



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

**CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA POTABLE EN LA REGIÓN  
METROPOLITANA, CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

VALENTINA JAVIERA GIOVANETTI ANTÚNEZ

PROFESORA GUÍA:  
Dra. DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Dra. CLAUDIA CANNATELLI  
Dr. JAMIE BUSCHER

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Valentina Javiera Giovanetti Antúnez  
**FECHA:** 15/01/2018  
**PROFESORA GUÍA:** Dra. Dolorinda Daniele

## **CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA POTABLE EN LA REGIÓN METROPOLITANA, CHILE**

El presente trabajo tiene por objetivo determinar las características fisicoquímicas del agua potable en la Provincia de Santiago, con el fin de evaluar la calidad de ésta. Para ello se llevó a cabo un muestreo compuesto en la zona de estudio, recolectando muestras de las tres principales empresas de Servicios Sanitarios: Aguas Andinas, Aguas Cordillera y SMAPA, que en conjunto representan un 96,19% de la población urbana abastecida de agua potable.

La caracterización de las aguas muestra un carácter sulfatado (clorurado) cálcico predominante, aunque SMAPA presenta mayores proporciones de calcio y bicarbonato que Aguas Andinas y Aguas Cordillera, llamados de aquí en adelante Grupo AC. Las concentraciones iónicas son mayores en el Grupo AC, lo cual se refleja en mayor dureza, conductividad eléctrica, cantidad de sólidos disueltos y, también, en una mayor capacidad de generar residuos en tuberías, hervidores, teteras u otros artefactos.

Se realizó una comparación de los valores obtenidos con diversas regulaciones nacionales como internacionales: NCh409 (2005), OMS (2017), EPA (2009), Directiva 98/83/CE. El análisis de elementos mayores permite observar que el Grupo AC posee una concentración moderadamente alta de sulfato que altera aspectos organolépticos (sabor, color, olor), pudiendo afectar la aceptabilidad por parte de consumidores. El flúor se encuentra en bajas concentraciones: SMAPA se considera no fluorizada y Grupo AC mínimamente fluorizada. El sodio se encontró en concentraciones moderadamente altas; el aporte en adultos, tras consumir 2 litros de agua por día, llegaría al 14% de la recomendación diaria para este elemento. Por otro lado, los constituyentes menores o trazas fueron medidos en órdenes de magnitud menores que los máximos permitidos, por lo que, de acuerdo con la información toxicológica disponible hasta este momento, el agua no presentaría riesgos a la salud humana.

La comparación de agua potable con agua embotellada disponible en el mercado chileno muestra que el agua potable es más segura, dado que varias de las aguas embotelladas sobrepasan límites establecidos para ciertos parámetros (As, NO<sub>3</sub>, B, pH). Sin embargo, no posee componentes que afecten su sabor, color u olor; favoreciendo su aceptabilidad por los consumidores, a pesar de tener un costo entre 521 hasta 3886 más alto que el agua domiciliaria.

Se recomienda una revisión de la normativa chilena de calidad de agua potable: los elementos que no han sido regulados aún y aquellos con límites mayores a los máximos establecidos internacionalmente. También se sugiere revisar la norma relativa a la calidad de aguas embotelladas Decreto 106 (MINSAL, 1997) y sus incongruencias con la norma de calidad de agua potable NCh409 (2005).

*Aramara, con ella todo, sin ella nada.*

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a la vida por el camino recorrido, que me ha traído justo donde tengo que estar. Agradezco a mí misma por la fuerza que necesité para terminar esta carrera universitaria. Agradezco a quienes me dieron fuerza cuando la mía propia se me había acabado.

Papá, te agradezco la libertad con que me permitiste llevar todo, el apoyo cuando me eché ramos o cuando quise dejar la U y, sobre todo, te agradezco siempre creer en mis capacidades. Agradezco mucho haberme cruzado con la Chili, mi partner, que hizo mucho más entretenido el paso por Geología, nos apañamos en los peores momentos: madrugadas estudiando, memorizando materia, los malos resultados y también en los mejores, los break después del estudio, el apañe en terreno, las conversaciones, la amistad. Agradezco la amistad de los geo-cabros: Edu, Topo, Pelao y tantos otros que se cruzaron con buena onda en el camino, también le desagradezco a Menares que de no ser por él habría terminado antes esta carrera. A los chiquillos de La Casa, con quienes quisimos construir un mundo nuevo, agradezco todo lo que he aprendido con ustedes y espero que nuestros caminos sigan yendo en esa misma dirección y nunca olvidemos nuestros sueños.

Agradezco a los profesores que me he cruzado: Linda y Claudia, porque el ramo Geoquímica Ambiental me mostró que la Geología sí tiene mucho que aportar en el trabajo de protección y restauración del medioambiente. A los profesores Linda, Claudia y Jamie le agradezco formar parte de la comisión evaluadora de esta memoria, que para mí es un minúsculo paso hacia la concientización de la importancia de nuestros recursos naturales, en particular del agua, fuente de vida; también doy gracias por todos los académicos, profesionales y estudiantes que trabajan con este fin.

También agradezco a quienes hacen funcionar la u: funcionarios, tías del aseo y quizás último, pero no menos importante, a la Blanca que infinitas veces solucionó los infinitos problemas con los ramos, trámites, etc, etc ¡Gracias Blanquita!

Agradezco a la ciencia, por mostrarme que no existen verdades, pero que con estudio y colaboración podemos acercarnos a comprender cómo funciona este mundo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iii</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>vi</b>
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Formulación del estudio</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
<b>1.3 Hipótesis de Trabajo</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO 2. ANTECEDENTES GENERALES</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Contexto Geológico</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Marco Hidrogeológico</b>	<b>4</b>
2.2.1 Aguas Superficiales	4
2.2.2 Aguas subterráneas	5
<b>2.3 Desde la naturaleza hasta nuestros hogares</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Servicios Sanitarios en la Región Metropolitana</b>	<b>7</b>
<b>2.5 Fiscalización de calidad de agua</b>	<b>9</b>
<b>CAPITULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Planificación de muestreo</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Material</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Muestreo</b>	<b>10</b>
3.1.1 Registro de parámetros fisicoquímicos	12
3.1.2 Extracción de muestras	12
<b>3.2 Métodos analíticos</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Calidad de datos</b>	<b>13</b>
<b>3.4 Conductividad Eléctrica</b>	<b>14</b>
<b>3.5 Sólidos Disueltos Totales</b>	<b>14</b>
<b>3.6 Dureza</b>	<b>15</b>
<b>CAPITULO 4. CALIDAD DEL AGUA Y SALUD HUMANA</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Componentes mayores del agua</b>	<b>16</b>
<b>4.2 Componentes menores y trazas del agua</b>	<b>18</b>
<b>4.3 Marco regulatorio</b>	<b>26</b>
<b>CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>28</b>

<b>5.1 Parámetros Fisicoquímicos medidos en terreno</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Calidad de datos analíticos</b>	<b>29</b>
<b>5.3 Resultados analíticos</b>	<b>30</b>
5.3.1 Elementos mayores	33
5.3.2 Elementos menores y traza	36
<b>5.4 Clasificación de aguas</b>	<b>38</b>
5.4.1 Diagrama Piper	38
5.4.2 Diagramas de Stiff	39
5.4.3 Otras clasificaciones	41
<b>5.5 Comparación con otros valores</b>	<b>43</b>
5.5.1 Reporte de la SiSS	43
5.5.2 Reporte de estaciones de calidad de la DGA	44
5.5.3 Agua embotellada chilena	45
<b>5.6 Marco Regulatorio</b>	<b>50</b>
<b><i>CAPITULO 6. CONCLUSIONES</i></b>	<b>52</b>
<b><i>CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA</i></b>	<b>54</b>
<b><i>CAPITULO 8. ANEXOS</i></b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Principales empresas sanitarias proveedoras de agua potable en la Región Metropolitana. Se indica la cantidad de clientes residenciales de agua potable y el porcentaje que representa del total (SiSS, 2017b). .....	7
<b>Tabla 2.2</b> Parámetros normados en la norma chilena de agua potable (NCH409, 2005) .....	9
<b>Tabla 3.1</b> Principales empresas de servicios sanitarios de la Región Metropolitana con sus respectivos porcentajes de población urbana abastecida por ellos y el número de muestras extraídos por este trabajo. ....	12
<b>Tabla 3.2</b> Diferencia aceptable en el balance iónico con relación a la suma de Aniones, según Clesceri, et al. (1999). .....	14
<b>Tabla 3.3</b> Clasificación de agua de acuerdo con su EC (Van der Aa, 2003). .....	14
<b>Tabla 3.4</b> Clasificación de aguas según los sólidos totales disueltos (TDS) de acuerdo con Davis y De Wiest (1966). .....	15
<b>Tabla 3.5</b> Clasificación de dureza establecida por la Asociación de Calidad de Agua (WQA, 2017). .....	15
<b>Tabla 4.1</b> Se presentan los valores máximos permitidos por la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409/1), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). .....	27
<b>Tabla 5.1</b> Resultados de los parámetros físico químicos medidos en terreno. ....	28
<b>Tabla 5.2</b> Conductividades eléctricas medidas y recalculadas a 20°C .....	29
<b>Tabla 5.3</b> Sumatoria de cationes y aniones totales (en meq/L) y el balance iónico. ....	30
<b>Tabla 5.4</b> Resultados de los análisis químicos realizados en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del CEGA. Se observan los valores de aniones, cationes mayores, cationes trazas y parámetros fisicoquímicos para las diez muestras obtenidas y además se señala el valor de referencia sugerido por la OMS (2017). <sup>1</sup> precaución de salud, <sup>2</sup> podría afectar aspectos organolépticos (olor, sabor, color), <sup>3</sup> valor de referencia provisional .....	31
<b>Tabla 5.5</b> Resultados promediados de cada empresa. Se observan los valores de aniones, cationes mayores, cationes trazas y parámetros fisicoquímicos para las diez muestras obtenidas y además se señala el valor de referencia sugerido por la OMS (2017). “n” corresponde al número de muestras. ....	32

<b>Tabla 5.6</b> Clasificación de las muestras según su conductividad eléctrica, basado en la clasificación de Van der Aa (2003).....	41
<b>Tabla 5.7</b> Conductividad eléctrica y temperaturas medidas en terreno, conductividad eléctrica a 25°C calculada, Sólidos Disueltos Totales calculados y clasificación respecto a TDS (Davis y De Wiest, 1966). .....	42
<b>Tabla 5.8</b> Concentración de calcio y magnesio (en mg/L) medida en las muestras y la dureza calculada a partir de ellos. ....	42
<b>Tabla 5.9</b> Concentraciones medidas e informadas a la SiSS de las empresas analizadas en este estudio, los valores corresponden al mes de mayo de este año. N.d = no determinado. * = promedio de las concentraciones medidas en este trabajo .....	44
<b>Tabla 5.10</b> Valores promediados medidos de las muestras de Aguas Andinas y los valores informados por la DGA en la estación de calidad de aguas Río Yeso antes junta Río Maipo en el período otoño-invierno (octubre).....	44
<b>Tabla 5.11</b> Resultados estadísticos reportados por Bonatici (2017) de 10 marcas de agua embotellada disponibles en el mercado chileno. ....	48
<b>Tabla 5.12</b> Precios por litro de agua de cada empresa analizada por este estudio (SiSS, 2017B) .....	50
<b>Tabla 8.1</b> Instrumento y límites de detección de los componentes medidos por este trabajo. ....	59
<b>Tabla 8.2</b> Número de muestras de agua potable que no cumplen con la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). <sup>1</sup> = no corresponden a valores de referencia, si no a recomendaciones. <sup>2</sup> = incluidas en la norma secundaria de calidad de aguas, elementos no tóxicos, <sup>3</sup> = valor que no representa daños tras el consumo en el largo plazo, <sup>4</sup> = nitrato medido como N <sub>2</sub> . ....	60
<b>Tabla 8.3</b> Número de muestras de agua embotellada que no cumplen con la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). <sup>1</sup> = no corresponden a valores de referencia, si no a recomendaciones. <sup>2</sup> = incluidas en la norma secundaria de calidad de aguas, elementos no tóxicos, <sup>3</sup> = valor que no representa daños tras el consumo en el largo plazo, <sup>4</sup> = nitrato medido como N <sub>2</sub> . Valores extraídos de Bonatici (2017) .....	61
<b>Tabla 8.4</b> Resultados estadísticos de 10 muestras de agua potable colectadas en la Región Metropolitana. ....	62

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

- Figura 2.1** Principales empresas sanitarias proveedoras de agua potable en la Región Metropolitana. Se indica la cantidad de clientes residenciales de agua potable y el porcentaje que representa del total (SiSS, 2017b) ..... 8
- Figura 3.1** Mapa de planificación de muestreo con las casas seleccionadas. Los círculos corresponden a radios de 5, 10 y 15 kilómetros respecto del centro geométrico del área urbana de la Región Metropolitana. El área color violeta corresponde al área urbana. Los símbolos de casas corresponden a los hogares que fueron visitados para la realización de este estudio ..... 11
- Figura 5.1** Diagrama de clasificación Piper que muestra la composición iónica mayor de las muestras analizadas en este estudio ..... 39
- Figura 5.2** Diagramas de clasificación de Stiff. .... 40
- Figura 5.3** Imagen comparativa entre la concentración de aniones presentes en agua potable versus agua embotellada. Se indican las normas analizadas por este trabajo (ver leyenda). .... 46
- Figura 5.4** Imagen comparativa entre la concentración de aniones presentes en agua potable versus agua embotellada. Se indican las normas analizadas por este trabajo (ver leyenda). .... 47

# **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Formulación del estudio**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el acceso al agua potable y saneamiento son servicios fundamentales para resguardar la salud y calidad de vida de las personas. Además, la mejora del abastecimiento de agua, del saneamiento y de la gestión de los recursos hídricos son acciones que pueden favorecer de manera importante el crecimiento económico de los países contribuyendo así en la reducción de la pobreza (OMS, 2017). En 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al abastecimiento de agua y al saneamiento. Todas las personas tienen derecho a disponer de forma continuada de agua suficiente, salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable, para uso personal y doméstico (UN, 2017).

En Chile, cada año se generan 7,7 muertes por cada 100.000 habitantes causadas por enfermedades relacionadas con el agua, saneamiento e higiene (SINIA, 2017). La cobertura de agua potable alcanza el 99,92%, mientras que la cobertura a red de alcantarillado alcanza el 96,83% (SiSS, 2017a). En la Región Metropolitana, la cobertura de agua potable es de un 100% y la red de alcantarillado alcanza un 98,8% (SiSS, 2017a).

La calidad del agua para consumo humano es un factor determinante en las condiciones de salud y los contaminantes y patógenos asociados al agua potable son muy diversos en términos de sus efectos en la salud, el tiempo que demora en aparecer los síntomas y las poblaciones vulnerables a ellos. Dependiendo del contaminante, los efectos de la ingesta de agua no apta van desde problemas dentales hasta defectos de nacimiento o cáncer. Algunas enfermedades presentan síntomas rápidamente (diarrea, metahemoglobinemia), otros demoran semanas (hepatitis infecciosa) o incluso años (cáncer). Los efectos pueden ser causados por una exposición única, como aquellos causados por patógenos, o tras una prolongada exposición, que es el caso de los contaminantes químicos (Gray, 2008). En el caso de metales pesados, se han documentado diversos efectos negativos en la salud humana y, por lo tanto, este tipo de elementos requieren de especial atención, ya que muchos son tóxicos y pueden causar problemas severos incluso en muy bajas concentraciones (Memom y Schröder, 2009).

Estos elementos se asocian con la quema de combustibles fósiles, minería, residuos municipales, fertilizantes, pesticidas y aguas residuales (Wei y Zhou, 2008), aunque también existen regiones con grandes concentraciones naturales de estos elementos. Este es el caso del norte de Chile donde se ha documentado lesiones en la piel y aumento de mortalidad por cáncer de vejiga y pulmón asociadas a arsénico (Smith *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 2000). Los metales pesados pueden reemplazar metales esenciales en pigmentos o enzimas, interrumpiendo su normal funcionamiento. Según su toxicidad, los elementos más problemáticos son: Hg, Cd, Pb, As, Cu, Zn, Sn y Cr (Ali *et al.*, 2013).

Por otro lado, una vez que el agua entra al sistema de distribución, la calidad del agua puede variar ya que interactúa con la tubería por cientos de miles de kilómetros. El material de las tuberías puede afectar la naturaleza del agua; tanto las cualidades estéticas: olor, color, sabor, turbidez; como la calidad relativa a la salud humana (Gray, 2008). El agua mediante reacciones de oxidación-reducción puede corroer las tuberías, erosionando y causando la disolución y solubilización de metales (Mays, 1999).

Actualmente la Región Metropolitana concentra el mayor número de habitantes del país, con una población de 7.036.792 (40,5% de la población país) (INE, 2017). Por lo tanto, el agua abastecida en esta región es consumida por una importante parte de la población chilena y, por lo tanto, en el caso de que existan concentraciones elevadas de algún parámetro potencialmente tóxico para la salud podría afectar a un gran número de habitantes. Es por este motivo que es fundamental conocer la calidad del agua disponible de los hogares en la Región Metropolitana.

Es por todo lo anterior que este estudio pretende ser un paso más hacia el conocimiento y la valoración de la calidad de agua que consumimos en Chile. Para ello busca caracterizar la fisicoquímica de 10 muestras de agua obtenidas de hogares seleccionados en la Región. Estas muestras representan a las tres principales empresas sanitarias presentes en la Región Metropolitana: Aguas Andinas, Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA) y Aguas Cordillera, que en conjunto atienden a un 96,19% de los clientes (SiSS, 2017).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo principal de esta memoria es generar una evaluación de la calidad del agua potable para consumo humano en la Región Metropolitana.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinación de parámetros fisicoquímicos de agua obtenida directamente desde la llave de un número determinado de hogares en la Región Metropolitana,
- Comparación de los valores obtenidos con los valores máximos permitidos por normas tanto nacionales (NCh409, 2005) como internacionales (EPA, 2009; Directiva 98/83/CE) y con los valores de referencia promovidos por organizaciones internacionales (OMS, 2017).
- Identificar las distintas fuentes de agua que abastecen a la ciudad de Santiago.
- Comparar la calidad obtenida con la calidad el agua embotellada.

### **1.3 Hipótesis de Trabajo**

Según la información más reciente otorgada a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS) acerca de las fiscalizaciones realizadas en junio del 2017, todas las empresas cumplen con los requerimientos físicos, químicos y biológicos de calidad de agua (SiSSa, 2017). Por lo tanto, se espera encontrar concentraciones menores a las establecidas por ley para los elementos normados.

Por otro lado, este estudio además analiza elementos que no han sido considerados por la norma chilena NCh409 (2005), pero que sí han sido considerados por otras normas o directrices internacionales (**Tabla 4.1**). Al no ser normados y no existir información de análisis de estos elementos, es posible, aunque no necesariamente probable, que existan concentraciones elevadas de alguno de ellos.

## **CAPITULO 2. ANTECEDENTES GENERALES**

### **2.1 Contexto Geológico**

La provincia de Santiago se encuentra en la cuenca del mismo nombre, ubicada entre las latitudes 33°10'S - 33°51'S y longitudes 70°28'O – 71°05'O, en la Depresión Intermedia o Valle Central de Chile; dominio geomorfológico norte-sur ubicado entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes con un área aproximada de 1.440 km<sup>2</sup>. Brüggén (1950) y Thiele (1980) proponen que la cuenca corresponde a un graben delimitado por falla normales al Este y Oeste; pero Farías et al. (2006) indica que la cuenca no puede ser consecuencia solamente de procesos tectónicos y que más bien es producto de un drenaje lateral.

Según Araneda *et al.* (2010), esta cuenca se puede dividir en tres zonas principales:

- Zona oriental, que correspondería a la Cordillera de los Andes, formada principalmente por rocas estratificadas plegadas y falladas; de origen volcánico y sedimentario marino y continental Mesozoico y Cenozoico. Además, se presentan plutones granodioríticos intrusivos del Terciario Superior.
- Zona de la Depresión Intermedia, formada principalmente por sedimentos Cuaternarios y cerros islas de composición volcánica y granítica de edad Terciaria. Los depósitos sedimentarios corresponderían a: cenizas riolíticas, depósitos de abanico, aluviones, depósitos fluviales, depósitos coluviales, conos de deyección, depósitos lacustres y depósitos de remoción en masa que alcanzarían los 500 m de espesor.
- Zona Occidental correspondiente a la Cordillera de la Costa, la cual está compuesta principalmente por rocas graníticas de edad Paleozoica superior y Mesozoica, con algunos afloramientos de rocas volcánicas y sedimentarias de edad Cretácica.

### **2.2 Marco Hidrogeológico**

#### **2.2.1 Aguas Superficiales**

La Cuenca de Santiago se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica del Río Maipo, que abarca desde el límite con Argentina por el Este y hasta el Océano Pacífico por el Oeste, con una superficie de 15.157 kilómetros cuadrados (DGA, Balance hídrico de Chile)

Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas alta y media el río Maipo es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Maipo posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones.

El río Maipo tiene una extensión de aproximadamente 673 kilómetros con un caudal medio anual, medido en la estación fluviométrica de la DGA “Maipo en el Manzano”, de 117,2 m<sup>3</sup>/s (CONAMA, 2017). En la Cordillera Principal recibe aporte de los ríos Volcán, Yeso y Colorado, siendo el último el más importante con un aporte de 26 m<sup>3</sup>/s promedio anual en la zona de la confluencia. En la Depresión Central confluyen los ríos Clarillo y Angostura, este último proviene en parte importante de sus tributarios los ríos Peuco y San Francisco. Llegando a la Cordillera de la Costa recibe desde el Norte al río Mapocho y aguas abajo recibe aporte del estero Puangue. Finalmente, desemboca al Océano Pacífico, en Llolleo, inmediatamente al sur del Puerto de San Antonio, Quinta Región.

El río Mapocho es el principal receptor de las descargas de aguas servidas de la ciudad de Santiago. Tiene un caudal promedio anual de 63,2 m<sup>3</sup>/s y abarca una extensión de 110 kilómetros que finalizan al confluir con el Río Maipo. Drena las aguas del sector El Plomo y sus principales afluentes son los ríos Molina, San Francisco y los esteros Arrayán y Lampa.

Los esteros y ríos que fluyen por la Cuenca de Santiago atraviesan las diferentes formaciones y unidades que afloran en el sector. El río Maipo recorre rocas graníticas ubicadas en la Cordillera Principal, el río Mapocho cruza la formación Abanico, el estero Colina las formaciones Abanico y Lo Valle, el estero Lampa la formación Las Chilcas y el estero Angostura las formaciones Abanico y Las Chilcas. Todos con una escasa infiltración, la que se daría principalmente por fracturas de poca profundidad (Morales, 2002).

### 2.2.2 Aguas subterráneas

Falcon *et al.* (1970) identifica tres unidades hidrogeológicas de distintas posición estratigráfica relativa y permeabilidad:

- **Unidad A:**  
Es la unidad de mayor potencia y constituye la base de los depósitos sedimentarios. Presenta principalmente material clástico de tamaño limo y arcilla, y también hay, pero en menor medida, arenas e incluso clastos gruesos de tamaño grava usualmente angulosos (Falcón *et al.*, 1970). Morales (2002) indica es posible que correspondan a antiguos depósitos tipo corrientes de barro y aportes laterales provenientes de altos topográficos. Además, señala que debido a su gran contenido de material fino y al grado de compactación que aumenta con la profundidad, se le considera un nivel impermeable, con una permeabilidad estimada del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  cm/s.
- **Unidad B:**  
Esta unidad sobreyace a la anterior y está formada por depósitos fluviales y fluvio-glaciares de características anisótropas, se distribuye en lentes de distintas granulometrías y distintas dimensiones. Constituido por sedimentos gruesos, principalmente arenas y gravas y material fino en menor proporción (Falcón *et al.*, 1970). Se le considera como el principal acuífero de la región, con espesores que aumentan hacia el sur. Esta unidad presenta una permeabilidad estimada del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  cm/s (Morales, 2002).

- **Unidad C:**  
Unidad descrita por Morales (2002) que sobreyace a la unidad B y son, principalmente, depósitos piroclásticos y lacustres. En general, se presenta de manera discontinua y corresponde a material de tamaño fino. Con extensión local, no presenta características favorables para contener un acuífero, dado que su permeabilidad es del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s (Morales, 2002).

## 2.3 Desde la naturaleza hasta nuestros hogares

El agua que observamos en las superficies de la tierra, como ríos y lagos, o el agua subterránea contenida por acuíferos, pasa por varios procesos antes de llegar hasta nuestros hogares:

### ***Captación***

El agua cruda es obtenida o captada desde los dos tipos de fuentes: superficiales (ríos, esteros, lagos) y subterráneas (acuíferos).

### ***Producción***

El agua obtenida, es posteriormente procesada para eliminar la turbiedad y suciedad del agua. Acá podemos reconocer dos sub-procesos:

- Proceso Físico: donde se eliminan elementos contundentes que podría arrastrar el agua (arena, ramas, etc.).
- Proceso Fisicoquímico: Coagulación primaria - Floculación primaria - Predecantación - Segunda etapa de Coagulación y Floculación - Filtración - Cloración – Fluoración.

En la coagulación primaria se desestabiliza químicamente las partículas tras la adición de un coagulante que es capaz de neutralizar la carga eléctrica del coloide para que forme un aglomerado de partículas (SiSS, 2017c). Usualmente se utiliza sulfatos de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), aluminato de sodio ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ), sílice activado, sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) u óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), aunque también podrían agregar arcillas o limos (Dinelli, 2012). En la floculación primaria el agua es agitada para promover la aglomeración de las partículas desestabilizadas en partículas de mayor tamaño (flóculos o *flocs*) que pueden sedimentar. Luego, la predecantación consiste en que estas impurezas son depositadas al fondo del estanque. Finalizada esa primera etapa, se procede a repetir el proceso: coagulación, floculación y decantación final (SiSS, 2017c).

Posteriormente se procede con la filtración, que consiste en la eliminación de sólidos remanentes y partículas floculadas mediante tamizaje mecánico con filtros de arena, o también puede usarse filtros de antracita o de tierra de diatomeas. Tras esto y antes de llegar a los hogares el agua es clorada (adición de gas cloro con el fin de desinfectar) y fluorada (adición de flúor) (SiSS, 2017c).

## ***Distribución***

La producción se transporta a estanques de almacenamiento y, posteriormente, el agua viaja por una red de tuberías que se distribuyen a los hogares. El material utilizado tanto en la red de producción como en la red de distribución deben cumplir con las normas chilenas respectivas para ese uso. Principalmente se utilizan los siguientes materiales: Policloruro de vinilo, Polietileno, Acero, Polipropileno, Cobre y Hierro Dúctil (NCh3197, 2010).

## **2.4 Servicios Sanitarios en la Región Metropolitana**

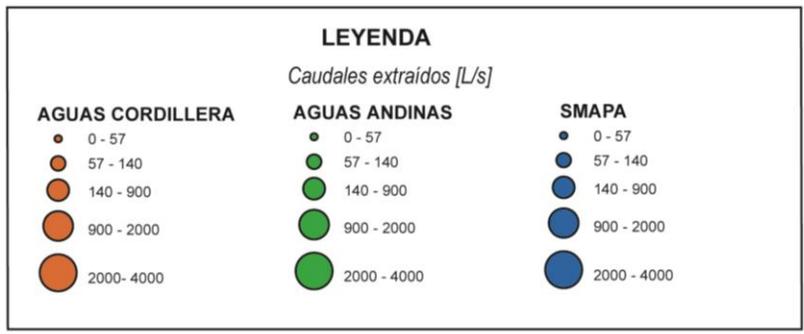
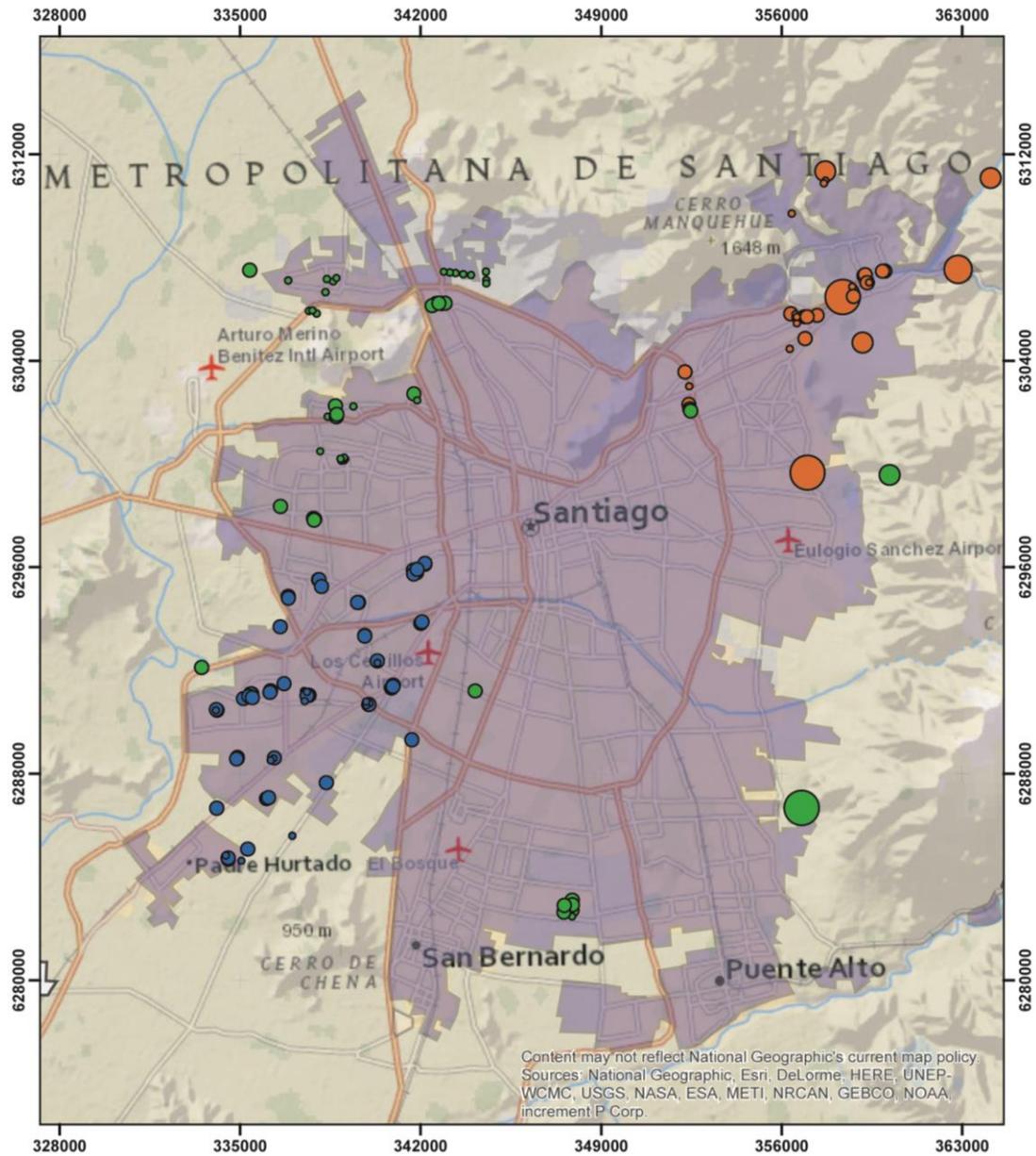
En Chile, los servicios de agua potable y alcantarillado están concesionados a empresas sanitarias que son reguladas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS), la cual controla el cumplimiento de la normativa vigente de calidad de aguas (NCh409, 2005), garantizando que el agua suministrada sea apta para el consumo humano.

A junio del año 2017 existen 25 empresas de servicios sanitarios operando en la Región Metropolitana, cubriendo un universo de 2.131.645 clientes. Las tres principales empresas sanitarias abarcan un 96,19% de la población urbana abastecida de agua potable: Aguas Andinas (80,51%), Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA; 8,82%) y Aguas Cordillera (6,86%) (Tabla 2.1) y les siguen Sembcorp Aguas Chacabuco (1,06%) y Aguas Manquehue (0,58%) (SiSS, 2017b).

**Tabla 2.1** Principales empresas sanitarias proveedoras de agua potable en la Región Metropolitana. Se indica la cantidad de clientes residenciales de agua potable y el porcentaje que representa del total (SiSS, 2017b).

<b>Empresa</b>	<b>Clientes residenciales de agua potable</b>	<b>% Clientes residenciales de agua potable</b>
Aguas Andinas	1.716.160	80.51
SMAPA	187.982	8.82
Aguas Cordillera	146.176	6.86

El Grupo AC (Aguas Andinas, Aguas Cordillera y Aguas Manquehue) indica en su sitio web (Aguas Andinas, 2017) que el 85% del agua es obtenida de fuentes superficiales (Río Maipo, Laguna Negra, Embalse el Yeso y Estero San Ramón) y que el 15% restante proviene de fuentes subterráneas (150 pozos profundos y drenes que extraen agua de 3 acuíferos). Mientras que SMAPA indica que el 100% del agua es obtenida de acuíferos subterráneos (SMAPA, 2017). Los detalles de los puntos de captación de las principales empresas abastecedoras se pueden observar en la **Figura 2.1**



**Figura 2.1** Principales empresas sanitarias proveedoras de agua potable en la Región Metropolitana. Se indica la cantidad de clientes residenciales de agua potable y el porcentaje que representa del total (SiSS, 2017b)

## 2.5 Fiscalización de calidad de agua

Como se ha indicado previamente, la SiSS se encarga de fiscalizar el cumplimiento de la norma de calidad de agua (NCh409/1, 2005) por parte de las empresas prestadoras de este servicio. Los análisis corresponden a autocontroles de las empresas sanitarias y en ningún caso son efectuados por la Superintendencia. Los análisis contemplan los parámetros contenidos en la (**Tabla 2.2**).

**Tabla 2.2** Parámetros normados en la norma chilena de agua potable (NCh409/1, 2005)

<b>Elementos Esenciales</b>	<b>Elementos o Sustancias no Esenciales</b>	<b>Sustancias orgánicas</b>	<b>Plaguicidas</b>
Cobre total	Arsénico	Tetracloroetano	DDT + DDD + DDE
Cromo total	Cadmio	Benceno	2,4 - D
Fluoruro	Cianuro	Tolueno	Lindano
Hierro total	Mercurio	Xilenos	Metoxicloro
Manganeso total	Nitratos		Pentaclorofenol
Magnesio	Nitritos		
Selenio	Razón nitrato + nitrito		
Zinc	Plomo		
<b>Productos secundarios de la desinfección</b>	<b>Elementos radiactivos</b>	<b>Parámetros organolépticos</b>	<b>Otros</b>
Monocloraminas	Estroncio 90	<b>Físicos</b>	<b>Desinfección</b>
Dibromoclorometano	Radio 226	Color verdadero	Cloro libre residual
Tribromometano	Actividad base total	Olor	
Triclorometano	Actividad beta total	Sabor	<b>Microbiológicos y turbiedad</b>
Trihalometano	Actividad alfa total		Coliformes fecales
		<b>Inorgánicos</b>	
		Amoniaco	
		Cloruros	
		pH	
		Sulfatos	
		TDS	
		<b>Orgánicos</b>	
		Compuestos fenólicos	

Cada concesionaria sanitaria dispone de casi un mes para recopilar toda la información y remitirla a la Superintendencia, la cual procesa y publica los resultados dentro de los siguientes 15 días.

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Planificación de muestreo

Para poder determinar con un mayor grado de detalle las principales fuentes de agua que abastecen a la Región Metropolitana se solicita la información mediante el Portal de Transparencia del Gobierno (Ley N° 20.285). Los puntos de captación pueden observarse en la **Figura 2.1**

Para realizar la selección de los puntos de muestreo, se utiliza un programa de muestreo compuesto y para ello se utilizó el *software* ArcMap 10.5. En primer lugar, se calcula el centro geométrico del área que abarca la Región Metropolitana y respecto de ese punto se generan tres círculos concéntricos de radios 5, 10 y 15 km. Por otro lado, se genera una base de datos de usuarios de servicios sanitarios que ponen a disposición su residencia para la extracción de muestras. En base a la ubicación, accesibilidad y disponibilidad horaria, se seleccionan 10 puntos de muestreo (**Figura 3.1**)

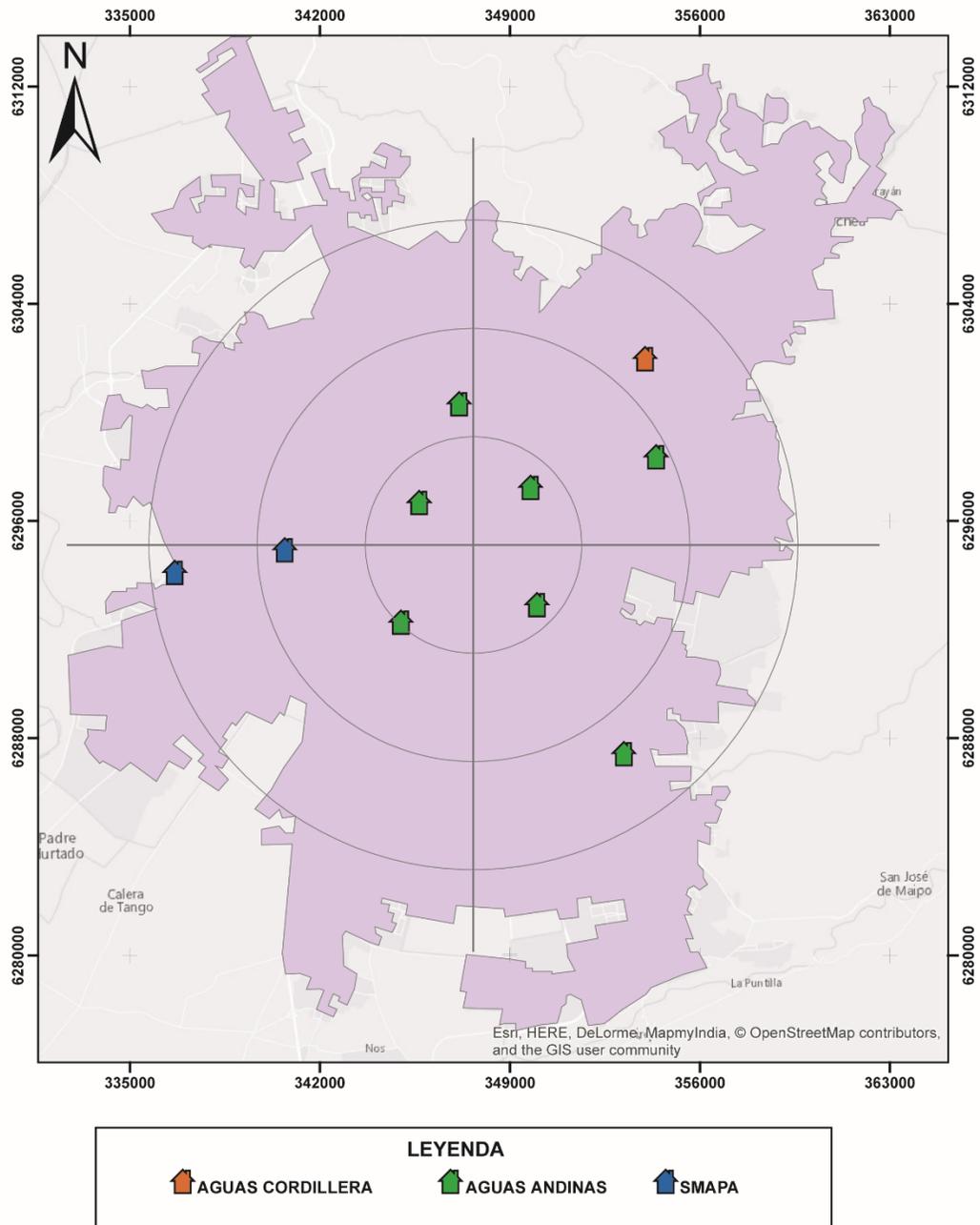
### 3.1 Material

Las muestras son almacenadas en botellas de polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE, por sus siglas en inglés, *High Density Polyethylene*) de 125 mL. Estas botellas fueron preparadas previamente en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA).

El procedimiento que se sigue depende del tipo de muestra. Las botellas utilizadas para análisis de cationes y elementos traza son enjuagadas con agua de osmosis reversa, ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y agua ultrapura, siguiendo las instrucciones de lavado proporcionadas por el laboratorio. Las botellas para aniones y bicarbonato, en cambio, se lavan con agua de osmosis reversa y con agua ultrapura.

### 3.1 Muestreo

En julio del 2017, se recolectan 10 muestras de agua tomadas directamente de la llave. Una muestra es tomada en un espacio público (Departamento de Geología de la Universidad de Chile) y las nueve muestras restantes en residencias privadas. En las residencias privadas se selecciona la llave de la cocina debido a que representa el agua que bebemos día a día y en el lugar público se escoge la llave del baño que es el lugar accesible y habilitado que proporciona a los alumnos agua potable. Siete de las muestras provienen de la principal empresa sanitaria de la región (Aguas Andinas), dos provienen del Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú (SMAPA) y una proviene de Aguas Cordillera (**Tabla 3.1**)



**Figura 3.1** Mapa de planificación de muestreo con las casas seleccionadas. Los círculos corresponden a radios de 5, 10 y 15 kilómetros respecto del centro geométrico del área urbana de la Región Metropolitana. El área color violeta corresponde al área urbana. Los símbolos de casas corresponden a los hogares que fueron visitados para la realización de este estudio

Antes de comenzar la toma de muestras, se deja correr el agua por al menos dos minutos con la finalidad de disminuir el efecto de interacción entre el sistema de cañerías del hogar y el agua. Posterior a esto, se ambientan dos contenedores plásticos, uno es utilizado para el registro de parámetros fisicoquímicos y el otro para la extracción de las muestras para cationes, elementos traza y aniones. Una vez ambientados se procede a llenar los contenedores con el agua que será muestreada.

**Tabla 3.1** Principales empresas de servicios sanitarios de la Región Metropolitana con sus respectivos porcentajes de población urbana abastecida por ellos y el número de muestras extraídos por este trabajo.

<b>Empresa</b>	<b>% Población urbana abastecida de agua potable</b>	<b>Número de muestras</b>
<b>Aguas Andinas</b>	80,97	7
<b>SMAPA</b>	9,29	2
<b>Aguas Cordillera</b>	5,62	1

### **3.1.1 Registro de parámetros fisicoquímicos**

Utilizando uno de los contenedores con agua, se determina la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y el potencial eléctrico (Eh) con un multiparámetro de terreno.

### **3.1.2 Extracción de muestras**

En primer lugar, se procede a la extracción de la muestra para análisis de bicarbonato directamente desde la llave:

- Ambientación de la botella de muestra para bicarbonato, al menos dos veces, con el agua potable.
- Directamente desde la llave se extrae la muestra de agua, procurando no dejar ninguna burbuja de aire en el interior de la botella.
- Se rotula con el código de la muestra y el análisis al que será efectuado.

Posteriormente, se toman las muestras para análisis de cationes, aniones y elementos traza, desde el segundo contenedor:

- Ambientación de la jeringa (60 ml) con la cual se extrae agua al menos dos veces, para evitar contaminación.
- Se utiliza un filtro millipore de 0,45  $\mu\text{m}$ .
- Para las muestras destinadas al análisis cationes y trazas, se acidifica el contenido de la botella utilizando ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), aplicando un volumen aproximado de 1,5 mL. Este procedimiento tiene como objetivo evitar la precipitación de fases minerales.

- Se rotulan las botellas indicando el código asignado a la muestra y el tipo de análisis al que será sometida.

Posteriormente todas las muestras se mantienen almacenadas en un refrigerador a una temperatura aproximada de entre 3 y 4°C.

### 3.2 Métodos analíticos

Los análisis químicos de las muestras fueron realizados en los laboratorios de Geoquímica de Fluidos del CEGA, a cargo de la analista Verónica Rodríguez.

Para el análisis de aniones se utilizó un Cromatógrafo Iónico 861 Advanced Compact IC Metrohm, excepto por bicarbonato y carbonato que fueron medidos utilizando un titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado, usando el Método de Giggenbach.

La determinación de cationes mayores, por otro lado, fue realizada con espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, ICP-OES, Perkin Elmer Precisely Optima 7300 V. Los elementos trazas y menores fueron medidos con espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q.

Los límites de detección pueden ser encontrados en el **ANEXO 8.1**.

### 3.3 Calidad de datos

El agua, a escala macroscópica más que escala molecular, posee la condición de electroneutralidad. Por lo tanto, la suma de cargas positivas iguala a la suma de cargas negativas. Una de las maneras de validar la calidad de los análisis químicos de agua es utilizando la ecuación de balance iónico (Ecuación 2.1).

$$BI = 100 * (\sum cationes - \sum aniones) / (\sum cationes + \sum aniones) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Este error puede estar relacionado con (1) errores analíticos en la determinación de las concentraciones o (2) especies iónicas presente en niveles significativas no consideradas en el análisis. Además, debe tenerse en cuenta que se puede obtener un porcentaje de error pequeño, cuando existan errores individuales si ellos se equilibran entre sí. En general, es aceptado que el error puede llegar hasta el 10%. Los laboratorios de análisis de aguas normalmente estiman aceptable un error de hasta un 5% (Freeze y Cherry, 1979) aunque para muestras más diluidas se podría considerar un error de hasta un 10% (Saindon y Whitworth, 2005). Bartram y Ballance (1996), en su estudio co-patrocinado por la OMS y por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), indican que para aguas superficiales puede aceptarse hasta un 10%. Clesceri *et al.* (1999) indica que la diferencia aceptable depende de la suma de aniones según se observa en la **Tabla 3.2**

**Tabla 3.2** Diferencia aceptable en el balance iónico con relación a la suma de Aniones, según Clesceri, et al. (1999).

Suma de Aniones (meq/L)	Diferencia Aceptable
0-3,0	± 0.2 meq/L
3,0 – 10,0	± 2%
10,0 - 800	5%

### 3.4 Conductividad Eléctrica

Dentro de los parámetros composicionales del agua potable, la cantidad de sustancias disueltas es una de las más importantes. Según Hem (1985) la conductividad eléctrica refleja directamente el tipo de agua. El presente trabajo utiliza la clasificación basada en el trabajo de Van der Aa (2003) que se puedes observar en la **Tabla 3.3**.

**Tabla 3.3** Clasificación de agua de acuerdo con su EC (Van der Aa, 2003).

Clasificación	EC (µS/cm)
Concentración mineral muy baja	<77
Concentración mineral baja	77 - 769
Concentración mineral intermedia	769 - 2308
Concentración mineral alta	>2308

### 3.5 Sólidos Disueltos Totales

La conductividad eléctrica está estrechamente relacionada con la cantidad de sólidos disueltos totales (TDS; *Total Dissolved Solids*) debido a que la conducción de la corriente a través de una solución electrolítica depende principalmente de la concentración de especies iónicas presente en ella. La relación entre estos parámetros es descrita por Hem (1985) como se puede observar en la ecuación 2.2, donde *TDS* corresponde a los sólidos disueltos totales en mg/L, *A* corresponde a una constante que varía entre 0.55 y 0.75, con los mayores valores asociados a aguas sulfatadas y  $EC_{25}$  es la conductividad eléctrica a 25°C en µS/cm.

$$TDS(mg/L) = A * EC_{25}(\mu S/cm) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Debido a que la conductividad eléctrica medida en terreno no corresponde necesariamente a una temperatura de 25°C, se realiza la conversión según la ecuación 2.3, donde  $EC_{25}$  corresponde a la conductividad eléctrica a 25°C en µS/cm, *EC* la conductividad eléctrica medida en µS/cm., *a* corresponde a un factor de correlación y *t* a la temperatura medida en °C.

$$EC_{25} = \frac{EC}{1 + a*(t-25^{\circ}C)} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Para el factor de correlación existen distintos valores citados en la literatura, se ha propuesto un valor de 0,0191 por Clesceri *et al.* (1999), mientras que los textos de aguas subterráneas mencionan que existe un aumento de 2% en la conductividad eléctrica con el aumento de 1°C (Hem, 1985), lo que se traduciría en un factor de 0.02. Hayashi (2003) analiza estos típicos valores utilizado y confirma la aplicabilidad del valor propuesto por Clesceri, *et al.* (1999) a una gran variedad de aguas.

El presente estudio utiliza un valor de  $a = 0,0191$  y un valor de  $A = 0.65$  para los cálculos correspondientes.

Davis and De Wiest (1966) proponen una clasificación según los TDS presente en el agua que va desde conveniente para su consumo hasta no apta para consumo o regadío (**Tabla 3.4**)

**Tabla 3.4** Clasificación de aguas según los sólidos totales disueltos (TDS) de acuerdo con Davis y De Wiest (1966).

Clasificación	TDS (mg/L)
Conveniente para su consumo	<500
Aceptable para su consumo	500-1000
Útil para regadío	1000-3000
No apta para consumo o regadío	>3000

### 3.6 Dureza

La dureza es definida como la suma de a concentraciones de calcio y magnesio expresadas como carbonato de calcio en mg/L y se aplica la ecuación 2.4, donde  $[Ca, mg/L]$  corresponde a la concentración de calcio expresada en mg/L y  $[Mg, mg/L]$  a la concentración de magnesio en mg/L (Clesceri *et al.*, 1999)

$$\text{dureza } [mg/L CaCO_3] = 2.497 [Ca, mg/L] + 4.118 [Mg, mg/L] \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Para la clasificación de las muestras respecto a la dureza, se utiliza la clasificación establecida por la Asociación de Calidad de agua (WQA) que se puede observar en la **Tabla 3.5**.

**Tabla 3.5** Clasificación de dureza establecida por la Asociación de Calidad de Agua (WQA, 2017).

Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Suave	<17.0
Ligeramente dura	17.1-60
Moderadamente dura	60-120
Dura	120-180
Muy dura	>180

## CAPITULO 4. CALIDAD DEL AGUA Y SALUD HUMANA

La mayor parte de la evidencia existente de problemas de salud relacionados al agua son el resultado de contaminación microbiológica (bacterias, virus, protozoos, etc). Sin embargo, también existe un número apreciable de contaminantes químicos asociados a problemas de salud tras la prolongada exposición a estos.

A continuación, se presentan las sustancias y parámetros considerados como aquellos potencialmente riesgosos para la salud humana. La información proviene de “*Guidelines for drinking water quality, Fourth Edition, incorporation the first addendum*” (OMS, 2017), a menos que se señale otra fuente. Los valores de referencia señalados por la OMS (2017), junto con los valores máximos permitidos por la NCh409 (2005), US EPA (2009) y Directiva 98/83/CE pueden ser encontrados en el apartado 4.3 (**Tabla 4.1**).

### 4.1 Componentes mayores del agua

#### ***Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )***

El sulfato está presente en numerosos minerales y se utiliza también en la industria química. También hay aportes provenientes de residuos industriales y de deposición atmosférica, aunque los mayores niveles se encuentran en aguas subterráneas que son de origen natural. En general, la alimentación es el principal recurso de este elemento, aunque en lugares con alto contenido de este elemento, el agua podría ser una fuente más importante. No existen evidencias de efectos en la salud más que el laxante, pero no llega a provocar diarrea, deshidratación ni pérdida de peso.

#### ***Cloruro ( $Cl^-$ )***

El cloruro presente en el agua potable usualmente previene de aguas residuales y efluentes industriales, escorrentía urbana que contiene sal de deshielo e intrusiones salinas. No obstante, la principal fuente de cloruro es la adición de sal en los alimentos y usualmente es mucho más importante que la ingesta vía agua potable.

El exceso de cloruro puede aumentar la tasa de corrosión de metales en el sistema de distribución, dependiendo de la alcalinidad del agua. Esto puede llevar a un aumento en la concentración de metales en el agua suministrada.

#### ***Nitrato ( $NO_3^-$ )***

El nitrato se encuentra en el medioambiente y es un importante nutriente para las plantas. Puede llevar al agua potable como consecuencia de la actividad agrícola, por aguas residuales o por oxidación de residuos nitrogenados de humano u otros animales. El nitrito se encuentra en concentraciones significativas sólo en ambientes reductores, dado que el nitrato es más estable. Se puede encontrar por la reducción microbiológica

de nitratos o por la reducción in vivo de nitrato ingerido. También puede formarse químicamente en tuberías del sistema de distribución por bacterias Nitrosomonas. Un exceso de amonio libre en el sistema puede llevar a la nitrificación y aumentar las concentraciones de nitrito y nitrato en el agua potable.

En general, la fuente más importante a nitrato y nitrito es a través del consumo de carne (sólo de nitrito, que se utiliza como conservante) y vegetales. Aunque también es posible que el agua potable haga un aporte importante a la dosis diaria de nitrato y, en algunas ocasiones, de nitrito. La absorción del nitrato ingerido de vegetales, carne o agua es rápida. En humanos, alrededor de un 25% del nitrato ingerido recircula en la saliva, del que un 20% de este es convertido nitrito por acción de bacterias presentes en la boca.

Uno de los efectos tóxicos más importantes de estas sustancias en la salud humana es la metahemoglobinemia, que reduce la capacidad de transporte del oxígeno en la sangre. Alto niveles de metahemoglobinemia en infantes puede dar lugar a cianosis, que es una coloración azulada en la piel y/o en las membranas mucosas. Aunque el nitrato presente en el agua potable puede ser un factor muy importante en la metahemoglobinemia, también hay mucha evidencia que indica que esto podría estar asociado a infecciones gastrointestinales que aumenta la formación de nitrito endógeno y también podría aumentar la reducción del nitrato ingerido a nitrito. Por otro lado, el nitrato podría competir con el Yodo por la absorción, que afectaría potencialmente la tiroides. Información actual sugiere que el nitrato ingerido por agua potable podrá alterar la función de la glándula tiroidea, aunque estos estudios presentan limitaciones metodológicas.

### ***Fluoruro (F)***

El Flúor es un elemento común encontrado ampliamente distribuido en la corteza terrestre y existe como fluoruro en un gran número de minerales. En muchas aguas se pueden encontrar trazas de fluoruros con mayores concentraciones generalmente asociadas a aguas subterráneas. Muchos alimentos contienen trazas de fluoruro, la vegetación también contiene debido a que lo absorbe desde el agua y desde el suelo.

El flúor es utilizado en preparaciones dentales para combatir caries, particularmente en áreas de gran ingesta de azúcar. En algunos países, se adiciona artificialmente flúor al agua o la sal de mesa con la intención de prevenir caries. De acuerdo con Romero *et al.*, 2017; Chile es pionero en la fluorización del agua potable, desde que en 1953 implementara un programa piloto de fluorización en Curicó y se estima que la cobertura nacional de agua potable fluorada alcanza un 82,3%. Contrariamente, el 98% de los países europeos prohíben fluorar el agua potable. Usualmente las concentraciones finales tras esta adición van desde los 0.5 a 1 mg/L.

Para presentar signos de intoxicación severa por fluoruro se debería ingerir una dosis de 1mg por kilogramo de peso corporal. Se han llevado a cabo muchos estudios epidemiológicos de los posibles efectos adversos tras el consumo de agua fluorada. Estos estudios establecen que altas concentraciones de fluoruros produce efectos en el tejido óseo. En bajas concentraciones puede ayudar a prevenir caries, pero en también podría tener efectos adversos en el esmalte dental y podría dar lugar a fluorosis dental leve. Las

altas concentraciones pueden tener efectos aún más graves en los tejidos óseos. La fluorosis esquelética podría observarse con concentraciones entre 3 y 6 mg/L de fluoruro.

### ***Magnesio (Mg)***

El magnesio es esencial para la vida humana y la alimentación es la principal fuente de este elemento. Se han asociado niveles bajos de magnesio con disfunción endotelial, aumento de reacción vascular y disminución de insulina, lo que tras una prolongada exposición puede significar hipertensión, enfermedad coronaria, diabetes mellitus o síndrome metabólico.

### ***Sodio (Na)***

El sodio puede encontrarse en una gran cantidad de alimentos, siendo esta la mayor fuente de ingesta de este elemento, pero también se puede encontrar en el agua potable en un menor grado de importancia.

No hay evidencias de que tenga algún efecto sobre la salud humana, por lo tanto, no se señala un valor máximo permitido por la OMS (2017), pero señala que una concentración mayor a 200 mg/L podría presentar un sabor perceptible por los consumidores. La Directiva 98/83/CE establece el mismo valor máximos, mientras que la EPA (2009) y la NCh409 (2005) no indican un valor.

## **4.2 Componentes menores y trazas del agua**

### ***Antimonio (Sb)***

El antimonio es utilizado como reemplazo de Plomo en soldaduras, pero existe muy poca evidencia de que este signifique una contribución importante en la dosis de consumo diario. La principal fuente de esta sustancia en concentraciones alarmantes es de origen ocupacional y la ingesta vía oral es mínima comparativamente.

El estado en que se encuentre este elemento es determinante al definir el grado de toxicidad que representa. El Antimonio que proviene de la lixiviación de materiales que lo contienen está en la forma de antimonio (V), que sería la menos tóxica. A pesar de que existe evidencia de la toxicidad de este elemento por inhalación, no la hay para indicar que por vía oral también lo sea. La EPA (2012), por otro lado, indica que a largo plazo podría producir aumento de colesterol y/o disminución en los niveles de azúcar en la sangre.

## ***Aluminio (Al)***

Es el elemento metálico más abundante y constituye un 8% de la corteza terrestre. Se utilizan sales de aluminio en el tratamiento de aguas como coagulantes para reducir materia orgánica, color, turbidez y niveles de microorganismos, lo cual podría verse reflejado en el agua que llega hasta los hogares.

Se cree que el aluminio es pobremente absorbido por el cuerpo humano, sin embargo, esto aún no ha sido estudiado para todos los sectores de la población. Existen algunas indicaciones de que la ingesta en humanos sea tóxica, se han planteado hipótesis que indican que la exposición a aluminio podría favorecer el desarrollo o aceleración de Alzheimer (AD, *Alzheimer Disease*) en humanos. Sin embargo, Flaten (2001) indica que a pesar de la gran cantidad de estudios epidemiológicos que muestran una relación positiva entre la ingesta de aluminio y AD, el agua potable aporta tan solo una fracción de la ingesta diaria. Particularmente, representa una milésima parte de lo que aporta un antiácido, aunque tampoco se puede descartar que el agua potable sea particularmente biodisponible. Según la OMS la contribución del agua potable al total de la ingesta oral de aluminio es usualmente menos de un 5% del total.

## ***Arsénico (As)***

El Arsénico puede ser encontrado en la corteza terrestre e sus tres estados de oxidación:  $As^{-3}$ ,  $As^0$ ,  $As^{+3}$ , usualmente como sulfuro, arseniuros metálicos o arseniato. En el agua se encuentra principalmente como arseniato (+5) pero en condiciones anaeróbicas es más común encontrarlo como arsenito (+3). Aguas naturales, usualmente se encuentra en concentraciones menores a 1–2  $\mu\text{g/l}$ . Sin embargo, en aguas subterráneas, donde existen depósitos metálicos con sulfatos y depósitos sedimentarios provenientes de rocas volcánicas, estas concentraciones pueden ser un tanto más elevadas. La principal ruta de exposición al Arsénico es a través de la comida y del agua, donde las concentraciones en el agua potable son de 10  $\mu\text{g/l}$  o mayores, convirtiéndose en la mayor fuente de este elemento.

No ha sido demostrado que el As sea esencial para humanos. La toxicidad es función predominantemente de la tasa de excreción del cuerpo. La arsina (-3), hidruro de arsénico, se considera la forma más tóxica de As, seguido de arsenitos, arseniatos y compuestos orgánicos de As. Se han reportado intoxicaciones graves por ingesta de agua de pozo con altas concentraciones de As (21.0 mg/l)

En poblaciones que han consumido aguas contaminadas con As, se han observado: signos de arsenismo crónico, incluyendo lesiones dérmicas tales como hiperpigmentación o hipopigmentación, neuropatía periférica, cáncer de piel, cáncer de vejiga y pulmones, enfermedad vascular periférica. Las lesiones dérmicas son los síntomas más comúnmente observados y ocurren tras una exposición mínima de 5 años.

Aún existen números incertezas y controversias respecto del mecanismo cancerígeno y de la forma de la curva dosis-respuesta de un consumo bajo. El programa internacional de seguridad química, *International Programme on Chemical Safety* (IPCS), concluye que una exposición prolongada a arsénico en el agua potable está causalmente

relacionada a un aumento del riesgo de cáncer de piel, pulmones, vejiga y riñón, así como también otros problemas en la piel, como la hiperqueratosis y cambios de pigmentación.

### ***Bario (Ba)***

Los compuestos de Ba se encuentran en la naturaleza como depósitos minerales o en depósitos ígneos y sedimentarios y, además, son utilizados en algunos procesos industriales. El Ba presente en el agua proviene principalmente de fuentes naturales, pero también puede provenir de emisiones industriales y usos antropogénicos. Cuando las concentraciones en el agua son altas pueden contribuir en un gran porcentaje de la ingesta diaria.

No hay evidencias de que sea cancerígeno o genotóxico. A pesar de que se han reportado problemas de hipertensión que podrían estar asociados al Ba, se considera que es un elemento de baja preocupación toxicológica.

### ***Berilio (Be)***

La fuente principal de compuestos de Be en aguas se relaciona con la quema de carbón y otros usos industriales y naturalmente proviene de deposición de berilio atmosférico y meteorización de rocas o suelos con contenido de Be. No es comúnmente encontrado en aguas naturales más que en niveles traza como resultado de la insolubilidad de óxidos e hidróxidos de berilio en los rangos usuales de pH.

En concentraciones altas el berilio es considerado tóxico y puede causar beriolisitis o enfermedad crónica de berilio (Muller-Quernheim, 2005). La EPA (2009) señala que puede generar lesiones intestinales.

### ***Boro (B)***

Los compuestos de boro son usados en la manufactura de vidrio, jabones, detergentes y retardantes de fuego. Naturalmente ocurren en aguas subterráneas como resultado de la lixiviación de rocas y suelos con boratos o borosilicatos. Las concentraciones suelen verse elevadas por las descargas de aguas residuales, sin embargo, actualmente esto ha ido disminuyendo. Experimentos de exposición a corto y largo plazo se han llevado a cabo en animales con ácido bórico y bórax y se ha demostrado que afecta al tracto reproductivo masculino.

### ***Cadmio (Cd)***

Este metal es usado en la industria del acero y del plástico. Se usa ampliamente en baterías, además está presente en aguas residuales y también en contaminación difusa producto de contaminación de fertilizantes y de polución en el aire. Altas concentraciones de cadmio pueden ser consecuencia de impurezas en el zinc de tuberías

galvanizadas, soldaduras u otros accesorios de metal. La alimentación es la principal fuente exposición diaria al Cd y fumar es un recurso adicional importante a la exposición.

El Cd se acumula principalmente en los riñones y tiene una larga vida media de unos 10 – 35 años en humanos. Existe evidencia de ser cancerígeno por vía nasal y el Centro de investigación del Cáncer (CICC) lo clasifica como probablemente cancerígeno en humanos.

### **Cesio (Cs)**

Existen estudios acerca de los efectos de los isótopos radiactivos de este elemento ( $Cs^{134}$  y  $Cs^{137}$ ) tras la exposición de la población tras el accidente de Chernobyl (Bennett *et al.*, 2006). Sin embargo, respecto del isótopo estable, muy poca información es conocida. Según Melnikov y Zaroni (2010) se puede considerar que el Cesio es relativamente seguro y que los signos de toxicidad leve incluyen problemas gastrointestinales, hipotensión, síncope y entumecimiento u hormigueo en los labios. También reportan que se han observado, tras la ingesta diaria de 6 g/ día, hipokalemia grave, hipomagnesemia, intervalo QT prolongado, episodios de taquicardia ventricular polimórfica e incluso paros cardiacos agudos. Aunque, también indican los autores, no existe aún suficiente información y hacen falta más estudios acerca de su toxicidad aguda y crónica.

### **Cobalto (Co)**

Según Lauwerys y Lison (1994), la principal fuente de cobalto en humanos es la alimentación y el agua potable, aunque también se encuentran trazas de este elemento en cemento y otros productos de construcción.

El cobalto no es una toxina que se acumule, más bien es excretada en la orina y en menor medida en las fecas. Se han reportado manifestaciones tóxicas tras la inhalación de esta sustancia. Los principales órganos que daña son la piel y el tracto respiratorio. Puede causar dermatitis alérgica, rinitis y asma (Lauwerys y Lison, 1994).

### **Cromo (Cr)**

El cromo está ampliamente distribuido en la corteza terrestre y puede encontrarse en valencia +2 a +6, el cromo (III) es un nutriente esencial (OMS, 2017). La fuente de este elemento en agua potable suele ser descargas de fábricas de acero y celulosa (EPA, 2009).

La alimentación es la principal fuente de ingesta de este elemento. Estudios epidemiológicos han mostrado una asociación entre la exposición a Cromo (VI) vía inhalación y cáncer de pulmón. El CICC clasifica al Cromo (VI) como cancerígeno en humanos y del Cromo (III) indica que no es clasificable en cuanto a su cancerogenicidad

en humanos. La EPA, por otro lado, indica que a largo plazo puede provocar dermatitis alérgica.

### ***Cobre (Cu)***

El cobre se considera un nutriente esencial como también un contaminante. Se utiliza en tuberías, válvulas y otros accesorios y está presente en aleaciones y revestimientos. El sulfato de cobre pentahidratado es ocasionalmente utilizado en la superficie del agua para controlar algas. Las concentraciones de cobre varían ampliamente, siendo el principal recurso de este elemento productos de la corrosión las tuberías de cobre. Así el cobre puede aumentar considerablemente durante la distribución, especialmente en sistemas con un pH ácido o en aguas carbonatadas con pH alcalino.

El agua potable y alimentos son la principal fuente de cobre en la dieta humana en países desarrollados. El consumo de agua potable, sin dejarla correr puede aumentar drásticamente la exposición diaria a este elemento. Estudios recientes han delineado valores umbrales para los efectos en el tracto intestinal que puede provocar en cobre, pero aún existen incertezas respecto de los efectos a largo plazo en poblaciones sensibles, tales como portadores del gen de Wilson u otros desórdenes metabólicos. La EPA (2009) añade que podría provocar daños en el hígado o riñones.

### ***Estroncio (Sr)***

El estroncio en aguas superficiales o subterráneas proviene principalmente de la meteorización de rocas y suelos que lo contienen. En el agua se encuentra presente como catión hidratado. Este elemento podemos encontrarlo naturalmente se encuentra en cuatro formas de isótopos estables:  $^{88}\text{Sr}$  (82.6%),  $^{86}\text{Sr}$  (9.9%),  $^{87}\text{Sr}$  (7.0%) and  $^{84}\text{Sr}$  (0.6%). El agua potable contribuye aproximadamente 0,7 a 2 mg/día, mientras que la alimentación 1,2 – 2,3 mg/día (Watts y Howe, 2010).

Podría interferir con el desarrollo esquelético, además numerosos estudios han señalado que el principal afectado tras la ingesta oral son los tejidos óseos (Watts y Howe, 2010).

### ***Hierro (Fe)***

El Hierro es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre. Se encuentra en aguas frescas naturales en niveles entre 0,5 a 50 mg/L. También puede estar presente en el agua potable tras la corrosión de tuberías de acero o hierro fundido en el sistema de distribución. El hierro es un elemento esencial, particularmente el Hierro (II) y el requerimiento humano diario depende de varios factores: edad, sexo, estado físico biodisponibilidad del Hierro.

### ***Litio (Li)***

El litio es considerado un elemento esencial para la nutrición. Este elemento traza se moviliza por las lluvias desde rocas y suelos hasta llegar a aguas superficiales o

subterráneas. Las concentraciones pueden llegar hasta los 5,2 mg/L en algunas regiones (Kapusta et al., 2011).

A diferencia del resto de los elementos acá analizados, las altas concentraciones de este elemento han sido ampliamente asociadas con efectos positivos en la salud mental. Varios estudios han concluido en una relación inversa entre el litio y las tasas de suicidios, violencia y robos (Kapusta *et al*, 2011; Schrauzer y Shrestha, 1990; Ohgami *et al.*, 2009). Sin embargo, es importante mencionar que no se conoce mucho sobre los efectos en el largo plazo que podría significar este elemento en altas concentraciones.

### ***Manganeso (Mn)***

El manganeso es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre, usualmente se encuentra junto con Hierro. Se utiliza principalmente en la manufactura de aleaciones de hierro y acero, como oxidante para limpieza, blanqueamiento y desinfección (permanganato de potasio). El Manganeso ocurre naturalmente en aguas subterráneas y superficiales, particularmente en condiciones anaeróbicas y esta es su fuente más importante en el agua potable. Usualmente la mayor fuente de este elemento en la alimentación.

Varios estudios epidemiológicos han detectado que el Manganeso soluble se asocia con problemas de aprendizaje en niños. Sin embargo, esto aún debe ser confirmado por mayor información científica.

### ***Mercurio (Hg)***

Para la OMS, el mercurio es uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública. Se utiliza en la producción electrolítica de cloro, en aparatos eléctricos, amalgamas dentales y como materia prima para varios compuestos de mercurio. Se ha demostrado que ocurre metilación (adición de un grupo metilo, -CH<sub>3</sub>, a una molécula) del Mercurio inorgánico en el agua y en aguas no contaminadas el Mercurio se encuentra en su forma Hg<sup>2+</sup>. Así, se considera que no existen riesgos directos en el consumo de compuestos orgánico de mercurio, pero aún cabe la posibilidad de que el metilmercurio se convierta en mercurio inorgánico. La fuente principal de mercurio es la alimentación.

Se han observado efectos tóxicos de componentes de mercurio, tanto en humanos como en animales de laboratorio, principalmente en los riñones tras exposiciones de corto o largo plazo. En humanos, tras ingesta oral se observa gastritis hemorrágica y colitis y el daño mayor es en los riñones. También hay evidencia que prueba que el cloruro de Mercurio(II) podría aumentar la incidencia de tumores benignos.

### ***Molibdeno (Mo)***

El Molibdeno es considerado un elemento esencial. Se encuentra naturalmente en suelos y también es usado en la manufactura de aceros especiales y en la producción de tungsteno y pigmentos; los compuestos de Molibdeno se utilizan como aditivos

lubricantes y en agricultura para evitar la deficiencia de Mo. Las concentraciones son usualmente 0.01 mg/L, aunque se han encontrado concentraciones de 0.2 mg/L en áreas cercanas a minería.

### ***Níquel (Ni)***

El Níquel se utiliza en la producción de aleaciones de níquel y acero. La principal fuente de exposición a esta sustancia es la alimentación y el agua suele ser un aporte menor a la ingesta diaria. El CICC lo clasifica, vía inhalación como cancerígeno, mientras que el Ni metálico es considerado posiblemente cancerígeno. Sin embargo, aun hace falta evidencia de los riesgos cancerígenos tras la exposición oral a este elemento. La dermatitis alérgica de contacto es el efecto más observado en la población general.

### ***Plata (Ag)***

La plata está de manera natural principalmente en forma de óxido, sulfuro y sal y es muy insoluble e inmóvil. Sólo un pequeño porcentaje de la plata consumida es absorbida, se estima que entre un 0 y 10%.

El síntoma de intoxicación con plata es la argiria, condición en la que la piel y el cabello son decolorados y presentan coloraciones azules a grisáceas; aunque en las concentraciones que suele encontrarse en el agua potable no presenta riesgos.

### ***Plomo (Pb)***

El Plomo se utiliza principalmente en la producción de baterías de plomo-ácido, soldadura y aleaciones. Algunos compuestos de plomo han sido usados extensamente como agentes antidetonantes y lubricantes en el petróleo, aunque en la mayoría de los países se ha eliminado. En Chile, La estatal Empresa Nacional del Petróleo (Enap) anuncia que se deja de distribuir gasolina con como en el año 2001.

Debido a que se ha ido dejando atrás el uso de plomo para este uso, las concentraciones de Pb en aire y alimentos ha ido disminuyendo. Raramente se encuentra en el agua potable como resultado de disolución desde el recurso natural, más bien es resultado de efectos corrosivos en el sistema de distribución que contiene tubos de plomo, soldaduras y otros accesorios en las conexiones del servicio a los hogares. La concentración de plomo disuelta depende varios factores: pH, temperatura, alcalinidad, calidad de la tubería y el tiempo de permanencia en contacto con el agua, siendo los factores favorables: agua blanda, ácida la más disolvente.

La exposición al Plomo se ha asociado a un amplio rango de efectos en la salud, incluyendo problemas de desarrollo neuronal, mortalidad (principalmente por problemas cardiovasculares), daño renal, hipertensión, infertilidad y otros resultados adversos del embarazo. El daño en el desarrollo neurológico en niños requiere de una menor concentración de Pb que el resto de los otros efectos y es el efecto más documentado y estudiado. En adultos, el principal riesgo asociado es el aumento de la

presión sistólica en la sangre. Se estima que 25 µg/kg de peso corporal se asocia en al menos 3 puntos menos de IQ (*Intelligence Quotient*) en niños y en un aumento de 3mmHg (0.4 kPa) en la presión sistólica.

### ***Rubidio (Rb)***

El rubidio es considerado como un elemento esencial y debido a que no es considerado tóxico, no existe mucha información acerca de efectos observados en la salud humana. Es por este mismo motivo por el cual no existen valores de referencia para este parámetro.

### ***Selenio (Se)***

El Selenio suele asociarse a minerales sulfurados. Es un elemento traza esencial para la salud y las principales fuentes son cereales, carne roja y pescado. Existen muchos lugares donde los niveles de Selenio en la población son muy bajos, Europa Oeste, por ejemplo.

La deficiencia de selenio se ha asociado con la enfermedad de Keshan, una miocarditis multifocal, y con la enfermedad de Kaschin-Beck, una condrodistrofia. También existen numerosos estudios que asocian bajos niveles de este elemento con la prevalencia de varios tipos de cáncer. Dosis altas también se asocian a enfermedades, que también se dependen mucho de otros factores. Se han observado síntomas en personas con altos niveles de selenio en el aparato urinario, como problemas gastrointestinales, decoloración en la piel, deterioro dental, pérdida de pelo y uñas, anomalías en las uñas y cambios en los nervios periféricos.

### ***Uranio (U)***

El uranio se puede encontrar en granito o incluido en muchos tipos de depósitos minerales. Se encuentra en el medioambiente por lixiviación de depósitos naturales, combustión de carbón u otros combustibles y uso de fertilizantes de fosfato que contienen uranio. El aporte de uranio por consumo de agua potable es considerado bajo, aunque en lugares con altas concentraciones puede llegar a ser un importante aporte.

Existen muchos datos corroborando la cancerogenicidad del uranio en humanos y en animales. Los principales órganos afectados son los riñones y el principal efecto observado es la nefritis. Sin embargo, se observan estos efectos en concentraciones bastante altas respecto de las comúnmente encontradas en aguas potables.

### 4.3 Marco regulatorio

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha realizado la guía “*Guidelines for drinking water quality*” que actualiza cada año. Esta guía provee valores de referencia o directrices para sustancias que se en (OMS, 2017). Esta guía es considerada la principal referencia en cuanto a la determinación de estándares nacionales de calidad de agua potable. En efecto, Chile consideró la guía “*Guidelines for Drinking-water Quality, Third Edition, Volume 1 Recommendations*” (2004) para la creación de la actual norma.

Según la Norma Chilena NCh1333 acerca de “Requisitos de calidad de agua para diferentes usos” del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 1978) el agua para consumo humano y para bebida de animales debe ser potable, la cual debe cumplir con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección establecidos en la NCh 409 (MINSAL, 2005), que aseguren su inocuidad y aptitud para consumo. Los requisitos se dividen en cinco categorías:

- Tipo I: Parámetros microbiológicos y de turbiedad.
- Tipo II: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud.
- Tipo III: Elementos radioactivos.
- Tipo IV: Parámetros relativos a las características organolépticas.
- Tipo V: Parámetros de desinfección

**Tabla 4.1** Se presentan los valores máximos permitidos por la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409/1), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). <sup>1</sup> = no corresponden a valores de referencia, si no a recomendaciones. <sup>2</sup> = incluidas en la norma secundaria de calidad de aguas, elementos no tóxicos, <sup>3</sup> = valor guía provisional, <sup>4</sup> = nitrato medido como N<sub>2</sub>

	<b>OMS (2017)</b>	<b>NCh409 (2005)</b>	<b>EPA (2009)</b>	<b>Directiva 98/83/CE</b>
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	500 <sup>1</sup> /250 <sup>2</sup>	500	250 <sup>2</sup>	250 <sup>2</sup>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	250 <sup>2</sup>	400	250 <sup>2</sup>	250 <sup>2</sup>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	50	50	10 <sup>4</sup>	50
<b>F<sup>-</sup></b>	1,5	1,5	4/2 <sup>2</sup>	1,5
<b>Br<sup>-</sup></b>	2 <sup>1</sup>	-	-	-
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-	125	-	-
<b>Na<sup>+</sup></b>	200 <sup>2</sup>	-	-	200 <sup>2</sup>
<b>Elementos menores y trazas (µg/L)</b>				
<b>Be</b>	12 <sup>1</sup>	-	4	-
<b>B</b>	2400	-	-	1000
<b>Al</b>	900 <sup>1</sup>	-	200 <sup>2</sup>	200 <sup>2</sup>
<b>Cr</b>	50 <sup>3</sup>	50	100	50
<b>Fe</b>	2000 <sup>1</sup> /300 <sup>2</sup>	300	300 <sup>2</sup>	200 <sup>2</sup>
<b>Mn</b>	400 <sup>1</sup>	100	50 <sup>2</sup>	50 <sup>2</sup>
<b>Ni</b>	70	-	-	20
<b>Cu</b>	2000	2000	1300/1000 <sup>2</sup>	2000
<b>Zn</b>	3000 <sup>2</sup>	3000	5000	-
<b>As</b>	10 <sup>3</sup>	10	10	10
<b>Se</b>	40 <sup>3</sup>	10	50	10
<b>Mo</b>	70 <sup>1</sup>	-	-	-
<b>Ag</b>	<b>0,1<sup>1</sup></b>	-	-	-
<b>Cd</b>	<b>3</b>	10	5	5
<b>Sb</b>	<b>20</b>	-	6	5
<b>Ba</b>	1300	-	2000	-
<b>Hg</b>	<b>1</b>	1	2	1
<b>Pb</b>	10 <sup>3</sup>	50	15	10
<b>U</b>	30 <sup>3</sup>	-	30	-
<b>Fisicoquímicos</b>				
<b>pH</b>	6,5 -8,5	6,5 -8,5	6,5 -8,5	6,5 - 9,5
<b>TDS (mg/L)</b>	-	1500	500 <sup>2</sup>	-
<b>CE (µS/cm)</b>	-	-	-	2500

## CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Parámetros Fisicoquímicos medidos en terreno

#### *pH*

Las muestras extraídas presentan un pH promedio de 7,66 (ligeramente básico), el menor valor medido es el de la muestra AA-07 (Aguas Andinas) con un pH de 7,53 y el máximo valor medido es 7,92 de la muestra AA-01 (Aguas Andinas) (ver **Tabla 5.1**). Para este parámetro no se observan diferencias entre las empresas y más bien todas las muestras presentan valores similares, con una desviación estándar de 0,12.

El valor de pH debe estar dentro del rango recomendado por los organismos, que es de 6,5 – 8,5 (OMS, 2017; NCh409/1, 2005; US EPA, 2009) a excepción de la Unión Europea que recomienda un rango de 6,5 – 9,5. Por lo tanto, todas las muestras cumplen con el requerimiento de pH de todas las normas y referencias utilizadas por este estudio.

**Tabla 5.1** Resultados de los parámetros físico químicos medidos en terreno.

	AA-01	AA-02	AA-03	AA-04	AA-06	AA-07	AA-08	AC-09	SM-05	SM-10
<b>pH</b>	7,92	7,7	7,62	7,63	7,56	7,53	7,61	7,64	7,57	7,79
<b>Eh [mV]</b>	551	607	596	587,3	618	617,9	609,5	616,3	590,4	573,5
<b>EC [μS/cm]</b>	1598	1547	1534	1524	1594	1303	1334	1460	849	462
<b>T [°C]</b>	13,6	10,3	11,4	11,8	9,5	7,8	9,7	12,1	15,6	16,3

#### **Potencial REDOX (o Eh)**

El potencial oxidación-reducción de las muestras varía entre 551 mV (AA-01, Aguas Andinas) hasta 617,9 mV (AA-07, Aguas Andinas) (**Tabla 5.1**) promediando 596,7 mV con una desviación estándar de 21,9 mV. El Eh tampoco presenta variaciones según la empresa proveedora.

Actualmente no existen valores normados para el potencial de oxidación reducción. Sin embargo, en 1971 la OMS señaló que existe una relación exponencial entre el potencial redox y la tasa de inactivación de virus. Un valor de 650 mV causaría la inactivación instantánea de patógenos incluso en altas concentraciones. Estudios recientes han corroborado la necesidad de mantener los niveles de REDOX sobre los 650 mV para asegurar la inactivación de patógenos como Escherichia Colli, Salmonella, Erwinia, and Pseudomonas y otros organismos que podrán encontrarse presentes en el agua potable (Goncharuk et al., 2010).

Los valores medidos de este parámetro no cumplirían con esta recomendación que aseguraría una eficaz desinfección. La OMS (2017) si bien indica que el REDOX es un buen indicador del grado de desinfección, también señala que un valor mínimo debería ser definido caso por caso. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo más estudios para determinar el grado de desinfección del agua para poder, en caso de ser necesario, tomar las medidas necesarias.

Zagory (2000) indica que el monitoreo del REDOX es un método más directo de verificar la limpieza del agua que la tradicional medición de cloruro. Además, existen sistemas automatizados comercialmente disponibles que monitorean y mantienen el REDOX estable. Por lo tanto, también se recomienda analizar y comparar ambos métodos con el fin de definir el más óptimo.

### **Conductividad eléctrica**

La Conductividad eléctrica, por su lado, contempla valores entre 462  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (SM-10, SMAPA) hasta 1594  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (AA-06, Aguas Andinas) (**Tabla 5.1**). La empresa SMAPA presenta valores mucho menores a los del Grupo AC (media SMAPA: 655,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Aguas Andinas: 1490,571  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Aguas Cordillera: 1460  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (**Tabla 5.1**).

Este parámetro es normado solamente por la EPA que indica una concentración máxima permitida de 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 20°C. Se ha calculado la EC a 20°C utilizando la Ecuación 2.3. Por lo tanto, como se observa en la **Tabla 5.2**, todas las muestras acá analizadas sí cumplen con esta recomendación. Así, la conductividad eléctrica no debería presentar riesgos a la salud, pero sí es indicadora de una mayor concentración iónica en el agua del Grupo AC que en el agua de SMAPA.

**Tabla 5.2** Conductividades eléctricas medidas y recalculadas a 20°C

Muestra	AA-01	AA-02	AA-03	AA-04	AA-06	AA-07	AA-08	AC-09	SM-05	SM-10
EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	1598	1547	1534	1524	1594	1303	1334	1460	849	462
EC <sub>20</sub> [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	1424	1305	1318	1318	1328	1057	1115	1269	783	432

## **5.2 Calidad de datos analíticos**

A partir de lo señalado en el apartado 3.5, de cada muestra se obtiene la sumatoria de cationes y aniones y con ello el balance iónico (**Tabla 5.3**). Los valores se encuentran entre un 3,6% hasta un 6,7% (media 5,4%).

Las muestras analizadas, si bien no cumplen con el requisito utilizado por algunos autores de 5% de error (Freeze y Cherry, 1979; Clesceri *et al.*, 1999), sí con el criterio más utilizado para este tipo de estudios que es del 10%. Se considera, entonces, que los resultados obtenidos son válidos.

**Tabla 5.3** Sumatoria de cationes y aniones totales (en meq/L) y el balance iónico.

Muestra	Empresa	$\Sigma$ cationes (meq/L)	$\Sigma$ aniones (meq/L)	Balance Iónico (%)
AA-01	Aguas Andinas	16,677	14,591	6,671
AA-02	Aguas Andinas	16,979	15,115	5,808
AA-03	Aguas Andinas	16,752	15,078	5,261
AA-04	Aguas Andinas	16,702	15,097	5,048
AA-06	Aguas Andinas	16,539	14,821	5,476
AA-07	Aguas Andinas	14,648	13,127	5,476
AA-08	Aguas Andinas	14,817	13,248	5,588
AC-09	Aguas Cordillera	16,053	14,394	5,449
SM-05	SMAPA	9,457	8,801	3,596
SM-10	SMAPA	4,910	4,362	5,903

### 5.3 Resultados analíticos

Los resultados de análisis químicos de este trabajo pueden observarse en la **Tabla 5.4** y, a modo de referencia, se incluye los valores guía señalados por la OMS (2017). Se puede observar que los valores del Grupo AC son muy similares entre sí, pero difieren de manera importante con los de SMAPA, los cuales también difieren entre sí. Los análisis realizados en este estudio muestran que ninguno de las mediciones obtenidos sobrepasa los valores de referencia, tampoco los valores precautorios de salud ni los de referencia provisionales. Sin embargo, las muestras del Grupo AC sobrepasan el valor de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) propuesto para evitar afectar aspectos organolépticos (color, sabor, olor) del agua y se acerca al valor recomendado de cloruro ( $\text{Cl}^-$ )

Con el fin de analizar las concentraciones medidas, en la **Tabla 5.5** se resumen los resultados estadísticos de los resultados por empresa. Los posteriores apartados comentan estas diferencias con relación a las normas existentes de calidad de agua.

**Tabla 5.4** Resultados de los análisis químicos realizados en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del CEGA. Se observan los valores de aniones, cationes mayores, cationes trazas y parámetros fisicoquímicos para las diez muestras obtenidas y además se señala el valor de referencia sugerido por la OMS (2017). <sup>1</sup> precaución de salud, <sup>2</sup> Podría afectar aspectos organolépticos (olor, sabor, color), <sup>3</sup> Valor de referencia provisional

	OMS (2017)	AA-01	AA-02	AA-03	AA-04	AA-06	AA-07	AA-08	AC-09	SM-05	SM-10
<b>Aniones (mg/L)</b>											
<b>HCO<sub>3</sub></b>		122.2	125	125.1	123.8	121.7	111.9	113.4	129.3	141.9	101.4
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	500 <sup>1</sup> 250 <sup>2</sup>	324	332	330	337	335	324	325	314	179	70
<b>Cl<sup>-</sup></b>	250 <sup>2</sup>	206	217	217	213	206	160	163	201	84.8	37.5
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	50	1.99	2.09	2.24	2.72	2.57	2.15	1.59	4.22	22.1	11.5
<b>F<sup>-</sup></b>	1.5	0.406	0.46	0.46	0.48	0.48	0.5	0.5	0.53	< 0.03	< 0.03
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>											
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		175	178	176	177	177	168	170	171	132	64.8
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		17	17.8	17.4	17.8	18	16.6	16.4	18	20.7	6
<b>Na<sup>+</sup></b>	200 <sup>2</sup>	147	149	147	144	140	110	112	136	25.2	25.9
<b>K<sup>+</sup></b>		5.9	5.9	5.61	5.52	5.28	4.46	4.38	4.81	2.76	2.18
<b>Cationes trazas (µg/L)</b>											
<b>Li</b>		58,5	62,35	61,9	61,1	57,7	48,0	48,1	53,4	2,01	2,69
<b>B</b>	2400	315	330	338	324	311	264	266	298	80,0	89,9
<b>Al</b>	200*	27,2	30,3	30,6	27,9	28,3	27,4	38,1	26,1	23,9	25,7
<b>Cr</b>	50 <sup>3</sup>	0,42	0,45	0,52	0,43	0,35	0,36	0,38	0,39	0,65	1,17
<b>Fe</b>	2000 <sup>1</sup> 300 <sup>2</sup>	18	27	27	20	23	22	34	19,5	18	23
<b>Mn</b>	400 <sup>1</sup>	1,00	1,13	2,43	1,11	1,19	1,09	3,96	1,21	1,01	1,69
<b>Co</b>		0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,37	0,38	0,38	0,29	0,14
<b>Ni</b>	70	5,33	5,39	5,45	5,52	5,49	5,33	5,40	5,63	3,86	1,83
<b>Cu</b>	2000	6,97	5,06	4,10	3,62	3,73	2,87	4,94	10,5	11,9	5,38
<b>Zn</b>	3000 <sup>2</sup>	34,6	30,1	54,6	28,8	28,4	28,7	66,4	32,6	31,6	32,5
<b>As</b>	10 <sup>3</sup>	1,55	1,69	1,67	1,56	1,61	1,32	1,25	2,03	1,46	2,47
<b>Se</b>	40 <sup>3</sup>	1,23	1,34	1,86	1,43	1,25	1,10	1,15	1,18	0,74	0,53
<b>Rb</b>		10,6	11,4	11,4	11,4	11,0	8,53	8,59	9,53	0,97	1,84
<b>Sr</b>		1266	1314	1310	1321	1291	1195	1198	1196	300	215
<b>Zr</b>		0,11	0,10	0,10	0,09	0,096	0,087	0,085	0,085	0,073	0,086
<b>Mo</b>	70 <sup>1</sup>	3,67	3,74	3,82	3,70	3,78	4,38	4,16	3,42	0,43	0,47
<b>Cs</b>		3,00	3,76	3,71	3,75	3,65	2,54	2,60	2,88	0,033	0,029
<b>Ba</b>	1300	22,4	22,6	22,8	22,4	22,3	19,7	20,0	18,8	16,2	11,8
<b>Pb</b>	10 <sup>3</sup>	<0,008	<0,008	0,13	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	0,33	0,12
<b>U</b>	30 <sup>3</sup>	0,54	0,56	0,56	0,57	0,56	0,58	0,59	0,59	0,76	0,54

**Tabla 5.5** Resultados promediados de cada empresa. Se observan los valores de aniones, cationes mayores, cationes trazas y parámetros fisicoquímicos para las diez muestras obtenidas y además se señala el valor de referencia sugerido por la OMS (2017). “n” corresponde al número de muestras.

	<b>OMS (2017)</b>	<b>Aguas Andinas</b>	<b>Aguas Cordillera</b>	<b>SMAPA</b>
<b>n</b>		7	1	2
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>		120.44	129.3	121.65
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	500 <sup>1</sup> 250 <sup>2</sup>	329.57	314	124.5
<b>Cl<sup>-</sup></b>	250 <sup>2</sup>	197.43	201	61.15
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	50	2.19	4.22	16.8
<b>F<sup>-</sup></b>	1.5	0.47	0.53	< 0.03
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		174.43	171	98.4
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		17.29	18	13.35
<b>Na<sup>+</sup></b>	200 <sup>2</sup>	135.57	136	25.55
<b>K<sup>+</sup></b>		5.29	4.81	2.47
<b>Elementos menores y traza (µg/L)</b>				
<b>Li</b>		56.81	53.4	2.35
<b>B</b>	2400	306.86	298	84.95
<b>Al</b>	200*	29.97	26.1	24.80
<b>Cr</b>	50 <sup>3</sup>	0.42	0.39	0.91
<b>Fe</b>	2000 <sup>1</sup> 300 <sup>2</sup>	24.43	19.5	20.50
<b>Mn</b>	400 <sup>1</sup>	1.70	1.21	1.35
<b>Co</b>		0.39	0.38	0.22
<b>Ni</b>	70	5.42	5.63	2.85
<b>Cu</b>	2000	4.47	10.5	8.64
<b>Zn</b>	3000 <sup>2</sup>	38.80	32.6	32.05
<b>As</b>	10 <sup>3</sup>	1.52	2.03	1.97
<b>Se</b>	40 <sup>3</sup>	1.34	1.18	0.64
<b>Rb</b>		10.42	9.53	1.41
<b>Sr</b>		1270.71	1196	257.50
<b>Zr</b>		0.10	0.085	0.08
<b>Mo</b>	70 <sup>1</sup>	3.89	3.42	0.45
<b>Cs</b>		3.29	2.88	0.03
<b>Ba</b>	1300	21.74	18.8	14.00
<b>Pb</b>	10 <sup>3</sup>	0.13	< 0.008	0.23
<b>U</b>	30 <sup>3</sup>	0.57	0.59	0.65

### 5.3.1 Elementos mayores

#### ***Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ )***

Las empresas no presentan muchas diferencias entre sí: Aguas Andinas presenta una concentración promedio de 120,4 mg/L, Aguas Cordillera 129,3 y SMAPA 121,7 mg/L (**Tabla 5.5**). En Italia las concentraciones promedian 224,3 mg/L en un rango de 21,2 – 612 mg/L (Dinelli *et al.*, 2012). Por lo tanto, considerando además que no se conocen efectos negativos en la salud de este elemento, se estima que este elemento no presenta riesgos a la salud humana.

#### ***Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )***

Aguas Andinas y Aguas Cordillera presentan mayores concentraciones que SMAPA, 329,6mg/L, 314 mg/L y 124,5 respectivamente (**Tabla 5.5**). Ninguna de las muestras sobrepasa los 500 mg/L indicados por la OMS (2017) y por la NCh409 (2005). Sin embargo, todas las muestras del Grupo AC sí sobrepasan el valor señalado para evitar afectar aspectos organolépticos del agua (250 mg/L) y, por lo tanto, el agua podría presentar sabor, olor y/o color perceptible por los consumidores debido a la presencia de este componente. Se recomienda una revisión de este límite en la norma chilena y una reevaluación de la importancia que se le da a la modificación de características organolépticas y cómo afectan la aceptabilidad por parte de la población.

#### ***Cloruro ( $\text{Cl}^-$ )***

El Cloruro se encuentra en concentraciones promedio de 197,4 mg/L, 201 mg/L y 61,2 mg/L para las muestras de Aguas Andinas, Aguas Cordillera y SMAPA, respectivamente (**Tabla 5.5**). Todas las muestras se encuentran bajo el valor normado de 400 mg/L (NCh409, 2005) y, también, bajo el recomendado de 250 mg/L (OMS, 2017; US EPA, 2009; Directiva 98/83/CE) para no otorgar un sabor detectable. Sin embargo, no se puede descartar que cierta población sensible pueda sentir el sabor en algunas de las muestras del Grupo AC, dado que seis de las siete muestras superan los 200 mg/L, acercándose al valor sugerido que evita los efectos perceptibles.

#### ***Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )***

Las empresas presentan diferencias en la concentración de este componente: Aguas Andinas promedia 2,2 mg/L, Aguas Cordillera 4,2 mg/L, mientras que SMAPA 16,8 mg/L (**Tabla 5.5**). Aun así, los valores no sobrepasan el valor de 50 mg/L que recomienda la OMS (2017), mismo valor normado en Chile (NCh409, 2005) y en la Directiva 98/83/CE. El valor señalado por la EPA (2005) es de 10 mg/L medidos como nitrógeno, lo cual se traduce en 44,24 mg/L de nitrato y, por lo tanto, tampoco se sobrepasa este parámetro.

Los valores presentados por SMAPA difieren entre sí y debido a que la principal fuente de nitrato en acuíferos subterráneos son los fertilizantes, se supone que aquel con un mayor aporte de este elemento sería extraído de un pozo más somero. Así la muestra SM-10 provendría de un pozo más profundo que SM-05.

### **Fluoruro ( $F^-$ )**

El fluoruro, que es adicionado al agua con el propósito de proteger la salud dental, se encuentra en concentraciones de 0,47 mg/L en el Grupo AC y en concentraciones bajo el límite de detección (<0,03 mg/L) para SMAPA (**Tabla 5.5**). Por lo tanto, se encuentran incluso bajo la concentración recomendada para aguas fluoradas artificialmente (0,5 – 1 mg/L), así el agua que provee SMAPA se considera no fluorizada y las aguas del Grupo AC: mínimamente fluorizadas. Sin embargo, también es importante destacar que hoy en día existen distintas posiciones respecto de la fluorización del agua. Iheozor-Ejiofor et al., 2015 en una revisión sistemática de 155 artículos concluye que la fluorización sí disminuiría la aparición de caries en niños, pero que en adultos no existe suficiente información como para aseverarlo. Además, el autor indica que la mayoría de los estudios (75%) que avalan el efecto de protección fueron conducidos antes de 1975, cuando aún no se extendía el uso de pastas de dientes fluoradas.

### **Calcio ( $Ca^{2+}$ )**

Aguas Andinas presenta una concentración de 174,4 mg/L de Ca, similar al valor de Aguas Cordillera: 171 mg/L, mientras que SMAPA presenta menores concentraciones: 98,4 mg/L (**Tabla 5.5**). Para este parámetro no existe un valor máximo recomendado dado que no se ha asociado a efectos tóxicos y, por el contrario, se asocia con prevención de problemas cardíacos; sin embargo, este posible efecto aún no ha sido probado (OMS, 2017). Las concentraciones varían ampliamente: en Estados Unidos las concentraciones están en el rango de 9-60 mg/L (Azoulay et al., 2001), en Italia los valores van entre 0,1 hasta 168 mg/L, con un promedio de 62,3 mg/L (Dinelli et al., 2012); en Asia los valores van entre 2 a 80 mg/L (OMS, 2009). Por lo tanto, al comparar los valores obtenidos podemos observar que el agua muestreada presenta valores mayores a los encontrados en otros lugares, pero no se puede señalar los efectos de esta concentración en la salud humana debido a la falta de información acerca de este tema.

### **Magnesio ( $Mg^{2+}$ )**

Al igual que el calcio, este componente también ha sido asociado a efecto preventivo de enfermedades cardíacas y por el mismo motivo no hay un valor que se recomiende para este. Las concentraciones medidas son de 17,3 mg/L, 18 mg/L y 13,4 mg/L para Aguas Andinas, Aguas Cordillera y SMAPA, respectivamente (**Tabla 5.5**); es decir, las empresas no presentan grandes diferencias entre ellas. Los valores de Mg en Italia se mueven en el rango de 0,01- 56,6 con un promedio de 14,1 mg/L, en Estados Unidos van entre 5 y 29 mg/L (Azoulay et al., 2001) y en Asia se encuentran bajo los 20 mg/L (OMS, 2009). Entonces, los valores obtenidos en la Región Metropolitana se encuentran en el rango típico de concentraciones del elemento y probablemente no afecte la salud.

### **Sodio ( $Na^+$ )**

No suele encontrarse en concentraciones que podrían significar algún daño para la salud y por ello la OMS (2017) no señala un valor guía. Sin embargo, la OMS (2017) y la Directiva 98/83/CE indican que en concentraciones mayores a 200 mg/L podrían

afectar el sabor del agua y se recomienda mantener los valores bajo este límite; lo cual todas las muestras cumplen.

Por otro lado, según la OMS, el sodio se encuentra usualmente por bajo los 20 mg/L, pero en ciertas regiones pueden sobrepasar altamente este valor (OMS, 2017). En Italia se encuentra en concentraciones de entre 0,3 hasta 256,1 mg/L, con un promedio de 24,3 mg/L (Dinelli, 2012), en el Reino Unido en el rango de 1,2 a 164 mg/L, con una mediana de 18,1 mg/L, en Estados Unidos los valores se encuentran entre 0,4 hasta 1900 mg/L, pero valores sobre 20 mg/L sólo ocurren en 42% de las muestras y tan sólo 13% de las aguas presentan más de 100 mg/L (EPA, 1973). Por lo tanto, los valores encontrados en la Región Metropolitana de 25,6 mg/L de SMAPA no se escapan de los típicos valores encontrados en otros lugares del mundo (**Tabla 5.5**). Sin embargo, los valores del Grupo AC: 135,6 mg/L para Aguas Andinas y 136 mg/L para Aguas Cordillera pueden ser considerados moderadamente altos.

Según algunos autores, altas concentraciones de sodio en el agua potable pueden asociarse con problemas de hipertensión en la población, sobre todo en infantes. Tuthill y Calabrese (1979) observaron que estudiantes de una comunidad con agua de una concentración de 107 mg/L de Na mostraron un marcado aumento de presión sanguínea al compararlo con otros estudiantes que consumían agua de menores concentraciones (8 mg/L). Pomeranz et al., también señala que neonatos bebiendo concentraciones de 198 mg/L reportaron presión sanguínea significativamente más altas que los grupos de control del estudio.

Mundialmente, la hipertensión es considerada como una de las principales causas de muerte, con cerca de 9 millones de muertes por año (OMS, 2013) y en Chile aproximadamente 1 de cada 4 personas sufre de presión arterial alta. Por lo tanto, es importante considerar que las concentraciones encontradas en el agua de la Región Metropolitana podrían contribuir en un porcentaje considerable respecto a la recomendación de consumo de este elemento (la OMS recomienda consumir 2 g/día). Considerando que se consumen 2 litros de agua al día, el agua del Grupo AC aportaría aproximadamente un 14% del consumo recomendado. Dicha cifra es significativa y además es muy probable que la población consuma esta agua sin considerar este aporte. Además, este aporte podría ser considerado peligroso para población vulnerable, como aquellos con hipertensión o también infantes.

### **Potasio ( $K^+$ )**

El potasio suele encontrarse en concentraciones bajas y, al igual que con el sodio, no se han señalados concentraciones máximas. Se suele encontrar entre 0,5 a 8 mg/L, esperando un promedio de 2 mg/L (DeZuane, 1997). En Italia se encuentra en el rango de 0,1 a 30,2 mg/L, con una media de 2,6 mg/L (Dinelli, 2012). Los valores obtenidos del Grupo AC se encuentran en el mismo orden de magnitud: Aguas Andinas (5,3 mg/L) y Aguas Cordillera (4,81 mg/L). Mientras que, por otro lado, el agua de SMAPA presenta valores más bajos, promediando 2,47 mg/L (**Tabla 5.5**). Por lo tanto, no llaman la atención los valores obtenidos.

### 5.3.2 Elementos menores y traza

En general, los elementos potencialmente tóxicos para la salud humana, aquellos para los que la OMS (OMS, 2017) señala un valor de referencia máximo, se encuentran en concentraciones de órdenes de magnitud menores a las señalados por los valores guía: un orden (B, Al, Fe, Ni, As, Se, Mo), dos órdenes (Cr, Mn, Zn, Ba, Pb, U) y hasta tres órdenes de magnitud (Cu). Incluso, hubo otros elementos analizados con concentraciones bajo el límite de detección: Be, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg y W. Por lo tanto, según la información disponible actualmente, ninguno de los elementos mencionados presentaría riesgos para la salud por sí mismos. Sin embargo, también es importante recordar que se sabe muy poco acerca de posibles interacciones entre ellos.

Por otro lado, existen otros elementos para los que se desconoce los efectos que podrían tener en la salud y que las organizaciones mencionadas por este estudio no han señalado un valor máximo permitido o recomendado. Por lo tanto, a continuación, se presenta una breve evaluación estos:

#### **Litio (Li)**

SMAPA presenta menores concentraciones que el Grupo AC con 2,35 µg/L, mientras que Aguas Andinas 56,8 µg/L y Aguas Cordillera 53,4 µg/L. Las concentraciones del Grupo AC serían consideradas intermedias, mientras que las de SMAPA son bajas (Huthwaite, 2010). Se considera que este elemento en concentraciones altas (>60 µg/L) podría disminuir las tasas de suicidios, violencia y robos (Kapusta *et al*, 2011; Schrauzer y Shrestha, 1990). Ohgami *et al.* (2009) analizó valores similares a los de este estudio, en Japón, donde midió concentraciones entre 0,7 a 59 µg/l y observó una relación inversa entre las concentraciones de litio y las tasas de mortalidad por suicidio.

Considerando la diferencia de concentración medida entre el Grupo AC y SMAPA, sería interesante comprobar si se puede observar el efecto mencionado anteriormente. Verificar si en áreas suministradas por Aguas Andinas se observan menores tasas de suicidios, violencia y robos que en áreas suministrada por SMAPA, por ejemplo.

#### **Cobalto (Co)**

El cobalto suele encontrarse en concentraciones entre 1 y 2 µg/L, según la ATSDR (2004), y entre 0,1 y 5 mg/L, según Lauwerys (1994). Así, los valores medidos de cobalto se encuentran en una concentración intermedia a baja (Aguas Andinas 0,39 µg/L; Aguas Codillera 0,38 µg/L y SMAPA 0,22 µg/L). No hay información disponible acerca de concentraciones que podría provocar efectos sobre la salud y, por lo tanto, este estudio no puede concluir al acerca de la toxicidad de este componente.

#### **Rubidio (Rb)**

Para este elemento también se observan diferencias entre el Grupo AC y SMAPA, Aguas Andinas promedia 10,4 µg/L, Aguas Cordillera 9,53 µg/L, mientras que SMAPA 1,4 µg/L. En Italia se encuentra en concentraciones de 0,03 - 63 µg/L con promedio 2,8 µg/L (desviación estándar 7,3 µg/L) (Dinelli *et al.*, 2012); por otro lado, en Alemania se

promedia una concentración de  $11 \pm 8,8 \mu\text{g/L}$  ( $1,9 - 38 \mu\text{g/L}$ ) (Anke y Angelow, 1995) y en Argentina se han encontrado valores entre  $1,2 - 40 \mu\text{g/L}$  (Concha et al., 2010). Por lo tanto, los valores determinados por este estudio se encuentran dentro del rango común y, se esperaría que no generase problemas de salud.

### ***Estroncio (Sr)***

Este elemento no es normado por ninguna de las organizaciones. Sin embargo, la EPA había señalado una recomendación de  $1500 \mu\text{g/L}$  pero en el año 2016 se decide no regular este elemento en la espera de mayor cantidad de datos para determinar si se establecen límites (US GPO, 2017). En Italia se observan desde concentraciones no detectables hasta concentraciones de  $3400 \mu\text{g/L}$  con una media de  $450 \mu\text{g/L}$ , en Argentina se han medido valores del rango  $102 - 396 \mu\text{g/L}$  (Concha et al., 2010) y en Estados Unidos  $300 - 1500 \mu\text{g/L}$  (Azoulay et al., 2001).

Los valores obtenidos fueron  $257,5 \mu\text{g/L}$  (SMAPA),  $1270 \mu\text{g/L}$  (Aguas Andinas) y  $1196 \mu\text{g/L}$  (Aguas Cordillera), donde se observa diferencia entre ellos, con valores mucho mayores para el Grupo AC. Según la información que se dispone hasta el momento se desprende que este componente no generaría problemas de salud en humanos. Sin embargo, es importante recordar lo indicado por la EPA (US GPO, 2017) acerca de mantenerse a la espera de más información para determinar los efectos posibles no contemplados hasta ahora.

### ***Zirconio (Zr)***

Se midieron muy bajas concentraciones de este elemento:  $0,1 \mu\text{g/L}$  (Aguas Andinas),  $0,085 \mu\text{g/L}$  (Aguas Cordillera) y  $0,08 \mu\text{g/L}$  (SMAPA). Existe muy escasa información acerca de las concentraciones de este elemento en el agua potable y también acerca de sus efectos en la salud humana. En Italia las concentraciones medidas por Dinelli (2012) promedian  $0,0168 \mu\text{g/L}$ . Por otro lado, Schroeder y Balassa (1966) indicaron que el consumo diario de Zr es cercano a los  $3,5 \text{ mg}$ , mientras que Hamilton y Minski (1973) señalan un valor de  $53 \pm 34 \mu\text{g/día}$ . Respecto de lo anterior, Mertz (2012) señala que el segundo valor mencionado es más razonable debido a otros estudios que midieron las concentraciones de Zr en frutas, vegetales y granos.

Con la información disponible no es posible determinar si las concentraciones que se midieron son altas o son bajas, ya que no existen más valores de referencias que los reportados por Dinelli (2012). Sin embargo, si se considera un consumo de  $53 \mu\text{g/día}$  el aporte del agua es menor al 1% y podría considerarse insignificante, aunque se desconoce si por esta vía es especialmente biodisponible o no.

### ***Cesio (Cs)***

En el caso del cesio, también se midieron mayores concentraciones para las muestras del Grupo AC y menores para SMAPA, con  $3,29$  y  $2,88 \mu\text{g/L}$  para Aguas Andinas y Aguas Cordillera, respectivamente y  $0,03 \mu\text{g/L}$  para SMAPA. Existe poca información acerca de concentraciones de este elemento en agua potable y también acerca de los efectos en la salud humana. En Argentina se midieron concentraciones en el rango de  $0,03 \mu\text{g/L}$  hasta  $320 \mu\text{g/L}$  (Concha et al., 2010), por otro lado, en Italia Dinelli (2012) midió

concentraciones que promedian 0,14 µg/L (valores menores a 0,001 µg/L hasta 6,78 µg/L). Las concentraciones de este elemento suelen encontrarse bajo 1 µg/L, tanto en agua potable como en el agua del mar (Concha *et al.*, 2010; ATSDR 2004).

Así las concentraciones medidas para el Grupo AC pueden ser consideradas moderadamente altas, mientras que las de SMAPA son consideradas intermedias. Respecto de su toxicidad, con la información disponible, no se puede indicar algún efecto en la salud.

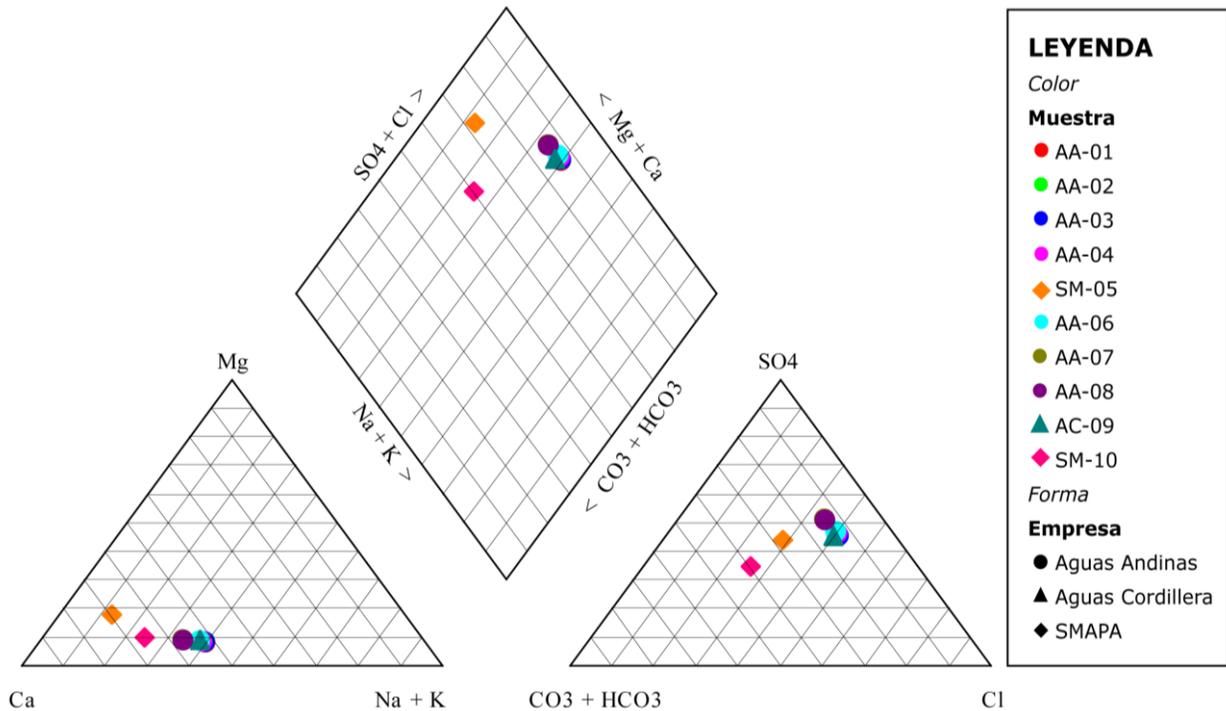
## 5.4 Clasificación de aguas

A continuación, se presentan algunas de las principales clasificaciones para aguas, según: diagrama Piper, diagrama de Stiff, conductividad eléctrica, TDS y dureza.

### 5.4.1 Diagrama Piper

En la Figura 5.1 se presenta el diagrama de clasificación Piper de las muestras analizadas en este estudio. Se puede observar que las muestras del Grupo AC presentan muy similares composiciones, mientras que las muestras de SMAPA distan entre ellas y también del resto de las muestras. A pesar de lo anterior, todas las muestras comparten ciertas tendencias: el catión predominante es el calcio, aunque el Grupo AC presenta mayor proporción de Na + K (aunque principalmente sodio) y menor de magnesio son mucho más bajas, en contraste con SMAPA.

Las muestras del Grupo AC presentes, las muestras tienen un carácter sulfatado – clorurado, con predominancia del SO<sub>4</sub>, mientras que las proporciones de bicarbonato son bajas en general. SMAPA no presenta un anión predominante, aunque se puede observar un leve carácter bicarbonatado (sulfatado) (**Figura 5.1**).

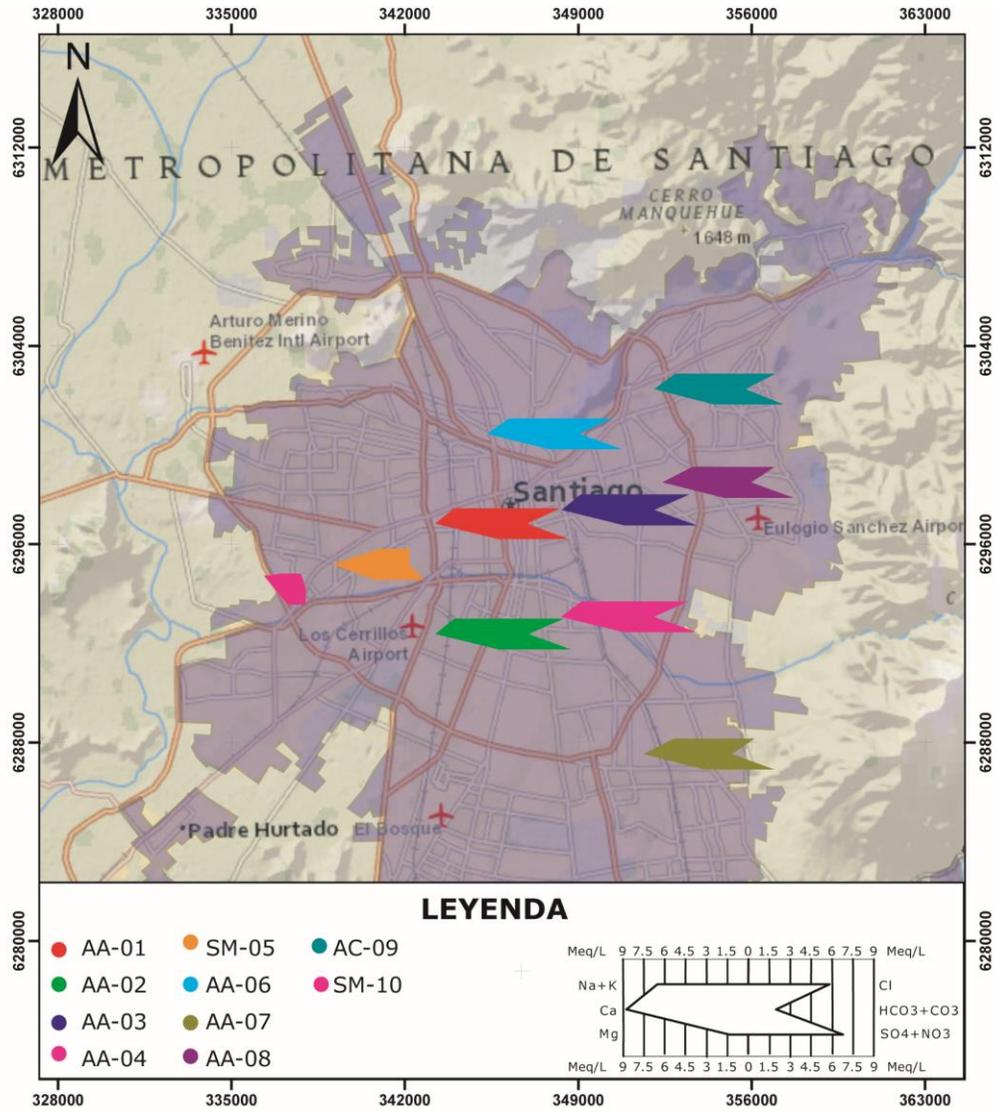


**Figura 5.1** Diagrama de clasificación Piper que muestra la composición iónica mayor de las muestras analizadas en este estudio

### 5.4.2 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff muestran gráficamente la similitud de componentes mayores de las que forman el Grupo AC y la mayor variabilidad de las muestras recolectadas de SMAPA. Se reconoce el mismo carácter observado con el diagrama Piper: aguas Sulfatadas (cloruradas) cálcicas, a excepción de la muestra SM-10 que sería considerada bicarbonatada (sulfatada) cálcica (**Figura 5.2**)

Este diagrama también nos permite observar la menor concentración mineral de las aguas de SMAPA respecto de las aguas del Grupo AC.



**Figura 5.2** Diagramas de clasificación de Stiff.

### 5.4.3 Otras clasificaciones

#### 5.4.3.1 Conductividad eléctrica

La clasificación propuesta por Van der Aa (2003) determina que 9 de las 10 muestras de aguas recolectadas corresponden a la categoría “Concentración mineral intermedia” y tan sólo la muestra VG10 que pertenece a la empresa SMAPA se clasifica como “Concentración mineral baja” (**Tabla 5.6**).

**Tabla 5.6** Clasificación de las muestras según su conductividad eléctrica, basado en la clasificación de Van der Aa (2003).

Muestra	Empresa	CE[ $\mu$ S/cm]	Clasificación
AA-01	Aguas Andinas	1598	Concentración mineral intermedia
AA-02	Aguas Andinas	1547	Concentración mineral intermedia
AA-03	Aguas Andinas	1534	Concentración mineral intermedia
AA-04	Aguas Andinas	1524	Concentración mineral intermedia
AA-06	Aguas Andinas	1594	Concentración mineral intermedia
AA-07	Aguas Andinas	1303	Concentración mineral intermedia
AA-08	Aguas Andinas	1334	Concentración mineral intermedia
AC-09	Aguas Cordillera	1460	Concentración mineral intermedia
SM-05	SMAPA	849	Concentración mineral intermedia
SM-10	SMAPA	462	Concentración mineral baja

#### 5.4.3.2 Sólidos Disueltos Totales

Según los resultados obtenidos y la clasificación propuesta por Davis and De Wiest (1966), las muestras de SMAPA pertenecen a la categoría “conveniente para su consumo”, mientras que las aguas del Grupo AC se clasifican como “aceptables para su consumo” (**Tabla 5.7**). Por lo tanto, si bien con estas clasificaciones este parámetro no presentaría riesgos a la salud, se señala que el Grupo AC podrían mejorar la calidad disminuyendo este parámetro.

El límite entre estas dos categorías mencionadas es también el valor de la norma secundaria propuesta por la EPA (2005) de 500 mg/L para evitar modificaciones en el color, olor y/o sabor del agua. Entonces, las muestras del Grupo AC sobrepasan este valor y la calidad organoléptica del agua podría verse afectada por este parámetro. La OMS (2017) indica que recién sobre los 1000 mg/L la concentración sería importante como para producir problemas de acumulación de residuos en las tuberías o hervidores u otros artefactos. Por lo tanto, el Grupo AC presentaría una mayor capacidad de mostrar este problema que SMAPA, aunque no debería ser un problema importante.

**Tabla 5.7** Conductividad eléctrica y temperaturas medidas en terreno, conductividad eléctrica a 25°C calculada, Sólidos Disueltos Totales calculados y clasificación respecto a TDS (Davis y De Wiest, 1966).

Muestra	Empresa	EC [μS/cm]	EC25 [μS/cm]	TDS (ppm)	Clasificación
AA-01	Aguas Andinas	1598	1312,27	853,0	Aceptable para consumo
AA-02	Aguas Andinas	1547	1207,87	785,1	Aceptable para consumo
AA-03	Aguas Andinas	1534	1217,69	791,5	Aceptable para consumo
AA-04	Aguas Andinas	1524	1217,14	791,1	Aceptable para consumo
AA-06	Aguas Andinas	1594	1229,89	799,4	Aceptable para consumo
AA-07	Aguas Andinas	1303	980,79	637,5	Aceptable para consumo
AA-08	Aguas Andinas	1334	1032,32	671,0	Aceptable para consumo
AC-09	Aguas Cordillera	1460	1171,38	761,4	Aceptable para consumo
SM-05	SMAPA	849	719,77	467,9	Conveniente para consumo
SM-10	SMAPA	462	396,17	257,5	Conveniente para consumo

### 5.4.3.3 Dureza

Los resultados de dureza se pueden observar en la

**Tabla 5.8.** Todas las muestras han sido clasificadas como “muy dura” y aquella que presenta la mayor dureza es VG02 (Aguas Andinas), mientras que VG10 (SMAPA) presenta la menor (

**Tabla 5.8).** Las muestras del Grupo AC (Aguas Andinas, Aguas Cordillera) presentan valores mayores (media 506 ppmCaCO<sub>3</sub>) que los de SMAPA (media 300 ppmCaCO<sub>3</sub>).

**Tabla 5.8** Concentración de calcio y magnesio (en mg/L) medida en las muestras y la dureza calculada a partir de ellos.

Muestra	Empresa	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Dureza [ppm CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación
AA-01	Aguas Andinas	175	17	506,98	Muy dura
AA-02	Aguas Andinas	178	17,8	517,77	Muy dura
AA-03	Aguas Andinas	176	17,4	511,13	Muy dura
AA-04	Aguas Andinas	177	17,8	515,27	Muy dura
AA-06	Aguas Andinas	177	18	516,09	Muy dura
AA-07	Aguas Andinas	168	16,6	487,85	Muy dura
AA-08	Aguas Andinas	170	16,4	492,03	Muy dura
AC-09	Aguas Cordillera	171	18	501,11	Muy dura
SM-05	SMAPA	132	20,7	414,85	Muy dura
SM-10	SMAPA	64.8	6	186,51	Muy dura

## 5.5 Comparación con otros valores

### 5.5.1 Reporte de la SiSS

Como se comentó en el apartado 2.5, las empresas entregan informes de calidad de agua mensual de las concentraciones medidas de los elementos normados por la NCh409 (2005). Los resultados de análisis químicos son publicados en mg/L. En el informe de junio de 2017 publicado en el sitio web de la Superintendencia, Aguas Andinas y Aguas Cordillera indican en sus resultados concentraciones medidas de 0 mg/L para todos los elementos menores y traza (excepto Zn con una concentración de 0,3 mg/L para Aguas Andinas). Por otro lado, refiriéndonos a los parámetros estudiados por este trabajo, SMAPA informa solamente acerca de fluoruro, nitrato y pH (SiSS, 2017) (**Tabla 5.9**).

Respecto de las concentraciones informadas por el Grupo AC es posible que se informen valores aproximadas al primer decimal (mg/L) y, al ser las concentraciones del agua de ordenes menor, se aproximan a 0 mg/L. Sin duda, se desconoce la información acerca de elementos menores y traza de las tres principales empresas de servicios sanitarios de la región y, también, de varios elementos mayores del agua de SMAPA. Lo anterior dificulta estudios acerca de la evolución de la calidad del agua en el tiempo y también las diferentes concentraciones entre las distintas empresas. Por lo tanto, se recomienda que la SiSS regularice la situación y se facilite la información de calidad de agua potable que debería otorgar a la población.

La Tabla 5.9 muestra las últimas mediciones con los parámetros que han sido informadas. Los valores presentados, en el caso de Aguas Cordillera, que tiene dos áreas de servicio, corresponden al promedio de las áreas. Para Aguas Andinas corresponde al área Laguna Negra dado que abastece a la Región Metropolitana. En el Caso de SMAPA, se mide fluoruro en el área Haras Figurón y el nitrato corresponde al promedio entre las áreas Maipú-Cerrillos y San José.

Las concentraciones de Aguas Andinas informadas respecto de las medidas no distan en magnitud, aunque el nitrato medido por este estudio es menor, casi la mitad, de lo informado por la empresa. Aguas Cordillera sí presenta mayores diferencias, siendo las concentraciones medidas generalmente mayores que las informadas. Sin embargo, debe tenerse en consideración que se cuenta con tan sólo 1 muestra de Aguas Cordillera (**Tabla 2.1**) la cual podría no ser representativa del agua de la empresa. En el caso de SMAPA se midieron concentraciones mucho menores que las informadas. Recordando la distinta composición iónica de estas muestras, podemos suponer que el agua de esta empresa muestra una mayor variabilidad composicional. Un ejemplo de lo anterior es el nitrato medido, que en una de las muestras fue de 22.1 mg/L y 11.5 mg/L en la otra. Por lo tanto, para comprender mejor esta situación sería conveniente llevar a cabo un estudio con un mayor número de muestras de esta empresa.

**Tabla 5.9** Concentraciones medidas e informadas a la SiSS de las empresas analizadas en este estudio, los valores corresponden al mes de mayo de este año. N.d = no determinado. \* = promedio de las concentraciones medidas en este trabajo

	<b>Aguas Andinas Junio, 2017 (SiSS, 2017)</b>	<b>Aguas Andinas Junio, 2017*</b>	<b>Aguas Cordillera Mayo, 2017 (SiSS, 2017)</b>	<b>Aguas Cordillera Junio, 2017*</b>	<b>SMAPA Junio, 2017 (SiSS, 2017)</b>	<b>SMAPA Junio, 2017*</b>
<b>Aniones Mayores (mg/L)</b>						
SO <sub>4</sub>	368	329.57	249	314	n.d	124.5
Cl <sup>-</sup>	163	197.43	122.5	201	n.d	61.15
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.00	2.19	1.5	4.22	33	16.8
F <sup>-</sup>	0.50	0.47	0.55	0.53	0.2	< 0.03
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>						
Mg	15.9	17.29	12.45	18	n.d	13.35

### 5.5.2 Reporte de estaciones de calidad de la DGA

La DGA dispone de distintos puntos de control de calidad química de agua. En particular dispone de una estación aguas abajo de la Laguna Negra (punto de reserva principal de Aguas Andinas) llamada Estación Río Yeso antes junta Río Maipo y, por cercanía, correspondería a agua de similar composición a la captada por Aguas Andinas. En la **Tabla 5.10** se presentan los valores informados por la DGA en ese punto y a modo de comparación los valores medidos de Aguas Andinas por este trabajo.

**Tabla 5.10** Valores promediados medidos de las muestras de Aguas Andinas y los valores informados por la DGA en la estación de calidad de aguas Río Yeso antes junta Río Maipo en el período otoño-invierno (octubre).

	<b>Aguas Andinas</b>	<b>Río Yeso Antes Junta Río Maipo octubre 2017 (DGA)</b>
<b>Aniones Mayores (mg/L)</b>		
SO <sub>4</sub>	329.6	299.6
Cl <sup>-</sup>	197.4	48.6
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>		
Ca	174.4	152.0
Mg	17.3	15.8
Na	135.6	48.6
K	5.3	3.2
<b>Elementos menores y traza (µg/L)</b>		
Fe	24.4	423
Mn	1.7	39

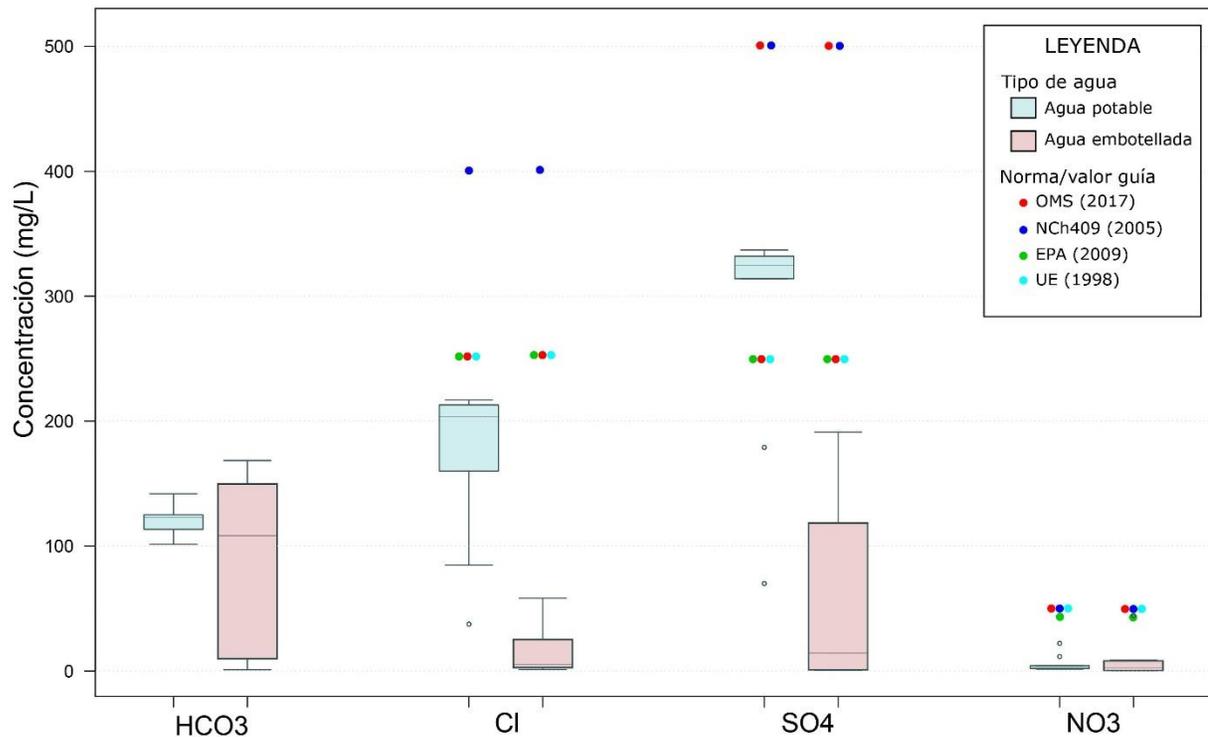
Los elementos menores muestran disminución de un orden de magnitud, el hierro pasa de 423 µg/L a 24,4 µg/L y el manganeso de 39 µg/L a 1,7 µg/L. Mientras que puede observarse que, en general, las concentraciones de los elementos mayores no varían significativamente, excepto por el cloruro que aumenta (probablemente debido a la adición de cloro como agente desinfectante) y el sodio que también aumenta. Respecto del sodio, indica la OMS (2017) que la utilización de procesos “suavizadores” de agua pueden aumentar la concentración de este elemento, al provocar un intercambio iónico entre Ca o Mg con el Na. Sin embargo, puede observarse que, por el contrario, las concentraciones de Ca y Mg también aumentan, aunque en un grado mucho menor.

Las recién mencionadas diferencias de concentraciones observadas probablemente se pueden asociar a los procesos de producción de agua potable. Cabe destacar que se desconocen los productos (aglomerantes, coagulantes y otros) que son utilizados durante estos procesos. Sería deseable que esta información se encontrara disponible con el fin de comprender cómo modifican el agua desde el momento de la captación hasta su distribución en los hogares y poder analizar acerca de la eficacia y posibles efectos secundarios de estos procesos en la composición del agua. También se recomienda revisar este proceso con el fin de determinar si es posible disminuir la adición de Na durante estos procesos en vías de disminuir el aporte diario de este elemento por consumo de agua.

### **5.5.3 Agua embotellada chilena**

Bonatici (2017) llevó a cabo un estudio de la calidad de aguas embotelladas comercializadas en el mercado chileno: Andes Mountain, Cachantún, Jahuel, Jumbo, Porvenir, Puyehue, Tottus, Vital, Benedictino y Nestlé. Las estadísticas de los resultados de este trabajo se muestran en la **Tabla 5.11**. Cabe mencionar que la calidad del agua embotellada en Chile es regulada por el Decreto 106 (MINSAL, 1997) que, como indica Bonatici (2017), presenta incongruencias respecto de la NCh409 (2005).

A continuación, se realiza una comparación de calidad de ambas aguas disponibles para la población chilena: el agua potable versus el agua embotellada. Los valores estadísticos de ambos resultados se disponen en la **Tabla 5.111** (agua embotellada) y en el **Anexo 8.4** (agua potable).



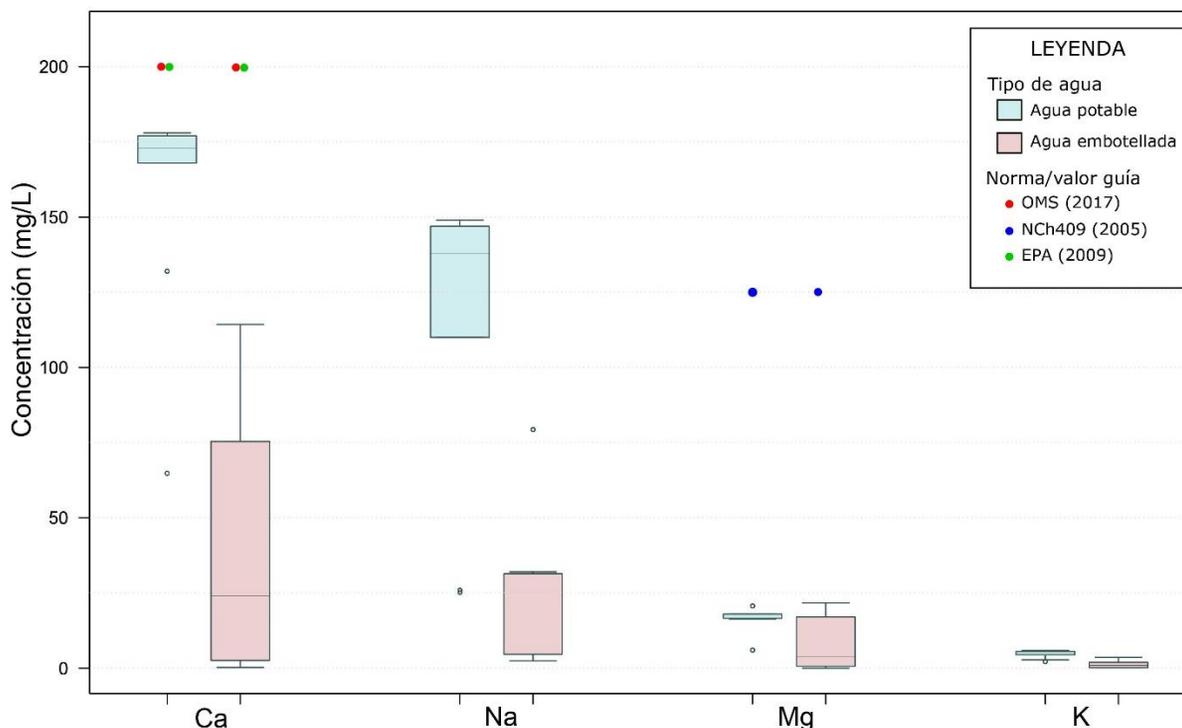
**Figura 5.3** Imagen comparativa entre la concentración de aniones presentes en agua potable versus agua embotellada. Se indican las normas analizadas por este trabajo (ver leyenda).

### Elementos mayores

En general, el agua potable presenta una concentración iónica más alta que el agua embotellada. Recordemos que las aguas de llave presentan un carácter sulfatado (clorurado) cálcica, a excepción de la muestra SM-10 que sería considerada bicarbonatada (sulfatada) cálcica; mientras que las agua embotelladas presentan mayor variabilidad, predominando tipo bicarbonatado (4 muestras) en combinación con Ca, Mg y K, seguido por sulfatado (2), clorurado (2) y otras dos muestras mixtas.

El sulfato en aguas embotelladas es considerablemente más bajo con un promedio de 56,57 mg/L (versus 287 mg/L del agua potable) y, por lo tanto, no supera el valor límite de la OMS para evitar modificar aspectos organolépticos, a diferencia del agua de llave (**Figura 5.3**). Por lo tanto, es probable que los consumidores puedan notar un mayor sabor, olor y/o color sulfatado en el agua potable a diferencia de las aguas embotelladas debido a este componente.

Además, el cloruro es más de 100 veces mayor en el agua potable que en la embotellada (**Figura 5.3**), lo cual probablemente sea atribuible a la cloración del agua de llave con fines desinfectantes a diferencia del agua embotellada. Como se mencionó anteriormente, los valores del agua potable del Grupo AC se acercan mucho al valor máximo recomendado y cierta población sensible podría sentir sabor clorurado y no así en el agua embotellada.



**Figura 5.4** Imagen comparativa entre la concentración de aniones presentes en agua potable versus agua embotellada. Se indican las normas analizadas por este trabajo (ver leyenda).

Por otro lado, el nitrato de las aguas embotelladas es moderado a excepción de la muestra de la marca Cachantún (44,26 mg/L) que supera levemente la recomendación de la EPA (2009) de 10 mg/L medido como  $N_2$  o equivalentemente 44,24 mg/L de  $NO_3$ ; a diferencia de las concentraciones encontradas en el agua potable que no superan los límites establecidos (**Figura 5.3**). EPA (2009) indica que infantes menores de 6 meses que consuman agua con concentraciones mayores al límite impuesto podrían enfermar gravemente e, incluso, morir. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente que se lleven a cabo más estudios de las aguas de esta marca y verificar si existe o no un riesgo sanitario y, de ser pertinente, tomar las medidas que sean necesarias.

El agua potable presenta una mayor concentración de cationes, principalmente Ca y Na aunque en menor medida también Mg y K, que el agua embotellada (**Figura 5.4**).

### **Elementos menores**

Las concentraciones de los componentes menores y trazas son más altas en el agua potable, salvo el arsénico. Se observan composiciones relativamente similares para B, Mn, Se, Mo y U, mientras que para el resto de los elementos (Li, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Cs, Ba) el agua embotellada presenta concentraciones significativamente menores que las del agua potable. Cabe recordar que todas las concentraciones de agua de llave se encuentran bajo los límites establecidos.

Uno de los contaminantes más relevantes para la salud humana es el arsénico. Las concentraciones del agua potable son más bajas con un máximo medido de 2,47 µg/L. Mientras que varias de las muestras de agua embotellada presentan concentraciones altas a moderadamente altas: Puyehue, Jumbo, Jahuel, Tottus y Vital concentraciones de 18,97; 12,76; 12,54; 7,09 y 6,18 µg/L, respectivamente (Bonatici, 2017). Las tres primeras sobrepasan el límite de As reconocido para agua potable por diversas normas (NCh409, 2005; EPA, 2009; OMS, 2017; Directiva 98/83/CE) de 10 µg/L. Tal como indicó Bonatici (2017) se sugiere una revisión acerca de la normativa que regula las aguas embotelladas; también señala que el Decreto 106 (MINSAL, 1997) se encuentra desactualizado ante la NCh409 (2005) y que es particularmente permisivo con As, Pb y Cd. Sin embargo, no se detectó la presencia de plomo o cadmio en ninguna muestra de agua, ni embotellada ni potable.

**Tabla 5.11** Resultados estadísticos reportados por Bonatici (2017) de 10 marcas de agua embotellada disponibles en el mercado chileno.

	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	1,02	168,49	87,93	67,77
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,44	191,3	56,57	77,82
<b>Cl<sup>-</sup></b>	1,15	58,29	15,97	19,87
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,25	44,26	7,46	13,3
<b>F<sup>-</sup></b>	0,04	0,41	0,16	0,11
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,24	114,3	35,71	40,11
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,00	21,76	8,18	9,08
<b>Na<sup>+</sup></b>	2,46	79,35	25,04	22,24
<b>K<sup>+</sup></b>	0,10	3,64	1,13	1,12
<b>Elementos menores y trazas (µg/L)</b>				
<b>Li</b>	0,06	21,91	5,18	6,73
<b>B</b>	2,46	1449,69	258,28	431,47
<b>Mn</b>	0,01	3,31	0,38	1,03
<b>Co</b>	0,02	0,16	0,06	0,05
<b>Ni</b>	0,10	1,91	0,65	0,61
<b>Cu</b>	0,2	4,14	0,72	1,23
<b>As</b>	0,06	18,97	6,15	6,64
<b>Se</b>	0,30	2,15	0,73	0,76
<b>Rb</b>	0,06	5,09	1,76	2,06
<b>Sr</b>	0,59	525,91	137,16	181,27
<b>Mo</b>	0,01	3,99	1,98	1,60
<b>Cs</b>	0,00	0,20	0,06	0,08

<b>Ba</b>	0,02	25,40	6,55	8,96
<b>U</b>	0,00	0,65	0,18	0,26
<b>Fisicoquímicos</b>				
<b>pH</b>	5,72	9,31	7,68	0,92
<b>TDS (mg/L)</b>	14,9	487,7	223,75	169,21
<b>CE (µS/cm)</b>	22,7	743,0	340,97	257,82

Por otro lado, el agua embotellada Puyehue también posee una concentración de boro que sobrepasa de manera importante el límite propuesto por la Directiva 98/83/CE de 1 mg/L, con una concentración de 1,45 mg/L. Sin embargo, no sobrepasa el límite de la OMS (2017) de 2,4 mg/L, aunque se desconoce qué efectos podría tener esta concentración en infantes.

### ***Parámetros fisicoquímicos***

Las aguas embotelladas presentan un rango más amplio de pH, con dos muestras que escapan del rango recomendado por la OMS (2017) y normado por la NCh409 (2005) y la Directiva 98/83/CE, a diferencia de las muestras de agua potable. Las marcas que no cumplen con los estándares o normas son Tottus y Nestlé, con concentraciones de 9,3 y 5,7, respectivamente. Bonatici (2017) indica que la acidez del agua Nestlé es un factor de incertidumbre en cuanto a su seguridad, dado que podría facilitar la disolución de metales del envase que lo contenga. Por otro lado, el pH se recomienda que sea menor a 8 para asegurar la desinfección con cloro, pero considerando las concentraciones de cloruro medida de la muestra de Tottus (3,64 mg/L), es probable que la desinfección se realice por otro medio. Por lo tanto, este factor podría no ser relevante en cuanto a la desinfección y se desconoce si podría tener efectos en la salud humana.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente las muestras del Grupo AC contienen altas concentraciones de sólidos disueltos que afecta aspectos organolépticos del agua, mientras que las aguas embotelladas no sobrepasan el límite de 500 mg/L con concentraciones similares a las medidas en las muestras de SMAPA. Así, estas últimas aguas presentarían una menor capacidad de generar residuos en artefactos que el Grupo AC.

### ***Costo del agua***

Otro factor por considerar es la diferencia de costos entre ambos tipos de aguas. El agua potable tiene un costo promedio de \$0,37/litro, siendo SMAPA la empresa de menor costo con \$0,276/litro y Aguas Cordillera el mayor con \$0,467/litro en hora no punta (**Tabla 5.12**). Por otro lado, el agua embotellada tiene una gran diversidad de valores. Los formatos y marcas utilizados por Bonatici (2017) van desde \$243,75/litro (Agua marca Tottus, sin gas, 1600 cc, \$390) hasta los \$990/litro (Agua marca Andes Mountain, sin gas, 1000cc, \$990). Por lo tanto, el valor del agua embotellada es entre 521 hasta 3586 veces más cara que el agua potable.

**Tabla 5.12** Precios por litro de agua de cada empresa analizada por este estudio (SiSS, 2017B)

<b>Costo por litro</b>	<b>Aguas Andinas</b>	<b>Aguas Cordillera</b>	<b>SMAPA</b>	<b>Promedio</b>
Hora punta	\$0,355	\$0,465	\$0,276	<b>\$0,37</b>
Hora no punta	\$0,355	\$0,467	\$0,276	<b>\$0,37</b>

Es decir, los consumidores de agua embotellada pagan por un agua considerablemente más cara de una calidad en general menor que la del agua potable. La principal ventaja de consumir esta agua es relativa a las cualidades organolépticas del agua, es decir, tendrían un olor, sabor y color menos perceptible que el del agua potable.

## 5.6 Marco Regulatorio

De las normas y estándares analizados por este estudio aquel propuesto por la OMS (2017) es el que incluye la mayor cantidad de parámetros y es considerada como una de las principales bases para la creación de normas de calidad de aguas. La norma chilena de calidad de aguas NCh409 (2005) no regula cinco parámetros para los que la organización sugiere y señala un valor guía (B, Ni, Ba, U y Sb) y establece valores mayores a los sugeridos para Cd y Pb. Sin embargo, para la fortuna de la salud de la población, en la Región Metropolitana todos estos elementos se encontraron bajo los límites señalados por la OMS (2017). Por lo tanto, no significaría un riesgo en el área de estudio, no obstante, se desconoce la situación del resto del país y, por lo tanto, se recomienda la revisión de la normativa con el fin de evitar problemas sanitarios a futuro.

Al respecto de los elementos no normados: la OMS (2017) establece valores guía para el B, que podría afectar el aparato reproductivo: 2400 µg/L, mientras que la Directiva 98/83/CE señala una concentración máxima de este elemento de 1000 µg/L. Ni es considerado posiblemente cancerígeno y la OMS (2017) señala una concentración máxima de 70 µg/L y la Directiva 98/83/CE 20 µg/L. El Ba es de baja preocupación toxicológica, pero se señala un valor guía de 1300µg/L por la OMS (2017) y de 2000 µg/L por la EPA (2009). El U ha sido asociado a cáncer, principalmente en riñones, y se establece un valor guía provisorio de 30 µg/L, este valor de provisorio debido a incertezas científica, la EPA (2009) adopta el mismo límite. Por último, el Sb tiene un valor guía de 20µg/L, aunque la EPA (2009) y Directiva 98/83/CE permiten valores menores a tal recomendación: 6 y 5 µg/L, respectivamente.

Además, tampoco existen regulaciones para otros elementos que son considerados por otras normativas (EPA, 2009; Directiva 98/83/CE) o que la OMS (2017) señala recomendaciones, pero no señala un valor guía por distintos motivos (incertezas en las dosis riesgosas, usualmente se encuentran en concentraciones no importantes, entre otros motivos). Estos elementos son: Be (OMS, 2017; EPA, 2009), Al (OMS, 2017; EPA, 2009; Directiva 98/83/CE), Mo (OMS, 2017) y Ag (OMS, 2017).

Por otro lado, la norma chilena (NCh409, 2005) señala un valor máximo de Cd de 10 µg/L, mientras la OMS indica 3µg/L, aunque la EPA (2009) y la Directiva 98/83/CE

recomiendan 5µg/L. Este elemento es considerado como uno importante dentro de los potencialmente tóxicos y, aunque las empresas analizadas no se tengan altas concentraciones, puede ocurrir en otros suministros. La situación es similar con el Pb, también considerado un importante agente tóxico que puede provocar graves problemas cardiovasculares y neurológicos. La OMS (2017) sugiere una máxima concentración de 10 µg/L, pero en Chile se permite hasta 50 µg/L.

Como se mencionó anteriormente, la concentración máxima permitida de sulfato se encuentra sobre la recomendación efectuada por la OMS (2017) para evitar evitar modificar aspectos organolépticos (250 mg/L) y fija aquella recomendada para evitar riesgos de salud (500 mg/L). Lo anterior permite que las concentraciones se encuentren sobre los 250 mg/L, provocando características perceptibles.

Por lo tanto, se sugiere una revisión de la normativa con el fin de analizar la incorporación de los elementos no considerados y para la actualización de los valores de otros elementos con el fin de alcanzar los estándares internacionales. También se recomienda reevaluar la importancia de las características organolépticas del agua dado que impactan en la elección de agua en la población y así evitar el consumo de aguas embotelladas, que, presentaría concentraciones más riesgosas de ciertos elementos a un precio más alto.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES**

El presente estudio llevó a cabo un análisis químico con el fin de determinar la calidad del agua potable distribuida por las principales empresas de servicios sanitarios de la provincia de Santiago. Las conclusiones son expuestas a continuación:

El agua de la Región Metropolitana presenta distintas características dependiendo de la empresa proveedora del servicio. Las aguas son de tipo Sulfatadas (cloruradas) cálcicas, a excepción de una muestra de SMAPA clasificada como bicarbonatada (sulfatada) cálcica. Las aguas del Grupo denominado AC: Aguas Andinas y Aguas Cordillera presentan concentraciones muy similares para la gran mayoría de los parámetros medidos y presentan muy baja variabilidad entre ellas también; estos valores distan de los medidos en SMAPA, donde además sus dos muestras presentan concentraciones distintas entre ellas.

En general, las empresas del Grupo AC poseen una mayor concentración iónica que SMAPA, lo cual puede verse reflejado en la conductividad eléctrica medida y en los sólidos disueltos totales (TDS) y dureza calculados. Lo anterior no afectaría a la salud de los consumidores, sin embargo, podría afectar en la formación de residuos en el sistema distribuidor o artefactos como hervidores o teteras. Por otro lado, el pH se encuentra en un rango acotado, con media 7,66; que se sitúa dentro de las normas y estándares analizados. El potencial REDOX medido se encuentra bajo el mínimo típicamente recomendado de 650 mV y dado que este parámetro se asocia con el grado de desinfección, se recomienda estudiar esta relación en mayor detalle.

Desde el punto de vista químico todas las muestras de agua extraídas por este estudio, de acuerdo con la información científica toxicológica disponible en la actualidad, no presentarían riesgo sanitario alguno para la población que la consume. Sin embargo, el Grupo AC presenta concentraciones moderadamente altas de  $\text{SO}_4^{2-}$  (327 mg/L) y de Cl<sup>-</sup> (197 mg/L), lo cual podría otorgarle características organolépticas apreciables y, por lo tanto, podría afectar la aceptabilidad. El F<sup>-</sup> medido indica el Grupo AC presenta una muy baja fluorización con 0,477 mg/L, concentración bajo el nivel recomendado para fluorización de aguas (0,5 - 1 mg), mientras que SMAPA no presenta concentraciones detectables. El Na<sup>+</sup> del Grupo AC es moderadamente alto, con una media de 135,6 mg/L, por lo tanto, beber 2 litros diarios de agua aportaría un 14% de la ingesta recomendada por la OMS. Aporte posiblemente riesgoso para población vulnerable como infantes o personas hipertensas.

Respecto de los constituyentes menores o trazas, se tienen en concentraciones de órdenes de magnitud menores bajo los valores guía: un orden (B, Al, Fe, Ni, As, Se, Mo), dos órdenes (Cr, Mn, Zn, Ba, Pb, U) y hasta tres órdenes de magnitud (Cu). Además, algunos elementos no alcanzaron a ser detectados: Be, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg y W. Se concluye, entonces, que no existiría ningún elemento alarmante que pudiese considerarse tóxico y, según la información disponible, todas las aguas serían aceptables para su consumo sin efectos secundarios en la salud.

Los valores obtenidos por este estudio fueron comparados con distintos valores disponibles. En primer lugar, se comparó con los valores informados a la SiSS, en segundo lugar, con aquellos registrados por la DGA de un punto de monitoreo cercano al

punto de captación de Aguas Andinas y, por último, con las concentraciones de agua embotelladas. Los resultados de este estudio no difieren de manera importante con los informados a la SiSS, aunque en general se informa tan solo algunos de los parámetros normados ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$  y  $\text{Mg}^+$  el Grupo AC y tan solo  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{F}^-$  en el caso de SMAPA). Se recomienda que la SiSS regularice la situación y facilite la información de calidad de aguas que debiese otorgar. Por otro lado, los resultados de Aguas Andinas son en general similares a los registrados por la DGA, aunque difieren de manera importante en  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$ . El cloruro es probablemente efecto de la adición de cloro con fines desinfectantes, mientras que el aumento de sodio probablemente se relaciona al proceso de potabilización del agua. Se sugiere que la información acerca de los procesos de potabilización utilizados por cada empresa, con el fin de evaluar cómo afectan la calidad final del agua.

La comparación de agua potable versus agua embotellada señala que, considerando la información toxicológica de la que se dispone actualmente, el agua potable sería más segura que la mayoría de las aguas embotelladas. Mientras el agua potable no sobrepasa ninguna recomendación o norma de calidad para la salud, varias marcas de agua embotellada presentan importantes concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ : Cachantún; As: Puyehue, Jumbo, Jahuel, Tottus y Vital (las tres primeras sobrepasan el límite permitido para agua potable); B: Puyehue y pH: Tottus y Nestlé. Aunque, por otro lado, el agua potable contiene importantes concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  que afecta el sabor, olor o color del agua, lo cual podría afectar la aceptabilidad por parte de los consumidores. Además, también contiene una mayor concentración iónica que afecta en la formación de residuos en hervidores, tetera, artefactos de plomería u otros. Por último, cabe señalar la diferencia de precios entre las aguas: el valor del agua embotellada es entre 521 hasta 3586 veces más cara que el agua potable. Así, los consumidores de agua embotellada pagan un valor mucho más alto por un agua que, en general, es de menor calidad que la que tienen a disposición desde sus mismos hogares.

Se propone una revisión de la normativa actual de calidad de agua potable con el fin de evitar posibles problemas futuros de salud pública. Se sugiere revisar los elementos no regulados por la actual norma NCh409 (2005): B, Ni, Ba, U y Sb y aquellos con límites superiores a los sugeridos por diversos organismos: Cd y Pb. También se sugiere revisar la norma que rige la calidad de las aguas embotelladas, Decreto 106 (MINSAL, 1997), con el fin de abordar las incongruencias entre esta y la NCh409 (2005). Respecto de la concentración máximas permtidas para  $\text{SO}_4$ , se propone reevaluar la importancia de las características organolépticas del agua dado que impactan en la aceptabilidad del agua.

Finalmente, se sugiere complementar este estudio tomando una mayor cantidad de datos de SMAPA y Aguas Cordillera. También se recomienda llevar a cabo estudios de calidad de aguas del resto de las empresas de servicios sanitarios no contempladas por este estudio.

## CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2004. - Public Health Statement: Cobalt. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp33.pdf>

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). 2004. Public Health Statement: Cesium. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=575&tid=107>

AGUAS ANDINAS. 2017. Captación. Disponible en: <https://www.aguasandinas.cl/la-empresa/que-hacemos/captacion>

ALI, H., KHAN, E., & SAJAD, M. A. 2013. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.

ANKE, M., & ANGELOW, L. 1995. Rubidium in the food chain. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 352(1), 236-239.

ARANEDA M., AVENDAÑO M., DEL RÍO G., 2010. Modelo Estructural de la Cuenca de Santiago de Chile y su relación con la hidrología. *Revista de Geofísica* pp 29-48.

AZOULAY, A., GARZON, P., & EISENBERG, M. J. 2001. Comparison of the mineral content of tap water and bottled waters. *Journal of General Internal Medicine*, 16(3), 168-175.

BARTRAM, J., & BALLANCE, R. (EDS.). 1996. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. CRC Press.

BENNETT, B., REPACHOLI, M., & CARR, Z. 2006. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. In Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Health”. Geneva: World Health Organization.

BONATICI, GIUSEPPE. 2017. *El Agua que bebemos*. Memoria de título, Universidad de Chile.

BRÜGGEN, J. 1950. *Fundamentos de la Geología de Chile*: Santiago. Chile, Instituto Geográfico Militar.

CLESCERL, C., GREENBERG, A., & EATON, A. 1999. *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th edition* (Washington, DC: American Public Health Association).

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 2017. *Resumen Diagnóstico Ambiental de Recursos Hídricos en la Región Metropolitana de Santiago*. Disponible en: <http://www.sinia.cl/1292/article-39509.html>.

COMUNIDAD EUROPEA (CE). 1998. Directiva 98/83/CE del Consejo, 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 330, 32-54.

CONCHA, G., BROBERG, K., GRANDÉR, M., CARDOZO, A., PALM, B., & VAHTER, M. 2010. High-level exposure to lithium, boron, cesium, and arsenic via drinking water in the Andes of northern Argentina. *Environmental science & technology*, 44(17), 6875-6880.

DAVIS, S. N., & DE WIEST, R. J. M. 1966. *Hydrogeology* (Vol. 463).

DEZUANE, J. 1997. *Handbook of drinking water quality*. John Wiley & Sons.

DIRECCIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA DEL INSTITUTO DE NUTRICIÓN Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS (DINTA). 2010. Documentos de interés. [en línea] <http://www.dinta.cl/wp-dintacl/wp-content/uploads/Encuesta-Nacional-de-Salud-2010.pdf>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2017. *National Primary Drinking Water Regulations*. Disponible en: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations> [Consulta 21 de agosto, 2017]

FARÍAS, M., COMTE, D., & CHARRIER, R. 2006. Sismicidad superficial en Chile central: Implicancias para el estado cortical y crecimiento de los Andes Centrales australes. In Congreso Geológico Chileno (No. 11, pp. 403-406).

FLATEN, T. P. 2001. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain research bulletin*, 55(2), 187-196.

FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*, 604 pp.

GONCHARUK, V. V., BAGRII, V. A., MEL'NIK, L. A., CHEBOTAREVA, R. D., & BASHTAN, S. Y. 2010. The use of redox potential in water treatment processes. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(1), 1-9.

GRAY, N. F. 2008. *Drinking water quality: problems and solutions*. Cambridge University Press.

GÜLER, C. 2007. Characterization of Turkish bottled waters using pattern recognition methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 86(1), 86-94.

HAYASHI, M. 2004. Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental monitoring and assessment*, 96(1), 119-128.

HEM, J. D. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.

IHEOZOR-EJIOFOR, Z., WORTHINGTON, H. V., WALSH, T., O'MALLEY, L., CLARKSON, J. E., MACEY, R., & GLENNY, A. 2015. Water fluoridation to prevent tooth decay. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 6.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). 2017. [en línea] <http://www.ine.cl/prensa/detalle-prensa/2017/08/31/segun-cifras-preliminares-del-censo-2017-poblacion-censada-en-chile-llega-a-17373831-personas>

KAPUSTA, N. D., MOSSAHEB, N., ETZERSDORFER, E., HLAVIN, G., THAU, K., WILLEIT, M., ... & LEITHNER-DZIUBAS, K. 2011. Lithium in drinking water and suicide mortality. *The British Journal of Psychiatry*, 198(5), 346-350.

KERMANSHAHI, K. Y., TABARAKI, R., KARIMI, H., NIKORAZM, M., & ABBASI, S. 2010. Classification of Iranian bottled waters as indicated by manufacturer's labellings. *Food chemistry*, 120(4), 1218-1223.

LAUWERYS, R., & LISON, D. 1994. Health risks associated with cobalt exposure—an overview. *Science of the Total Environment*, 150(1-3), 1-6.

MAYS, L. W. (ED.). 1999. *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing.

MELNIKOV, P., & ZANONI, L. Z. 2010. Clinical effects of cesium intake. *Biological trace element research*, 135(1-3), 1-9.

MEMON, A. R., & SCHRÖDER, P. (2009). Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(2), 162-175.

MERTZ, W. (2012). *Trace elements in human and animal nutrition* (Vol. 2). Elsevier.

MULLER-QUERNHEIM J 2005 Chronic beryllium disease. Orphanet.

NORMA CHILENA (NCH) 3197. 2010. Tuberías y accesorios para agua potable y alcantarillado - Manipulación, transporte y almacenamiento. Disponible en: [www.siss.gob.cl/577/articles-5853\\_Nch3197.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-5853_Nch3197.pdf)

NORMA CHILENA (NCH) 409. 2005. Agua Potable Decreto Exento N°446. Diario Oficial N°38.498.

OHGAMI, H., TERAQ, T., SHIOTSUKI, I., ISHII, N., & IWATA, N. 2009. Lithium levels in drinking water and risk of suicide. *The British Journal of Psychiatry*, 194(5), 464-465.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) 1971. *International standards for drinking-water*.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 2009. Calcium and magnesium in drinking-water: public health significance. *Organización mundial de la salud*.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 2011. Guidelines for drinking-water quality. *Organización mundial de la salud*, 216, 303-4.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 2013. Información general sobre la hipertensión en el mundo. Día mundial de la Salud 2013. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/pr84/es/>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

POMERANZ, A., DOLFIN, T., KORZETS, Z. E., ELIAKIM, A., & WOLACH, B. 2002. Increased sodium concentrations in drinking water increase blood pressure in neonates. *Journal of hypertension*, 20(2), 203-207.

ROMERO, V., NORRIS, F. J., RÍOS, J. A., CORTÉS, I., GONZÁLEZ, A., GAETE, L., & TCHERNITCHIN, A. N. 2017. Consecuencias de la fluoración del agua potable en la salud humana. *Revista médica de Chile*, 145(2), 240-249.

SAINDON, R., & WHITWORTH, T. M. 2005. Hyperfiltration of NaCl solutions using a simulated clay/sand mixture at low compaction pressures. *Aquatic geochemistry*, 11(4), 433-444.

SCHRAUZER, G. N., & SHRESTHA, K. P. 1990. Lithium in drinking water and the incidences of crimes, suicides, and arrests related to drug addictions. *Biological Trace Element Research*, 25(2), 105-113.

SCHROEDER, H. A., & BALASSA, J. J. 1966. Abnormal trace metals in man: zirconium. *Journal of chronic diseases*, 19(5), 573-586.

SERVICIO MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO (SMAPA). 2017. Calidad del agua. Disponible en: <http://www.smapa.cl/100-calidad/>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL (SINIA) 2017. Acceso al Agua Potable y Alcantarillado. Disponible en: <http://www.sinia.cl/1302/w3-propertyvalue-16508.html>

SKOUGSTADT, M. W., & HERR, C. A. 1960. Occurrence of strontium in natural water: US Geol. Survey Circ, 420(6), 1963.

SMITH, A. H., ARROYO, A. P., MAZUMDER, D. N., KOSNETT, M. J., HERNANDEZ, A. L., BEERIS, M., ... & MOORE, L. E. 2000. Arsenic-induced skin lesions among Atacameño people in Northern Chile despite good nutrition and centuries of exposure. *Environmental Health Perspectives*, 108(7), 617.

SMITH, A. H., GOYCOLEA, M., HAQUE, R., & BIGGS, M. L. 1998. Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water. *American journal of epidemiology*, 147(7), 660-669.

- SOLUTIONS, L. W. T. 2012. Calculadora de precisión de análisis de agua. Disponible en: <http://www.lenntech.com/calculators/accuracy/accuracy-water-analysis.htm>
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SiSS). 2017a. Calidad de agua potable. Disponible en: <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3525.html>
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SiSS). 2017b. Informe de cobertura sanitaria. Disponible en: [http://www.siss.gob.cl/577/articles-16607\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-16607_recurso_1.pdf)
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SiSS). 2017c. Agua potable y alcantarillado. Disponible en: <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-8579.html>
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SiSS). 2017d. Tarifas vigentes. Disponible en: <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3512.html>
- THIELE, R. (1980). Hoja Santiago. Carta GeoloÁgica de Chile, Escala 1: 250 000. Instituto de Investigaciones Geol3gicas. Santiago, 39, 21.
- TUTHILL, R. W., & CALABRESE, E. J. 1979. Elevated sodium levels in the public drinking water as a contributor to elevated blood pressure levels in the community. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 34(4), 197-203
- UNITED NATIONS (UN). 2017. Human right to water and sanitation. Disponible en: [http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human\\_right\\_to\\_water\\_and\\_sanitation\\_media\\_brief\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_spa.pdf)
- UNITED STATES GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE (US GPO). 2017. Disponible en: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2016-01-04/html/2015-32760.htm>
- VAN DER AA, M. 2003. Classification of mineral water types and comparison with drinking water standards. *Environmental Geology*, 44(5), 554-563.
- WATER QUALITY ASSOCIATION (WQA). 2017. Scale deposits. Disponible en: <https://www.wqa.org/learn-about-water/perceptible-issues/scale-deposits>
- WATTS, P., & HOWE, P. 2010. Strontium and strontium compounds (No. 77). World Health Organization.
- WEI, S., & ZHOU, Q. 2008. Trace elements in agro-ecosystems. Trace elements as contaminants and nutrients—consequences in ecosystems and human health. Wiley, New Jersey, USA, 55-80.
- ZAGORY, D. (2000). Wash water sanitation: how do I compare different systems. In 16th Annual Post Harvest Conference & Trade Show, March (pp. 14-15).

## CAPITULO 8. ANEXOS

**Tabla 8.1** Instrumento y límites de detección de los componentes medidos por este trabajo.

Instrumento		Límite de detección	Unidad	
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	Cromatógrafo Iónico 861 Advanced Compact IC Metrohm	0.07	mg/L	
<b>Cl<sup>-</sup></b>		0.03	mg/L	
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>		0.1	mg/L	
<b>F<sup>-</sup></b>		0.03	mg/L	
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>				
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>				
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	Espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, ICP-OES, Perkin Elmer Precisely Optima 7300 V	0.014	mg/L	
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		0.001	mg/L	
<b>Na<sup>+</sup></b>		0.094	mg/L	
<b>K<sup>+</sup></b>		0.044	mg/L	
<b>Li</b>		0.02	µg/L	
<b>B</b>		0.07	µg/L	
<b>Al</b>		0.06	µg/L	
<b>Cr</b>		0.02	µg/L	
<b>Fe</b>		1	µg/L	
<b>Mn</b>		0.004	µg/L	
<b>Co</b>		0.005	µg/L	
<b>Ni</b>		0.03	µg/L	
<b>Cu</b>		Espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q.	0.05	µg/L
<b>Zn</b>			0.2	µg/L
<b>As</b>			0.02	µg/L
<b>Se</b>			0.06	µg/L
<b>Rb</b>			0.001	µg/L
<b>Sr</b>			0.001	µg/L
<b>Zr</b>			0.002	µg/L
<b>Mo</b>	0.002		µg/L	
<b>Cs</b>	0.0004		µg/L	
<b>Ba</b>	0.01		µg/L	
<b>Pb</b>	0.002	µg/L		
<b>U</b>	0.0002	µg/L		

**Tabla 8.2** Número de muestras de agua potable que no cumplen con la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). <sup>1</sup> = no corresponden a valores de referencia, si no a recomendaciones. <sup>2</sup> = incluidas en la norma secundaria de calidad de aguas, elementos no tóxicos, <sup>3</sup> = valor que no representa daños tras el consumo en el largo plazo, <sup>4</sup> = nitrato medido como N<sub>2</sub>.

	<b>OMS (2017)</b>	<b>NCH409/1 (2005)</b>	<b>EPA (2009)</b>	<b>Directiva 98/83/CE</b>
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0 <sup>1</sup> 8 <sup>2</sup>	0	8 <sup>2</sup>	8 <sup>2</sup>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0 <sup>2</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0	0	10 <sup>4</sup>	0
<b>F<sup>-</sup></b>	0	0	0 0 <sup>2</sup>	0
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-	0	-	-
<b>Na<sup>+</sup></b>	0 <sup>2</sup>	-	-	0 <sup>2</sup>
<b>Cationes trazas (µg/L)</b>				
<b>B</b>	0	-	-	0
<b>Al</b>	0 <sup>*</sup>	-	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Cr</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>Fe</b>	0 <sup>1</sup> 0 <sup>2</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Mn</b>	0 <sup>1</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Ni</b>	0	-	-	0
<b>Cu</b>	0	0	0 0 <sup>2</sup>	0
<b>Zn</b>	0 <sup>2</sup>	0	0	-
<b>As</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>Se</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>Mo</b>	0 <sup>1</sup>	-	-	-
<b>Ba</b>	0	-	0	-
<b>Pb</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>U</b>	0 <sup>3</sup>	-	0	-
<b>Fisicoquímicos</b>				
<b>pH</b>	0	0	0	0
<b>TDS (mg/L)</b>	-	0	0 <sup>2</sup>	-
<b>CE (µS/cm)</b>	-	-	-	0

**Tabla 8.3** Número de muestras de agua embotellada que no cumplen con la norma chilena de calidad de agua potable (NCh409), valores de referencia de la Guía de calidad de Aguas Potable de la OMS, valores normados por la Comunidad Europea (Directiva 98/83/CE) y los valores normados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U (EPA, 2012). <sup>1</sup> = no corresponden a valores de referencia, si no a recomendaciones. <sup>2</sup> = incluidas en la norma secundaria de calidad de aguas, elementos no tóxicos, <sup>3</sup> = valor que no representa daños tras el consumo en el largo plazo, <sup>4</sup> = nitrato medido como N<sub>2</sub>. Valores extraídos de Bonatici (2017)

	<b>OMS (2017)</b>	<b>NCH409 (2005)</b>	<b>EPA (2009)</b>	<b>Directiva 98/83/CE</b>
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0 <sup>1</sup> 0 <sup>2</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0 <sup>2</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0	0	1 <sup>4</sup>	0
<b>F<sup>-</sup></b>	0	0	0 0 <sup>2</sup>	0
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-	0	-	-
<b>Na<sup>+</sup></b>	0 <sup>2</sup>	-	-	0 <sup>2</sup>
<b>Elementos menores y trazas (µg/L)</b>				
<b>B</b>	0	-	-	1
<b>Al</b>	0*	-	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Cr</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>Fe</b>	0 <sup>1</sup> 0 <sup>2</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Mn</b>	0 <sup>1</sup>	0	0 <sup>2</sup>	0 <sup>2</sup>
<b>Ni</b>	0	-	-	0
<b>Cu</b>	0	0	0 0 <sup>2</sup>	0
<b>Zn</b>	0 <sup>2</sup>	0	0	-
<b>As</b>	3 <sup>3</sup>	3	3	3
<b>Se</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>Mo</b>	0 <sup>1</sup>	-	-	-
<b>Ba</b>	0	-	0	-
<b>Pb</b>	0 <sup>3</sup>	0	0	0
<b>U</b>	0 <sup>3</sup>	-	0	-
<b>Fisicoquímicos</b>				
<b>pH</b>	2	2	2	1
<b>TDS (mg/L)</b>	-	0	0 <sup>2</sup>	-
<b>CE (µS/cm)</b>	-	-	-	0

**Tabla 8.4** Resultados estadísticos de 10 muestras de agua potable colectadas en la Región Metropolitana.

	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
<b>Aniones (mg/L)</b>				
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	101,40	141,90	121,57	10,90
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	70,00	337,00	287,00	89,65
<b>Cl<sup>-</sup></b>	37,50	217,00	170,53	62,17
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	1,59	22,10	5,317	6,59
<b>F<sup>-</sup></b>	0,00	0,53	0,38	0,20
<b>Cationes mayores (mg/L)</b>				
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	64,80	178	158,88	35,75
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	6,00	20,7	16,57	3,90
<b>Na<sup>+</sup></b>	25,20	149	113,61	48,45
<b>K<sup>+</sup></b>	2,18	5,9	4,68	1,29
<b>Cationes trazas (µg/L)</b>				
<b>Li</b>	2,01	62,35	45,58	23,37
<b>B</b>	80,00	338	261,59	96,33
<b>Mn</b>	1,00	3,96	1,58	0,94
<b>Co</b>	0,14	0,41	0,36	0,08
<b>Ni</b>	1,83	5,63	4,92	1,20
<b>Cu</b>	2,87	11,9	5,91	3,03
<b>As</b>	1,25	2,47	1,66	0,36
<b>Se</b>	0,53	1,86	1,18	0,36
<b>Rb</b>	0,97	11,4	8,53	3,92
<b>Sr</b>	215	1321	1060,60	426,66
<b>Mo</b>	0,43	4,38	3,16	1,45
<b>Cs</b>	0,029	3,76	2,60	1,43
<b>Ba</b>	11,8	22,8	19,90	3,57
<b>U</b>	0,54	0,76	0,59	0,06
<b>Fisicoquímicos</b>				
<b>pH</b>	7,53	7,92	7,66	0,12
<b>TDS</b>	180,72	477,04	338,97	82,34
<b>EC</b>	462	1598	1320,5	355,56