concentración de Cromo medidas en los diferentes sitios se comparó respecto a las concentraciones naturales promedio medidas en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003). El sitio HC-7 es el único lugar en que ambas profundidades investigadas se presentan sobre la concentración promedio de la corteza cortical. Además, del sitio HC-4 y HM-1 en la profundidad de 15 a 22 cm.

3.8.3.3 Plomo (Pb)

El Plomo presentó una variación de concentración entre un valor mínimo de 18,1 mg/kg en el sitio HC-7_15-22 y un máximo de 251 mg/kg en el sitio HC-4_15-22 (Gráfico 12). De esta manera, el sitio HC-4 en la profundidad de 15 a 22 cm, presenta una concentración de Plomo de 13,87 veces más que el punto HC-7 en la misma profundidad investigada (Tabla 35). El promedio de las concentraciones de Plomo obtenidas en una profundidad de 0 a 7 cm y 15 a 22 cm es de 76,06 mg/kg y 86,34 mg/kg respectivamente. Estos valores sobrepasan a la mediana calculada de 71,4 mg/kg entre los valores medidos a una profundidad de 0 a 7 cm y 49,5 mg/kg a la profundidad de 15 a 22 cm. Además, se aprecia un gradiente de concentración que incrementa a medida que nos acercamos a la zona aledaña al complejo industrial Ventanas. Por último, en la profundidad de 15 a 22 cm, se observa una mayor variabilidad en las concentraciones medidas que a una profundidad de 0 a 7 cm.

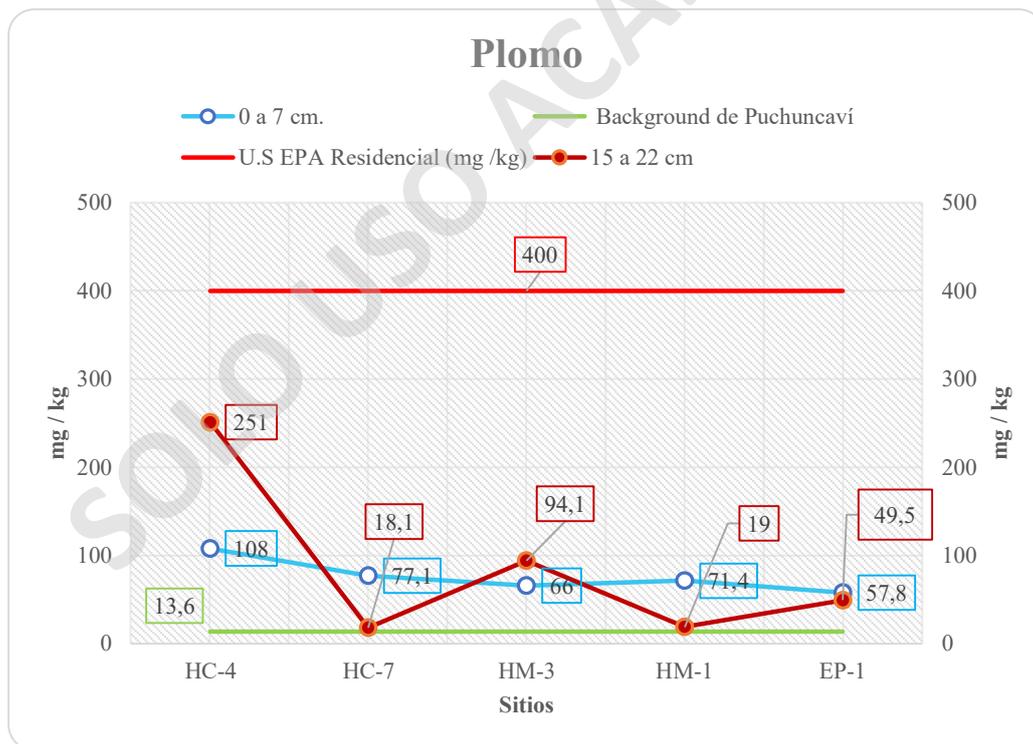


Gráfico 12. Concentración de Plomo en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Plomo permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Plomo natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 33. Concentración medida en cada sitio y estadística básica realizada para el Plomo.

Sitios	Pb_0-7 (mg/kg)	Pb_15-22 (mg/kg)
HC-4	108	251
HC-7	77,1	18,1
HM-3	66	94,1
HM-1	71,4	19
EP-1	57,8	49,5
Estadística	Pb_0-7 (mg/kg)	Pb_15-22 (mg/kg)
Mínimo	57,8	18,1
Máximo	108	251
Max/Min	1,87	13,87
Promedio	76,06	86,34
Mediana	71,4	49,5
Normativa de EE. UU.	0,27	0,6275
<i>Background Geológico</i>	7,94	18,46

Las concentraciones de Plomo no superan la concentración límite de referencia de EE. UU. para suelos (Ref.: 400 mg/kg) en ningún sitio estudiado. Por otro lado, las concentraciones naturales reportadas por la PGS (2015), son superadas en la totalidad de sitios investigados.

3.8.3.4 Níquel (Ni)

Las concentraciones de Níquel obtenidas variaron entre un rango de concentración mínima de 24,8 mg/kg en el sitio HM-1_0-7 hasta una concentración máxima de 173 mg/kg en el sitio HC-7_15-22. El sitio HC-7_15-22 presenta un enriquecimiento de 6,97 veces más que el sitio de mínima concentración (HM-1_0-7). El promedio de concentraciones de Níquel calculado en la profundidad de 0 a 7 cm es de 56,58 mg/kg y de 89,36 mg/kg en la profundidad de 15 a 22 cm, valores que sobrepasan la mediana calculada en ambas profundidades investigadas de 44,6 mg/kg y 78,9 mg/kg respectivamente. En general, se observa una tendencia de mayor enriquecimiento de Níquel en la profundidad de 15 a 22 cm investigada.

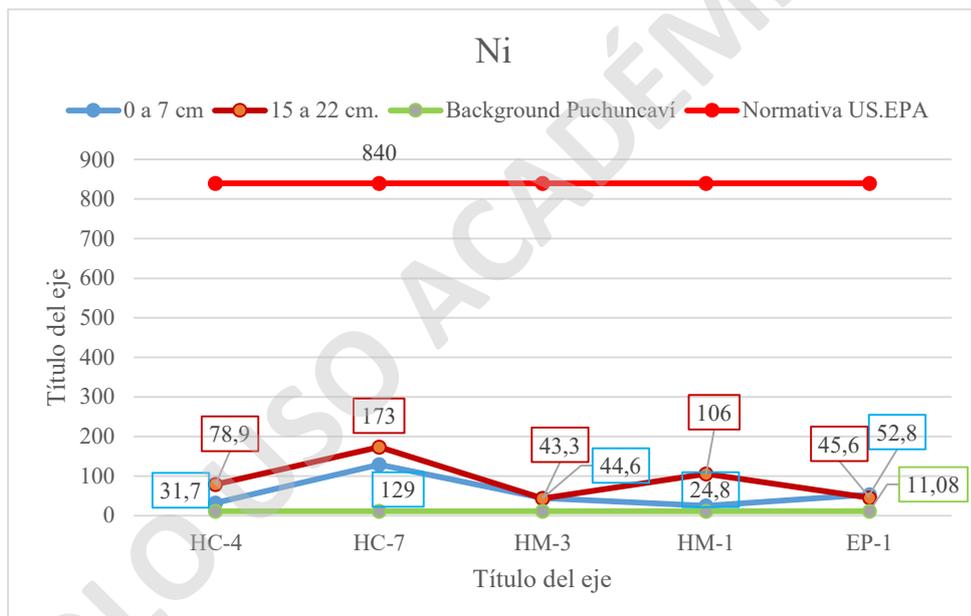


Gráfico 13. Concentración de Níquel en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Níquel permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Níquel natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 34. Estadística básica realizada para el Níquel.

Sitios	Ni_0-7 (mg/kg)	Ni_15-22 (mg/kg)
HC-4	31,7	78,9
HC-7	129	173
HM-3	44,6	43,3
HM-1	24,8	106
EP-1	52,8	45,6
Estadística	Ni_0-7 (mg/kg)	Ni_15-22 (mg/kg)
Mínimo	24,8	43,3
Máximo	129	173
Max/Min	5,20	4,00
Promedio	56,58	89,36
Mediana	44,6	78,9

Las concentraciones de Níquel cuantificadas no sobrepasan la concentración límite de referencia utilizada (*USEPA*) en ningún sitio estudiado. Por otro lado, la totalidad de concentraciones obtenidas sobrepasan las concentraciones naturales de la zona de Puchuncaví reportadas por la PGS en el año 2015.

3.8.3.5 Cobalto (Co)

Para el Cobalto se obtuvo un mínimo de concentración de 10,3 mg/kg (HM-3_15-22) y un máximo de 49,9 mg/kg (HC-4_15-22) (Gráfico 15). El sitio HC-4_15-22 presenta un enriquecimiento 4,84 veces mayor al sitio de mínima concentración (HM-3_15-22). La media de los datos obtenidos es de 19,73 mg/kg, el cual es mayor a la mediana calculada de 14,85 mg/kg. El Cobalto medido presentó sus máximas concentraciones en ambas profundidades del sedimento analizado del sitio HC-4 que se encuentra ubicado en la zona aledaña al CIV.

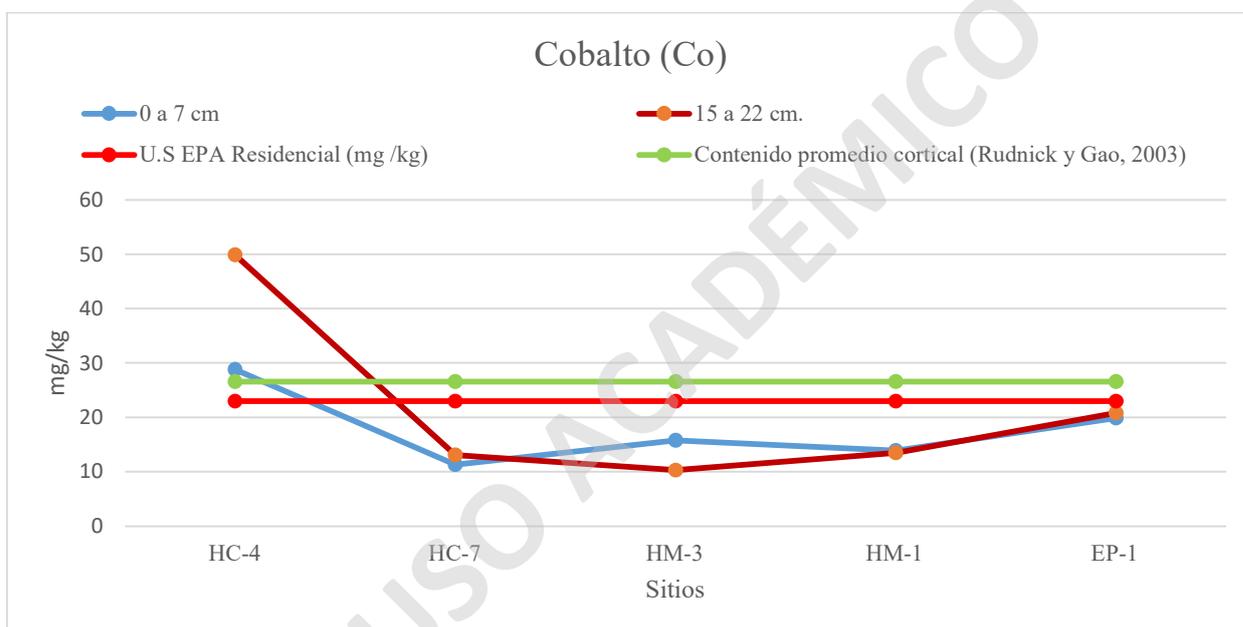


Gráfico 14. Concentración de Cobalto en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cobalto permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración promedio de Cobalto medido en la corteza cortical por Rudnick & Gao (2003).

Tabla 35. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Cobalto.

Sitio	Co_0-7 (mg/kg)	Co_15-22 (mg/kg)
HC-4	28,8	49,9
HC-7	11,3	13,1
HM-3	15,8	10,3
HM-1	13,9	13,5
EP-1	19,9	20,8
Estadística	Co_0-7 (mg/kg)	Co_15-22 (mg/kg)
Mínimo	11,3	10,3
Máximo	28,8	49,9
Max/Min	2,55	4,84
Promedio	17,94	21,52
Mediana	15,8	13,5
Normativa de EE. UU.	1,25	2,17
Background Geológico	?	?

En el caso del Cobalto, un 20 % de las muestras analizadas sobrepasan la normativa de EE. UU. (1 de 5 sitios). Las máximas concentraciones medidas se encuentran en el sitio muestreado más cercano al CIV (HC-4). Además, es el único sitio que presenta concentraciones que sobrepasan la norma de referencia utilizada en ambas profundidades estudiadas (ref.: 23 mg/kg), presentando un enriquecimiento de 2,17 veces la concentración límite de Cobalto establecida por la normativa de EE. UU. (Tabla 35).

3.8.3.6 Antimonio (Sb)

Para el Antimonio se obtuvo concentraciones solo en el sitio HC-4 y HC-7. Este elemento presenta una concentración mínima de 10 mg/kg en la muestra HC-7_15-22 y un máximo de 29 mg/kg en el sitio HC-4_15-22. La media de los datos obtenidos es de 9,06 mg/kg en la profundidad de 0 a 7 cm y 10,8 en la profundidad de 15 a 22 cm, estos valores son mayores a la mediana calculada de 5 mg/kg en ambas profundidades. Las máximas concentraciones de Antimonio se presentaron en el sitio HC-4 en ambas profundidades investigadas 17,3 mg/kg (HC-4_0-7) y 29 mg/kg (HC-4_15-22).

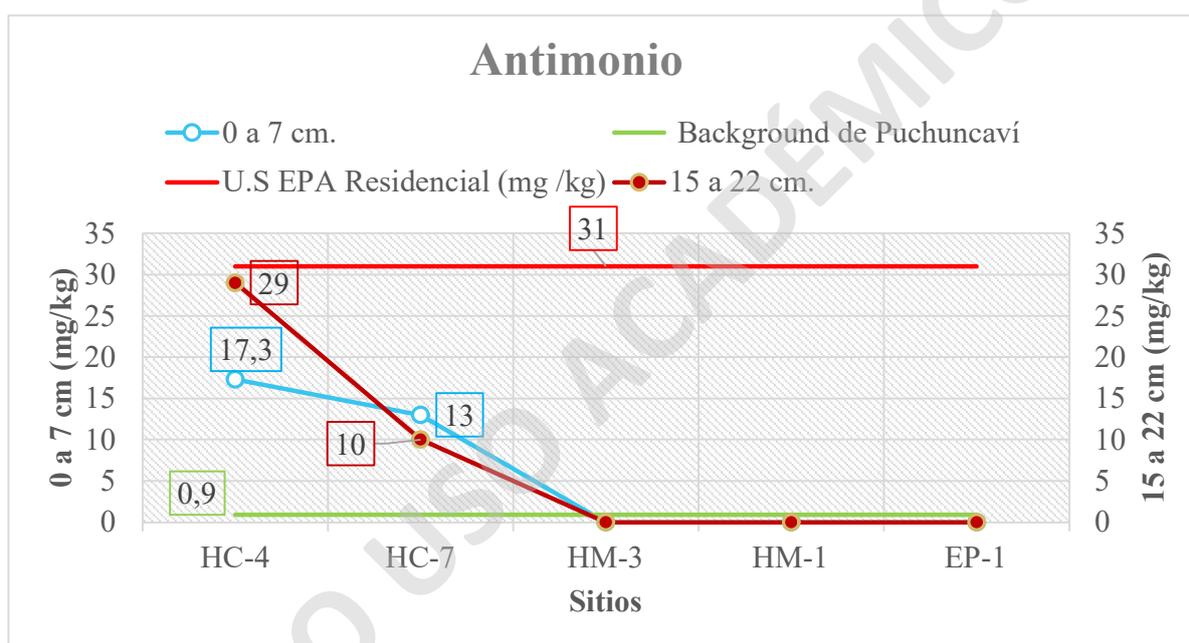


Gráfico 15. Concentración de Antimonio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Antimonio permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Antimonio natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 36. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Antimonio.

Sitios	Sb_0-7 (mg/kg)	Sb_15-22 (mg/kg)
HC-4	17,3	29
HC-7	13	10
HM-3	5	5
HM-1	5	5
EP-1	5	5
Estadística	Sb_0-7 (mg/kg)	Sb_15-22 (mg/kg)
Mínimo	5	5
Máximo	17,3	29
Max/Min	3,46	5,80
Promedio	9,06	10,8
Mediana	5	5
Normativa de EE. UU.	0,56	0,94
Background Geológico	19,22	32,22

Las concentraciones máximas de Antimonio medidas en el sitio HC-4 no sobrepasan la normativa de EE. UU. (Ref.: 31 mg/kg). Por otro lado, al comparar las máximas concentraciones respecto al *background* geológico supera 19,22 y 32,22 veces las concentraciones naturales en las profundidades de 0 a 7 cm y 15 a 22 cm respectivamente.

3.8.3.7 Molibdeno (Mo)

El Molibdeno presentó una variación de concentración entre un mínimo de 5,95 mg/kg en el sitio HM-1_0-7 a un máximo de 358 mg/kg en HC-4_15-22. El sitio de máxima concentración en la profundidad de 15 a 22 cm presenta un enriquecimiento de 45,20 veces más que el sitio de mínima concentración (HM-1_0-7). El promedio de los datos obtenidos es de 27,88 mg/kg (profundidad de 0-7 cm) y 83,55 mg/kg (profundidad de 15 a 22 cm), valores que superan la mediana calculada de 13 mg/kg y 16,3 mg/kg en cada profundidad investigada. El Molibdeno presentó sus máximas concentraciones en ambas profundidades del sitio HC-4 (aledaño al CIV).

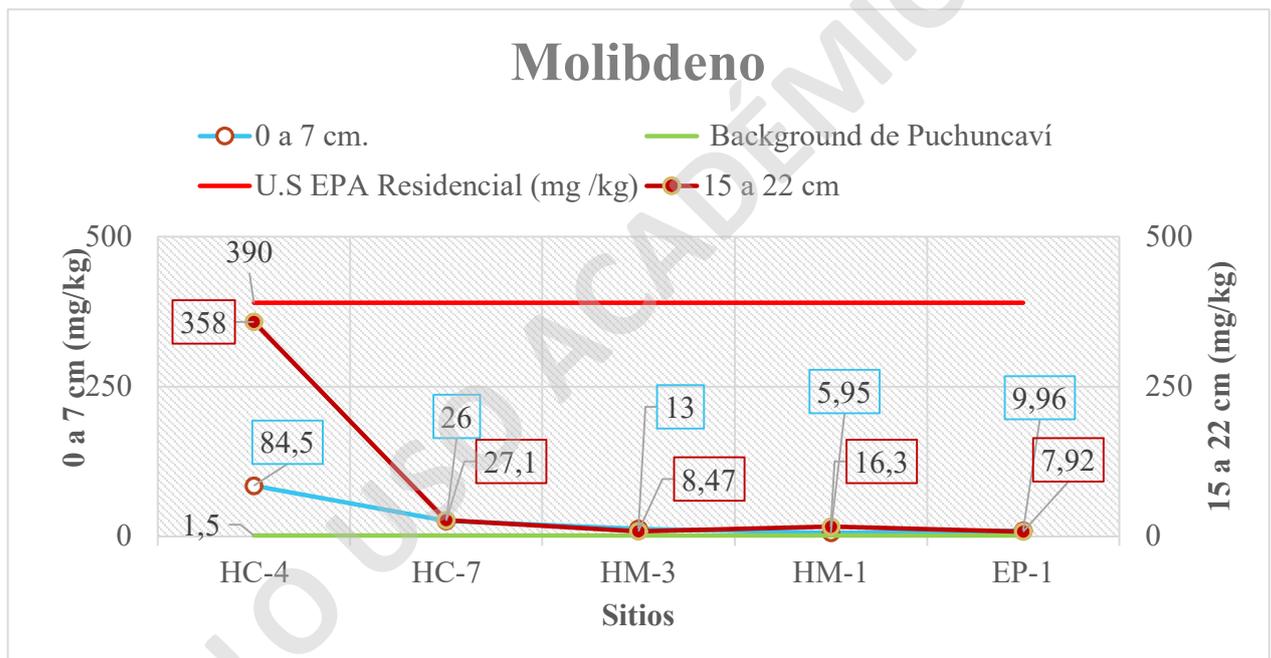


Gráfico 16. Concentración de Molibdeno en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Molibdeno permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración natural de Molibdeno en la zona (PGS, 2015)

Tabla 37. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Molibdeno.

Sitios	Mo_0-7 (mg/kg)	Mo_15-22 (mg/kg)
HC-4	84,5	358
HC-7	26	27,1
HM-3	13	8,47
HM-1	5,95	16,3
EP-1	9,96	7,92

Estadística	Mo_0-7 (mg/kg)	Mo_15-22 (mg/kg)
Mínimo	5,95	7,92
Máximo	84,5	358
Max/Min	14,20	45,20
Promedio	27,882	83,558
Mediana	13	16,3
Normativa de EE. UU.	0,22	0,92
Background Geológico	56,33	238,67

Las concentraciones de Molibdeno cuantificadas no superan la concentración límite definida por la normativa de EE. UU. (Ref.: 390 mg/kg). Por otro lado, la totalidad de las concentraciones medidas en los sitios investigados, superan las concentraciones naturales de Molibdeno reportadas por la PGS (2015) de 1,5 mg/kg.

3.8.3.8 Cadmio (Cd)

Las concentraciones de Cadmio se midieron solo en la profundidad de 0 a 7 cm en dos sitios HC-4_0-7 y HC-7_0-7 con una concentración de 6,72 mg/kg y 6,07 mg/kg respectivamente. La máxima concentración de Cadmio se encuentra 1,10 veces más enriquecida que el sitio de mínima concentración medida. El promedio de las concentraciones obtenidas coincide con la mediana con un valor de 6,395 (mg/kg). El cadmio se midió solo en la zona oeste, a aldeaño al CIV.

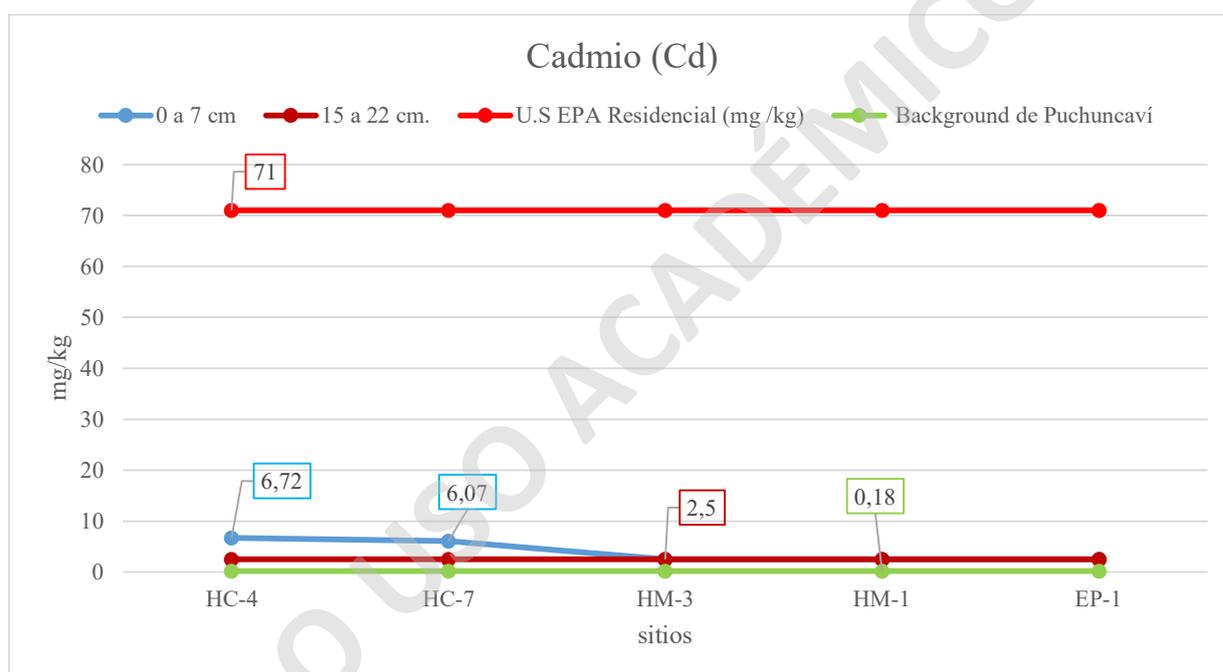


Gráfico 17. Concentración de Cadmio en los 5 sitios estudiados. Además, la línea roja limita la concentración máxima de Cadmio permitida por la normativa de EE. UU. En cambio, la línea verde muestra la concentración de Cadmio natural de la zona (PGS, 2015).

Tabla 38. Concentraciones medidas en cada sitio y estadística básica realizada para el Cadmio.

Sitio	Cd_0-7 (mg/kg)	Cd_15-22 (mg/kg)
HC-4_0-7	6,72	2,5
HC-7_0-7	6,07	2,5
HM-3_0-7	2,5	2,5
HM-1_0-7	2,5	2,5
EP-1A_0-7	2,5	2,5
Estadística	Cd_0-7 (mg/kg)	Cd_15-22 (mg/kg)
Mínimo	2,5	2,5
Máximo	6,72	2,5
Max/Min	2,69	1,00
Promedio	4,058	2,5
Mediana	2,5	2,5
Normativa de EE. UU.	0,094	0,035
<i>Background Geológico</i>	84	31,25

Las concentraciones de Cadmio, no sobrepasa la concentración máxima permitida por la normativa de EE. UU. (Ref.: 71 mg/kg) en ningún sitio estudiado. Por otro lado, se observa que en los sitios HC-4_0-7 y HC-7_0-7 (únicos sitios en donde se cuantifico el Cadmio) superó la concentración natural de Cadmio reportado por la PGS (2015) de 0,18 mg/kg.

4. Discusión

4.1 Impactos de metales pesados en humedales y su relación con los índices de calidad de sedimentos calculados

Los humedales son sistemas de gran importancia, estos sistemas pueden ser deteriorados producto a amenazas tales como el cambio climático, procesos de expansión urbana y un sobre enriquecimiento elemental (WCS, 2019; Smith & Romero, 2008).

Los humedales se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento de aguas, donde los elementos disueltos son removidos a través de procesos físicos, químicos y biológicos de forma natural (Cabezas & Cedeño, 2015). Estos sistemas son zonas donde el principal factor controlador del sistema es el agua y el lugar donde especies de flora y fauna se adaptan a las condiciones del medio (Ramsar, 1971). Esta flora y fauna puede ser deteriorado producto a una exposición prolongada o por bioacumulación de metales pesados (Combariza, 2009).

Los índices de calidad de sedimento o índices de riesgo ecológico es una herramienta de diagnóstico para suelos y sedimentos, que otorga un valor cuantitativo de forma fácil y simple, para lograr conocer el riesgo ecológico que puede ser generado por un contaminante determinado (Hakanson, 1980). De esta manera, elementos clasificados de alta a extremadamente contaminados, ósea el Plomo, Cobre, Níquel, Zinc, Cadmio, Arsénico, Antimonio y Molibdeno se encontrarían generando un efecto ecológico adverso importante en los humedales investigados, sobre todo en los lugares más cercanos. Esto es corroborado por estudios que señalan que el Cobre y Arsénico estarían generando efectos ecológicos adversos en Puchuncaví y que estos efectos incrementan en las cercanías al complejo industrial (Salmanigabeshi et al., 2015). Las concentraciones máximas metálicas de Cadmio, Zinc, Cromo, Cobre, Níquel, Plomo, Manganeso y Hierro medidas en sedimento estarían superando los límites PEL (*probably effect level*). El PEL es una concentración máxima aceptable en sedimentos para metales como Cadmio (5 mg/kg), Zinc (460 mg/kg), Cromo (110 mg/kg), Cobre (150 mg/kg), Níquel (49 mg/kg), Plomo (130 mg/kg), Manganeso (1100 mg/kg) y Hierro (40.000 mg/kg), por lo que al superar esta concentración se esperaría que estos elementos estén generando frecuentemente efectos adversos (CENMA, 2017; MacDonald & Col, 2000).

Igualmente, según la disponibilidad de estos metales para los organismos pueden entrar en la cadena trófica, e inclusive llegando a la población. Una alta exposición de metales pesados tiene efectos negativos a la salud humana, causando daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos (Combariza, 2009). De igual manera, metales pesados encontrados en los sedimentos podrían entrar a la cadena trófica a través de los invertebrados terrestres. Al ser fuente principal de alimento de aves y de otros pequeños vertebrados, de forma que se va traspasando a organismos que pertenecen a una cadena trófica de orden superior (Heikens *et. al*, 2001).

SOLO USO ACADÉMICO

4.2 Concentración de elementos químicos en sedimentos y su comparación respecto a la normativa de EE. UU. y *background* geológico de Puchuncaví

En los análisis realizados en sedimentos depositados debajo de los humedales Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví se encontraron concentraciones de Calcio, Azufre, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio, Cadmio, Aluminio, Hierro, Arsénico, Cromo, Manganeso y Cobalto que varían en un amplio rango dentro de la zona estudiada con una máxima concentración de la mayoría de los elementos de interés en la zona más próxima al sector industrial de Puchuncaví. Dentro de estos elementos el Aluminio, Arsénico, Cobalto, Hierro, Manganeso y Cromo presentan concentraciones que se encuentran sobre las concentraciones máximas permitidas por la normativa de EE. UU. Igualmente, estudios anteriores que han utilizado de referencia la normativa de EE. UU. para comparar respecto a las concentraciones medidas han señalado que elementos como Manganeso, Hierro, Cobre y Arsénico también se han encontrado sobre la normativa de EE. UU. (PGS, 2015).

La línea base natural de los sedimentos, representado por el material litogénico, varía geográfica y temporalmente de acuerdo con las características geológicas, climáticas y biológicas (vegetación) (Ayers, 1985; Gonzáles & Bergqvist, 1986). De esta manera, a través de las concentraciones mínimas y máximas definidas, podemos observar si la normativa de EE. UU. se adapta a las condiciones del sector.

Según autores consultados bibliográficamente, algunos de los factores que influyen en la acumulación y disponibilidad de los metales pesados en suelos y sedimentos son el pH, texturas, contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio, condiciones redox, la presencia de óxidos e hidróxidos de Hierro y Manganeso, Carbonatos y Salinidad. Otros factores que coadyuvan son el área específica, las proporciones de los tipos de arcilla, óxidos e hidróxidos de Aluminio, y procesos hidráulicos relacionados (Aguilar *et al.*, 1999).

4.2.1 Algunos factores que influyen en las concentraciones químicas medidas en sedimentos son:

4.2.1.1 Geología

Los sitios investigados en el humedal Campiche, Los Maitenes, y estero Puchuncaví de donde se extrajeron los testigos analizados, se encuentran en la zona geológica correspondiente a dos unidades sedimentarias no consolidadas, como lo son: Sedimentos aluviales- coluviales (Qac) y depósitos costeros antiguos o paleodunas (Pqd) (Rivano, 1993). Sumado a esto en la zona investigada existen dos formaciones, las cuales aportarían material no consolidado a través de procesos erosivos hacia zonas de menor altura y con influencia de los humedales estudiados: Una de ellas es la Formación Confluencia, la cual es clasificada como una formación sedimentaria compuesta por conglomerados, areniscas, brechas y limonitas. La segunda es la Formación Ajial que representa a las rocas volcánicas pertenecientes a la cordillera de la costa y se encuentra conformada por tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas (Rivano, 1993; Thomas, 1958; Piráces & Maksae, 1977).

Estas rocas volcánicas Jurásicas pertenecientes a la Formación Ajial presentan mineralización de cobre, sin embargo, estas corresponden a anomalías puntuales que no alteran a mayor escala las concentraciones generales de la zona (PGS, 2015). Las concentraciones naturales medidas en Puchuncaví provienen de la Formación Horcón, Formación Ajial e intrusivo Jurásico (PGS, 2015). Por lo tanto, cierta parte de las concentraciones de Vanadio, Manganeso, Hierro, Níquel, Cobre, Zinc, Arsénico, Molibdeno, Cadmio, Antimonio y Plomo medidas en el presente estudio, podrían tener un potencial origen en el material meteorizado *in situ* de la Formación Ajial que posteriormente es movilizado por agentes naturales.

En general, el material meteorizado es transportado desde zonas de mayor a menor energía. De esta manera, los humedales estudiados son zonas de baja energía que favorecen la depositación de sólidos, al encontrarse estancados y en zonas de baja altura. El material por el cual está constituida la base sedimentaria del humedal, debería ser el mismo que las zonas superiores, más el aporte sedimentario del aumento y disminución del nivel del mar (antes que existiera el CIV), el cual debería poseer una química similar debido a que han sido afectados por los mismos procesos geológicos en su génesis.

En general, los sedimentos extraídos en los sitios HC-4, HM-3, HM-1_0-7 y EP-1 se encuentran conformados por granos tamaño limo – arcilla. A diferencia de HC-7 en ambas profundidades y HM-1_15-22 que se encuentran constituidos por granos tamaño arena fina. Se observó restos de

animales como gastrópodos en el sitio HC-7 y en mayor proporción en el sitio HM-3. Esto confirmaría las unidades de origen sedimentario definidas por Rivano (1993).

Aunque la geoquímica natural de las rocas y sedimentos presentes en la zona de estudio representa un significativo aporte elemental, no logra explicar las variaciones de concentración de los diferentes elementos en una diferencia de profundidad de 0 a 22 cm, ni tampoco la diferencia de concentración encontrada en los diferentes sitios estudiados respecto a la distancia uno del otro. Además, del notorio aumento de concentración hacia el oeste de la zona (convergiendo hacia el CIV).

4.2.1.2 pH

Las condiciones de pH de las aguas de los humedales estudiados presentan un rango medido entre 9,80 en las cercanías al escorial (HC-4) y 4,3 en el punto investigado más lejano (EP-1). En general todos los puntos muestreados dentro de la delimitación de los humedales se encontraron en un rango de pH 9 a 9,8, lo que favorecería una especiación distinta y mayores concentraciones de metales pesados presentes en sedimento para cada elemento respecto al punto más lejano EP-1 al presentar un pH 4,3. En un pH ácido la mayoría de los metales tiende a estar más disponibles, generándose además una degradación de la materia orgánica y consecuente solubilización de los metales afectando a la especiación química y movilidad química (Galán y Romero, 2008). Por lo tanto, a un pH alcalino existe mayor preferencia de algunos elementos por la fase sólida, tales como Níquel, Cobre, Zinc, Cadmio, Plomo, Aluminio y Hierro aumentando la concentración de metales en los sedimentos. En cambio, aniones como Molibdeno Cromo (VI), Arsénico, Selenio, Antimonio y Sulfato en una condición de pH alcalino (sobre 9) se encuentran principalmente disueltos (Van der Sloot, 2010)

El aporte litogénico desde zonas de mayor altura y la geología de la zona de los sitios estudiados es relativamente homogénea, por lo que no explican las diferencias de pH presente en el mismo curso de agua (desde el CIV al punto EP-1) (Tabla 19; Figura 19).

En general en los sitios cercanos a la zona oeste como HC-4, HC-7 y HM-3 presentan un pH más alcalino (9,8, 9,21 y 9,66) que los pHs medidos previamente por Cabrera (2020) en estos mismos sitios de 8,5, 8,2 y 7,0 respectivamente. Además, el pH de 4,3 medido en el punto EP-1 discrepa de el pH de 8,1 medido previamente por Cabrera (2020) en el mismo sitio.

4.2.1.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica en las aguas se encuentra directamente relacionada a las sales disueltas. Las sales más importantes que contribuyen a la conductividad son Na^+ y Ca^{2+} que pueden remplazar a metales pesados en sitios de intercambio catiónico, y el Cl^- y SO_4^{2-} pueden formar compuestos más estables con metales como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Hg^{2+} , formando sales y contribuyendo a un pH alcalino (Galán y Romero, 2008). La salinidad es una variable muy importante para la movilidad de metales pesados, debido a que en sistemas estuarinos el ion Cl^- puede formar varios complejos con los metales pesados, los cuales se pueden intercambiar y aumentar o disminuir su disponibilidad al medio acuático (Lacerda, 1998).

La conductividad eléctrica medida presenta un máximo en el sitio HM-3 (32.510 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ubicado hacia el NE del complejo industrial Ventanas, esto podría ser producto a una deposición y transporte de partículas provenientes desde el CIV que provocarían un aumento en las concentraciones disueltas en los sitios investigados en dirección del viento (NE). Esto es corroborado por medidas de la sedimentación atmosférica de algunos metales pesados, ion sulfato y arsénico aumentan en los alrededores del complejo industrial Ventanas (Chiang, 1989). Igualmente, estudios previos que miden la conductividad eléctrica reportan valores similares, excepto en el sitio HM-3, donde anteriormente se midieron valores de 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Cabrera, 2020).

El sitio HC-7 aunque es un sitio cercano al CIV no se encuentra en la dirección preferencial de los vientos (NE) por lo que tendría un menor aporte de elementos vía aérea y por lo tanto menor proporción de partículas en suspensión (2.223 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que el sitio HM-3 que se encuentra a una distancia similar al sitio HC-7, pero en dirección NE tendría un aporte mayor de material particulado proveniente del CIV.

El aumento de la conductividad eléctrica es relacionado con el aumento de iones en disolución, y, por lo tanto, existe más cationes y aniones disponibles que pueden precipitar o adsorberse en algún momento a alguna superficie, formando sales u otros minerales estables a las condiciones del sistema. Además, la alcalinización del sistema es un proceso que podría facilitar una mayor preferencia de algunos elementos por la fase sólida (sobre pH 9), tales como Níquel, Cobre, Zinc, Cadmio, Plomo, Aluminio y Hierro aumentando la concentración de metales en los sedimentos.

En cambio, aniones como Molibdeno, Cromo (VI), Arsénico, Selenio, Antimonio y Sulfato en una condición de pH alcalino se encuentran principalmente disueltos (Van der Sloot, 2010).

4.2.1.4 Industrias de la zona

Autores han mencionado 2 industrias principalmente que podrían contribuir a un enriquecimiento elemental en las zonas aledañas al complejo industrial Ventanas (Chiang *et al.*, 1985; González & Bergvist, 1986; PGS, 2015), estas son:

a) Termoeléctricas

La industria termoeléctrica a carbón libera elementos que pueden ser perjudiciales para el medioambiente (Lockwood *et al.*, 2009). En la presente investigación se midieron concentraciones significativas de Arsénico, Cromo, Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Plomo y Níquel. Es posible que cierta concentración de estos metales medidos podría deberse al resultado de la generación de energía eléctrica a través la industria termoeléctrica del complejo industrial Ventanas. Investigadores han mencionado que el proceso de generación de electricidad a través de la industria termoeléctrica podría liberar material particulado (MP10 y MP2,5), monóxido de Carbono, dióxido de Nitrógeno (NO₂), sulfuro de Hidrógeno (H₂S), dióxido de Azufre (SO₂), dióxido de Carbono (CO₂), Ozono (O₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Querol, 1996; Lockwood *et al.*, 2009). Además, se han encontrado concentraciones de Mercurio, Cobre, Níquel, Plomo, Vanadio, Mercurio, Cromo Cobalto, Arsénico, Molibdeno Cadmio y Antimonio en cenizas volantes originadas de la quema del carbón (GAC, 2006; CONAMA, 2009; Lockwood *et al.*, 2009; MMA 2013; Greenpeace *et al.*, 2020;).

Se ha informado que las centrales de Puchuncaví estarían ocupando carbón como principal combustible (CONAMA, 2009). Otros, han mencionado que algunas termoeléctricas de la zona estarían utilizando carbón y “*petcoke*” como combustible (González, 2016). Este último contiene elevadas concentraciones de elementos como Níquel y Vanadio (Comisión especial investigadora, 2018). Además, otros investigadores han concluido que las emisiones al aire asociadas a la actividad de generación eléctrica se relacionan principalmente con la combustión, el tipo y calidad de los combustibles (carbón, *petcoke*, diesel, petróleo pesado y gas natural) (CONAMA, 2009). El coque es originado de las fracciones más pesadas del petróleo, concentra las impurezas más densas, como metales y compuestos sulfurados; el contenido de esos

componentes depende directamente de la calidad del petróleo procesado. Así, se pueden tener coques en el mercado internacional con contenidos de Azufre que varíen de 4 a 7,5 % en masa (Salvador *et al.*, 2003).

Las termoeléctricas se encuentran en el sector norte del complejo industrial Ventanas por lo que la dirección predominante de los vientos permitiría un posible transporte de partículas hacia la zona NE, dirección en que se ubica el sitio EP-1 del presente estudio (ubicado a 3 km del sitio HC-4). Esto podría contribuir a un enriquecimiento en las distintas matrices ambientales, contribuyendo en las concentraciones de elementos como Arsénico, Cromo, Níquel, Cobalto, Cobre, Plomo, entre otros. Según la bibliografía consultada estos elementos podrían ser emitidos como producto de la generación de electricidad a través de la industria termoeléctrica (GAC, 2006; Lockwood *et al.*, 2009; MMA 2013; Greenpeace *et al.*, 2020). Aunque, los vientos predominantes son en sentido NE, vientos de menor frecuencia podrían esparcir material emitido en otras direcciones, según modelaciones del material particulado emitido en Puchuncaví, donde se observa una zona de influencia entre 10 a 20 km alrededor de las centrales termoeléctricas (Greenpeace *et al.*, 2020).

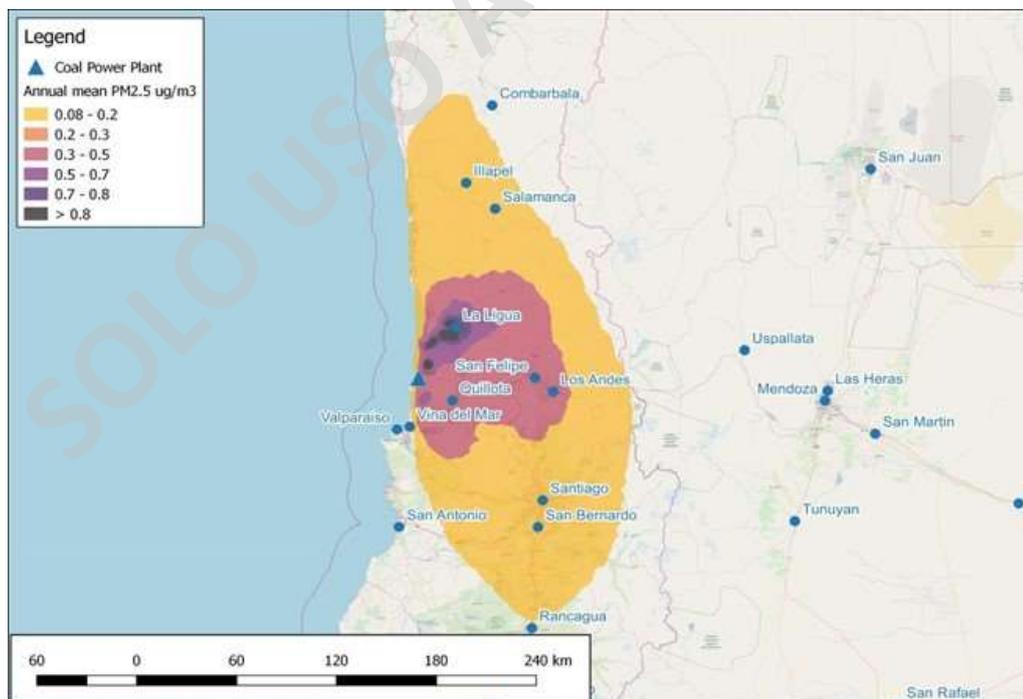


Figura 18. Promedio máximo en 24 h para material particulado MP 2,5 en la Región de Valparaíso, proveniente de las termoeléctricas de Puchuncaví.

Se encontraron variaciones de concentraciones significativas en sedimentos de elementos como Cromo (<2,5 a 6,72 mg/kg), Hierro (39.375 a 110.508 mg/kg), Cobre (49,7 a 1487 mg/kg), Zinc (101 a 1624 mg/kg), Plomo (18,1 a 251 mg/kg) y Níquel (24,8 a 173 mg/kg) en Puchuncaví. Las variaciones de concentración medidas en sedimento son mayores que los reportados por autores en lugares donde existen termoeléctricas tales como Agua Prieta en Sonora México y Huasco en Chile (Atondo *et al*, 2013; CENMA, 2017). Excepto para metales medidos en Puchuncaví como Manganeso (640 a 2178 mg/kg) y Cadmio (<2,5 a 6,72 mg/kg) donde los rangos de concentraciones encontradas fueron mayores en Huasco (CENMA, 2017). Además, el Cadmio ha sido señalado como un metal proveniente de las termoeléctricas (CONAMA, 2009). Igualmente, el Cadmio produciría efectos adversos probables (PEL) sobre una concentración de 5 mg/kg en sedimentos (CENMA, 2017).

Además, los efectos sobre la salud producto a emisiones de termoeléctricas están documentados ampliamente por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y por la Agencia de sustancias tóxicas y registro de enfermedades (ATSDR). Además, también se han documentado, pero con una menor cantidad de estudios, los efectos sobre la flora y la fauna (CONAMA, 2009).

b) Fundidora de Cobre

El residuo sólido generado por las fundidoras de Cobre podría aportar con la mayoría de los elementos de interés como Arsénico, Azufre, Antimonio, Aluminio, Cobalto, Calcio, Cadmio, Cromo, Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Plomo, Molibdeno y Níquel. Aunque, autores que han medido las concentraciones químicas presentes en la escoria generada por la fundición Ventanas han cuantificado la totalidad de metales de interés, excepto Arsénico y Cadmio (Oyarzun, 2013). Otros estudios de las emisiones de la fundidora de Cobre en Puchuncaví señalan que emitiría toneladas anuales de Azufre, MP₁₀ y Arsénico (CENMA, 2013).

En el sitio HC-4 y HC-7 se midieron concentraciones de Cadmio en la profundidad de 0 a 7 cm. El Cadmio es uno de los elementos de mayor relevancia en el ámbito ambiental debido a que produce efectos adversos para el hombre y el medio ambiente (EPA, 2006; MMA, 2013). Igualmente, estudios de fiscalización ambiental realizados en sitios cercanos a la fundición de

Ventanas han encontrado concentraciones de Arsénico en la totalidad de sitios analizados, y Cadmio en el sector de los botaderos de Codelco definido como “humedal 1” (Superintendencia del medio ambiente, 2013). Este lugar se encontraría cercano al sitio HC-4 del presente estudio.

Algunos de los elementos que presentaron su máxima concentración en el sitio HC-4 tales como Arsénico, Cobre, Plomo, Molibdeno, Zinc y Cadmio, han sido correlacionados en estudios anteriores y asociados a un posible origen a la fundidora de Cobre (PGS, 2015). El sitio HC-4 se encuentra en el mismo sitio que el escorial, y por lo tanto podría aportar material directamente hacia el humedal Campiche. Además, el viento de la zona podría resuspender material fino del relave (material que es transportado y depositado en el sector botadero) siendo transportado en dirección de los vientos (NE), lo que contribuiría elementalmente a sitios como HM-3, HM-1 e inclusive EP-1 dependiendo de la intensidad del viento. Así, lo han reportado investigadores de la zona que han encontrado un enriquecimiento preferencial hacia el NE (Chiang *et al.*, 1985; CENMA, 2013; Greenpeace *et al.*, 2020)

El sitio HC-7 también presentó las máximas concentraciones de Cromo y Níquel. Igualmente, presentó concentraciones significativas de Cadmio y Cobre al comparar entre los distintos sitios. La fundidora de Cobre de Ventanas ocuparía de agente reductor el coque (carbón utilizado en el convertidor teniente y en el horno eléctrico) y carbón vegetal utilizado como agente reductor y no como combustible. De esta manera, el carbón se utilizaría para evitar la formación de acreciones de magnetita y para extraer el exceso de oxígeno del Cobre líquido (Codelco, 2018). Igualmente, autores mencionan que la combustión del carbón podría liberar metales como Cromo y Níquel al medioambiente (Lockwood *et al.*, 2009).

Las concentraciones de metales de interés medidos en sedimentos en el presente estudio sobrepasan a concentraciones reportadas por autores en otros sitios cercanos a fundidoras de Cobre. Esto se ha hecho evidente al comparar los datos obtenidos respecto a concentraciones medidas en suelos de Australia (Port Kembla) (Jafari *et al.*, 2020; Martley *et al.*, 2004). Las emisiones de las fundiciones de Cobre han generado un enriquecimiento de metales pesados en las cercanías de las plantas de fundición y en las áreas que se encuentran en la dirección de los vientos predominantes (Martley *et al.*, 2004).

Comparación con concentraciones medidas en suelos de Port Kembla (Australia).

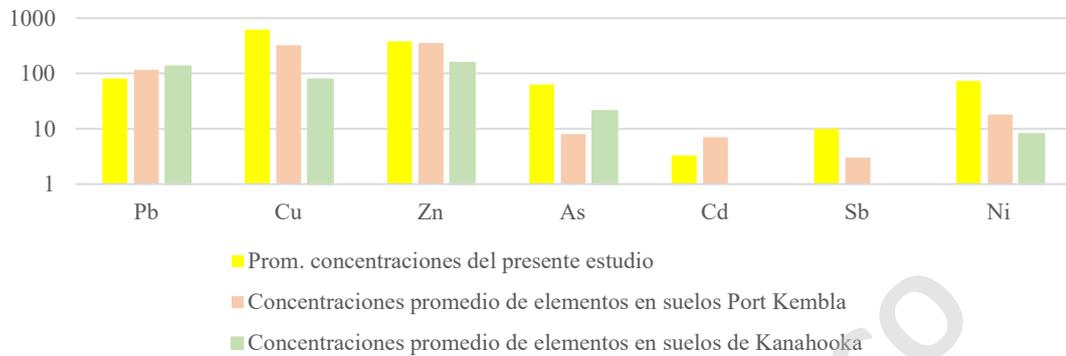


Gráfico 18. Comparación de concentración metálica en suelos de localidades en donde hay una fundidora de Cobre cercana. (Jafari et al., 2020)

Aunque estas industrias son las más nombradas por autores, existen otras 13 empresas en el borde costero, que podrían estar contribuyendo a un enriquecimiento en las zonas aledañas. Igualmente, se ha documentado algunas filtraciones de petróleo en el borde costero por parte de ENAP (Céspedes & Rueda, 2019). Aunque, estos derrames es probable que no afecten directamente a los humedales investigados debido a que se encuentran en la parte interior, aledaño a la zona urbana. Por último, es importante mencionar la contribución de metales y gases por la actividad agrícola mediante fertilizantes, pesticidas, encalado, entre otros que se ha desarrollado en la zona desde antes de la inauguración del sector industrial de la comuna (Espinoza, 2015).

c) Sector agrícola

La comuna de Puchuncaví presenta una actividad agrícola anterior al complejo industrial Ventanas (Espinoza, 2015). Parte de las concentraciones medidas en la presente investigación de los metales de interés (Arsénico, Cobre, Zinc, Níquel, Plomo, Cadmio, Manganeso, Cromo, Cobalto y Hierro) podrían tener su origen en los fertilizantes y pesticidas utilizados en el sector agrícola que presenta un desarrollo en los alrededores de Puchuncaví. Autores señalan que los fertilizantes y abonos orgánicos contendrían concentraciones significativas de elementos como Arsénico, Cobalto, Manganeso, Hierro, Cobre, Cadmio, Cromo, Plomo, Zinc y Níquel (Rodríguez *et al.*, 2012; Carrasco *et al.*, 2006; El-Bahi *et al.*, 2004 como se citó en Alcaíno, 2012). Además, los fertilizantes contienen cantidades significativas de nitratos y fosfatos, estos elementos pueden ser transportados a cuerpos de agua de manera intermitente, a través de procesos de arrastre superficial o lixiviación en función de la estacionalidad de actividades de aplicación o fenómenos de precipitación (Alfaro *et al.*, 2005).

Las concentraciones de Fosforo medidas en la profundidad de 0 a 7 cm se encontraron en un rango entre 632 a 1460 (mg/kg), mientras que la profundidad de 15 a 22 cm el Fosforo medido se encontró en un rango de 538 a 1426 (mg/kg). Las máximas concentraciones de Fosforo se obtuvieron en los sitios HC-4 (1460 mg/kg) y EP-1 (1008 mg/kg). Los valores medidos son bajos respecto a medidas de concentración de Fosforo en sedimentos de aguas dulce con avanzado estado de eutrofización que se encuentran entre 187,33 a 7.100 (mg/kg) en la zona de concepción (Almanza-Marroquín *et al.*, 2016). De igual manera, no se descarta que algunos cuerpos de agua de donde se extrajo sedimentos se encuentren con algún grado de eutrofización.

Un contenido significativo de nitrato y fosfato conlleva a un proceso de eutrofización de ecosistemas acuáticos que consiste en una gran proliferación de la biomasa de algas que acaba reduciendo la luz que llega al fondo y también reduce el oxígeno disponible para el resto de los organismos (García & Miranda, 2018). Aunque, no se tienen datos sobre la concentración de elementos como nitrato y fosfato en aguas, las altas concentraciones de fosfato medidas en sedimento podrían indicar un aporte significativo de nutrientes de distintas fuentes y en consecuencia un posible proceso de eutrofización activo de algunos cuerpos de agua. Esto debido a que en otros estudios se ha señalado que los aportes nutricionales son incorporados a

organismos muy rápidamente o van al sedimento, explicando bajos contenidos de nitrógeno y fósforo en aguas de lagos, al tiempo que una parte de la biomasa sale del sistema por los efluentes hacia el mar o pasa al sedimento como consecuencia de la deposición de materia orgánica que no ha podido ser degradada (Soria *et al.*, 1987). Además, autores han señalado que lagos someros son sometidos a una mezcla vertical y por tanto los sedimentos aportarían nutrientes todo el año (Almanza-Marroquín *et al.*, 2016).

El sitio HC-4 se encuentra aledaño al complejo industrial con industrias que podrían aportar un mayor contenido de nutrientes de manera directa (Residuos sólidos o líquidos) e indirectamente (a través de la deposición atmosférica en zonas más lejanas) (Chiang *et al.*, 1985; Gonzalez y Bergvist, 1986; CENMA, 2013; MMA, 2013; DGA, 2018). Igualmente, este sitio se encuentra en la zona occidental, dirección en la que se dirige el flujo de aguas superficiales de la comuna de Puchuncaví. Por lo tanto, parte de estas concentraciones de distintas fuentes difusas podrían ser arrastradas hacia el sitio HC-4 en periodos esporádicos de mayor precipitación. Por otro lado, el sitio EP-1, es el sitio investigado más alejado al complejo industrial y se encuentra situado cercano a tierras de cultivo junto al sitio HM-3, el cual corresponde a una acequia de riego. De manera que estas zonas también podrían presentar una contribución directa de metales proveniente de fertilizantes y abonos orgánicos (Rodríguez *et al.*, 2012; Carrasco *et al.*, 2006; El-Bahi *et al.*, 2004 como se citó en Alcaíno, 2012). Además, de técnicas agrícolas como el encalado que podrían estar contribuyendo con concentraciones de Calcio (Muena *et al.*, 2010)

4.3 Concentración de elementos en los humedales investigados y su relación con la cercanía al complejo industrial Ventanas.

El gradiente máximo de concentración de Aluminio, Hierro, Arsénico, Cobre Magnesio, Manganeso, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio, Cobalto y Cadmio medida respecto a las concentraciones naturales de cada elemento tiende a incrementar hacia el área oeste de Puchuncaví, sector que comparten lugar tanto los humedales estudiados y el complejo industrial Ventanas (Figura 18; Anexo 16; Anexo 17; Anexo 18; Anexo 19; Anexo 20; Anexo 21; Anexo 22; Anexo 23; Anexo 24).

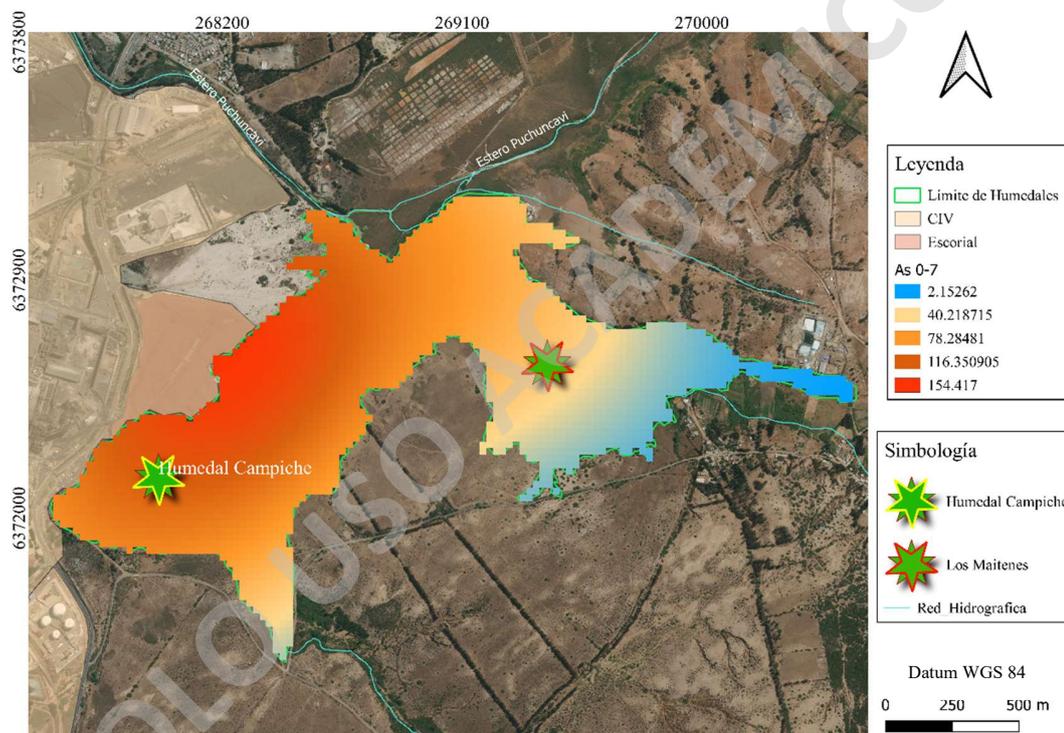


Figura 19. Distribución de concentración de Arsénico en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).

Estudios realizados que miden la deposición atmosférica y concentraciones de metales traza presentes en la superficie de material particulado sedimentable reportan un aumento en la concentración de Cobre, Cadmio, Plomo, Zinc, Manganeso, Arsénico y Sulfato en los pueblos más cercanos al complejo industrial Ventanas (Chiang, 1989). Además de Arsénico, Vanadio y Molibdeno que presentan una distribución espacial acorde a la dirección predominante del viento en sentido SW-NE de acuerdo con CENMA (2013). Esto concordaría respecto a las concentraciones encontradas en sedimentos de fondo del humedal Campiche y Los Maitenes debido a una mayor disponibilidad de estos elementos en la zona oeste.

La mayor disponibilidad de elementos en la zona oeste es corroborada por los estudios de suelos efectuados en la zona de Puchuncaví que mostraron un aumento la concentración de Hierro, Cobre, Zinc, Arsénico, Molibdeno, Cadmio, Antimonio y Plomo en las cercanías del complejo industrial Ventanas (PGS, 2015). Algunos de estos elementos han sido medidos en suelos y sedimentos extraídos desde el humedal Campiche, estos son: Cobre, Plomo, Zinc y Arsénico encontrándose sobre la normativa italiana (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha, 2014). Existen estudios hidroquímicos de las aguas superficiales de la comuna de Puchuncaví que señalan un incremento de Cobre, Molibdeno, Boro, Sulfato, Manganeso, Magnesio, Hierro, Arsénico, Plomo y Cloruro disueltos en los humedales cercanos al complejo industrial Ventanas (Cabrera, 2020).

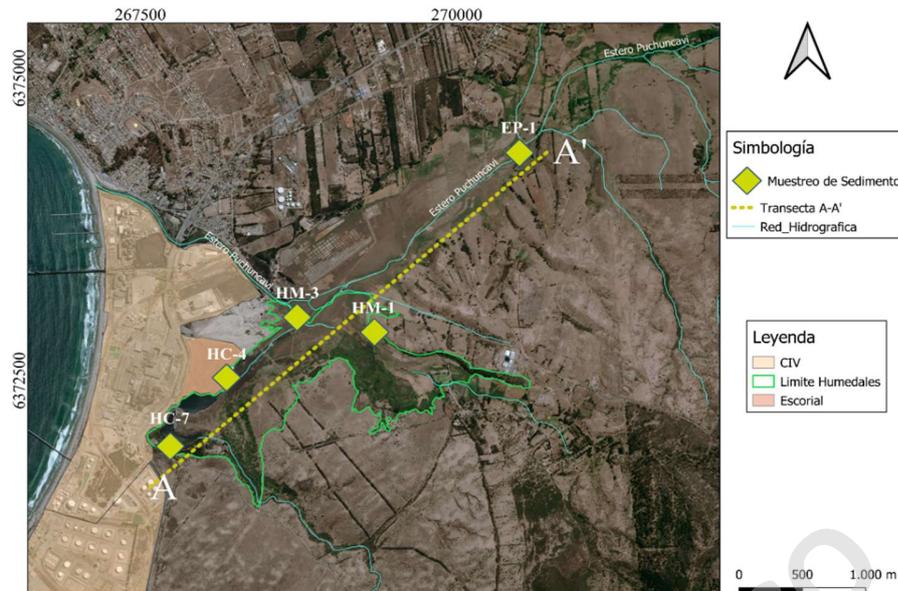


Figura 20. Planificación de muestreo, con la dirección SW-NE representada por la traza A-A' y en el extremo inferior izquierdo se observa el polígono que representa el complejo industrial Ventanas.

En el presente estudio el sitio HC-4 es un sitio en contacto directo con material proveniente desde el escorial Codelco. Este sitio frecuentó los peores índices de calidad de sedimento para los diferentes elementos de interés con un índice de contaminación integrado (IPI) de 27,86. Entre los elementos de interés definidos se encontraron el Arsénico, Cobre, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio que presentaron una convergencia de las máximas concentraciones al sitio HC-4. Al comparar la concentración elemental en los diferentes sitios investigados, se podría relacionar el aumento de las concentraciones en la zona oeste con respecto a la geoquímica perteneciente al escorial Codelco, industria que podría aportar un enriquecimiento de la mayoría de los elementos anteriormente mencionados en los sectores aledaños (Oyarzún, 2013).

En la presente investigación se realizaron índices de evaluación de calidad de sedimento, y su comparación respecto a la distancia al CIV y profundidad entre sitios investigados, y comparaciones respecto a concentraciones máximas permitidas por normativas internacionales (normativa de EE. UU.) con el fin de definir elementos que podrían encontrarse en concentraciones significativas y generar un riesgo ecológico en la zona (según los índices de evaluación de calidad de sedimentos). Esta metodología ha sido ocupada debido a que Chile no cuenta con concentraciones máximas definidas en suelos y sedimentos, de esta manera han sido definidos distintos elementos de interés para el presente estudio y serán comparados con estudios previos de la zona:

4.3.1 Aluminio (Al)

El Aluminio es un elemento que se encuentra generalmente en la corteza terrestre con un contenido medio de 84.111 mg/kg (Rudnick y Gao, 2003). Las concentraciones de Aluminio podrían deberse a la contribución de componentes corticales tales como Al_2O_3 (Castillo et. al, 2008; Parra, 2013). Aguas arriba del estero Puchuncaví (NE) se encuentran la Formación Ajial con tobas (cuarzo, feldespato, y alteración de clorita-epidota-sericita), lavas andesítico-basálticas (plagioclasa y clinopiroxeno (augita-diópsido), flujos dacíticos (plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y anfíbol), conglomerados (areniscas) y rocas pelíticas, estos feldespatos presente son minerales formados por silicatos de aluminio combinados en sus tres formas: potásicos, sódicos y cálcicos (Thomas, 1958; Piráces & Maksaev, 1977; Sánchez *et. al*, 2010). Autores también han encontrado concentraciones de aluminio en muestras analizadas del escorial Codelco en la comuna de Puchuncaví, encontrando concentraciones equivalentes a 1,37% de la muestra total (Oyarzún, 2013).

Las concentraciones de Aluminio cuantificadas en la profundidad de 0 a 7 cm se encuentran en un rango entre 78.109 – 118.031 (mg/kg) en los sitios HC-7 y HC-4. Además, las concentraciones medidas de Aluminio medidas en la profundidad de 15 a 22 cm presentan un rango similar (70.852 – 108.285 mg/kg), en los sitios HM-3 y HC-4, respectivamente. Observándose una clara convergencia de las máximas concentraciones hacia el oeste de la zona de estudio. Análisis realizados a fracciones de material particulado re-suspendido permitió la detección de partículas de silicato de Aluminio, así como de Cobre, Zinc, Arsénico, Plomo y Calcio, entre otros, hecho que corrobora la emisión de partículas enriquecidas por dichos

elementos traza asociados a la fundición de Cobre (Parra, 2013). Además, la solubilidad del aluminio es baja en el rango de pH 5-10, por lo que el Aluminio presente en el sistema se encontraría en mayor medida precipitado.

No se ha encontrado datos sobre las concentraciones naturales de Aluminio en la comuna de Puchuncaví. Por lo tanto, al no saber la concentración natural de la zona, no es posible asegurar si el máximo permitido por la normativa de EE. UU., se adapta a las condiciones de geoquímicas del suelo de la comuna de Puchuncaví. Entre los lugares muestreados 4 de 5 sitios se encuentran en su totalidad sobre la normativa de EE. UU., a excepción del sitio HM-3 en la profundidad de 15 a 22 cm.

4.3.2 Hierro (Fe)

Se han encontrado concentraciones promedio de Hierro en la corteza cortical es de 52.157 mg/kg (Rudnick & Gao, 2003). Otros autores han medido concentraciones naturales de Hierro en suelos de Puchuncaví que representa un 5,48 % del material muestreado (PGS, 2015). Se ha observado que las fracciones mayores a 10 μm en muestras de suelo y material particulado existen silicatos de Titanio, Hierro y Aluminio, lo que nos indica un aporte cortical de dichos elementos en este lugar (Parra, 2013). Además, se han medido concentraciones de óxido de Hierro (Fe_2O_3) en muestras analizadas provenientes del escorial Codelco, el cual representa el 48,16 % del total de muestra analizada (Oyarzún, 2013).

Las concentraciones medidas en los sedimentos del humedal Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví en una profundidad de 0 a 7 cm, varían entre un rango de 42.963- 66.692 (mg/kg) en los sitios HC-7 y HC-4, respectivamente. Aunque la máxima variaciones medidas se obtuvo en la profundidad de 15 a 22 cm con un rango de concentraciones entre 39.375 – 110.508 (mg/kg) en los sitios HM-3 Y HC-4. De manera que se logra apreciar una clara convergencia de las máximas concentraciones de Hierro hacia las zonas aledañas al complejo industrial Ventanas (PGS, 2015). Estudios indican que el Vanadio y Hierro se encuentran correlacionados, por lo que, probablemente se podrían asociar a termoeléctricas de la zona y/o actividades de refinación de petróleo (PGS, 2015). Al igual que un posible aporte elemental debido a la geoquímica presente en el escorial Codelco (Oyarzún, 2013).

El estudio realizado por la PGS (2015), midió concentraciones naturales de Hierro de 54.800 mg/kg (PGS, 2015). Este *background* de Hierro es superado en dos sitios: El sitio HC-4 en ambas

profundidades estudiadas de 0 a 7 cm y 15 a 22 cm. Además, del sitio HM-1, solo en la profundidad superior de 0 a 7 cm. Estos mismos lugares son sitios que se encuentran fuera de norma, según lo establecido por la normativa de EE. UU. Es importante destacar que la normativa no se adapta a las condiciones geoquímicas de la comuna de Puchuncaví, al ser similares la concentración natural de la zona y el máximo permitido por la normativa de EE. UU.

4.3.3 Azufre (S)

Las concentraciones promedio de Azufre medidas en la corteza cortical es de 404 mg/kg (Rudnick y Gao, 2003). La principal fuente de Azufre en el suelo es producto de la meteorización de minerales como la piritita (FeS_2) derivada de las rocas ígneas (Colacelli, 2001). Estudios han analizado concentraciones de Azufre en muestras de escoria provenientes del escorial Codelco de 0,29 % de la muestra total (Oyarzún, 2013). Igualmente, se ha medido concentraciones de dióxido de Azufre y partículas enriquecidas provenientes de la fundición de Cobre (Chiang *et. al*, 1985; González y Bergqvist, 1986; CONAMA, 2009; Parra, 2013). De manera que el SO_2 emitidas a la atmosfera presentó concentraciones máximas diarias que llegan a 600 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (CENMA, 2013). Este aumento en el aporte de Azufre ha generado una deposición ácida fuerte originando daños a la vegetación local y acidificación del suelo (pH en agua de 4,7; Ginocchio, 2000).

En la presente investigación se encontraron concentraciones de Azufre en sedimentos de 0 a 7 cm que van desde 1.427- 12.488 (mg/kg) en los sitios EP-1 y HM-1, respectivamente. Asimismo, se han encontrado concentraciones entre 690 – 5.051 (mg/kg) en los sitios HC-7 y HM-1 en la profundidad de 15 a 22 cm. La disminución de concentración en profundidad para el Azufre podría relacionarse al ciclo del Azufre, debido a que es un elemento esencial para plantas y animales, principalmente, en una gran variedad de funciones metabólicas, además de ser un elemento esencial en las proteínas (Rogan *et. al*, 2005).

Las concentraciones máximas encontradas se ubicaron en el sitio HM-1, sitio ubicado al NE del complejo industrial Ventanas. Los vientos de la zona permiten una deposición acorde al tamaño y densidad de partículas de las emanaciones originadas desde el complejo industrial Ventanas, de manera que dióxido de Azufre al poseer un menor tamaño de las partículas se depositaría a mayor distancia al comparar su distribución con los elementos trazas ligados al material particulado (González *et. al*, 2014).

La atmosfera al estar compuesta por SO₂, es otra fuente de Azufre en el suelo. En la actualidad, el SO₂ es aportado mayoritariamente por la quema de combustibles fósiles e incendios (Granat y Rodhe, 1976). Además, el sitio HM-3 presento una profundidad de 50 cm aproximadamente, abundante materia orgánica y se identificó el olor característico del sulfuro de Hidrogeno este es liberado como resultado de la respiración de microorganismos del suelo en ecosistemas acuáticos. Esta reacción es mediante la oxidación de la materia orgánica y la consecuente reducción de compuestos de Azufre resultando en el sulfuro de Hidrogeno (Langmuir, 1997).

Igualmente, estos compuestos al ser liberados a la atmosfera reaccionan con el vapor de agua convirtiéndose en ácido sulfúrico (H₂SO₄) y vuelve a la tierra al precipitar como la conocida lluvia acida. (Granat y Rodhe, 1976).

No se encontraron datos dentro de la bibliografía consultada sobre concentraciones naturales de Azufre en la comuna de Puchuncaví. Aunque autores han medido concentraciones promedio de Azufre de 404 mg/kg (Rudnick & Gao, 2003). Tampoco, se ha encontrado concentraciones máximas permitidas de Azufre por la normativa de EE. UU.

4.3.4 Calcio (Ca)

No se encontraron datos bibliográficos sobre las concentraciones naturales de Calcio en Puchuncaví. No obstante, se han medido concentraciones promedio de Calcio en la corteza cortical de 45.811 mg/kg (Rudnick & Gao, 2003). El contenido de Calcio en diferentes fracciones del suelo de Puchuncaví señala un enriquecimiento de Calcio con aporte cortical y antropogénico (Parra, 2013). Este aporte antropogénico provendría de emisiones de partículas asociadas a la fundición de Cobre (Parra, 2013).

Las concentraciones de Calcio medidas en la profundidad de 0 a 7 cm varían en un rango de 15.606 (mg/kg) a 59.144 (mg/kg) en los sitios EP-1 y HM-3 respectivamente, y una concentración entre 11.255 (mg/kg) a 118.204 (mg/kg) en los sitios HC-4 y HM-3 en una profundidad de 15 a 22 cm. Las mayores concentraciones de Calcio medidas son coincidentes con los sitios en que fueron encontrados los gastrópodos observando las máximas concentraciones de Calcio en el sitio HM-3 y HC-7 en ambas profundidades analizadas. Organismos que en su estructura dura (concha o conchilla), cónica enroscada en forma helicoidal, elongada antero-posteriormente, es constituida esencialmente de carbonato de Calcio (Damiani y Álvarez, 2005). Estos organismos al estar compuestos por carbonato de Calcio podrían actuar

como reguladores naturales de pH en el caso de una acidificación del medio (Harrould-Kolieb *et al.*, 2009).

En el presente estudio se encontró una amplia variabilidad de concentraciones de Calcio con las menores concentraciones ubicadas en los sitios muestreados aledaños al escorial Codelco (11.255 mg/kg), además de los sitios ubicados más hacia el este como el sitio EP-1_0-7 (15.606 mg/kg) y EP-1_15-22 (13.899 mg/kg). Estudios han medido concentraciones de Calcio en Puchuncaví reportando un máximo en el año 2007 de 164.530 (mg/kg) en la estación la Greda sitio ubicado a 1,89 km de distancia de las fuentes de contaminación, mientras que el valor de concentración más bajo fue de 13.517 (mg/kg) en la estación más lejana de las fuentes emisoras (Puchuncaví ubicada a 8,58 km) (Parra, 2013). Esto es explicado por tecnologías de abatimiento para procesos de desulfuración de gases vía húmeda donde los gases de combustión se saturan con agua y la piedra caliza (CaCO_3) actúa como reactivo, para la transformación de azufre en la fase gaseosa (SO_2) a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Parra, 2013).

4.3.5 Manganeso (Mn)

Se han informado concentraciones naturales de Manganeso de 917,4 (mg/kg) en suelos de la comuna de Quintero y Puchuncaví (PGS, 2015). Superior a la concentración media de Manganeso medida en la corteza cortical de 774 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Otros estudios en la comuna de Campiche han encontrado en material particulado sedimentable contenidos promedio de Manganeso de 26,57 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día) (Chiang, 1989). Además, han medido concentraciones de Manganeso en suelos de 582,09 a 2011,89 (mg/kg) en zonas cercanas al humedal Campiche y cordillera de la costa (NE del complejo industrial Ventanas), respectivamente (PGS, 2015). Análisis de la escoria proveniente del escorial Codelco han medido concentraciones de Manganeso que equivalen a 0,07 % del total de muestra analizada (Oyarzún, 2013). El sitio HC-4 de la presente investigación se encuentra aledaño al escorial Codelco, en este lugar se encontró las máximas concentraciones medidas del estudio (en ambas profundidades estudiadas 0 a 7 cm y 15 a 22 cm). Observando una convergencia en las máximas concentraciones de Manganeso principalmente hacia el sector oeste de la comuna de Puchuncaví. Estas concentraciones coinciden con las máximas concentraciones informadas por estudios de suelos donde en comunas como Puchuncaví- Runge presentan concentraciones de 3.040 ppm y Ventanas 1.700 ppm (PGS, 2015). Las muestras comunales se concentran 800 y 1.000 ppm, en tanto que en las urbanas están entre 600- 800 ppm (PGS, 2015). (1 ppm = 1 mg/kg).

Entre los sitios investigados solo los sitios HC-7_0-7, HC-7_15-22, HM-3_15-22 y HM-1_0-7 presentaron concentraciones de Manganeso que se encontraron bajo las concentraciones naturales de la zona. Por último, los sitios investigados solo el sitio HC-4_0-7 presentó concentraciones de Manganeso que sobrepasan la normativa de EE. UU.

4.3.6 Cobre (Cu)

Estudios realizados en la comuna de Puchuncaví reportan concentraciones naturales de Cobre de hasta 89,44 (mg/kg) (PGS, 2015). Estos valores naturales son superiores a la media de los valores medidos en la corteza cortical de 27 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Igualmente, estudios en suelos en la comuna de Puchuncaví muestran que la concentración de Cobre aumenta en las zonas aledañas al complejo industrial Ventanas (PGS, 2015). Estudios sobre la deposición atmosférica de material particulado han medido concentraciones de cobre que aumentan en los pueblos cercanos al polo industrial (La Greda: 874,3 – 1.167,9 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día); Campiche: 341,2 – 876,7 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día)) (Chiang, 1989). Además, autores han determinado la geoquímica perteneciente al escorial Codelco, midiendo concentraciones de Cobre en la escoria de 0,86 % de la muestra total (Oyarzún, 2013).

Los contenidos de Cobre se encuentran en un rango entre 454 – 1.204 (mg/kg) en los sitios HM-1, EP-1 y HC-4 en la profundidad de 0 a 7 cm. En la profundidad de 15 a 22 cm, se midieron una mayor variabilidad de concentraciones que van desde 49,7 – 1.487 (mg/kg) en los sitios HM-1 y HC-4. Observando un aumento de concentración que aumenta hacia la zona oeste de Puchuncaví, sobretodo en el sitio más cercano al escorial Codelco (HC-4). Este sitio presentó concentraciones significativamente altas en las profundidades investigadas. Los valores máximos medidos en la zona aledaña del complejo industrial Ventanas son coincidentes respecto a valores comunicados por otros autores dentro de Puchuncaví (González & Bergqvist, 1986; PGS, 2015; Parra, 2013).

Dentro de las 10 muestras analizadas solo el sitio HM-1 en la profundidad de 15 a 22 cm, se encontró bajo las concentraciones naturales de Cobre de 89, 44 (mg/kg). Al comparar las concentraciones de Cobre respecto a normativas internacionales, se puede observar que ninguno de los sitios analizados supera la normativa de EE. UU.

4.3.7 Zinc (Zn)

Estudios han medido concentraciones naturales de Zinc de 95,08 (mg/kg) en la zona de Quintero y Puchuncaví (PGS, 2015). Estas concentraciones son ligeramente superiores a las concentraciones medias reportadas de Zinc de 72 (mg/kg) en la corteza cortical (Rudnick y Gao, 2003). Otros estudios han medido concentraciones de Zinc presentes en el material particulado sedimentable en pueblos cercanos como La Greda y Campiche reportando concentraciones en un intervalo entre 323,4-890,0 y 204,5-754,9 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día) (Chiang, 1989). Igualmente, estudios en suelos han medido concentraciones de Zinc en zonas urbanas como Quintero y Puchuncaví (PGS, 2015). Por lo que el Zinc entra en el aire, el agua y el suelo como resultado de procesos naturales y de las actividades humanas (CENMA, 2013).

Las concentraciones de Zinc encontradas en la profundidad de 0 a 7 cm varían entre un mínimo de 205 (mg/kg) en el sitio más distal al complejo industrial Ventanas (EP-1) a un máximo de 451 (mg/kg) encontrado en el sitio más cercano muestreado (HC-4). De igual manera, las concentraciones obtenidas en una profundidad de 15 a 22 cm varían entre 101- 1.624 (mg/kg). Observando las máximas concentraciones de Zinc en el sitio más cercano al complejo industrial Ventanas (HC-4). Este aumento en el gradiente de concentración en suelos de Zinc convergentes hacia la zona oeste ha sido observado también por otros autores (PGS, 2015; CENMA, 2016). El nivel de Zinc en el suelo aumenta principalmente de la eliminación de desechos de Zinc de las industrias de fabricación de metal y de las cenizas de carbón de las centrales eléctricas. Lodos y fertilizantes también contribuyen a un aumento de los niveles de Zinc en el suelo (CENMA, 2013).

La totalidad de muestras analizadas presentaron concentraciones de Zinc que sobrepasan las concentraciones naturales reportadas en la zona. No obstante, todas las concentraciones medidas en la presente investigación, se encuentran por debajo de las concentraciones máximas definidas por la normativa de EE. UU.

4.3.8 Arsénico (As)

Se han informado concentraciones medias de Arsénico en la corteza cortical de 2,5 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). En los suelos de Puchuncaví se estimó un valor de fondo geoquímico para el Arsénico de 18,6 (mg/kg) (Poblete *et. al*, 2015). Otros estudios también realizan un *background* geológico en la zona y encontraron una concentración natural de Arsénico en suelos

de 7,6 (mg/kg) (PGS, 2015). Igualmente, investigadores han encontrado concentraciones promedio de Arsénico de 266,55 y 196,34 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día) en material particulado proveniente desde el complejo industrial Ventanas en pueblos cercanos de La Greda y Campiche, respectivamente (Chiang *et. al*, 1985).

Las concentraciones de Arsénico encontradas en sedimentos en una profundidad de 0 a 7 cm varían entre un rango de 29,9 – 162 (mg/kg) en los sitios EP-1 y HC-4, respectivamente. De igual manera, en la profundidad de 15 a 22 cm se encontró un rango de concentraciones entre 14,4 – 142 (mg/kg) en los sitios HM-1 y HC-4. Estas concentraciones son menores a los máximos encontrados por medidas informadas por otros autores entre 78 – 305 (mg/kg) encontradas en la comuna de Quintero y Ventanas, respectivamente (Poblete *et. al*, 2015).

La totalidad de las concentraciones de Arsénico sobrepasan los valores máximos permitidos por la normativa de EE. UU. de 0,7 mg/kg. Aunque esta no es una referencia que se adapte a las condiciones geoquímicas del sector investigado, debido a que las concentraciones naturales promedio encontrado en el sector investigado es mayor.

Según autores han reportado que el Arsénico se encuentra disponible en el ambiente en pHs alcalino (Galán y Romero, 2008). Esto podría indicar que existen cantidades considerables de Arsénico disuelto, según los rangos de pHs encontrados en los sitios investigados que generalmente se encontraron por sobre un pH de 9. Aunque los minerales y compuestos de Arsénico son muy solubles, este elemento puede ser fácilmente adsorbido a minerales de arcilla, hidróxidos y materia orgánica del suelo, así como también a minerales de óxidos de Hierro y Manganeso (Kabata-Pendias, 2011).

4.3.9 Cromo (Cr)

La concentración promedio de Cromo en la corteza cortical es de 135 (mg/kg) (Rudnick y Gao, 2003). Se han medido concentraciones de Cromo en el material particulado sedimentable del aire al interior de Puchuncaví de 3.716,71 mg/kg respectivamente (CENMA, 2013). Este MPS, sedimenta sobre calles, casas y lugares públicos y se encuentra compuesto por diversos metales pesados (CENMA, 2013).

El Cromo se encuentra en la naturaleza principalmente en forma de Cromo (0), Cromo (III) y Cromo (VI). El Cromo (III) es un elemento esencial para organismos. No obstante, respirar altos

niveles de Cromo (VI) puede causar daños para la salud en personas (CENMA, 2013). Igualmente, el Cromo (VI) puede ser reducido a Cromo (III) por una oxidación de la materia orgánica (Azario et al., 2010).

Se encontraron concentraciones de Cromo en la profundidad de 0 a 7 cm que oscilan entre 43,2 – 241 (mg/kg) en los sitios HC-4 y HC-7, respectivamente. Estos sitios investigados se encuentran a 700 metros uno del otro, y no se observó un cambio litológico que pudiera aportar un mayor contenido de Cromo. Igualmente, se encontraron concentraciones de cromo en la profundidad de 15 a 22 cm que varían entre 93,1 – 323 (mg/kg) en los sitios HM-3 y HC-7. Además, se observa que las máximas concentraciones convergen hacia la zona oeste, precisamente hacia el sitio HC-7, por lo que pareciera que podría existir un factor externo involucrado como cenizas volantes producidas por la quema de carbón bituminoso, las que pueden presentar elementos traza como Cromo (Querol et. al, 1996), las cuales tienen un impacto ambiental negativo (CENMA, 2013).

Dentro de la bibliografía consultada no han sido encontrado datos sobre las concentraciones naturales de Cromo en la comuna de Puchuncaví, por lo que no es posible establecer una concentración base en la zona de estudio. No obstante, se han ocupado concentraciones de referencia encontradas en la corteza cortical, con el propósito de comparar respecto a aportes geogénicos. Por último, dentro de los sitios investigados en la profundidad de 0 a 7 cm, solo el sitio HC-7 sobrepasa las concentraciones límites establecidas por la normativa de EE. UU. En cambio, en la profundidad de 15 a 22 cm es posible observar un enriquecimiento de Cromo, además de superar las concentraciones límites establecidas por la normativa EE. UU. en los sitios HC-4, HC-7 y HM-1. Aunque al no poseer las concentraciones naturales de los suelos de la zona, no es posible determinar si esta concentración límite establecida por la normativa de EE. UU. se adapta a las condiciones geoquímicas de la zona.

4.3.10 Plomo (Pb)

Se han reportado concentraciones naturales de Plomo de 13,6 (mg/kg) en un *background* geológico realizado en la comuna de Puchuncaví (PGS, 2015). Estos valores son coincidentes con concentraciones promedio de Plomo medidas en la corteza cortical de 11 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Estudios en Puchuncaví comunican que existe una gran cantidad de material particulado que es dispersado desde las chimeneas y que contiene numerosos compuesto de metales pesados, tales como el Plomo (Chiang, 1989; CENMA, 2013). Las concentraciones de Plomo medidas en material particulado sedimentable muestreado en La Greda y Campiche se

encuentran en un rango entre 65,5 – 127,0 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$) y 27,3 – 134,3 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$), respectivamente (Chiang, 1989). Igualmente, se han medido concentraciones de Plomo de 917 (ppm), 152 (ppm) y 75,4 (ppm) en zonas urbanas como Quintero, Ventanas y Puchuncaví-Rungue, respectivamente (PGS, 2015).

En el presente estudio, se midieron en una profundidad de 0 a 7 cm concentraciones de Plomo que varían entre 57,8 - 108 (mg/kg) en los sitios EP-1 y HC-4, respectivamente. Aunque, se observó una mayor variación de concentración en los sitios HC-7 y HC-4 (18,1 – 251 (mg/kg)) en la profundidad de 15 a 22 cm. Estas concentraciones son similares a las concentraciones máximas reportadas medidas en Puchuncaví-Runge de 75,4 (ppm), pero inferiores a las concentraciones máximas medidas en la comuna de Quintero de 917 (ppm) (PGS, 2015).

Análisis realizados a las fracciones del material particulado re-suspendido permitió la detección de partículas de silicato de aluminio, así como de Cobre, Zinc, Arsénico, Plomo y Calcio entre otros, hecho que corrobora la emisión de partículas enriquecidas por dichos elementos traza asociados a la fundición de Cobre (Parra, 2013).

Las concentraciones naturales de la zona son sobrepasadas en la totalidad de puntos muestreados. Por último, ninguna concentración medida supera la normativa máxima de referencia establecida por la normativa EE. UU. de 400 (mg/kg).

4.3.11 Níquel (Ni)

Autores han reportado concentraciones naturales de Níquel de 11,08 (mg/kg) en la comuna de Puchuncaví (PGS, 2015). Este valor es inferior a las concentraciones medias encontradas en la corteza cortical de 59 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Estudios que analizan la composición química del material particulado sedimentable (MPS) muestran que las mayores concentraciones de metales como Cadmio, Arsénico, Plomo, Cobre, Níquel, Zinc, Manganeso, Vanadio y Molibdeno se encuentran en la comuna de Puchuncaví, especialmente en el sector de la Greda, Los Maitenes y al interior de Puchuncaví (CENMA, 2013; CENMA, 2016). Las muestras provenientes de la estación La Greda presentaron material particulado enriquecido con Níquel y Cromo, así como la presencia de cenizas volantes producidas por la quema de carbón bituminoso que pueden contener elementos traza como el Níquel, Vanadio, Mercurio, Cromo, Estaño, Germanio, Cobalto, Arsénico, Antimonio, entre otros relacionadas con el aporte cualitativo de la termoeléctrica presente en el lugar (Parra, 2013; Querol et al., 1996). Análisis de las escorias

provenientes desde el escorial Codelco obtuvieron concentraciones de Níquel de 0,02 (%) de la muestra total analizada (Oyarzún, 2013).

Para la profundidad de 0 a 7 cm muestreada, se han obtenido concentraciones de Níquel entre 24,8- 129 (mg/kg), en sitios investigados como HM-1 y HC-7, respectivamente. Igualmente, análisis realizados de sedimento en la profundidad de 15 a 22 cm, cuantifican concentraciones de Níquel que van desde 43,3- 173 (mg/kg). Este contenido de Níquel medido es superior a las concentraciones encontradas en zonas urbanas como en Puchuncaví-Rungue y Maitencillo con 23,50 y 19,50 (mg/kg), respectivamente.

Las concentraciones naturales de Níquel son sobrepasadas en la totalidad de sitios muestreados. Por otro lado, la normativa de EE. UU. no es sobrepasado en ningún sitio muestreado. En general, se observó un mayor enriquecimiento en la profundidad de 15 a 22 cm, sobretodo en el sitio HC-7 en ambas profundidades investigadas.

4.3.12 Cobalto (Co)

Han sido medidas concentraciones promedio en la corteza cortical de Cobalto de 26,6 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Estudios que analizan la concentración química elemental del escorial Codelco, material que se encuentra en contacto directo con un sitio muestreado en la presente investigación (HC-4), miden concentraciones de Cobalto de 0,09 (%) de la muestra total analizada (Oyarzún, 2013).

En el presente estudio las concentraciones medidas varían entre un mínimo de 10,3 mg/kg (HM-3_15-22) a un máximo de 49,9 mg/kg en el sitio HC-4_15-22, observándose un claro aumento de las concentraciones de Cobalto en las cercanías del complejo industrial Ventanas. La totalidad de los sitios muestreados presenta las mismas litologías y por tanto la misma geoquímica, descartando un enriquecimiento por algún factor natural. Las cenizas volantes producidas por la quema de carbón bituminoso ocupado en termoeléctricas pueden presentar elementos traza como Cobalto (Querol et. al, 1996), las cuales tienen un impacto ambiental negativo (Parra, 2013).

Ambas fracciones muestreadas del sitio HC-4 superan la máxima concentración permitida de Cobalto según la normativa de EE. UU., permitiendo concentraciones máximas de hasta 23 mg/kg (USEPA, 2018). Se desconocen las concentraciones naturales presentes en Puchuncaví, por lo que no es posible establecer si la normativa de EE. UU. se adapta a las condiciones geológicas de la comuna de Puchuncaví.

4.3.13 Antimonio (Sb)

Se han medido concentraciones naturales de Antimonio de 0,9 (mg/kg) en la comuna de Puchuncaví (PGS, 2015). Estos valores son superiores a las concentraciones naturales medias de la corteza cortical de 0,2 (mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Análisis de la geoquímica perteneciente al escorial Codelco han medido concentraciones de Antimonio de 0,03 (%) de la muestra total analizada.

El Antimonio solo se midió en los lugares muestreados HC-4 y HC-7, sitios que se encuentran aledaños al complejo industrial Ventanas. Las concentraciones de Antimonio encontradas en una profundidad de 0 a 7 cm, los valores fluctuaron entre 13-17,3 (mg/kg) en los sitios HC-7 y HC-4, respectivamente. A una mayor profundidad (15 a 22 cm) se obtuvieron concentraciones de Antimonio que se encuentran entre 10 – 29 (mg/kg) en los sitios HC-7 y HC-4, respectivamente. Por lo tanto, se logra observar un enriquecimiento de Antimonio localizado principalmente en la zona oeste de Puchuncaví. Estudios en los suelos de la zona han medido concentraciones máximas de Antimonio en Quintero (253 mg/kg) y Puchuncaví (11,2 mg/kg). Al comparar respecto a las concentraciones encontradas nos percatamos de una diferencia significativa entre comunas aledañas, además, existen similitudes en las concentraciones encontradas en Puchuncaví, no así de Quintero que son superiores. Estudios mencionan que “las cenizas volantes producidas por la quema de carbón bituminoso pueden presentar elementos traza tales como Antimonio...” (Querol et. al, 1996). Además, el proceso de fundición y refinación de concentraciones de sulfurados de cobre (Chiang *et. al*, 1985), podría generar residuos sólidos (escorias y material particulado rico en elemento traza). Dichos residuos sólidos son principalmente el producto de la oxidación de minerales sulfurados, los cuales generan emisiones de material particulado enriquecido con elementos traza entre los que se encuentran el Antimonio (Parra, 2013).

4.3.14 Molibdeno (Mo)

Se han informado en la comuna de Puchuncaví concentraciones naturales de Molibdeno de 1,54 (mg/kg). Estas concentraciones son ligeramente mayores a las concentraciones de Molibdeno medidas en la corteza cortical (0,8 mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Análisis de la composición química del material particulado sedimentable arroja que las mayores concentraciones de metales como el Molibdeno, se encuentran en las comunas de Quintero y Puchuncaví (18,92 y 53,51 mg/kg, respectivamente) (CENMA, 2013; CENMA, 2016). Otros estudios que analizan la geoquímica perteneciente al escorial Codelco han medido concentraciones de Molibdeno de 0,06 (%) de la muestra total analizada. Además, el proceso de fundición y refinación de concentraciones de sulfurados de Cobre (Chiang *et. al*, 1985), podría generar residuos sólidos (escorias y material particulado rico en elementos traza). Dichos residuos sólidos provenientes de la fundición podrían contener sulfuros que podrían sufrir un proceso de oxidación liberando elementos traza entre los que se encuentran el Molibdeno (Parra, 2013). Además, se han encontrado concentraciones máximas de Molibdeno en suelos de Ventanas y Puchuncaví (PGS, 2015).

Se midieron concentraciones de Molibdeno en sedimentos a una profundidad de 0 a 7 cm, obteniendo concentraciones que varían entre 5,95 (mg/kg) en HM-1 a 84,5 en el sitio HC-4. Aunque, la mayor variación se observó a una profundidad de 15 a 22 cm, donde se obtuvieron concentraciones de Molibdeno entre un rango de 7,92 a 358 (mg/kg), en los sitios EP-1 y HC-4, respectivamente. Observando una clara convergencia en las concentraciones de Molibdeno, específicamente en el sitio HC-4. Los valores encontrados en el presente estudio son superiores a los valores reportados por otros autores, los que han medido concentraciones máximas de Molibdeno en Ventanas (8,23 mg/kg) y Puchuncaví (7,41 mg/kg).

Las concentraciones naturales de Molibdeno son sobrepasadas en la totalidad de puntos muestreados. Por otro lado, no se obtuvieron concentraciones de Molibdeno que sobrepasaran la normativa de EE. UU. (390 mg/kg).

4.3.15 Cadmio (Cd)

Para el Cadmio se han reportado concentraciones naturales de 0,18 (mg/kg). Estas concentraciones son ligeramente mayores a concentraciones de Cadmio medidas en la corteza cortical (0,08 mg/kg) (Rudnick & Gao, 2003). Existen estudios donde se han medido concentraciones de Cadmio en material particulado sedimentable en pueblos como La Greda y Campiche (8,8 y 6,7 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ día)) (Chiang, 1989). Los residuos generados por Codelco del proceso de fundición y refinación de concentrados sulfurados de Cobre generan residuos sólidos (escorial y material particulado rico en elementos traza) y gaseosos, principalmente SO_2 y NO_x , (Chiang *et. al*, 1985; CENMA, 2013). “Estos residuos sólidos son principalmente el producto de la oxidación de minerales sulfurados..., los que generan emisiones de material particulado enriquecido con elementos traza entre los que se encuentra el Cadmio...” (Parra *et al*, 2014).

Las concentraciones de Cadmio medidas son localizadas en la zona oeste (2 sitios) y a una profundidad de 0 a 7 cm. Estas concentraciones presentan un rango estrecho que varía de 6,07-6,72 (mg/kg) en los sitios HC-4 y HC-7, respectivamente. Estas concentraciones encontradas son superiores a las obtenidas en suelos de Puchuncaví por otros autores con una máxima concentración medida en zonas urbanas que corresponde a Quintero (2,76 mg/kg), además, se encontraron concentraciones máximas de Cadmio en Puchuncaví-Rungue de 1,61 (mg/kg) (PGS, 2015).

Las concentraciones de Cadmio obtenidas sobrepasan las concentraciones naturales de la zona de 0,18 (mg/kg). Además, las concentraciones máximas permitidas por la normativa EE. UU., no son sobrepasadas en ningún lugar muestreado. Esto podría ser debido a que la normativa EE. UU. no se adapta a las concentraciones naturales de Cadmio de la zona de Puchuncaví.

4.4 Adsorción de elementos en diferentes fracciones geoquímicas de humedales

La distribución de metales en las fracciones geoquímicas del sedimento permite predecir su movilidad y biodisponibilidad, cuando existen cambios en las condiciones fisicoquímicas en la que se encuentran los sedimentos. Dentro de las variables del medio que podrían afectar una adsorción de elementos se encuentra: pH, salinidad, potencial oxidación-reducción, concentración de materia orgánica e intermediación microbiana y de la variación de este elemento en el tiempo (Rodríguez, 2010). Además, del contenido de limos y arcillas (Tam y Wong, 1996).

La caracterización fisicoquímica del sedimento es determinante de los contenidos y formas químicas en que se encuentran los metales (Espinoza *et. al*, 2011). Los contenidos de limo-arcilla y materia orgánica controlan las concentraciones de metales, ya que aumentan la superficie de adsorción favoreciendo la retención de metales, principalmente por intercambio iónico y adsorción específica (Chatterjee *et. al*, 2007).

Los óxidos e hidróxidos presentes en el suelo, en especial depositados como recubrimiento de minerales primarios y secundarios o infiltrados en agregados de arcilla, alteran la carga eléctrica, modifican las propiedades de superficie e incrementan la capacidad amortiguadora del suelo (Acevedo-Sandoval *et. al*, 2004). La carga de los óxidos e hidróxidos que son dependientes del pH (punto isoeléctrico), presentan una notoria afinidad (atracción de carga) con aniones como Arsénico y Cromo. Además, se ha observado que la eficiencia de la adsorción de Cromo se encuentra limitada por la presencia de sulfatos, que compiten en la adsorción (Acevedo-Sandoval *et. al*, 2004).

No es posible determinar qué tipo de superficie estaría controlando los procesos de adsorción en los humedales, debido a una falta de información de contenido de materia orgánica, limo-arcilla, y óxidos e hidróxidos en los sedimentos extraídos. Aunque, las condiciones alcalinas del sistema estarían favoreciendo una adsorción de cationes en superficies de carga opuesta (materia orgánica, óxidos e hidróxidos y algunas arcillas) (Van der Sloot, 2010; Acevedo-Sandoval *et. al*, 2004; Chatterjee *et. al*, 2007; Tam y Wong, 1996)).

*

4.5 Discusión entre las concentraciones químicas medidas en profundidad y su relación respecto al tamaño de grano identificado en profundidad.

Al observar las concentraciones medidas en profundidad de 0 a 7 y 15 a 22 cm es posible observar algunos elementos que presentan mayores concentraciones en la profundidad superior de 0 a 7 cm en la mayoría de los sitios muestreados, estos son: Arsénico, Manganeso, Azufre, Calcio, y Cobre. Igualmente, el Cadmio, que se midió solo en la profundidad superior. Entre estos elementos, el Arsénico, Cobre y Azufre presentan mayores concentraciones en los sitios que se observó un tamaño de grano identificado como limo-arcilla, esta fracción fina del sedimento presenta una mayor afinidad por los metales traza debido a su mayor superficie de contacto (Förstner & Salomons, 1980, Förstner & Wittmann, 1981). Igualmente, en los horizontes superficiales las concentraciones naturales se vieron afectados por el enriquecimiento antropogénico por lo que es esperado un mayor enriquecimiento en superficie. Esto ha sido observado también en otras partes donde existen industrias que podrían aportar un enriquecimiento en zonas aledañas (Martley *et al.*, 2003; CENMA, 2017). Otros autores han señalado que la zona superior de los sedimentos de humedales existe una mayor acumulación de materia orgánica, la cual podría actuar como una superficie filtradora de metales (Ortiz *et al.*, 2005). Igualmente, los valores de pH estarían favoreciendo una adsorción de cationes en superficies de carga opuesta como materia orgánica, óxidos e hidróxidos y algunas arcillas (Van der Sloot, 2010; Acevedo-Sandoval *et. al.*, 2004; Chatterjee *et. al.*, 2007; Tam y Wong, 1996).).

En cambio, en la profundidad de 15 a 22 cm, se observaron mayores concentraciones de Cromo y Níquel. Generalmente, se observó las máximas concentraciones de estos elementos en sitios que presentaron un tamaño de grano definido como arena fina (HC-7_0-7, HC-7_15-22 y HM-1_15-22). Esto es contradictorio con resultado de autores que indican que el Níquel presenta una mayor afinidad por la fracción fina del sedimento (limo-arcilla) (Förstner & Salomons, 1980; Förstner & Wittmann, 1981; Herrera-Núñez *et. al.*, 2013).

Dentro de los elementos de interés no se observaron concentraciones a una profundidad preferencial para elementos como Aluminio, Cobalto, Hierro, Plomo, Zinc, Molibdeno y Antimonio.

El sitio HC-4 presenta un tamaño de grano limo-arcilla y se encuentra en contacto directo al escorial de Codelco, este sitio presentó generalmente las máximas concentraciones de metales (oides). En la profundidad de 0 a 7 cm se midieron las máximas concentraciones de Arsénico, Aluminio, Manganeso y Cadmio. Igualmente, en la profundidad de 15 a 22 cm se midieron las máximas concentraciones de Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cobre. Aunque esta diferencia de concentración en profundidad en el sitio HC-4 podría deberse a la heterogeneidad mineralógica presente en el escorial (Urrutia, 2016). Autores han reportado concentraciones de algunos elementos como Aluminio, Calcio, Azufre, Aluminio, Manganeso, Antimonio, Zinc, Plomo, Molibdeno, Cobre y Cobalto en la escoria proveniente de Codelco (Oyarzún, 2013).

4.6 Discusiones de las concentraciones químicas encontradas en sedimentos y su contraste respecto a las máximas concentraciones permitidas por la normativa de EE. UU. y los índices de riesgo ecológico calculados.

Chile no posee una normativa de concentraciones químicas máximas permitidas en suelos y sedimentos, por lo que es necesario comparar las concentraciones obtenidas respecto a una referencia que se adapte a las concentraciones naturales del sector. Se ha recomendado la utilización de la normativa de EE. UU. con el fin de contrastar las concentraciones obtenidas respecto a concentraciones máximas permitidas internacionalmente (Ministerio del medio ambiente, 2012).

Las concentraciones de Aluminio, Cobalto, Arsénico, Hierro, Manganeso y Cromo sobrepasan las concentraciones máximas permitidas por la normativa de EE. UU. en al menos un sitio de la zona de estudio. Lo encontrado en el presente estudio es consistente respecto a lo informado por otros autores donde el Manganeso, Hierro, Arsénico y Cobre sobrepasaron las concentraciones máximas permitidas por la normativa de EE. UU. (PGS, 2015).

Aunque es una normativa usualmente utilizada como referencia, en esta zona no se adapta a las concentraciones naturales para el Cromo, Cobalto y Arsénico. En el caso del Arsénico las concentraciones naturales de la zona son de aproximadamente 7,64 mg/kg y la concentración máxima permitidas por la normativa de EE. UU. es de 0,68 mg/kg.

Por otro lado, los índices de calidad del sedimento han sido utilizado para comparar el nivel de las concentraciones preindustriales y actuales almacenadas en sedimentos (Weisse, 2015). Estos índices permiten evidenciar de una manera más sencilla el grado de enriquecimiento que presentan los sedimentos analizados. De esta manera, elementos clasificados de alta a extremadamente contaminados, ósea el Plomo, Cobre, Níquel, Zinc, Cadmio, Arsénico, Antimonio y Molibdeno se han seleccionado como elementos de interés para ser comparados respecto a concentraciones medidas por otros autores y discutidos con mayor detalle, en cuanto a su distribución y posible fuente de enriquecimiento.

Tabla 39. Resumen de las concentraciones obtenidas que se encuentran sobre la normativa de EE. UU. y/o con un índice clasificado de alta a extrema contaminación.

Tipo de elemento	Muestras Recolectadas										
	Elemento	HC-7 0-7	HC-7 15-22	HC-4 0-7	HC-4 15-22	HM-3 0-7	HM-3 15-22	HM-1 0-7	HM-1 15-22	EP-1A 0-7	EP-1 15-22
Mayoritarios	S	4.322	690	8.026	3.060	10.519	3.491	12.488	5.051	1.427	790
	Ca	47.241	21.450	19.357	11.255	59.144	118.204	22.256	22.354	15.606	13.899
	Al	78.109	83.444	118.031	108.285	84.193	70.852	81.635	87.653	86.618	88.149
	Fe	42.963	48.570	66.692	110.508	48.736	39.375	55.892	42.648	51.763	54.736
Minoritarios	As	75,4	19,1	162*	142	79,9	24,5	45,6	14,4	29,9	35,7
	Cu	1.360	100	1.204	1.487	623	122	454	49,7	454	327
	Cr*	241	323	43,2	156	93	93,1	48,6	198	114	99
	Mn	894	688	2.178	1.488	1.312	654	640	919	1.124	1.058
	Ni	129	173	31,7	78,9	44,6	43,3	24,8	106	52,8	45,6
	Pb	77,1	18,1	108	251	66	94,1	71,4	19	57,8	49,5
	Zn	296	124	451	1.624	267	292	218	101	205	217
Trazas	Mo	26	27,1	84,5***	358***	13	8,47	5,95	16,3	9,96	7,92
	Sb	13	10	17,3	29	5	5	5	5	5	5
	Co	11,3	13,1	28,8	49,9	15,8	10,3	13,9	13,5	19,9	20,8
	Cd	6,07***	2,5	6,72***	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Parámetros Fco-Qcos	pH	9,21		9,8		9,66		s / d		4,3	
	CE (µS/cm)	2.223		10.000		32.510		s / d		2.440	
Celda amarilla y numero negro: Concentraciones que superan la normativa EE.UU											
Numero rojo: presenta algún índice clasificado de alta a extrema contaminación.											
Celda amarilla y numero rojo: Las concentraciones superan la normativa de EE. UU y presento algún índice clasificado de alta a extrema contaminación.											
*: En el presente estudio se evaluó la calidad de sedimento a través de 3 índices. Cada * significa que un índice calculado fue clasificado de alto a extremadamente											

4.7 Discusiones respecto a concentraciones químicas medidas en sedimentos y en aguas superficiales de los humedales Campiche, Los Maitenes y estero Puchuncaví.

Es indispensable analizar tanto el agua y los sedimentos de humedales, ya que el conocimiento de la distribución de los metales (oides) que son fijados en los sedimentos permite conocer su disponibilidad (Cosma *et. al*, 1982). Debido a que su sorción en sedimentos representa un importante reservorio de metales que eventualmente pueden retornar a la columna de agua por procesos de difusión, mezcla, actividades de organismos bentónicos y re-suspensión (Meyerson *et. al*, 1981). Por lo que comparar concentraciones químicas obtenidas en agua en los mismos sitios, pero en diferentes años y épocas diferentes, no sería representativo, pero nos puede dar señales sobre un posible aporte extra de elementos en el tiempo. Por lo tanto, las concentraciones de metales medidas en sedimentos también pueden variar significativamente dependiendo de los cambios en las condiciones físico, químicas y biológicas del medio (Rodríguez, 2010).

Estudios previos que ha medido concentraciones de metales como Cobre, Zinc y Manganeso en la cuenca del estero Puchuncaví reportan concentraciones para estos elementos que sobrepasan la normativa chilena para aguas de consumo humano (NCh N° 409) y de aguas para diferentes usos (NCh N° 1.333) en al menos un sitio en la zona de estudio (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha, 2014). Además, estudios realizados en los humedales del sector (humedal Campiche, humedal Los Maitenes y estero Puchuncaví) han señalado que el Sulfato, Arsénico, Magnesio, Manganeso, Molibdeno y Hierro se encuentran sobre alguna normativa chilena (Nro 409 o 1.333), en al menos un sitio (Cabrera, 2020).

El Azufre presentó sus mayores concentraciones obtenidas en sedimentos en el sitio HM-1_0-7, lugar en que el agua se evapora, por lo que las concentraciones de Sulfato presentes en las aguas se concentraron en la superficie del sedimento. Otro sitio con concentraciones de importancia es HM-3_0-7, este lugar presentó las mayores concentraciones de Azufre dentro de los sitios estudiados en que los sedimentos se encuentran cubiertos con agua. Este sitio al momento de la extracción de sedimento, se sintió el característico olor del sulfuro de Hidrogeno, este gas puede ser generado a través de la oxidación de la materia orgánica y la consecuente reducción de sulfatos.

El gradiente de concentración máximo entre las concentraciones medidas en sedimentos y las concentraciones naturales de Arsénico y Molibdeno obtenidas en Puchuncaví aumentaron en dirección oeste, con sus mayores concentraciones en el sitio HC-4 en ambas profundidades

investigadas. Esto coincide con las máximas concentraciones de Arsénico y Molibdeno disueltos, las cuales se presentan en el sitio HC-4 y en general en los sitios más cercanos a este sitio (Cabrera, 2020).

El gradiente de concentración máximo entre las concentraciones medidas en sedimentos y las concentraciones naturales obtenidas en Puchuncaví para Magnesio y Manganeso se concentra en la zona aledaña al complejo industrial Ventanas (sitio HC-4). Aunque, también presenta un enriquecimiento significativo en los sitios HM-3_0-7 y EP-1_0-7. Mientras que las concentraciones disueltas de Magnesio y Manganeso presentaron concentraciones anómalas principalmente en sitios correspondientes al humedal Campiche (Cabrera, 2020).

Por último, el gradiente de concentración máximo entre las concentraciones medidas en sedimentos y las concentraciones naturales obtenidas en Puchuncaví para el Hierro se obtuvo en el sitio (HC-4, en ambas profundidades investigadas), además, de presentar concentraciones significativas en los sitios HM-1_0-7 y EP-1 (ambas profundidades). En cambio, las concentraciones disueltas de Hierro presentaron un único sitio donde sobrepasan las concentraciones máximas permitidas por la normativa chilena y que se midió en uno de los sitios investigados del humedal Los Maitenes (Cabrera, 2020).

El pH de las aguas que conforman los humedales que se ha reportado por autores se encuentra en un rango desde 7,0 a 8,5 (Cabrera, 2020). En cambio, los pH medidos en el presente estudio se encuentran entre 4,1 (EP-1) a 9,81 (HC-4). La alcalinización del medio provocaría un aumento en las concentraciones de elementos presentes en fase sólida, excepto para algunos elementos que presentan un comportamiento anfótero. Igualmente, esta alcalinización favorecerá a superficies de carga variables como óxidos e hidróxidos obtener una carga negativa, y de esta manera contribuir a la adsorción de cationes disueltos en estos sistemas.

Tabla 40. Resumen de las concentraciones disueltas encontradas en las aguas, y concentraciones medidas en sedimentos del humedal Campiche y Los Maitenes. Para el sedimento, se marcan en gris las concentraciones que sobrepasaron la normativa de EE.UU. En cambio, para las concentraciones disueltas que sobrepasaron una normativa chilena para aguas, se marco en amarillo, y rojo si sobrepasa dos normativas chilenas para agua (Nro 409 o 1333).

Parámetro	Normativa de Aguas		Normativa de Sedimento	Muestras									
	NCh 409	NCh 1333	Estado Unidense (mg/kg)	HC-7 (S)	HC-7 (A)	HC-4 (S)	HC-4 (A)	HM-1 (S)	HM-1 (A)	HM-3 (S)	HM-3 (A)	EP-1 (S)	EP-1 (A)
pH (Aguas)	-	-	-	9,21	8,2	9,81	8,5	s/d	7,1	9,66	7	4,3	8,1
CE	-	-	-	2223	3174	10000	9528	s/d	1371	32510	4029	2440	1183
ORP	-	-	-	-	118	-	110	-	88	-	-23	-	64
Cloruro	400	200	-	-	599	-	1269	-	232,4	-	738,07	-	177,59
Sulfato (A) / Azufre (S)	500	250	-	4322	257	8026	2050	12488	52,51	10519	85,33	1427	106,99
Arsénico	0,01	0,1	0,68	75,4	0,27	162	1,04	45,6	0,02	79,9	0,07	29,9	0,01
Cobre	2	0,2	3100	1360	0,16	1204	0,02	454	0,02	623	0,22	454	0,03
Plomo	0,05	5	400	77,1	0,06	108	0,001	71,4	0,001	66	0,0002	57,8	0,0002
Manganeso	0,1	0,2	1800	894	0,76	2178	0,4	640	1,17	1312	0,03	1124	0,09
Molibdeno	-	0,01	390	26	0,02	84,5	3,28	5,95	0,001	13	0,07	9,96	0,003
Hierro	0,3	5	55000	42963	1,03	66692	0,27	55892	1,79	48736	0,19	51763	0,12

(A) y (S) es indicativo si la concentración de determinado metal se midió en Aguas o Sedimentos.

5. Conclusiones

Existe un notorio gradiente de concentración de metales (oides) entre las concentraciones medidas en sedimentos, y las concentraciones naturales de los elementos de interés reportadas en Puchuncaví, este gradiente aumenta en los sitios más cercanos al complejo industrial Ventanas para el Aluminio, Hierro, Arsénico, Cromo, Manganeso, Cobre, Plomo, Níquel, Zinc, Cobalto, Antimonio, Molibdeno y Cadmio. Excepto para el Calcio y Azufre que presentan su máxima concentración en los sitios HM-3 y HM-1 respectivamente (ubicados a aproximadamente a 700 y 1200 m desde el sitio HC-4).

Además, se observó un mayor enriquecimiento de Arsénico, Manganeso, Cobre, Azufre, Calcio y Cadmio en la profundidad de 0 a 7 cm. Esto podría ser producto a que actualmente existe una fuente antropogénica que aportaría este enriquecimiento elemental en la zona superior. A diferencia del Cromo y Níquel que podrían presentar mayores concentraciones en la profundidad inferior producto a que anteriormente una fuente antropogénica enriqueció esta profundidad cuando estuvo en superficie, o que el Cromo podría estar siendo adsorbido por la misma fracción del sedimento que el Níquel. Igualmente, estas concentraciones varían en profundidad debido a factores como tecnologías de abatimiento, ciclos biogeoquímicos dependientes de las condiciones del sistema (pH y CE), movilidad de metales (estado de oxidación, fracción ligada), entre otros.

El sitio HC-4 se encuentra aledaño al escorial Codelco, este lugar presenta una diferencia significativa de concentraciones metálicas en profundidad, esta diferencia podría ser producto de la heterogeneidad mineralógica del escorial. Además, que las condiciones fisicoquímicas del sistema favorecerían una adsorción de cationes provenientes desde las aguas en superficies de carga opuesta. De esta manera, los sedimentos de humedales funcionan como filtro de estos sistemas, al almacenar elementos en su superficie. Esta acumulación elemental podría ser retornada a la columna de agua, producto a algún cambio en las condiciones físico, química y biológica del sistema.

Los resultados indican que elementos que se encontraron sobre la normativa de EE. UU. y elementos que presentan índices clasificados de alta a extrema contaminación, han sido enriquecidos en sedimentos con un aporte elemental natural y antropogénico. De igual manera, es necesaria una normativa que establezca una máxima concentración de metales en suelos y

sedimentos, y que se adapte a las condiciones naturales de la zona, para observar de mejor forma el enriquecimiento producto a actividad antropogénicas del sector.

La convergencia de las máximas concentraciones encontradas en diferentes matrices ambientales hacia la zona oeste de Puchuncaví, y las condiciones del sistema señalan que la fuente de origen de este enriquecimiento se encontraría en la zona cercana al sitio HC-4 Y HC-7.

Por último, la falta de información geoquímica y mineralógica sobre la concentración de metales y metaloides sorbidos en sólidos en suspensión en la columna de agua y el estudio de la fracción del sedimento en que se encuentran ligados estos metales son estudios importantes debido a que con estos datos se podría corroborar la biodisponibilidad de estos elementos para estos ecosistemas. Incluso, esta información faltante podría determinar el grado de responsabilidad del enriquecimiento de elementos presentes en sedimento por parte del complejo industrial Ventanas.

SOLO USO ACADÉMICO

CONCLUSION RESPECTO NORMATIVA DE EE. UU.

Existen concentraciones de Aluminio, Arsénico, Cromo, Hierro, Cobalto y Manganeseo que sobrepasan las máximas concentraciones permitidas por la normativa de EE. UU. Producto a la toxicidad de estos metales y metaloides es necesario prestar atención a los metales que se encuentren sobre estos máximos permitidos. Esto debido a que estos máximos permitidos son establecidos según la experiencia y desarrollo en relación con la evaluación de riesgo de la salud de EE. UU.

No obstante, cada zona tiene su propia geología y por lo tanto su propia geoquímica asociada, por lo que parte de este enriquecimiento es producto de las concentraciones naturales de la zona, aunque estas no logran explicar por si solas las altas concentraciones de metales (oides) obtenidas en sedimentos. De manera, que existe un aporte de origen antropogénico que estaría contribuyendo en gran medida a las concentraciones obtenidas en el presente estudio. Esta fuente antropogénica se encontraría en los alrededores de los sitios HC-7 y HC-4, lugares donde se midieron las máximas concentraciones para la mayoría de los elementos de interés.

La normativa de EE. UU. no se adapta del todo a las condiciones naturales de la zona, esto se puede observar en el caso del Cobalto, Cromo y Arsénico, donde las concentraciones máximas permitidas por la normativa EE. UU. son sobrepasadas por las concentraciones naturales de Puchuncaví. Por lo tanto, es indispensable una normativa que se adapte a las condiciones geológicas de la zona e indique concentraciones máximas permitidas para metales y metaloides en suelos y sedimentos.

CONCLUSION RESPECTO INDICES DE CALIDAD DE SEDIMENTO

Los índices de calidad de sedimento o índices de riesgo ecológico aplicados en las concentraciones medidas en los sedimentos de los humedales investigados, presentaron índices con una tendencia de aumentar en los alrededores del complejo industrial Ventanas. Los índices calculados de Arsénico, Cobre, Níquel, Plomo, Zinc, Molibdeno, Antimonio y Cadmio se encuentran clasificados de altamente a extremadamente contaminado en la zona oeste (CIV). De manera que los diferentes índices son comparables entre sí, y permiten un contraste respecto a las concentraciones naturales del sector. Por último, según los índices por sitio calculados, la totalidad de sitios investigados se encontrarían en una calidad de considerable a muy alta contaminación, y por tanto ha revelado impactos ecológicos significativos que aumenta en los sitios más cercanos al complejo industrial Ventanas (según los índices calculados para el grado de contaminación (Cdeg) y el índice de contaminación integrada (IPI)).

CONCLUSION RESPECTO A LA RELACION DE CONCENTRACIÓN DE METALES (OIDES) EN AGUAS Y SEDIMENTO

Los sedimentos representan un importante reservorio de metales (oides) que eventualmente pueden retornar a la columna de agua por cambios en las condiciones físico, químicas y biológicas del sistema. Por lo que comparar estudios de agua y sedimentos en diferentes años y épocas, no es representativo. Igualmente puede dar señales de un aporte extra de elementos en la zona.

El Arsénico, Plomo, Manganeso, Molibdeno y Hierro presentan un aumento de concentración de metales pesados en agua y sedimentos en las zonas cercanas al complejo industrial Ventanas. Igualmente, las concentraciones de Arsénico, Manganeso y Hierro sobrepasaron las concentraciones máximas permitidas en suelos y sedimentos definidas en la normativa de EE. UU., y exceden al menos una normativa de calidad de aguas de Chile (Nro 409 o Nro 1333). Esto podría indicar que en estos sitios existe un sobre enriquecimiento de estos elementos, al estar presentes en concentraciones significativas disueltas y adsorbidas en la fase sólida, y por tanto se podría ver afectada la función depuradora de los humedales investigados.

El rango de pH medido en los humedales investigados se encuentra en el rango de 4,3 a 9,81. El pH en las zonas más cercanas al complejo industrial Ventanas es netamente alcalino (9 a 9,81).

Generalmente, estos pHs permiten una mayor concentración de elementos adsorbido en sedimentos. Las condiciones alcalinas del medio también favorecerían a la carga negativa presente en las superficies de intercambio catiónico, lo que contribuiría a una adsorción de cationes disueltos, aumentando las concentraciones de elementos adsorbidos en sedimentos. Además, esto calza con las altas correlaciones encontradas entre el Zinc con el Hierro, Plomo, Cobalto, elementos que podrían presentar una movilidad similar, y por lo tanto estar asociados en cuanto a su comportamiento (adsorción o liberación de estos elementos al sistema) y por tanto posiblemente a la fracción del sedimento a la que se encuentran ligadas.

SOLO USO ACADÉMICO

6. Recomendaciones de estudios posteriores

Con el fin de complementar la información obtenida de geoquímica de aguas y sedimentos en los humedales de Puchuncaví, podría ser de utilidad estudiar en más detalle las interacciones que se produce a nivel molecular, por lo que se recomienda realizar:

Un análisis SEM del material particulado en suspensión en las aguas superficiales de los humedales investigados, con esto se podría observar a que tipo de superficie se encuentran ligados ciertos elementos, junto a las fases mineralógicas que estarían formando.

Estudios de extracción secuencial, para obtener datos sobre en qué fracción del sedimento se encuentran ligados metales y metaloides (fases solidas que forma). Esto debido a que ciertas fracciones como los carbonatos podrían liberar fácilmente elementos al medio por un cambio en las condiciones del sistema, mientras que elementos adheridos a la materia orgánica o arcillas podría generar una menor disponibilidad de estos. A la vez se podrían realizar estudios de capacidad de adsorción con el fin de ver la competitividad y afinidad de estos elementos por las diferentes fracciones que conforman los sedimentos (isotermas de adsorción).

Por último, es de gran importancia trabajar en una normativa sobre el contenido máximo permitido de elementos potencialmente tóxicos en sedimentos. Aunque los sedimentos son filtros naturales de las aguas con las que interactúan, al almacenar en su superficie metales y metaloides, son considerados una fuente de contaminación secundaria, debido a que podrían liberar los elementos adheridos a la superficie de solidos dependientes de las condiciones del medio y de las propiedades de los mismos metales.

7. Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497.
- Aguilar, J; Dorronsoro, C.; Gómez Ariza, J. L. y Galán E. (1999).- “ Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestras y análisis para su investigación.” Coonsejeria de Medio Ambiente Junta de Andalucía. 202pp.
- Alcaíno Concha, G. I. (2012). Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales.
- Alfaro, Marta & Salazar Sperberg, Francisco (2005). Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile. *Agricultura técnica*, ISSN 0365-2807, Vol. 65, N°. 3, 2005, pags, 330-340.
- Almanza-Marroquín, V., Figueroa, R., Parra, O., Fernández, X., Baeza, C., Yañez, J., & Urrutia, R. (2016). Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 44(2), 313-326.
- Appelo C.A.J. y postma D. (2005). *Geochemistry, groundwater and wastewater*. 21^a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1368p.
- Atondo, A. I. V., del Castillo Alarcón, J. M., Álvarez, A. G., Villalba, A. M. P., Ortiz, G. N., & Esquer, A. S. (2013). Contaminación del agua y suelo en el ecosistema Río Agua Prieta, Sonora, México. *Biotechnia*, 15(1), 3-11.
- Ayers, R.S, Westcot, D.S. (1985). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage paper 29. Rev. 1. <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.HTM>, fecha consulta: septiembre 2007
- Azario, Ricardo R, Salvarezza, Susana A, Ibarra, Alexis, & García, María del C. (2010). Efecto del Cromo Hexavalente y Trivalente sobre el Crecimiento de *Escherichia coli* ATCC 35218. *Información tecnológica*, 21(1), 51-56. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000100009>
- Boës, Xavier & Rydberg, Johan & Martinez-Cortizas, A. & Bindler, Richard & Renberg, I. (2011). Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*
- Boluda N. & Egea E., 2017. Evaluación del impacto medioambiental de los vertidos al mar de aguas depuradas. Adsorción de metales y tensioactivos aniónicos en sedimentos de la costa alicantina. *Holothuria tubulosa* como bioindicador de contaminación. Proyecto de investigación mediante convenio de la Universidad de Alicante, 1-52.
- Börgel R. O. Mapa geomorfológico. Santiago: Instituto geográfico militar., 1983. 182p
- Cabezas, L. M. V., & Cedeño, F. G. (2015). Eliminación de cromo utilizando humedales de flujo sub-superficial horizontal. *Afinidad*, 72(571).
- Cabrera Salinas, R. I. (2020). Caracterización hidroquímica del agua superficial en los humedales Campiche y Maitenes, comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile.
- 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 Titulo, Universidad de Chile, 259 p.
- Carrasco M., S. Olga & Acevedo Edmundo. (2006) Metales pesados y biodisponibilidad. Poster.

Carrillo-Pedroza, F. R., de Jesús Soria-Aguilar, M., Martínez-Luévanos, A., Galindo-Ramos, A., & Picazo-Rodríguez, N. (2014). Adsorción de Cromo y Arsénico en Óxidos de Hierro. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 6(12).

Casas, J.M., 1989. Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuenca del Cardener. Tesis Doctoral pp271.

Castillo, S., Teresa, T., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E., Herrmann, L., Mounkaila, M., Gibbons W., (2008). Trace element variation in size-fractionated African desert dusts. *Journal of Arid Environments* 2008; 72:1034–45. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196307003424>.

Centro Nacional del Medio Ambiente., 2013. (CENMA). Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Santiago de Chile.

Centro Nacional del Medio ambiente, 2017 (CENMA). Evaluación y caracterización del polvo negro en la comuna de Huasco e implementación de medidas de mitigación. Fundación de la universidad de Chile para el Ministerio del medio ambiente, Subsecretaría del medio ambiente (Informe final, versión corregida 5).

Cereceda et al., 2016. Universidad técnica Federico Santa María; Centro de tecnologías ambientales y Laboratorio de química ambiental. Caracterización química de las deposiciones atmosféricas en el valle de Puchuncaví y análisis del potencial impacto de la contaminación sobre tejidos vegetales, campaña 2, periodo 2016.

Céspedes, F. L., & Rueda, H. R. (2019). Antecedentes y reflexiones sobre la zona de sacrificio de Quintero y Puchuncaví. *Cuad Méd Soc (Chile)*, 59(1), 21-31.

Chatterjee, M., E. V. Silva-Filho, S. K. Sharkar, S. M. Sella, A. Bhattacharya, K. K. Satpathy, M. V. R. Prasad, S. Chakraborty y B. D. Bhattacharya. 2007. Distribution and possible sources of trace elements, in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance. *Environ. Internal.*, 33: 346-356

CHIANG, J., CORNEJO P., LÓPEZ J., ROMANO S., PASCUAL J. y CEA M., 1985. Determinación de cadmio, cobre, manganeso, plomo, hierro, cinc y arsénico en sedimento atmosférico, en la zona de Quintero, V región, Valparaíso, Chile. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química* 30: 139-158.

Chiang, A.J., 1989. Artículos sobre Valparaíso: Desarrollo Industrial y contaminación. (8p).

Comisión especial investigadora (2018). Informe comisión especial investigadora sobre causas de alta contaminación ambiental, especialmente en Concón, Quintero y Puchuncaví, y de responsabilidades en ejecución de plan de descontaminación. P172. <https://www.camara.cl/>.

CONAMA (2009). Análisis general del impacto económico social de una norma de emisión para termoeléctricas.

Contreras J., Arismendi, Gómez & Mendoza, Carmen & Contreras Perez, José Bernardino., 2004. Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del Río Haina. *Ciencia y Sociedad*. 29. 10.22206/cys. 2004.v29i1.pp38-71.

Colacelli, N.,2001. Azufre en el suelo. TECNIBOOK EDICIONES.

Combariza Bayona, D. A. (2009). Contaminación por metales pesados en el embalse del Muña y su relación con los niveles en sangre de plomo, mercurio y cadmio y alteraciones de salud en los habitantes del municipio de Sibaté (Cundinamarca) . Departamento de Toxicología.

Cortés B., 2017. “Aproximación al paisaje de los humedales urbanos de Bogotá dentro de la estructura ecológica principal de la ciudad.” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 27 (1): 118-130. doi: 10.15446/rcdg.v27n1.60584.

Cosma B, R Frache, F Baffi & A Dadone. 1982. Trace metals in sediments from the Ligurian coast, Italy. *Marine Pollution Bulletin* 13: 127-132.

Damiani, A. C., & Álvarez Rodríguez, G. F. (2005). Determinación de un patrón de fractura intencional en gasterópodos marinos (Golfo de San Matías, Provincia de Río Negro). *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, 30.

DGA, 2015. Información Hídrica de las cuencas Priorizadas, Fichas técnicas. (4p).

Dold, B. 2003. Enrichment processes in oxidizing sulfide mine tailings: Lessons for supergene ore formation. *SGA, News*, 16, p. 10-15

Espectroscopía de emisión atómica ICP-OES, 2019. CSIC. <https://icp.csic.es/>

Espinosa, L. F., Parra, J. P., & Villamil, C. (2011). Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de Santa Marta, Colombia.

Espinoza, F Luisa., Parra J.P., Villamil C., 2011. Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la Ciénaga grande de Santa Marta, Colombia (17p).

Espinoza Almonacid, L. E. (2015). El polo industrial Quintero-Ventanas: ¿Hacia dónde fue el desarrollo? *Millcayac: Revista Digital de Ciencias Sociales*, 2(3), 245-269. (26p).

Estrada I., 2010. Monografía sobre los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, escuela de química Pereira. p.178.

Fernández J., 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.

Folchi., 2006. Historia ambiental de las labores de beneficio en la minería del cobre en Chile, siglo XIX, y XX. Universidad Autónoma de Barcelona.

Förstner & Salomons., 1980. Trace Metal análisis on polluted sediments (I. Assessment of sources and intensities). *Environm, Tech Letters*, 494-505.

Förstner & Wittman., 1981. Metal pollution assessment from sediment analysis. En: *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Förstner & Wittman (Eds.), Springer-verlag, Berlin, Chapt D, 110-196.

Fundación Kennedy, 2017. Nuevo inventario online de Humedales en Chile. Extraído de: www.fundacionkennedy.cl/2017/10/27/nuevo-inventario-de-humedales-en-chile/

GAC (2006). Análisis de normas de emisión para centrales termoeléctricas a nivel internacional y propuesta para Chile. 614p.

Galán, E. (2000): The role of clay minerals in removing and immobilising heavy metals from contaminated soils. In "Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference", vol. 1, C. Gomes, ed. Funchal, 351-361

Galán, H.E. & Romero B. A., 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. Universidad de Sevilla, departamento de cristalografía, mineralogía y química agrícola. Facultad de Química. (17p).

García Miranda, F. G., & Miranda Rosales, V. (2018). EUTROFIZACIÓN, UNA AMENAZA PARA EL RECURSO HÍDRICO.

- Gevaio, B. & Jones, K., 2000. Bound pesticide residues in soils: a review. *Environmental Pollution* (Barking, Essex: 1987), 108(1): 3–14.
- Giménez A.D., 2012. Caracterización de la estructura geomorfológica y dinámica costera de las ensenadas de La Ligua, Horcón y Quintay, Región de Valparaíso. Memoria de título, Universidad de Chile, Sgto., Chile. (91p).
- Ginocchio, R., 2000. Effect of a copper smelter on a grassland community in the Puchuncaví Valley, Chile. *Chemosphere* 41, 15–23.
- González, S. (1986). Calidad de las aguas de riego en Chile. *Agricultura Técnica* 46(4): 467-474.
- González, S., & Bergqvist, E., 1986. Evidencias de contaminación con metales pesados en un sector del secano costero de la Región de Valparaíso. En *Agricultura técnica* (Vol. 46, Numero 3, p.8).
- González, S., & Ite R., 1992. Acumulación metálica en suelos del área bajo influencia de las chimeneas industriales de Ventanas, provincia de Valparaíso. *Agricultura técnica* (Chile); 9.
- González, G. (2016). Proyectos eléctricos y catastro de termoeléctricas en Chile [Electrical projects and thermoelectric register in Chile]. Santiago of Chile.
- Granat, L., Rodhe, H. 1976. The global sulphur cycle. Nitrogen, Phosphorous and Sulphur – Global Cycles, Svensson, B.H. and Söderlund, R editorial. *Scope report 7. Ecological Bulletins* (Stockholm). 22:89-134 p
- Greenpeace, Chile sustentable & Kas Ingenieros, 2020. Impactos de las emisiones de las termoeléctricas a carbón en la calidad del aire en las comunas de Huasco y Puchuncaví. 27p.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001.
- Harrould-Kolieb E., Savitz J., 2009. Acidificación: ¿Cómo afecta el CO₂ a los océanos? OCEANA, Segunda Edición Junio, 2009. (33p).
- Herrera-Núñez, J., Rodríguez-Corrales, J., Coto-Campos, J. M., Salgado-Silva, V., & Borbón-Alpizar, H. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Revista Tecnología en Marcha*, 26(1), ág-27.
- INAP, 2009. The Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), the International Network for Acid Prevention.
- Instituto Geográfico Militar, 1996. “Geografía de Chile: V región de Valparaíso”; Editado por Instituto Geográfico Militar; Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Estadísticas, 2017. Censo 2017, Chile.
- Jafari et al., 2020 (" trace element soil contamination from smelters in the Illawarra region, New South Wales, Australia").
- Jiménez Heinert, M., Grijalva Endara, A., & Ponce Solórzano, H. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *RECIMUNDO*, 4(4), 4-12. doi:10.26820/recimundo/4. (4). octubre.2020.4-12
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. Cuarta edición. Taylor and Francis group. 505 p.
- Kelly, D. P. 1997. Mineral Bioleaching. *Bact. Tech. Metallurgical Solutions Ltd.* P. 1-3. Kristiansson, K., Malmqvist, L., Persson, W. 1990. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour*, New Series, Volumen 14, p. 407- 416.

- Kerstner, M. & Forstner, U., 1989. Speciation of trace elements in sediments. In: G.E, Batley (ed.) Trace element speciation: Analytical Methods and Problems, CRC Press, Boca Raton, Florida. 245-317.
- Köppen W., 1948 Climatología – con un estudio de los climas de la Tierra. Fondo de Cultura Económica, (Sección de obra de Geografía)
- Lacerda, L. D., M. G. Ribeiro Jr. y B. B. Gueiros., 1998. Manganese dynamics in a mangrove mud flat tidal creek in SE Brazil. 105-115.
- Langmuir, D. (1997) Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. p601.
- Li, X.; Sheng, Z.; Wai, O. y Li, Y. 2000. Chemical partitioning of heavy metal contaminants in sediment of the Pearl River estuary. Chem. Spec. Bioaval., 12 (1): 17-25.
- Lockwood, A. H., Welker-Hood, K., Rauch, M., & Gottlieb, B. (2009). El impacto del carbón sobre la salud humana. Un informe de Médicos para la Responsabilidad Social (Physicians for Social Responsibility).
- Luca Palacios, R. F. (2012). Procesos de oxidación química y bioquímica en rocas sulfuro mineralizadas y relación con la generación de iones libres y gases de hidrocarburos: aplicación a la exploración de yacimientos bajo cobertura.
- Macdonald D, Ingersoll C.G., Berger T.A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines (p. 13).
- Maldonado, Y. (2020, 2 noviembre). ciclo del Azufre [Características] Etapas e Importancia. GEOLOGIAWEB. <https://geologiaweb.com/geologia-general/ciclo-azufre/>
- Martley, E., Gulson, B. L., & Pfeifer, H. R. (2004). Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of Port Kembla, NSW, Australia. Science of the Total Environment, 325(1-3), 113-127.
- Meyerson A, G Luther, J Krajewski & E Hires. 1981. Heavy metals distribution in Newark bay sediments. Marine Pollution Bulletin 12: 244-250
- Ministerio del medio ambiente, S/f. Humedales de Chile. Extraído de: www.humedaleschile.mma.gob.cl/ecosistemas/humedales
- Ministerio del Medio Ambiente - Centro de Ecología Aplicada., 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Santiago. Chile.164 pp.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2012. Guía Metodológica para la Gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes. Fundación Chile. Extraído de: <http://www.cenma.cl>
- Ministerio del medio ambiente (2013). Análisis de riesgo ecológico por sustancias potencialmente contaminantes en el aire, suelo y agua, en las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2014. Evaluación de riesgos para la salud de personas y biota terrestre por la presencia de contaminantes, en el área de influencia industrial y energética de las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví”, Santiago de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2018. Informe: “Línea base de la calidad del aire en la región de Valparaíso Período Año 2018. Extraído de: <https://mma.gob.cl>. (50p).

Muena, V., González, I., & Neaman, A. (2010). Efectos del encalado y la fertilización nitrogenada sobre el desarrollo de *Oenothera affinis* en un suelo afectado por la minería del cobre. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 10(2), 102-114.

Muller G, (1979). Heavy metals in the sediment of the Rhine-Changes seity. Umschau in Wissenschaft Technik. Geo journal.

Municipalidad de Puchuncaví., 2009. Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) 2009 – 2012.

Municipalidad de Puchuncaví., 2017. Plan de desarrollo comunal Puchuncaví 2017-2022 (pp. 1–46).

Navarro, E., Daesslé, L. W., Camacho-Ibar, V. F., Ortiz-Hernández, M. C., & Gutiérrez-Galindo, E. A. (2006). La geoquímica de Fe, Ti y Al como indicadora de la sedimentación volcánoclastica en la laguna costera de San Quintín, Baja California, México. *Ciencias marinas*, 32(2), 205-217.

Negrete, J., 2015: Informe Final Diagnóstico de sitios de alto valor para la conservación en la Región de Valparaíso Línea 1. Portafolio del sitio Humedal de Los Maitenes. - Universidad Católica de Valparaíso.

Olivares V., 2009. Milka Castro Lucic y Lucas Fernández Reyes (Editores). Gestión Sostenible de Humedales. *Revista de geografía Norte Grande*, (42), 103-104.

Ortiz, M.A., C. Siebe, y S. Cram, 2005. Diferenciación ecogeográfica, p. 305-321. In: J. Bueno, F. Álvarez y S. Santiago (Eds). *Biodiversidad del Estado De Tabasco*. Inst. de Biología, UNAM-CONABIO. ISBN 970-9-26-8.

Oyarzún, 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.

Parra, M.S., 2013. Determinación del origen y mecanismo de contaminación por metales y metaloides en los suelos de Valle de Puchuncaví. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Mención Química. (215p).

Paskoff, R., 1970. *Recherches Geomorphologiques dans le Chili semi-aride*. Biscaye Publisher, 420p.

Paskoff, R., 1996. *Atlas de las formas de relieve de Chile*, Instituto Geográfico Militar de Chile. 288p.

Pavón, T. M., 2017. Estado de preservación de las Áreas Protegidas por el Estado Chileno, en el marco de la Planificación Territorial Urbana: Casos del Área Metropolitana Costera de la V Región. Seminario de investigación,

Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

PGS SPA, 2015. Ministerio del Medio Ambiente: Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví,

Región de Valparaíso, Santiago de Chile. (173p).

Peiro A. Ucha, 2015. Coeficiente de correlación lineal. *Economipedia.com*

Piráces, R.; MaksaeV, V., 1977. Geología de la Hoja de Quillota, IV y V Región. Instituto de investigaciones Geológicas (inédito, N°1406), 135p., 1 mapa 1:250.000.

Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022, Ministerio del Medio Ambiente., 2018.

Poblete N., Macari O., & Carlos Rodríguez., PGS Chile., 2015 Enriquecimiento y distribución espacial de Arsénico en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví. (4p).

Pontificia Universidad católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha., 2014. Informe final: Evaluación de riesgos para la salud de las personas y la biota terrestre por la presencia de contaminantes, en el área de influencia industrial y energética de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. Recuperado de <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-55902.html>.

Querol, X., Alastuey, A., Lopez, A., Mantilla, E., Plana, F. Mineral composition of atmospheric particulates around a large coal-fired power station. *Atmospheric Environment* 1996; 30:3557–72.

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.

Ramsar, 2020. Annotated List of Wetlands of International Importance, Chile. Extraído de: https://rsis.ramsar.org/sites/default/files/rsiswp_search/exports/Ramsar-Sites-annotated-summary-Chile.pdf?1601500704.

Richardson, J., 1994. Ecological functions and human values in wetlands: A framework for assessing forestry impacts. *Wetlands* 14, 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF03160616>

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.

Rodríguez G., 2010. Niveles de contaminación por metales pesados en la zona costera de Santa Rosalía: sedimentos y macroalgas. Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional (centro interdisciplinario de ciencias marinas), La Paz, México. (198p).

Rodríguez, M. A., Vargas, A., A., Rojas, L., & Costero, M., 2010. Caracterización química de los sedimentos sumergidos, elemento clave dentro de un programa de monitoreo ambiental integral en las playas de la bahía de Matanzas. 1-10.

Rodríguez Alfaro, Mirelys, Muñoz Ugarte, Olegario, Calero Martín, Bernardo, Martínez Rodríguez, Francisco, Montero Álvarez, Alfredo, Limeres Jiménez, Teudis, Orphee Montoya, Mercedes, & de Aguilar Accioly, Adriana M. (2012). Contenido de metales pesados en abonos orgánicos, sustratos y plantas cultivadas en organopónicos. *Cultivos Tropicales*, 33(2), 05-12. Recuperado en 02 de febrero de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362012000200001&lng=es&tlng=es.

Rogan, B., Lemke, M., Levandowsky, M., & Gorrell, T. (2005). Exploring the Sulfur Nutrient Cycle Using the Winogradsky Column. *The American Biology Teacher*, 67(6), 348–356. [https://doi.org/10.1662/0002-7685\(2005\)067\[0348:ETSNCU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1662/0002-7685(2005)067[0348:ETSNCU]2.0.CO;2)

Rojas Quezada, C. A., Sepúlveda Zúñiga, E., Barbosa, O., Rojas, O., & Martínez Reyes, C. D. P. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción metropolitana.

Rudnick, R.I., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust: *Treatise on Geochemistry*, Elsevier 3, 1-64.

Sadiq, M. (2021). *Toxic metal chemistry in marine environments*. CRC Press.

Salmanighabeshi, S., Palomo-Marin, M.R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miro-, Rodriguez, C., Fadic-Ruiz, X., Vidal-Cortez, V., Cereceda-Balic, F., Pinilla-Gil, E., 2015. Long-term assessment of ecological risk from deposition of elemental pollutants in the vicinity of the industrial area of Puchuncaví-Ventanas, central

Salvador, S., J.M. Commandré y B.R. Stanmore (2003); Reaction rates for the oxidation of highly sulphurized petroleum cokes: the influence of thermogravimetric conditions and some coke properties, *Fuel*, 82, 715 - 720 (2003).

Sánchez, L. M., Campos, E. Z., & Borja, F. C. (2010). Análisis preliminares de un feldespatos para su certificación como material de referencia. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 1(1), 17-26.

Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).

Semeniuk, V., & Semeniuk, C., 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>.

SGS, 2020. Minería: Difracción de Rayos X (XRD). <https://www.sgs.cl/es-es/mining/metallurgy-and-process-design/high-definition-mineralogy/x-ray-diffraction-xrd>.

Smith Guerra, P., & Romero Aravena, H. (2008). Efectos del proceso de urbanización sobre la calidad ambiental de los humedales del Area Metropolitana de Concepción.

Soria, J. M., Miracle, M. R., & Vicente, E. (1987). Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia. *Limnetica*, 3(2), 227-242.

Spalletti, L.A., 1980. Paleo ambientes Sedimentarios en Secuencias Silicoclásticas. Asociación Geológica Argentina, Serie B: 175 p. Buenos Aires.

Stevenson, F.J., 1982. Organic forms of soil nitrogen. In: *Humus Chemistry. Genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons. USA. pp. 55-81.

Stevenson, A., 2001. Metal concentrations in marine sediments around Scotland: a baseline for environmental studies. *Cont. Shelf. Res.*, 21: 879-897.

Superintendencia del medio ambiente (2013). Informe de fiscalización ambiental de la fundición y refinería de Ventanas.

Sutherland R.A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ. Geol.* 39 (6), 611-27.

Tam, N. F. Y. y Y. S. Wong., 1996. Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater. *Environ. Pollut.*, 94 (3): 283-291.

Tarbut E.J., & Lutgens F.K., 2010. Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. Edición UNED-PEARSON.

Tejeda S., G. Zarazúa, T. Martínez, J.C. Sánchez- Meza, P. Ávila-Pérez. 2012. Análisis geoquímico de suelos de los Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Informe Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. México

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.

USEPA (2018) Regional Screening Level (RSL) Summary Table (TR=1E-06, HQ=1) May 2018.

Valdés & Castillo., 2014. Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27°S), Chile.

Velásquez, L. 2005. Distribución y comportamiento de los metales pesados Cd, Cu, Ni, Zn, Fe, Mn, Co, Cr y Pb en sedimentos superficiales del sector oriental del Golfo de Cariaco, Estado Sucre, Venezuela. Trabajo de pregrado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná.

Van der Sloot, H. A. (2010). Leaching Assessment Methodologies for Disposal and Use of Bauxite Residues. Hans van der Sloot Consultancy, Nashville, TN, USA.

Vera P.C., 2012. Diagnóstico de la percepción local sobre el conflicto ambiental de la zona saturada de Quintero – Puchuncaví, Valparaíso, Chile. Memoria de título. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, facultad de recursos naturales, instituto de geografía. (125p).

WCS. (2019). Chile, país de humedales. Santiago: WCS Chile.

Wedepohl, K.H. (1995) The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1217-1232

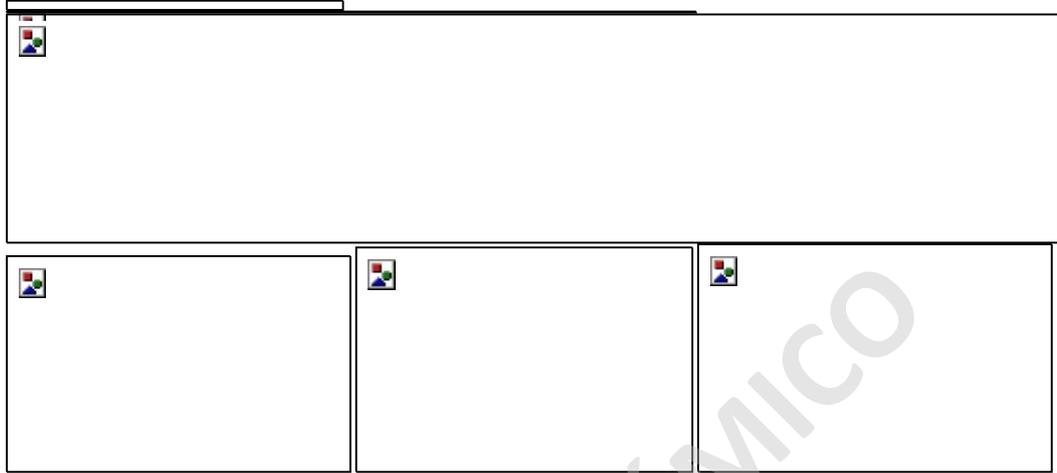
Wei, B. and Yang, L. (2010) A Review of Heavy Metal Contaminations in Urban Soils, Urban Road Dusts and Agricultural Soils from China. *Microchemical Journal*, 94, 99-107

Weisse Pinto, C. N. (2015). Índices de calidad de agua y sedimento en la cuenta del Río LLaucano (Doctoral Disertation).

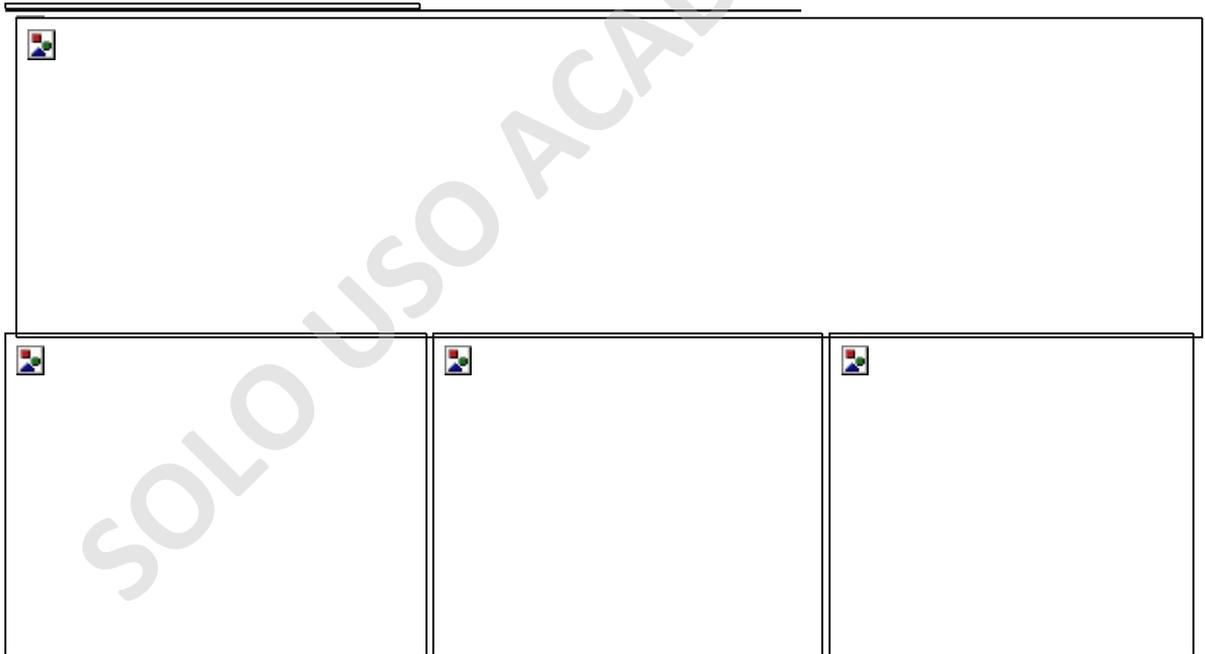
SAG., 2007. Protocolo de Métodos de Análisis para suelos y lodos. Elaborado con la participación de la comisión de Normalización y Acreditación de la sociedad chilena de la ciencia del suelo por encargo del servicio Agrícola y Ganadero. Universidad de concepción, Facultad de Agronomía, Chillan. (193p).

Zhou W., 2004. Global analyses of sumoylated proteins in *Saccharomyces cerevisiae*. Induction of protein sumoylation by cellular stresses.

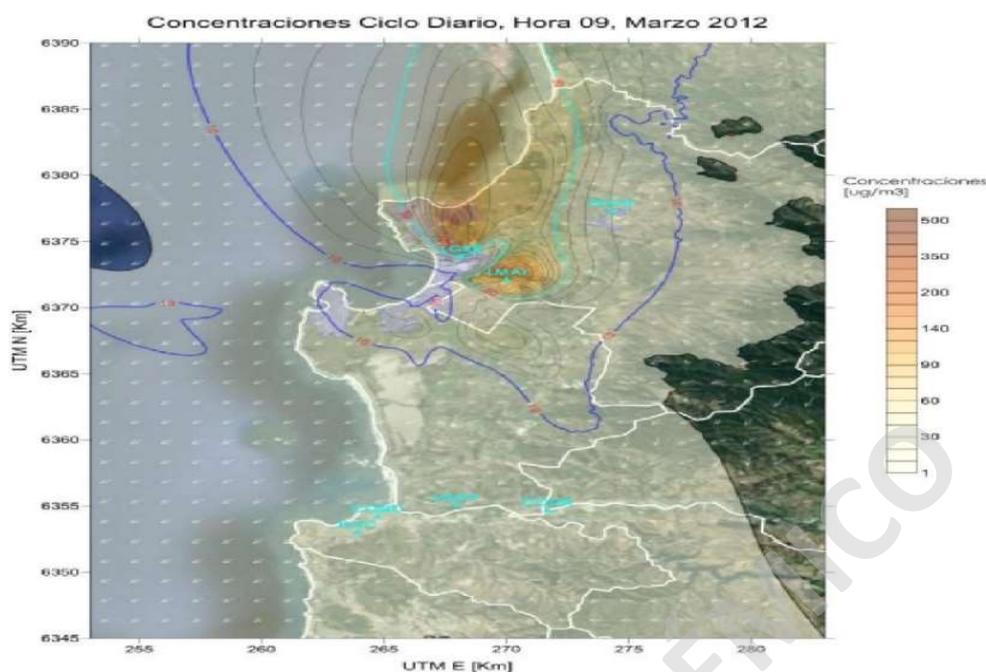
8. Anexos



Anexo. 1 Dirección NE de Pluma de SO₂, medida cada 5 horas (CENMA, 2013).



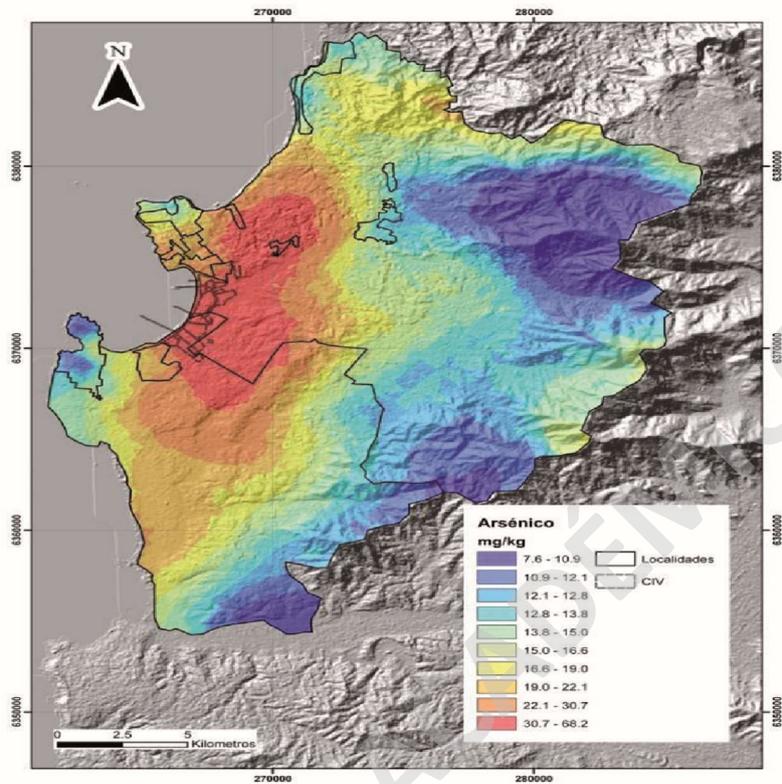
Anexo. 2 Dirección Norte de Pluma de SO₂, medida cada 5 horas (CENMA, 2013).



Anexo. 3 Distribución de concentración de SO₂ de la pluma emitida por el CIV (CENMA, 2013).

Anexo. 4 Presencia de metales en suelos y sedimentos de humedales, comparado a la normativa italiana y Norteamérica, Extraído de Pontificia Universidad Católica de Valparaíso & Universidad de Playa Ancha, 2014.

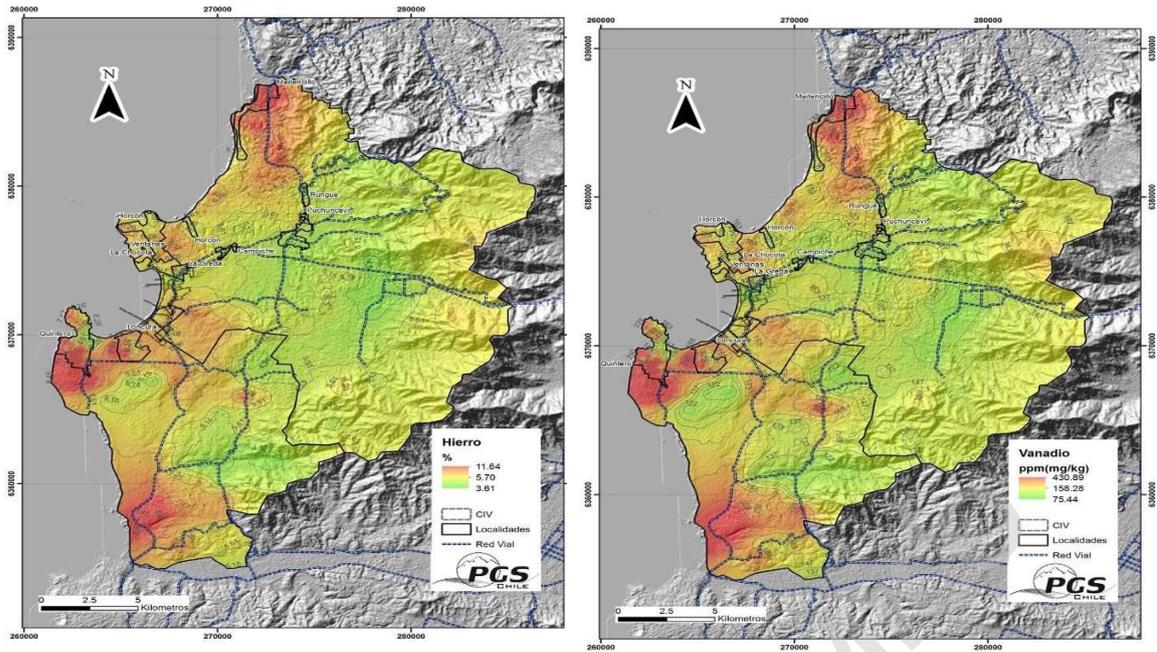
Etiquetas de fila	Promedio de Pb	Promedio de Cu	Promedio de V	Promedio de Zn	Promedio de As
sedimento	210,9	3.093,9	103,0	306,9	173,0
Campiche	886,0	14.130	231,0	1.226,0	559,0
El Bato	57,9	713	40,9	191,0	
Mantagua	25,3	16	169	74,5	19,1
Petras	78,1	609	56,0	35,4	112,0
Tunquen (control)	7,3	1,5	18,2	7,6	1,9
suelo	316,1	2.624,5	109,8	272,2	106,7
Campiche	932,5	8.128,5	176,0	698,0	304,4
El Bato	79,1	996,0	71,0	201,0	60,3
Mantagua	34,0	32,1	79,5	106,0	13,8
Petras	109,5	529,5	90,1	79,0	30,2
Tunquen (control)	15,4	27,7	86,2	44,4	3,5
Norma italiana suelos	100	120	90	150	20
Guía sedimentos Wisconsin	36	32	s/i	120	9,8
Guía New York (Long and Morgan)	35	70	s/i	120	33



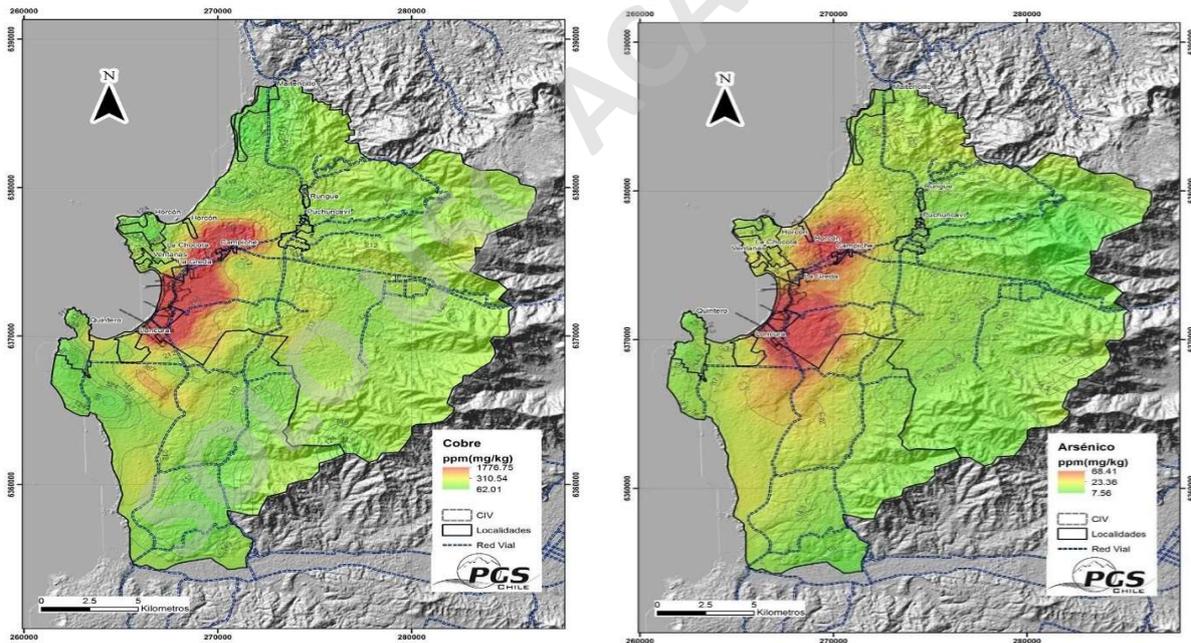
Anexo. 5 Distribución del enriquecimiento de Arsénico en suelos de Quintero y Puchuncaví (Poblete, 2015).

Anexo. 6 Comparación valores Background en suelos geológicos y agrologicos. Extradida de PGS, 2015.

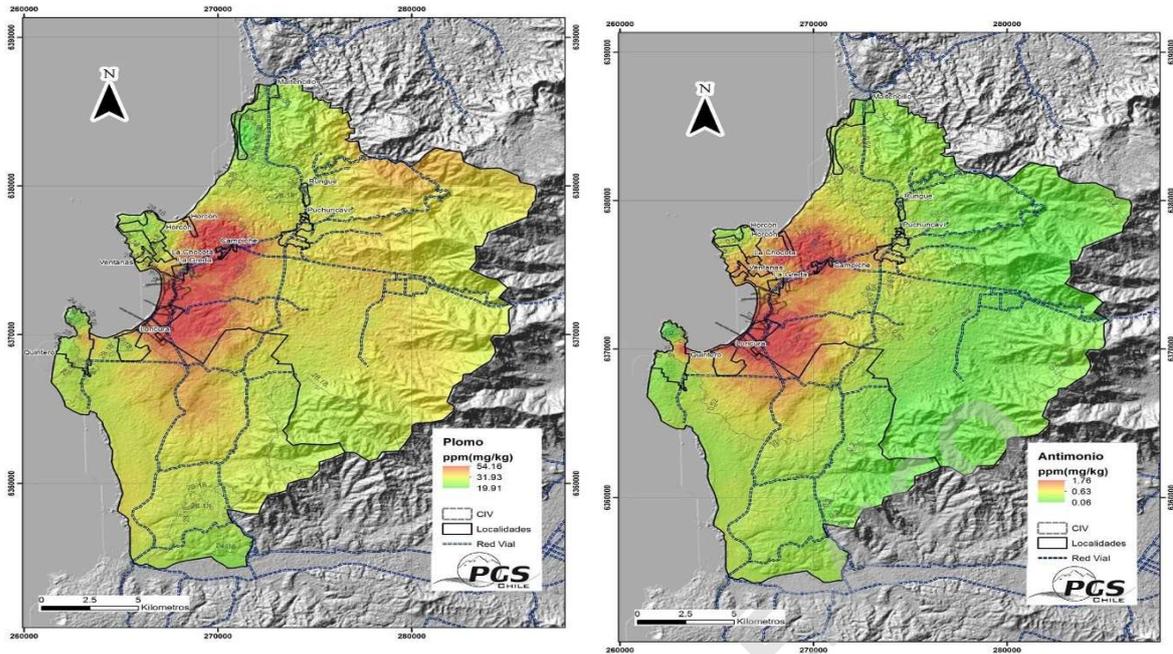
	V ppm	Mn ppm	Fe %	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	As ppm	Se ppm	Mo ppm	Cd ppm	Sb ppm	Pb ppm	Hg ppb
Background geológico	133.90	917.40	5.48	11.08	89.44	95.08	7.64	0.95	1.54	0.18	0.90	13.60	36.79
Background suelo	90.09	917.70	3.35	18.34	68.00	136.60	12.80	0.38	1.33	0.14	0.70	18.86	45.53



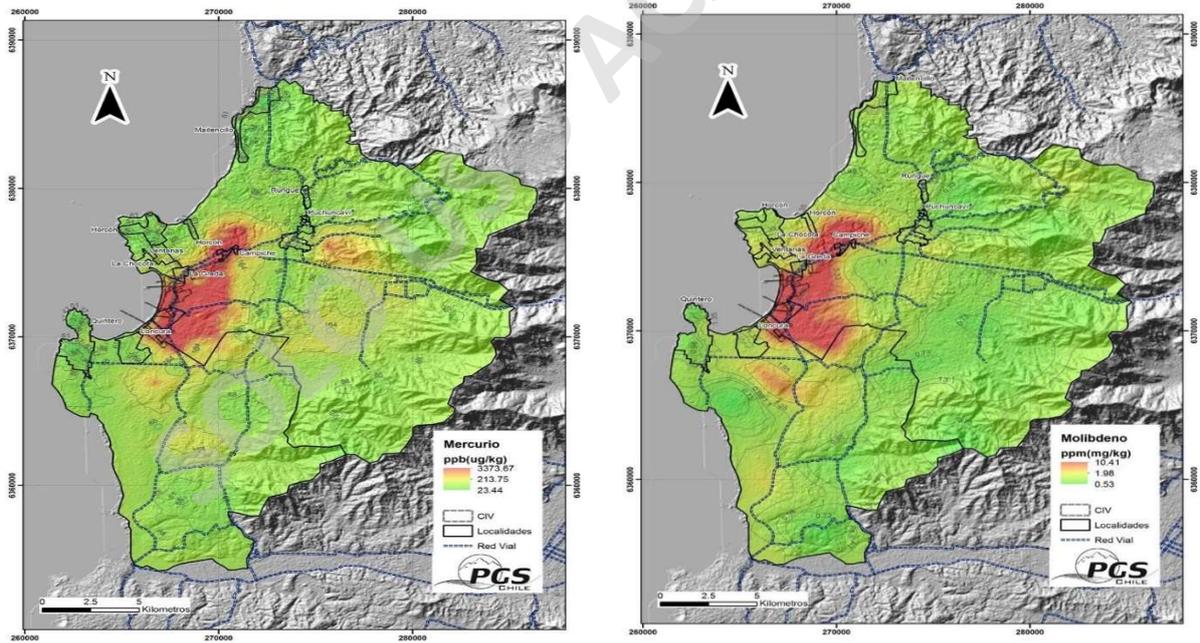
Anexo. 7 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Fe (%) y V (mg/kg), respecto a la norma canadiense (PGS, 2015).



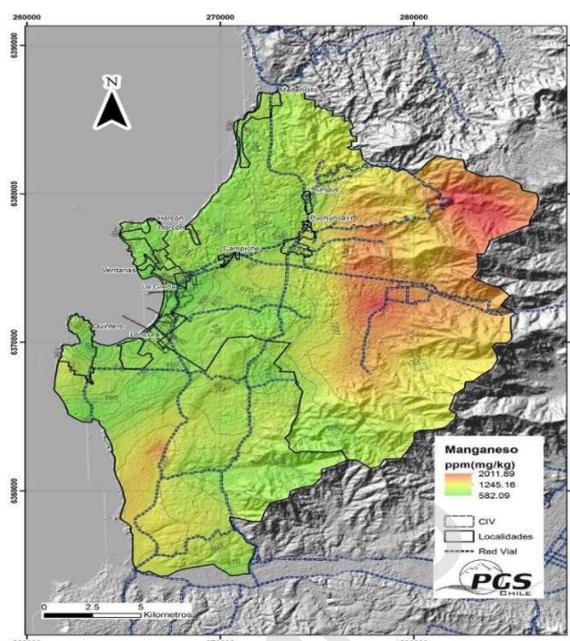
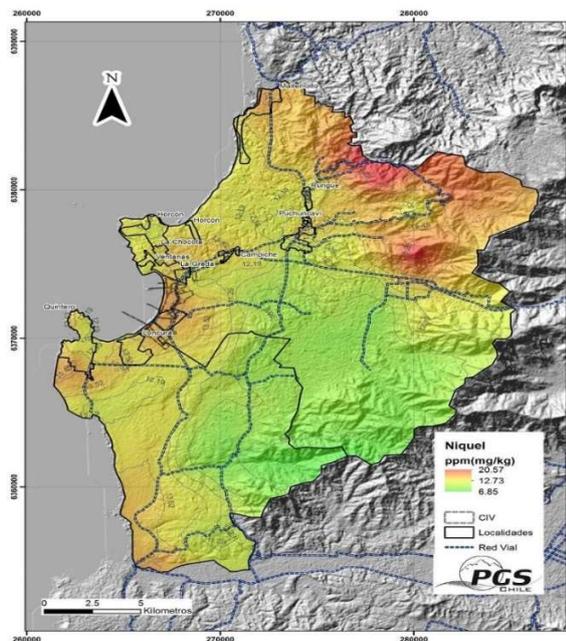
Anexo. 8 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Cu (mg/kg) y As (mg/kg), respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).



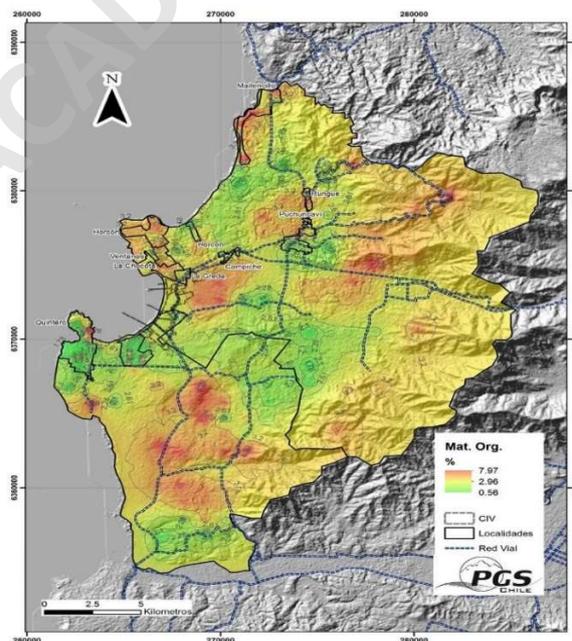
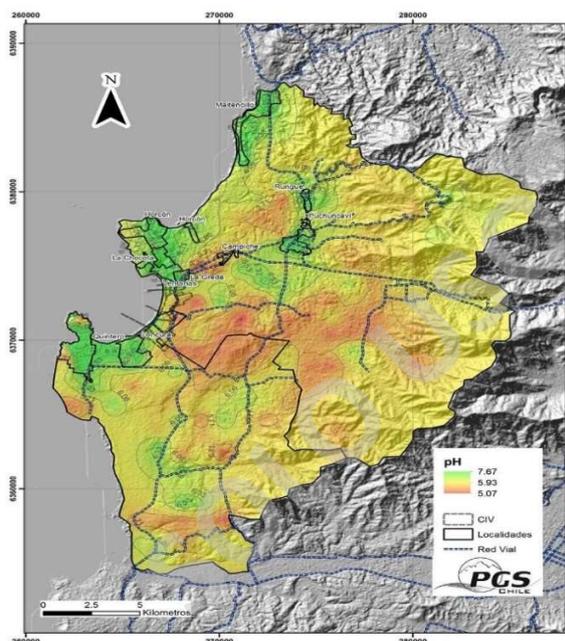
Anexo. 9 Mapas de distribución espacial de enriquecimiento de Pb (mg/kg) y Sb (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).



Anexo. 10 Mapas de distribución espacial y enriquecimiento de Hg (Mg/kg) y Mo (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).



Anexo. 11. Mapa de distribución espacial de Ni (mg/kg) y Mn (mg/kg) respecto a la norma canadiense, (PGS, 2015).



Anexo. 12 Mapas de distribución espacial de pH de suelos y enriquecimiento de Materia Orgánica (%), (PGS, 2015).

Anexo. 13 Porcentaje de muestras que superan la norma canadiense, (PGS, 2015).

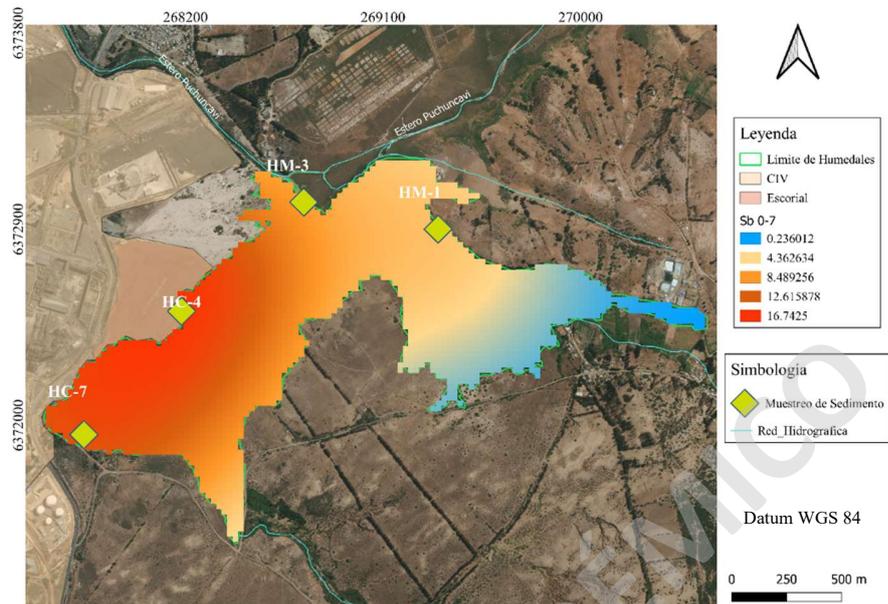
	Fe	V	Cu	Cd	Pb	As	Hg	Se	Zn	Sb	Mo	Mn	Ni
Porcentaje de muestras que superan la norma canadiense	61%	80%	93%	3%	6%	71%	0%	17%	13%	0%	3%	4%	0%

Anexo. 14 Parámetros Fisicoquímicos y concentraciones medidas en aguas superficiales del humedal Campiche y Los Maitenes (Cabrera, 2021).

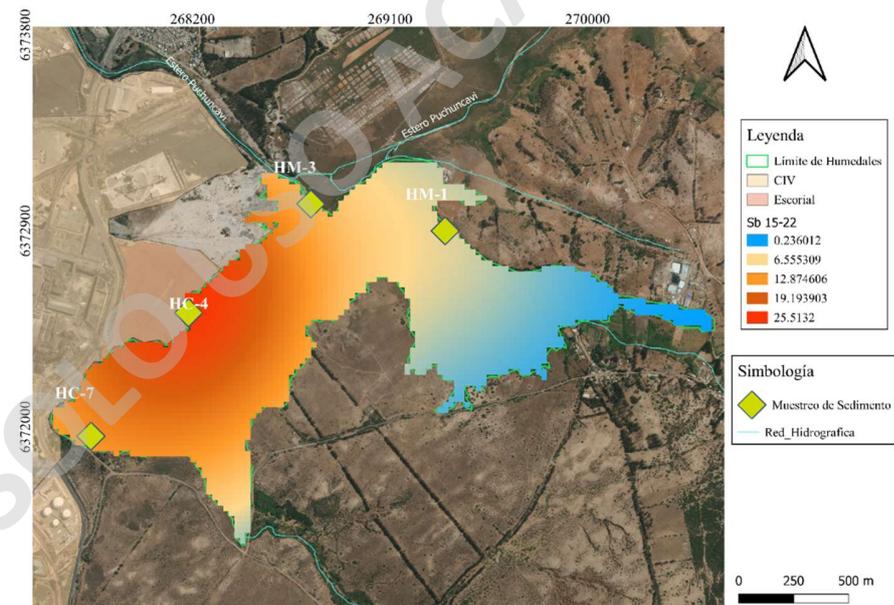
Parámetro	L.D.	Normas						Muestras									
		NCh 409	NCh 1333	EP-0	EP-1	EP-2	HC-1	HC-2	HC-3	HC-4	HC-5	HC-6	HC-7	HC-8	HM-1	HM-2	HM-3
Temperatura	-	-	-	12,5	15,1	14	15,8	14	16,5	17,1	14	14,9	13,7	16	12,2	13,3	14,7
pH	-	-	-	7,3	8,1	7,8	7,0	7,1	7,8	8,5	7,8	7,9	8,2	8,0	7,1	7,1	7,0
CE	-	-	-	1159	1183	8283	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

Anexo. 15 Tabla de concentraciones naturales y normativa de referencia utilizadas en el presente estudio. Los datos de concentraciones naturales fueron extraídos de los estudios de la PGS (2015) y Rudnick y Gao (2003). Además, de la normativa de EE. UU. (USEPA, 2018)

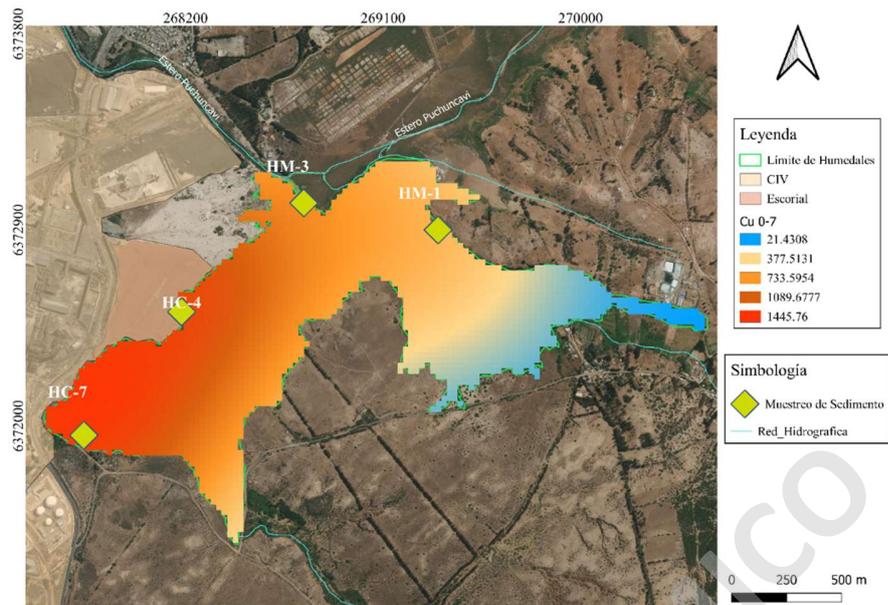
Referencias utilizadas			
Elemento	Background Puchuncaví.	Normativa de EE.UU	C. Cortical (Promedio)
S			404
Ca			45.811
Na			
Ti			4.315
K			
Mg			
Al		77.000	84.111
Fe	54.800	55.000	
As	7,64	0,68	
Ba		15.000	
Cu	89,44	3.100	
Cr*		0,3	135
Sr		47.000	
P		1,6	
Mn	917,4	1.800	
Ni	11,08	840	
Pb	13,6	400	
V	133,9	390	
Zn	95,08	23.000	
Mo	1,5	390	
Sb	0,9	31	
Co	-	23	26,6
Li		160	
Cd		71	0,08
Sc			



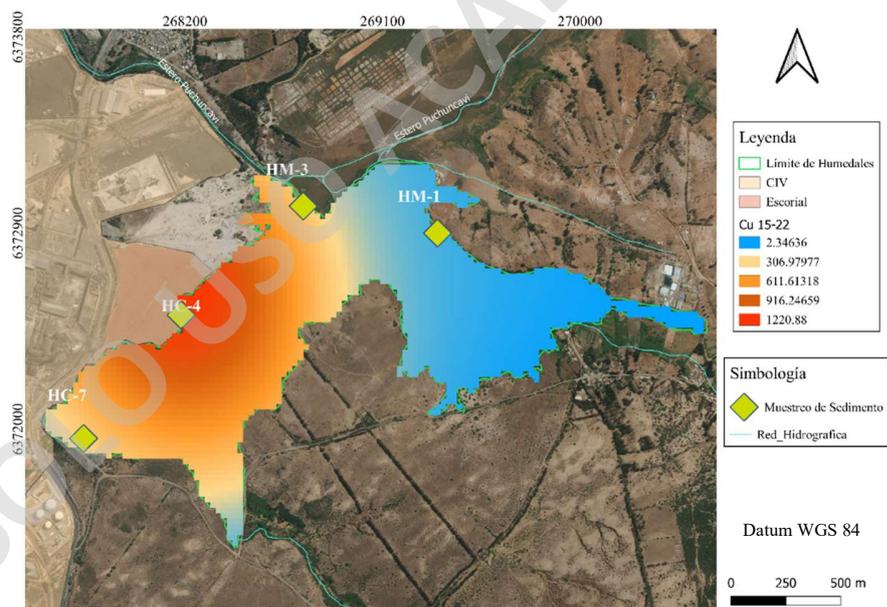
Anexo. 16 Distribución de concentración de Antimonio en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



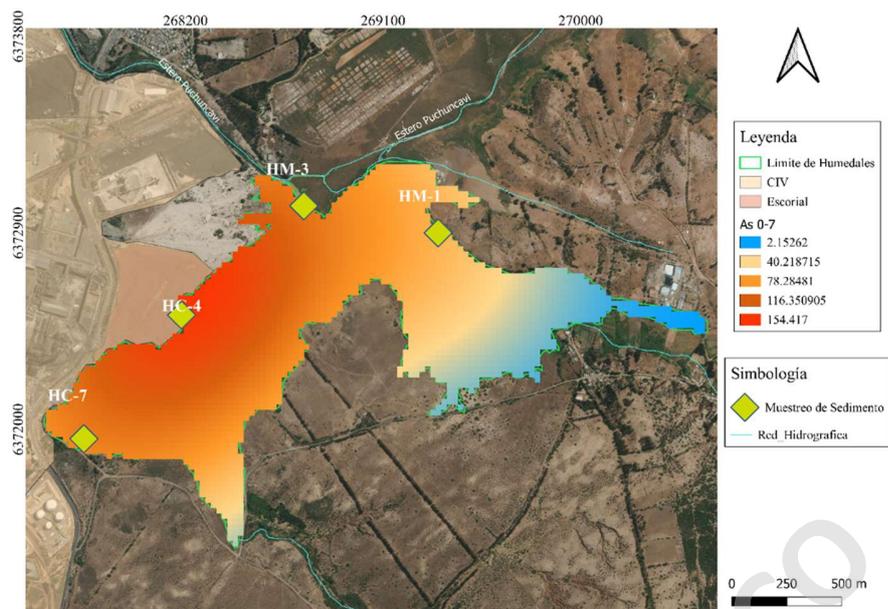
Anexo. 17 Distribución de concentración de Antimonio en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



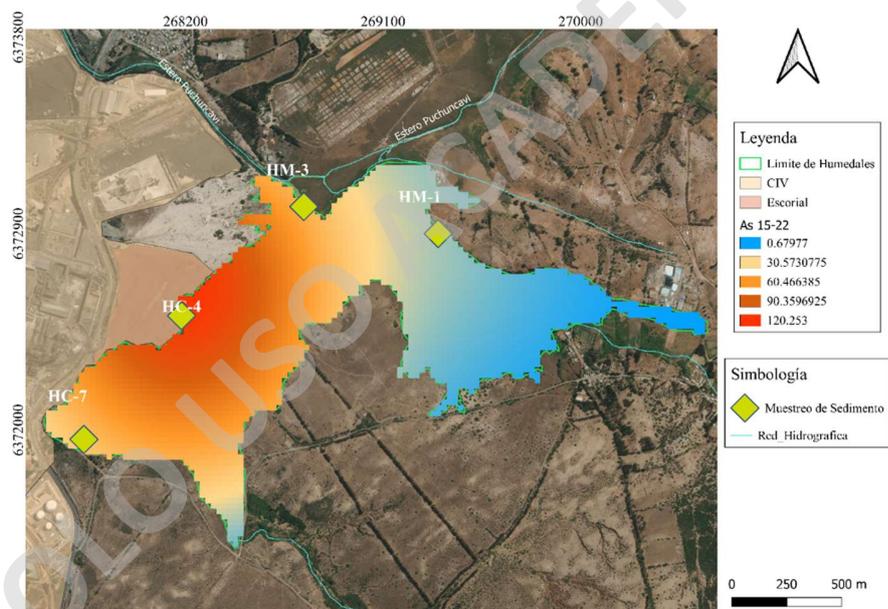
Anexo. 18 Distribución de concentración de Cobre en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



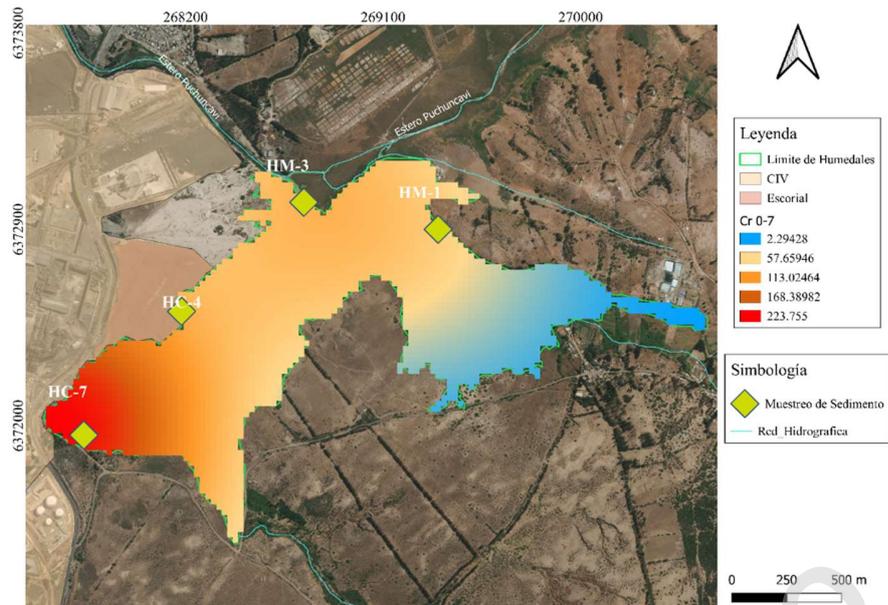
Anexo. 19 Distribución de concentración de Cobre en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



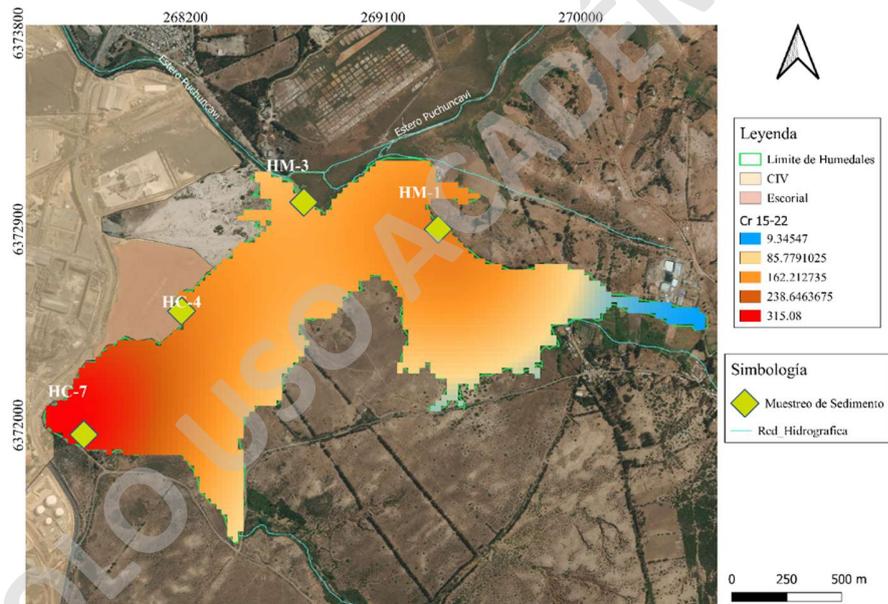
Anexo. 20 Distribución de concentración de Arsénico en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



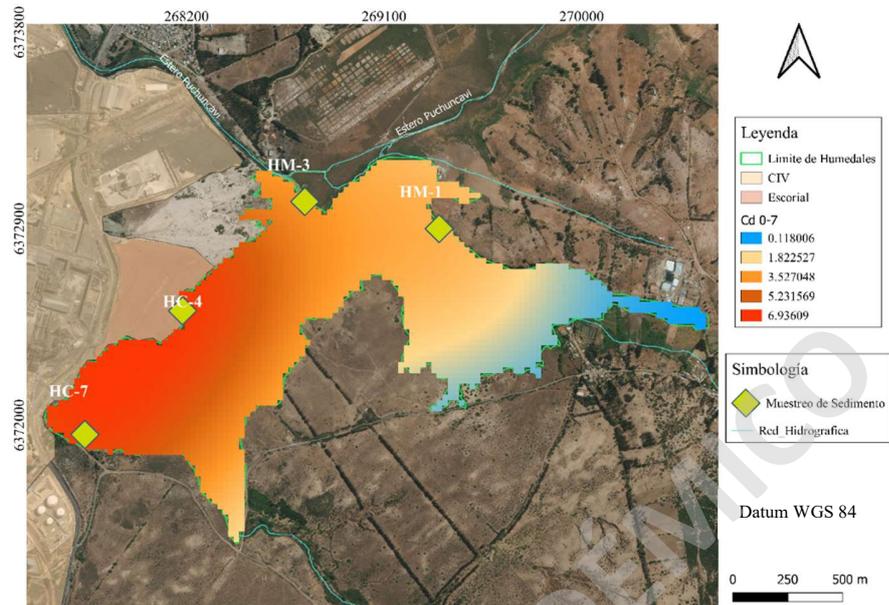
Anexo. 21 Distribución de concentración de Arsénico en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



Anexo. 22 Distribución de concentración de Cromo en a profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



Anexo. 23 Distribución de concentración de Cromo en la profundidad de 15 a 22 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).



Anexo. 24 Distribución de concentración de Cadmio en la profundidad de 0 a 7 cm en los humedales investigados (interpolación mediante B-Spline).

SOLO USO ACADÉMICO