



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DUREZA EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y USO INDUSTRIAL,
IMPACTOS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN. ESTUDIO DE CASO: CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

MARCO ANTONIO NEIRA GUTIÉRREZ.

**PROFESOR GUÍA:
ANA MARÍA SANCHA FERNANDEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
GERARDO AHUMADA THEODOLUZ
FERNANDO HIDALGO TAPIA**

**SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2006**

INDICE DE CAPÍTULOS

	Página
CAPÍTULO I:	
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO II:	
ANTECEDENTES GENERALES SOBRE LA DUREZA EN AGUAS.	4
2.1 DEFINICIÓN Y ORIGEN DE LA DUREZA EN AGUAS.	5
2.2 CLASIFICACIONES DE LA DUREZA EN AGUAS.	7
2.2.1 Clasificación de la dureza según aniones asociados al calcio y magnesio.	7
2.2.2 Clasificación de aguas según grado de dureza.	7
2.3 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE DUREZA.	8
CAPÍTULO III:	
IMPACTOS DE LA PRESENCIA DE DUREZA EN AGUAS.	10
3.1 IMPACTOS GENERALES DE AGUAS DURAS Y BLANDAS.	11
3.1.1 Impactos del Agua Dura.	11
3.1.2 Impactos del Agua Blanda.	12
3.2 IMPACTOS EN LA SALUD.	13
3.2.1 Dureza del agua y enfermedades Cardiovasculares.	14
3.2.2 Dureza del agua y litiasis urinaria.	16
3.2.3 Dureza de agua y otras enfermedades.	17
3.3 IMPACTOS EN USO INDUSTRIAL.	18
3.4 IMPACTOS EN EL USO EN RIEGO.	19
CAPÍTULO IV:	
NORMATIVAS SOBRE DUREZA, CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO.	21
4.1 ANTECEDENTES DE LA NORMATIVA VIGENTE.	22
4.2 COMPARACIÓN DE LAS NORMAS INTERNACIONALES DE CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO.	23

	Página
CAPITULO V:	
PROCESOS DE REMOCIÓN DE DUREZA DE LAS AGUAS.	26
5.1 ANTECEDENTES DEL ABLANDAMIENTO.	27
5.2 TRATAMIENTOS BÁSICOS PARA LA REMOCIÓN DE LA DUREZA.	28
5.2.1 Proceso Cal – Carbonato (o Cal – Soda).	28
5.2.2 Intercambio Iónico.	30
5.3 TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA LA REMOCIÓN DE DUREZA.	34
5.3.1 Procesos de Membranas.	34
5.3.2 Evaporación – Condensación.	36
5.3.3 Efecto del Campo Magnético.	36
CAPITULO VI:	
ESTUDIO DE CASO: DUREZA EN AGUAS CHILENAS.	39
6.1 ANTECEDENTES DE DUREZA, CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO EN CHILE.	39
6.1.1 Dureza, Calcio y Magnesio en el Agua Potable.	39
6.1.2 Dureza, Calcio y Magnesio en el Agua Mineral.	54
6.2 IMPACTOS EN LA SALUD DEBIDO A LA DUREZA EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO EN CHILE.	67
6.3 IMPACTOS DE LA DUREZA EN AGUAS DE USO INDUSTRIAL Y AGRICOLA EN CHILE.	69
6.3.1 Antecedentes.	69
6.3.2 Dureza en aguas en el uso industrial en Chile.	71
6.3.3 Dureza en aguas en el uso agrícola en Chile.	75
6.4 REMOCIÓN DE LA DUREZA EN CHILE.	76
CAPITULO VII:	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	79
7.1 CONCLUSIONES.	80
7.2 RECOMENDACIONES.	82
CAPÍTULO VIII:	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	83

ANEXOS

- Anexo 1:** Clasificación según los niveles de la Dureza por CaCO_3 en el Agua.
- Anexo 2:** Consumo diarios recomendados para el Calcio y el Magnesio.
- Anexo 3:** Concentraciones límites permisibles de sustancias en el agua mineral.
- Anexo 4:** Fuentes de Abastecimiento de las Empresas Sanitarias al 31 de diciembre del 2004.
- Anexo 5:** Datos de Concentraciones de Dureza Total, Calcio y Magnesio a nivel comunal.
- Anexo 6:** Clasificación según el nivel de Dureza en el agua potable, a nivel comunal a lo largo del país.
- Anexo 7:** Propiedades fisicoquímicas de las Aguas Minerales.
- Anexo 8:** Concentraciones Calcio y Magnesio de fuentes superficiales.

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1: Clasificación de aguas según el grado de dureza.	7
Tabla 2.2: Propuesta de Clasificación de aguas chilenas, según el grado de dureza.	8
Tabla 4.1: Contenidos máximos permisibles de dureza, calcio y magnesio en el agua potable.	24
Tabla 5.1: Solubilidades del Carbonato de Calcio e Hidróxido de Magnesio, como función de la Temperatura y el pH.	29
Tabla 6.1: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de dureza total en el agua potable en Chile.	48
Tabla 6.2: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Calcio en el agua potable en Chile.	50
Tabla 6.3: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Magnesio en el agua potable en Chile.	51
Tabla 6.4: Comunas chilenas de dureza en el agua potable mayor a 500 mg/L de CaCO_3 .	54
Tabla 6.5: Plantas de envasado de aguas minerales en Chile.	58
Tabla 6.6: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de fuentes de aguas minerales chilenas.	60
Tabla 6.7: Concentraciones promedio de dureza del agua mineral a nivel nacional.	62
Tabla 6.8: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de fuentes de aguas minerales envasadas.	64

	Página
Tabla 6.9: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de aguas minerales importadas.	64
Tabla 6.10: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de aguas minerales chilenas, a partir de muestras tomadas desde envases.	65
Tabla 6.11: Comparación de la concentración de dureza en el agua mineral, en la fuente, el envase y un análisis realizado al agua mineral en los envases.	66
Tabla 6.12: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio del agua superficial en Chile.	70
Tabla 6.13: Concentraciones de CaCO_3 y MgCO_3 Recomendadas para el Uso Industrial.	71
Tabla 6.14: Máximos niveles de dureza del agua cruda afluyente, aceptados por la Industria.	72
Tabla 6.15: Resumen de las concentraciones recomendadas de calcio, magnesio y dureza del agua superficial para ser utilizada como fuente de abastecimiento para el uso industrial	72
Tabla 6.16: Resumen de las concentraciones recomendadas de calcio, magnesio y dureza del agua superficial, a punto de ser utilizada en el proceso industrial.	73
Tabla 6.17: Costos de equipos de ablandamiento doméstico.	78

FIGURAS y GRÁFICOS

	Página
Figura 6.1:	Fuentes de agua potable en Chile. 39
Figura 6.2:	Niveles de dureza en agua potable, a nivel comunal, en Chile. 53
Figura 6.3:	Clasificación regional de aguas minerales según los niveles de dureza en Chile. 63
Figura 6.4:	Ablandador Doméstico: Modelo Gabinete. 77
Figura 6.5:	Ablandador Doméstico: Modelo dos Estanques 77
Gráfico 6.1:	Producción Nacional por tipo de fuente 2004. 40
Gráfico 6.2:	Relación entre las producciones de captaciones de agua superficial y subterránea para el abastecimiento de agua potable en Chile. 41
Gráfico 6.3:	Concentraciones promedio de la dureza en el agua potable en Chile. 48
Gráfico 6.4:	Concentraciones promedio del calcio en el agua potable en Chile. 50
Gráfico 6.5:	Concentraciones promedio del Magnesio en el agua potable en Chile. 51
Gráfico 6.6:	Catastro de fuentes minerales en Chile. 55
Gráfico 6.7:	Total Aguas Ventas 1998 -2005, millones de Litros y tasa de crecimiento. 57
Gráfico 6.8:	Relación entre las enfermedades cardiovasculares y la dureza en Chile. 67
Gráfico 6.9:	Relación entre urolitiasis y dureza en Chile. 68
Gráfico 6.10:	Concentraciones promedio de la dureza en el agua superficial en Chile. 70

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos más importantes, junto con el oxígeno, para la supervivencia del hombre. Es el componente más abundante del cuerpo humano representando un 65 a 70% del peso corporal. El agua viaja a través de las rocas y suelos como parte de su ciclo hidrológico y debido a su alto poder disolvente, va incorporando materiales orgánicos e inorgánicos durante su recorrido. Debido a esto, el hombre al ponerse en contacto con el agua, también lo hace con las sustancias que ésta transporta. En ocasiones, estos elementos pueden suponer un riesgo para la salud (sustancias radioactivas, mercurio, plomo, arsénico, pesticidas u organismos patógenos como bacterias o protozoos causantes de variadas enfermedades) o, por otro lado, ser compuestos fundamentales para el organismo (sodio, calcio, cloro, fósforo, azufre, magnesio, potasio, hierro, entre otras). Por ello a través de la cadena alimenticia se crea un vínculo directo entre la geoquímica y la salud.

La concentración de sustancias disueltas en el agua varía dependiendo de la localización geográfica y la estación del año. En lo que respecta a componentes activos, los iones calcio y magnesio son dos de los componentes químicos más importantes presentes en las aguas de consumo público y constituyen el mayor porcentaje de lo que se conoce como *Dureza del Agua*. También pueden contribuir a la dureza del agua las sales de hierro, manganeso y aluminio.

La dureza del agua está controlada, principalmente, por factores geológicos. Las fuentes minerales principales de la dureza provienen del suelo y de acuerdo a la composición de éste, el agua será más o menos dura. Las aguas duras, aguas con elevado contenido de calcio y magnesio, se asocian con cuencas de captación de rocas sedimentarias, de las cuales las más comunes son las de piedra caliza y creta. Las aguas blandas, aguas con bajo contenido de calcio y magnesio, suelen haber estado en contacto con rocas impermeables como el granito. Las aguas superficiales en general, suelen ser más blandas que las aguas subterráneas.

Existen algunos antecedentes internacionales en la bibliografía especializada sobre la relación entre dureza del agua de consumo y algunas enfermedades que afectan al ser humano. La Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que existen varios estudios epidemiológicos, ecológicos y analíticos, en que se ha observado que existe una relación inversa significativa entre la dureza y las enfermedades cardiovasculares y también se menciona que aguas muy blandas tienen efectos negativos en el equilibrio mineral del hombre. La OMS considera que estos estudios no son concluyentes, por lo que no propone un valor guía para la dureza basado en criterios sanitarios.

El agua, además, es una sustancia ampliamente utilizada en la industria, desempeñando diversas funciones: producción de energía por vaporización, transferencia de calor, transporte de materias primas, fabricación de productos, lavado, entre otras; por tal motivo las concentraciones de calcio y magnesio en el agua industrial juegan un rol fundamental, ya que pueden causar problemas como incrustación o corrosión de tuberías. Por tal motivo el agua debe someterse generalmente a una serie de procesos que la acondicionen ó ablanden, con el fin de lograr una eficiencia y costos óptimos para la producción.

Las principales fuentes industriales de la dureza del agua son las industrias químicas inorgánicas y la industria minera. Ambos elementos (calcio y magnesio) forman parte, además, de compuestos ampliamente utilizados en construcción, industrias textiles, refinerías, agricultura, medicina, entre otros rubros, los que, al ser eliminados finalmente en los cursos de agua, van a contribuir a la modificación de los niveles de dureza de una zona determinada

Considerando la escasa información acerca del tema de la dureza en Chile y sus posibles efectos sobre la salud del hombre y la industria, resulta primordial la realización de un estudio que identifique los niveles de dureza existentes en el agua consumida por la población chilena.

El objetivo del presente estudio, ha sido estudiar los impactos y medidas de mitigación de la dureza del agua en Chile, tanto en el consumo humano como en el uso industrial, lo que puede aportar una base fundamentada que servirá de punto de partida para futuros trabajos que permitan la evaluación de riesgos para la salud que aún no han sido estudiados de manera adecuada, aportando de esta manera a la creación de soluciones aplicables a la realidad del país.

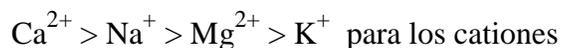
Para analizar este tema, se revisaron los antecedentes de la calidad de las aguas de consumo humano a nivel nacional relacionados con la dureza de las aguas, se evaluó el impacto de la dureza en la salud humana y en las diferentes actividades económicas del país, así como también se analizaron los diferentes procesos de remoción de dureza.

CAPÍTULO II:
ANTECEDENTES GENERALES
SOBRE DUREZA EN AGUAS

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES SOBRE LA DUREZA EN AGUAS

2.1 DEFINICIÓN Y ORIGEN DE LA DUREZA EN AGUAS

La concentración de sustancias disueltas en el agua puede variar, considerablemente, según la localización geográfica y la estación del año. Frecuentemente, en lo que respecta a componentes activos, la concentración relativa de los iones ó microcomponentes más importantes del agua, en orden decreciente, es la siguiente:



Estos iones están generalmente presentes en concentraciones que oscilan de 1 a 250 mg/L. Los restantes iones o microcomponentes se encuentran en menores concentraciones, incluso inferiores a 1 µg/L. Los iones de calcio y magnesio son los principales cationes bivalentes y conjuntamente constituyen el 95% de lo que se conoce como *Dureza del Agua*, la cual es una mezcla compleja y variable de cationes y aniones. ^[1, 2]

Si bien, la dureza del agua se debe, principalmente, a la presencia de calcio y magnesio, también contribuyen a ella el estroncio, hierro, manganeso, bario y otros iones polivalentes, los cuales se combinan con aniones como el sulfato, cloruro, nitrato y bicarbonato. ^[3]

Se dice que un agua es dura cuando su contenido de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} disueltos excede lo tolerado para el uso al que se destina dicha agua. Se comprende pues que no hay un único valor del máximo de Ca^{2+} y Mg^{2+} tolerable para los diferentes usos a los que se destina el agua.

Por lo general la dureza se expresa en mg/L de CaCO_3 , pero existen otras diversas unidades que se utilizan en distintos países tales como:

Grado Francés (°F)	—————>	1°F = 10.00 mg CaCO_3 /L
Grado Alemán (°D)	—————>	1°D = 17.85 mg CaCO_3 /L
Grado Inglés (°E)	—————>	1°E = 14.25 mg CaCO_3 /L

Las fuentes naturales principales de la dureza del agua provienen del suelo y son las rocas sedimentarias, las percolaciones y la escorrentía. El agua dura normalmente se origina en áreas donde la capa superior del suelo es gruesa y existen formaciones calcáreas. Por lo general, el agua subterránea es más dura que el agua de superficie. El agua subterránea, rica en ácido carbónico y oxígeno disuelto, suele poseer un alto potencial solubilizante, lo que va a provocar un mayor grado de erosión del suelo o de las rocas, las cuales contienen

cantidades apreciables de minerales como la calcita (CaCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) lo que, en consecuencia, puede llegar a elevar los niveles de dureza en varios miligramos por litro.^[2]

El calcio es el principal componente de la dureza en el agua y generalmente se encuentra en un rango de 5 a 500 mg/L en la forma de CaCO_3 , (2-200 mg/L, como Ca). Este ión está presente en muchos minerales, sobre todo en la piedra caliza y en el yeso. Con frecuencia, los depósitos de piedra caliza (formada por calcita y dolomita), corresponden a residuos de fósiles de pequeños organismos acuáticos, como los pólipos, que tomaron el calcio del agua de mar en el cual vivían, y lo utilizaron para formar sus esqueletos.

El magnesio, por lo general, corresponde aproximadamente a una tercera parte de la dureza total, siendo las dos terceras partes restante la dureza causada por el calcio. El magnesio varía en forma típica entre 40 y 200 mg/L en la forma de CaCO_3 (10-50 mg/l, como Mg). Al igual que el calcio, el magnesio es un componente primordial de muchos minerales, tales como la dolomita, magnesita (MgCO_3) y muchas variedades de arcilla.^[4]

Además de los ya mencionados, a la dureza total del agua pueden contribuir, en menor proporción, iones polivalentes como el zinc, manganeso, aluminio, estroncio, bario y hierro, disueltos a partir de minerales como la escalerita, arangita, bauxita, estroncianita, witerita y fosfosiderita.

Cabe destacar que los compuestos de calcio no son fácilmente solubles en el agua, sin embargo, la presencia de anhídrido carbónico aumenta rápidamente su solubilidad. Por otro lado, las sales que contienen magnesio son fácilmente solubles en el agua.^[2]

También se puede señalar que existen fuentes industriales de dureza, donde las principales son las industrias químicas inorgánicas y la industria minera. En la industria de la construcción, el óxido de calcio se utiliza como mortero, estuco y enlucido. También se emplea en la producción de pulpa y papel, en refinerías azucareras y de petróleo, en curtiembres como producto químico en el tratamiento de aguas y de las aguas residuales. El magnesio también se emplea en diversos métodos de la industria textil, curtiembres y en la industria del papel. Las aleaciones de magnesio se usan extensamente en vaciado de moldes y matrices, herramientas portátiles, equipajes y artículos domésticos en general. Las sales de magnesio se utilizan en la producción del metal magnesio, fertilizantes, cerámicas, explosivos y medicinas.^[2]

2.2 CLASIFICACIONES DE LA DUREZA EN AGUAS

2.2.1 Clasificación de la dureza según aniones asociados al calcio y magnesio.

La dureza puede ser temporal o permanente según los aniones asociados a los cationes causantes de la dureza.

Dureza Temporal: Corresponde a los contenidos de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación por filtración de los precipitados formados. También se le conoce como “Dureza de Carbonatos”.

Dureza Permanente: Corresponde a la dureza que queda en el agua después de la ebullición, incluye sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y magnesio. También se le conoce como “Dureza de No Carbonatos”.

2.2.2 Clasificación de aguas según grado de dureza

En el mundo existen una serie de clasificaciones del agua respecto a su contenido de dureza, siendo una de las más utilizadas la de la Organización Mundial de la Salud (OMS) esquematizada en la Tabla 2.1. Las demás clasificaciones se presentan en el Anexo 1.

Tabla 2.1: Clasificación de aguas según el grado de dureza.

CaCO ₃ (mg/L)	Tipo de Agua
0 - 60	Blanda
61 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
>180	Muy dura

Fuente: OMS [5]

Cabe destacar que para el presente estudio se propone una nueva clasificación según los niveles de dureza, que representa de mejor manera los valores de dureza encontrados en las aguas de nuestro país, tal como lo indica la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Propuesta de Clasificación de aguas chilenas, según el grado de dureza.

CaCO ₃ (mg/L)	Tipo de Agua
0 - 100	Blanda
100 - 300	Moderadamente blanda (dura)
300 - 500	Dura
>500	Muy dura

Fuente: Elaboración Propia

Se elaboró esta clasificación para poder diferenciar mejor las aguas chilenas, porque al usar clasificaciones internacionales, una gran mayoría de nuestras aguas serian clasificadas de “muy dura”.

2.3 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE DUREZA

La dureza del agua se puede determinar mediante métodos clásicos como el Método del Jabón, Método Gravimétrico, Método del EDTA o Volumétrico y también se pueden utilizar métodos avanzados como absorción atómica y plasma.

i) *Método del Jabón*: Originalmente se afirmaba que la dureza era la capacidad del agua para precipitar el jabón, por lo que el método consiste en titular el agua con una solución de jabón de concentración conocida, donde el indicador es la propia espuma del jabón, que sólo se forma cuando toda la dureza se ha consumido (o sea después que el jabón de sodio se ha combinado con los iones Ca⁺² y Mg⁺² formando jabones insolubles) con un volumen de solución de jabón que se puede determinar. [6]

ii) *Método Gravimétrico*: Es el método analítico más preciso para determinar la dureza total en aguas de composición desconocida. El calcio se determina por precipitación como oxalato, que luego se calcina para transformarlo en óxido de calcio. El magnesio se analiza precipitándolo como ortofosfato de magnesio y amonio, que también se calcina para convertirlo en pirofosfato de magnesio. La dureza total se calcula sumando el calcio y el magnesio de los residuos calcinados. [6]

iii) *Método del EDTA o Volumétrico*: Este método analítico es uno de los más utilizados y consiste en una titulación volumétrica, en la que se titula una muestra de agua, cuyo pH se ha amortiguado previamente con un agente orgánico secuestrante (el pH debe encontrarse en el intervalo 6 – 8), con una solución de sal de sodio del ácido etilendiaminotetracético (EDTA), en presencia de un colorante que sirve de indicador. Titulando una segunda

alícuota de la muestra en presencia de otro indicador y otro amortiguador, se efectúa una determinación por separado del calcio, diferenciando así el calcio del magnesio. Si las interferencias no sobrepasan los límites especificados, el método volumétrico es tan preciso como el gravimétrico.^[7]

iv) *Métodos avanzados*: Si bien estos métodos están libres de interferencias, no se pueden usar como métodos de control rutinario por el alto costo del instrumental requerido y el nivel de calificación del analista.

Por esta razón el método EDTA es el más recomendado y de mayor uso en el mundo.

CAPÍTULO III:
IMPACTOS DE LA PRESENCIA DE
DUREZA EN AGUAS

CAPÍTULO III: IMPACTOS DE LA PRESENCIA DE DUREZA EN AGUAS

3.1 IMPACTOS GENERALES DE AGUAS DURAS Y BLANDAS.

3.1.1 Impactos del Agua Dura

Uno de los efectos del agua dura que más frecuentemente se observa en el quehacer doméstico, se manifiesta sobre la acción de los jabones. Cuando se utiliza jabón, el cual es una sal de sodio de un ácido graso superior (generalmente de 16 a 18 átomos de carbono por molécula), en aguas duras, se forman precipitados debido a la presencia de calcio, magnesio y hierro. Los iones de calcio de esta agua se unen con los iones disueltos del jabón para formar sales insolubles. Este proceso gasta el jabón impidiendo la formación de espuma y produce un sólido grumoso indeseable, el cual no presenta ninguna utilidad.

Con el agua dura se pueden perder hasta 2/3 partes del detergente usado y, además de producirse un mayor desgaste de la ropa por la rugosidad de los tambores de las lavadoras, se producen manchas de cal en las vajillas, griferías y sanitarios. ^[8]

El agua muy dura, además puede empeorar las características de las bebidas o de los alimentos preparados con ella; por ejemplo, se produce una capa en la superficie del café o del té, se pierde gran parte de las sustancias aromáticas de los alimentos y bebidas (debido a la unión con el carbonato de calcio) y muchos consumidores han reportado un sabor desagradable en aguas con durezas elevadas (el umbral de sabor del calcio está entre 100 a 300 mg/L, el sabor desagradable se reporta con niveles sobre los 500 mg/L; contenidos de magnesio sobre los 170 mg/L, asociados además a aniones cloruro y sulfato, son responsables del sabor amargo del agua). Según algunos registros, el tiempo de cocción de los vegetales y de la carne aumenta con el agua dura.

Algunos estudios indican que las concentraciones de calcio en vegetales aumentan si éstos son cocidos en aguas duras y disminuyen notablemente si son cocidos en aguas blandas. En el caso del magnesio no se establecen bien definidas las tendencias. ^[9]

El agua con niveles de dureza superior a los 200 mg/L puede causar la aparición de incrustaciones en los sistemas de distribución, dependiendo además de la interacción con otros factores, como el pH y la alcalinidad ^[5]. Estas incrustaciones afectan a las redes de distribución tanto domésticas como industriales y se producen principalmente por una descomposición térmica de los bicarbonatos de calcio y magnesio solubles en el agua por calentamiento, en donde se elimina el dióxido de carbono y se precipitan los carbonatos (CaCO_3) que son insolubles, los que luego se depositan sobre las superficies de tuberías y calderas. Las incrustaciones están compuestas principalmente por calcita en mayor proporción, y por dragonita en menor proporción. Ambos son carbonatos de calcio con igual composición química, sin embargo, la calcita tiene una capacidad incrustante superior a la dragonita.

De no aplicarse un efectivo control de estas reacciones naturales, la adhesión constante y progresiva de carbonatos de calcio y magnesio provoca el crecimiento de una costra incrustante de importantes espesores en las paredes de los sistemas de distribución, la cual es mecánicamente dura de remover y térmicamente muy aislante, lo cual reduce enormemente la eficiencia de la transferencia de calor al agua (es decir, calderas). Esto no solo implica pérdida de la capacidad de caudal en las tuberías, sino que también un exceso de consumo de energía para producir calentamiento o enfriamiento.

3.1.2 Impactos del Agua Blanda

El agua blanda, cuya dureza es inferior a 100 mg/L, puede tener una capacidad amortiguante reducida y resultar, por tanto, más corrosiva para las tuberías, por lo que ciertos metales pesados como el cobre, zinc, plomo y cadmio pueden estar presentes en el agua potable que se distribuye ^[5]. El grado de corrosión y solubilización de los metales también depende del pH, la alcalinidad y de la concentración de oxígeno disuelto.

Se han desarrollado varios índices para caracterizar el potencial de corrosión de un agua determinada. La mayoría de ellos asume que el agua con tendencia a depositar escamas de CaCO_3 en las superficies metálicas es menos corrosiva. En este sentido, uno de los más importantes es el índice Langelier que mide la diferencia entre el pH actual de un agua y su pH de saturación, definido como el pH en el cual el agua de una misma alcalinidad y dureza está en equilibrio con el CaCO_3 sólido. Además de la dureza y la alcalinidad, para el cálculo del pH de saturación se tienen en cuenta la concentración de sólidos totales disueltos, así como también la temperatura. Así, las aguas con un pH menor que su pH de saturación, estarán menos saturadas respecto al CaCO_3 y serán consideradas más agresivas. De manera ideal, el agua distribuida de consumo público debería tener un índice Langelier ligeramente positivo para evitar ser corrosiva. ^[3]

Si bien, el agua muy dura posee un sabor desagradable, según sus consumidores, para el agua muy blanda, como por ejemplo, el agua destilada o el agua de lluvia, también se reporta un sabor desagradable, que es expresado por mucha gente como de un sabor jabonoso. Es esencial un mínimo contenido de minerales, de los cuales las sales de calcio y magnesio son las más importantes, para que el agua tenga un sabor agradable y refrescante para el consumidor.

Este tipo de aguas bien controladas presenta también algunas ventajas, como el ahorro en detergentes y productos de limpieza, ahorros de energía, máximo rendimiento de los electrodomésticos, eficiencia en sistemas de tuberías y griferías y reducción de las manchas de cal en vajillas, cubiertos y sanitarios.

3.2 IMPACTOS EN LA SALUD

Como se ha mencionado anteriormente, la dureza del agua está compuesta esencialmente por dos elementos, calcio y magnesio, los cuales son fundamentales para el organismo.

El Calcio (Ca) es el catión divalente más abundante en el organismo humano y aporta cerca de 1.5 a 2.0% del peso total. Es responsable de funciones estructurales que afectan el esqueleto y los tejidos blandos; además, juega un papel importante en la transmisión neuromuscular de estímulos químicos y eléctricos, en el buen funcionamiento del sistema de conducción miocárdica, en la transmisión de información intracelular y la coagulación de la sangre. Más del 99% del contenido de calcio se encuentra en el esqueleto, en la estructura de huesos y dientes. Debido a su función en la transmisión neuromuscular ejerce un papel importante en la contracción muscular y cardíaca, aumentando la amplitud del latido cardíaco a medida que su concentración se eleva. La osteoporosis y la osteomalacia son las manifestaciones más comunes de la deficiencia de calcio, y en menor grado, pero no menos importante, se ha comprobado que una deficiencia de calcio en el organismo puede causar hipertensión. El consumo diario de calcio recomendado ^[10, 11] para un adulto está entre el rango de 1000 a 1300 mg/día, siendo estos valores diferentes en otros grupos de población. (Ver Anexo 2). Considerando un consumo de 2 litros de agua con una concentración de 100 mg/L de calcio, esta aportaría aproximadamente el 20% del calcio recomendado para el adulto (1000 mg/día), aumentando este porcentaje para los niños e infantes.

El Magnesio (Mg) tiene un papel esencial como cofactor y activador de más de 300 reacciones enzimáticas incluyendo la glicólisis, el metabolismo del ATP, el transporte de elementos como el sodio, el potasio y calcio a través de membranas celulares, síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, en la excitabilidad neuromuscular y la contracción y relajación muscular. Actúa como antagonista natural del calcio. Se encuentra en un 60 a 65% en los huesos, 27% en los músculos, de 6 a 7% en otras células y 1% en los líquidos extracelulares. Una deficiencia de magnesio en el organismo, incrementa el riesgo en el ser humano de desarrollar variadas patologías, tales como, vasocontracción, hipertensión, arritmia cardíaca, aterosclerosis vascular, infarto agudo al miocardio, eclampsia en mujeres embarazadas, posiblemente diabetes tipo II y osteoporosis. El consumo diario recomendado de magnesio para un adulto está en el rango de 300 a 400 mg/día. ^[10, 11] (Ver anexo 2). Al igual que para el calcio, considerando un consumo de 2 litros de agua con una concentración de 50 mg/L de magnesio, esta aportaría aproximadamente el 12,5% del magnesio recomendado para el adulto (400 mg/día), aumentando este porcentaje para los niños e infantes.

El agua de consumo humano es una fuente esencial de elementos como el calcio y magnesio para la dieta diaria, por lo cual algunas enfermedades podrían relacionarse con la dureza presente en el agua de consumo.

3.2.1 Dureza del agua y enfermedades cardiovasculares

Las enfermedades cardiovasculares están entre las principales causas de mortalidad en el mundo. En Chile, las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en la población general. Durante el período 2000-2003, se registraron 61.541 defunciones por estas causas,^[12] representado el 19,05% del total de las muertes en ese período. Las enfermedades cardiovasculares, por ejemplo, la enfermedad cardíaca coronaria, la enfermedad cardíaca isquémica y la hipertensión, pueden llegar a tener consecuencias fatales, e incluso, llevar a la muerte, la que se produce generalmente por infarto agudo al miocardio, provocado principalmente por la obstrucción de una arteria coronaria o arteria periférica que impide el acceso de oxígeno al músculo cardíaco.

Los principales factores de riesgo para estas patologías son la hipertensión, el tabaquismo, el abuso de alcohol, los hábitos alimenticios y la inactividad física^[13]. Sin embargo, estos factores clásicos no explican totalmente la variabilidad de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en los diferentes países, por lo que se debe poner particular atención en factores ambientales como el clima, la polución del aire o el contenido de minerales del agua de consumo (AC).

Desde 1950, se ha hipotetizado la existencia de una relación entre la dureza del AC y algunas enfermedades cardiovasculares. Dicha relación entre la mortalidad cardiovascular y el contenido mineral del agua fue descrita primero por Kobayashi (1957) en Japón y por Schroeder (1960) en Estados Unidos. Desde entonces, muchos estudios epidemiológicos han sido presentados en el mundo, y una gran cantidad de ellos describen la existencia de una relación inversa entre la dureza de las aguas de consumo humano y las enfermedades cardiovasculares^[13]. No obstante, en otros trabajos esta asociación no se ha evidenciado^[14, 15].

Más recientemente, se han realizado varios estudios ecológicos donde se han incluido determinadas variables que se comportarían como factores de confusión, tales como factores climáticos (temperaturas, precipitaciones), geográficos, factores socioeconómicos o los mismos factores descritos de mayor riesgo para enfermedades cardiovasculares. En tales estudios realizados^[16, 17], se siguió encontrando una relación inversa entre dureza del agua y enfermedades cardiovasculares, tras controlar factores climáticos y socioeconómicos. Por su parte, otros autores^[18, 19], también hallaron esa misma relación tras controlar factores de riesgo como hipertensión, hábitos de consumo de tabaco e hiperlipidemia.

En una revisión de estudios epidemiológicos realizados entre los años 1979 al 2004, llevados a cabo por la OMS, sobre la dureza del agua de consumo y las muertes por enfermedades cardiovasculares^[13], se obtuvo que los estudios publicados sobre el tema, se dividen principalmente en dos: estudios de correlación geográfica (ecológicos) y estudios de caso – control.

De los 19 estudios de correlación geográfica revisados, en 12 de ellos se encontró una relación inversa significativa entre la dureza del agua y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares. Por ejemplo, en un estudio realizado por Yang (1996) ^[17] reportó un aumento del 10% en el riesgo de morir por enfermedades cardíacas isquémicas en personas que consumían agua con niveles de dureza menores a 75 mg/L comparado con personas cuyos niveles de dureza en el agua consumida era mayor a 150 mg/L. En los estudios donde el calcio y el magnesio fueron evaluados separadamente, se encontró una asociación similar de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares con los niveles de cada uno de estos minerales. En 6 de estos estudios se encontró una correlación muy pequeña entre ambas variables, no significativa o simplemente no se encontró ninguna asociación. Sólo en 1 de los 19 estudios ^[15] se obtuvo una correlación positiva significativa entre la concentración de magnesio y la proporción de mortalidad por enfermedad cardíaca isquémica.

Siete estudios de caso-control fueron revisados en este artículo. Estos estudios investigaron la asociación entre las concentraciones de calcio y magnesio con la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en Suecia, Taiwán y Finlandia. Todos los trabajos mencionados mostraron la existencia de una relación inversa entre los niveles de magnesio en el agua de consumo y el riesgo de morir por infarto agudo al miocardio, ataques fulminantes o hipertensión. Sólo uno de ellos encontró una relación inversa entre los niveles de calcio y estas patologías.

A lo largo de los aproximadamente 50 años de investigación acerca del tema, se han propuesto diversas hipótesis en un intento de explicar la relación existente entre la dureza del agua y las enfermedades cardiovasculares. Estas hipótesis son las siguientes ^[2, 13, 20]:

- a) El alto consumo de calcio y magnesio por ingesta de agua dura proporciona un suministro adecuado de estos minerales a la dieta. El rol de estos minerales, en el desarrollo de la hipertensión, ha sido investigado extensamente, mostrando una baja incidencia de esta enfermedad en poblaciones con una dieta rica en calcio y magnesio. Las aguas blandas pueden producir pérdidas de calcio y magnesio en la elaboración de los alimentos, limitando su disponibilidad en el organismo.
- b) Existe un efecto protector de otros posibles elementos presentes en pequeña cantidad en el agua dura, como por ejemplo, el litio, selenio, vanadio, silicio y cinc.
- c) La deficiencia de calcio y magnesio en el agua (agua blanda) favorece el ingreso de metales pesados dañinos al organismo, debido al fenómeno de corrosión de los tanques y de las redes de distribución de los acueductos. Uno de esos metales pesados es el plomo, el cual, se ha asociado largamente con enfermedades como la hipertensión y también con ataques fulminantes.

Finalmente la OMS señala que, existiendo una variedad de estudios epidemiológicos ecológicos y analíticos, se observa la existencia de una relación inversa estadísticamente significativa entre la dureza del agua potable y las enfermedades cardiovasculares, pero con la información de la cual se dispone, no es suficiente para llegar a la conclusión que dicha relación es de carácter causal.

3.2.2 Dureza del agua y litiasis urinaria

La urolitiasis es una enfermedad multifactorial en la que se han implicado aspectos epidemiológicos, raciales, geográficos y hereditarios de las poblaciones estudiadas. Se describen como factores de riesgo para la urolitiasis la hipercalciuria, la hiperuricosuria, el volumen urinario bajo, los hábitos alimentarios, el sexo, y factores genéticos, climáticos y sociales. El impacto económico de la enfermedad es considerable debido a la recurrencia de infecciones urinarias, a la necesidad de extracción quirúrgica y en el peor de los casos, a la progresión hacia una insuficiencia renal crónica.

En Chile, en la Base de Datos del Ministerio de Salud (MINSAL), en el año 2003 se registraron un total de 45 casos/100.000 habitantes, siendo las Regiones I, II y XII las más afectadas, de las cuales la II Región presentó la mayor incidencia con 108 casos/100.000 habitantes.

Los cálculos que contienen calcio (principal componente de la dureza) más frecuentemente identificados son los de oxalato y fosfato. La tendencia de la orina a formar cálculos de oxalato cálcico, por ejemplo, depende de la actividad iónica de los iones Ca^{+2} y C_2O_4^- (oxalato). La actividad iónica, es la concentración de cada ión disponible para combinarse con uno de carga opuesta y, por tanto, iniciar un proceso de formación de cristales (nucleación). Esta nucleación depende de algunos factores como el pH que aumenta o disminuye la solubilidad de productos susceptibles de formar cálculos, la diuresis (volumen de orina) y la presencia de inhibidores de cristalización, como los iones pirofosfato o los citratos, que inhiben la nucleación espontánea de los cristales de calcio.

El papel de la dureza del agua en el desarrollo de la litiasis urinaria es aún motivo de controversia, sin embargo, muchos estudios ^[21, 22, 23] demostraron que existe una relación directa entre la dureza del agua y el desarrollo de litiasis urinaria. Por otro lado, otros estudios realizados concluyen que la dureza del agua no tiene relación con la génesis de esta enfermedad, pero conviene señalar que aquellos estudios que reportan que la dureza del agua no contribuye al desarrollo de la litiasis urinaria se hicieron en comunidades en que la dureza total no superaba las 400 ppm ^[24, 25, 26].

En un estudio epidemiológico ruso (Mudryi, 1999) se encontró que el consumo de agua dura está asociado con un mayor riesgo de desarrollar cálculos urinarios, argumentando que el consumo prolongado de agua dura (mayor a 5 mmol/L) provoca un aumento del flujo sanguíneo renal, con alteración en los procesos de filtración y reabsorción, lo que puede llevar a la formación de urolitiasis y en casos más graves, hipertensión. Otra evidencia encontrada al respecto, se refiere al hallazgo de casos de urolitiasis en niños (raramente reportados), en quienes los alimentos habían sido preparados con agua rica en calcio (Ca 555 mg/L, dureza de 18,4 mmol/L) y el consumo de calcio diario había sido mayor al recomendado por largo tiempo.

Por el contrario, estudios prospectivos recientes han demostrado que un alto consumo de calcio disminuye el riesgo de desarrollar cálculos renales. Este efecto protector, ha sido atribuido a la menor excreción de oxalato en la orina, ya que altos niveles de calcio consumidos van a favorecer la formación de oxalato de calcio insoluble en el lumen intestinal que luego será eliminado en las heces.

El rol del magnesio en la génesis de la urolitiasis es desconocido.

3.2.3 Dureza de agua y otras enfermedades

Los resultados de diversos estudios han sugerido que una variedad de otras enfermedades están relacionadas con la dureza de agua. Éstas incluyen ciertos defectos y anomalías del sistema nervioso como la anencefalia, mortalidad perinatal y varios tipos de cáncer^[2]. Con respecto a los tipos de cáncer relacionados con la dureza estudiados^[27, 28, 29, 30, 31, 32] en los últimos años, se encuentran el cáncer rectal, cáncer de colon, cáncer de páncreas, cáncer de pulmón y cáncer de próstata, todos ellos estudiados por Chun-Yang, científico taiwanés que analizaba esta relación mediante estudios epidemiológicos de caso-control, los cuales presentan variables muy locales.

Otro efecto en la salud causado por la dureza del agua son las alteraciones en la piel la cual posee originalmente un pH ácido que evita la proliferación de bacterias. El contacto con el agua dura alcaliniza este pH, dificultando la acción del jabón posibilitando el desarrollo de infecciones y, por consiguiente, la aparición de granos, picazones, sequedad de la dermis y tacto rugoso.

Si bien algunos de estos hallazgos han sido demostrados en diferentes países, todavía existen grandes dudas acerca de su significado. Estas relaciones pueden simplemente estar reflejando pautas de enfermedades que pueden explicarse teniendo en cuenta los factores sociales, climatológicos y ambientales, más que la dureza del agua en sí.

3.3 IMPACTOS EN USO INDUSTRIAL

El agua es esencial prácticamente en todas las operaciones industriales, pero sólo en raras ocasiones es posible utilizarla tal y como se extrae de un río, lago o un pozo. Si no se toman las precauciones necesarias, las impurezas que a causa de la contaminación natural o artificial pueden afectar gravemente tanto a los equipos como a los productos.

Hay pocas aplicaciones importantes del agua que son exclusivas de una sola industria. Las principales, generación de vapor, enfriamiento y procesamiento, son comunes a todas las industrias. Los diferentes procesos en que interviene el agua tales como el transporte y lavado, pueden aplicarse en diversas industrias, que no tienen ninguna relación entre sí.

Un contaminante específico puede ser perjudicial en diversas operaciones industriales. En este caso el calcio y el magnesio son los principales contaminantes que forman incrustaciones en la mayoría de los abastecimientos de agua cruda. Casi todos los métodos de tratamiento para agua de calderas tienen como principal objeto evitar o reducir la formación de los depósitos de calcio y magnesio. Estos dos iones producen, sobre las superficies de transferencia térmica y otras partes internas del sistema de calderas, depósitos voluminosos y pesados, que varían desde incrustaciones duras hasta precipitados suaves. Si en una caldera se utiliza agua de alimentación no tratada, en un lapso muy corto, las superficies de transferencia de calor se cubren con incrustaciones de sulfato de calcio (que produce un depósito duro y cristalino) y carbonato de calcio, que puede existir ya sea como depósito suave o como capas duras. El carbonato de calcio es uno de los principales constituyentes de los depósitos en los sistemas de precalentamiento. Las sales de magnesio, tales como el silicato de magnesio y el hidróxido de magnesio, generalmente forman depósitos suaves y lodo. Estos depósitos, entre otros provienen de la dureza, interfieren gravemente con la transferencia de calor y reducen la eficiencia. Si no se evitan o eliminan a intervalos apropiados, se producirán fallas frecuentes en la tubería ^[6].

Puesto que el calcio y el magnesio a las condiciones químicas existentes en las calderas reaccionan de un modo distinto, ambos deben determinarse en el análisis de agua de alimentación, en lugar de combinarse como una determinación total de la dureza. Las concentraciones de calcio y magnesio encontradas en las aguas industriales, fluctúan desde varios cientos de miligramos por litro en los abastecimientos de agua cruda hasta 1µg/L o menos en el agua de alimentación para calderas de alta presión.

En los sistemas de enfriamiento abiertos pueden formarse incrustaciones y depósitos debido a la concentración de sólidos disueltos que se produce durante el enfriamiento por evaporación. Cuando se sobrepasan los límites de solubilidad, el carbonato de calcio se precipita en la forma de depósitos o lodos. También puede depositarse sulfato de calcio en algunos sistemas abiertos de recirculación, a menos que se ajuste debidamente la purga ^[6].

En industrias específicas se tiene, por ejemplo, que los iones de calcio y magnesio son elementos importantes en el teñido de los textiles. Pueden precipitar ciertas anilinas, dando como resultado manchas o estrías en los artículos teñidos, o bien, pueden actuar como mordentes, originando una mayor absorción de la tintura y coloraciones más profundas.

En la industria petrolera las incrustaciones naturales que más preocupan a los productores de petróleo son el carbonato de calcio y sulfato de calcio, las cuales se producen por temperatura, presión y sales disueltas totales en los diferentes procesos. En esta industria también puede producirse corrosión, la cual está muy ligada a la presencia de dióxido de carbono (CO₂).

Con respecto a la salmonicultura, existen indicios sobre una relación entre los peces y el agua dura. Un estudio ^[33] plantea que la Tilapia (*Oreochromis sp.*) en condiciones de agua dura, puede lograr un mayor peso y longitud, que otro pez en condiciones de agua normales.

3.4 IMPACTOS EN EL USO EN RIEGO

Tanto las fuentes de aguas superficiales como las subterráneas se toman como abastecimiento de agua para la agricultura. El agua para riego debe bombearse desde la fuente y pasarse a través de algún tipo de sistema de distribución, ya sea abierto o cerrado. Muchos sistemas de distribución son zanjas abiertas y canales en los que se desarrollan problemas de crecimientos biológicos, taponamientos con sedimentos, de infiltraciones del suelo (lo que constituye, por lo general, la porción más alta de agua que se pierde en el camino al punto de utilización)

Los problemas causados por la dureza se presentan en los sistemas cerrados de distribución en donde se producen incrustaciones o corrosiones. En estos últimos tiempos estos problemas se han ido solucionando con la implementación de tuberías de plástico, las cuales no sufren estos problemas.

Los principales problemas en el riego tecnificado por aspersión son causados por el calcio en combinación con el bicarbonato (HCO₃) y ocasionalmente por el sulfato (SO₄), los cuales forman depósitos en los aspersores durante los períodos de baja humedad (menor a 30%) y alta evaporación. La formación de estos depósitos causa serios problemas en la eficiencia de los sistemas de riego por aspersión ^[34].

Respecto a los problemas provocados en la infiltración del suelo existe una relación entre las concentraciones de sodio, calcio y magnesio la cual queda expresada en la razón de absorción de sodio (S.A.R), la que se calcula con la siguiente fórmula:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde:

Na = Sodio expresado en meq/L

Ca = Calcio expresado en meq/L

Mg = Magnesio expresado en meq/L

Cuando este índice aumenta, quiere decir que existe un aumento de sodio en relación al calcio y magnesio, lo que provoca cambios en la solubilidad del calcio resultando en la precipitación o disolución de éste durante el riego. Esta precipitación puede causar problemas tanto en el suelo, como en los sistemas de regadíos.

Otro tipo de impacto en el riego producido por un alto grado de dureza en aguas, es la disminución de la efectividad de los herbicidas, la cual se produce por la reacción entre los iones de calcio y magnesio y las sales de los herbicidas, donde se forman sales insolubles las cuales se precipitan, removiendo el herbicida.

CAPÍTULO IV:
NORMATIVAS SOBRE DUREZA,
CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS
DE CONSUMO HUMANO

CAPÍTULO IV: NORMATIVAS SOBRE DUREZA, CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO

4.1 ANTECEDENTES DE LA NORMATIVA VIGENTE.

La calidad del agua potable es de suma importancia para la salud, por lo cual la mayoría de los países tienen legislaciones internas relacionadas con las aguas de consumo humano. Estas normas sirven para determinar la responsabilidad de los distintos sectores involucrados en la producción y distribución del agua potable, su monitoreo y su control^[35].

Todos los países cuentan, asimismo, con reglamentaciones que definen qué se entiende por agua potable, es decir, los patrones que se deben seguir para que el agua sea inocua para la salud humana. Entre esas reglamentaciones hay una muy específica, que se denomina “Norma de Calidad del Agua Potable”. Allí se establece qué sustancias pueden estar presentes en el agua y las concentraciones máximas permisibles que no significan riesgo para la salud^[35].

Todos los países que establecen este tipo de normas nacionales utilizan como parámetro principal de comparación las Guías de la OMS para la Calidad del Agua Potable^[36], la cual define *valores guía* que representan el nivel máximo de los componentes (concentración o cantidad), para garantizar que el agua será agradable a los sentidos y que no implicará un riesgo importante para la salud del consumidor. Al sobrepasar un *valor guía* se debe considerar como un indicio de que es preciso investigar las causas que ocasionan que esto ocurra, con objeto de tomar medidas correctivas y consultar a las autoridades responsables de la salud pública para que proporcionen el asesoramiento adecuado^[1].

La OMS no propone valor guía para la dureza, basado en criterios sanitarios. No obstante, el grado de dureza del agua puede influir en la aceptación de ésta por el consumidor, la cual puede ser muy variable según las comunidades, en función de las condiciones locales. El umbral de sabor del ión calcio es del orden de 100 a 300 mg/L según el anión asociado, y el umbral de sabor del magnesio es probablemente inferior al del calcio. En algunos casos, los consumidores toleran una dureza de más de 500 mg/L.

En el caso de Chile, la norma que establece los requisitos del agua potable es la NCh409/1.Of2005^[37] y define como agua potable al “agua que cumple con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección descritos en NCh409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano”.

Esta norma no establece específicamente los límites para la dureza del agua, por lo que también se investigaron sus principales componentes, el calcio y el magnesio. En el caso del magnesio se encontró un límite máximo establecido en 125 mg/L^[37] y para el calcio no se establecieron parámetros de control. Cabe destacar que para concentraciones de

magnesio en el agua, mayores a 50 mg/L, pueden provocar efectos laxantes si los niveles de sulfato son altos (mayores a 250 mg/L).

Referente a las aguas minerales, la OMS define como agua mineral natural a “toda agua no contaminada bacteriológicamente, que procede de una fuente subterránea natural o perforada y contiene una determinada mineralización que puede inducir efectos favorables para la salud”. La OMS adopta los estándares del Código Alimentario ^[38], los que describen el producto, su composición y factores de calidad, incluyendo los límites químicos, la higiene, el embalado y el etiquetado. El Código Alimentario además incluye 16 elementos químicos (ver Anexo 3) con límites permisibles, en donde no se encuentran la dureza, el calcio y el magnesio.

La legislación chilena posee el “Reglamento de Aguas Minerales” (Decreto N° 106, de 1997. Actualizado 20.09.2001) ^[39], la cual define por aguas minerales a aquellas “aguas naturales que surgen del suelo, que no provienen de napas o cursos de aguas superficiales, de composición conocida, y que por su constitución o propiedades físico-químicas o biológicas, son susceptibles de aplicaciones beneficiosas para la salud”. Esta legislación posee 17 elementos químicos con límites máximos permitidos (ver Anexo 3), entre los que no se encuentran la dureza, calcio y magnesio.

4.2 COMPARACIÓN DE LAS NORMAS INTERNACIONALES DE CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO

Para la elaboración de este documento se tomó como base una publicación sobre “Normas Internacionales de Calidad de Agua de Bebida” realizado por la Organización Panamericana de la Salud en compañía de la Organización Mundial de la Salud ^[40].

Es necesario aclarar que en algunos países no existe una directriz para la dureza, el calcio o el magnesio. Esto se puede explicar porque no existen suficientes estudios relativos a los efectos de esta sustancia en el organismo y, por tanto, no es posible definir un valor límite.

La dureza, el calcio y el magnesio se agrupan entre las sustancias que pueden producir quejas en los usuarios del agua potable. La dureza particularmente puede causar incrustaciones, formación de espumas (mayor a 200 mg/L) o posibles corrosiones en el sistema de distribución (menor a 100 mg/L). La Tabla 4.1 muestra el valor límite permisible de los elementos estudiados en diferentes países.

Tabla 4.1: Contenidos máximos permisibles de dureza, calcio y magnesio en el agua potable.

País	Dureza [mg/L]	Calcio [mg/L]	Magnesio [mg/L]	Año Norma	Nombre de la Norma
OMS	-	-	-	2004	VALORES GUIAS
Chile	-	-	125	2005	NCH 409/1
C.E. Europea	-	100	50	1980	CD 80/778/EEC
Canadá	500	-	-	2004	GUIDELINES
Estados Unidos	-	-	-	2003	EPA 816 - F
México	500	-	-	2000	NOM-127-SSA1
Guatemala	500	150	100	1998	NGO29001
Honduras	400	100	50	1995	ACUERDO N° 084
El Salvador	400	75	50	1997	NSO130701
Nicaragua	400	100	50	1994	CAPRE
Costa Rica	400	100	50	1997	DTO. 25991-S
Panamá	-	-	-	1999	RESOLUCION N° 579
Republica Dominicana	500	200	150	1980	NOR-DOM
Cuba	400	-	-	1997	NC93-02
Colombia	160	60	36	1998	DEC 475/98
Venezuela	500	-	-	1998	NORM 187 & 138
Brasil	500	-	-	1990	PORTA-RIA 36-GM
Ecuador	500	-	-	1992	IEOS
Perú	300	-	-	1999	DIGE-SA (propuesta)
Bolivia	500	200	150	1997	IBNORCA NB512
Paraguay	400	100	50	2000	LEY N°1614
Uruguay	500	-	-	1996	DTO.27335
Argentina	400	-	-	1994	CODIGO ALIMENTARIO

Para la dureza, sólo 19 países de los 21 investigados poseen información disponible que regulan la concentración de estos compuestos, para la calidad del agua potable. De éstos, más del 50% adoptan un valor de 500 mg/L de dureza como límite permisible, valor que no se puede comparar con los valores de la OMS y la Comunidad Europea, ya que éstas no poseen valores guías de este compuesto. Se sabe que sobre el valor de 200 mg/L se pueden producir incrustaciones, no obstante, 18 países sobrepasan este valor como norma lo que podría estar produciendo incrustaciones en sus sistemas de distribución. Sólo en Colombia no se sobrepasa los 200 mg/L. Cabe destacar que en algunos países europeos se ha comenzado a establecer un rango de dureza en sus normas, como por ejemplo, en Polonia donde se estableció un rango de 60 a 500 mg/L de CaCO_3 como límite, ya que se ha estudiado que una deficiencia de los minerales componentes de la dureza, puede provocar ciertas enfermedades. También en Europa se ha establecido una concentración mínima exigida para las aguas destinadas al consumo humano que hayan sido sometidas a un tratamiento de ablandamiento, la que se estableció como 60 mg/L de Ca ^[41].

El calcio tampoco se rige por un valor guía entregado por la OMS, ya que no lo presenta, pero menciona que el umbral de sabor de éste es del orden de 100 a 300 mg/L, según el anión asociado. En este caso existen 3 países que sobrepasan este umbral, Guatemala, República Dominicana y Bolivia.

En el caso del magnesio, Chile se encuentra entre los límites más permisivos, junto con República Dominicana y Bolivia, límites que se encuentran muy por sobre la norma de la Comunidad Europea. Se puede mencionar que en el caso de Chile, en una persona adulta que consume 2 litros de agua con una concentración de 125 mg/L de magnesio (NCh409/1.Of2005), ésta aportaría aproximadamente el 62,5% del magnesio recomendado para el adulto ^[11] (400 mg/día).

En relación a la normativa internacional del agua mineral referente a la dureza, calcio y magnesio, solo se puede destacar el Código Alimentario Argentino ^[42], en el cual existe una categorización de las aguas minerales basado en su contenido de minerales específicos que fluctúan dentro de ciertos rangos y límites, y en este caso se definen aguas minerales cálcicas (más de 150 mg/L de calcio) y magnésicas (más de 50 mg/L de magnesio).

CAPÍTULO V:
PROCESOS DE REMOCIÓN DE
DUREZA DE LAS AGUAS

CAPÍTULO V: PROCESOS DE REMOCIÓN DE DUREZA DE LAS AGUAS.

5.1 ANTECEDENTES DEL ABLANDAMIENTO.

El agua, en su estado básico es originalmente “agua blanda”, luego recorriendo su ciclo hidrológico, pasando por lagos, ríos y corrientes de agua subterránea absorbe minerales que la hacen dura. El agua denominada dura contiene una cantidad importante de sales de calcio y magnesio, que si bien, al parecer no son nocivas para el ser humano, afectan las propiedades del agua para usos domésticos e industriales, tales como el lavado y la limpieza en general, además de presentar problemas de incrustaciones. En este sentido, los sistemas de tratamiento de remoción de dureza encuentran su mayor aplicación a nivel industrial, por otro lado a nivel doméstico aportan también múltiples beneficios en cuestiones de limpieza y cuidados de la piel.

Dependiendo de las características del agua extraída de las fuentes de abastecimiento y del uso que se le dará, se debe aplicar el tratamiento adecuado para garantizar la remoción de las sales que pudieran resultar perjudiciales para una aplicación específica.

Existen varias posibilidades para el ablandamiento del agua, que van desde una desmineralización total que se logra mediante la aplicación de algunas resinas utilizadas en el intercambio iónico, hasta el ablandamiento o desmineralización parcial, que consiste en remover sólo una parte de los iones causantes de la dureza en procesos como cal-carbonato, filtración por membranas, efecto del campo magnético, etc.

El agua blanda facilita las labores de limpieza, requiere menos detergentes o jabones y resuelve el problema de las incrustaciones, constituyendo así un ahorro de tiempo y dinero. Por el contrario esta agua es muy corrosiva y no posee los minerales necesarios como, por ejemplo, para el crecimiento de las plantas.

Existen distintos tratamientos para la remoción de la dureza, los cuales se dividen en básicos y avanzados, procesos que serán analizados a continuación.

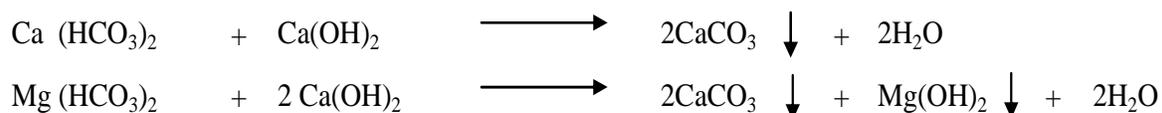
5.2 TRATAMIENTOS BÁSICOS PARA LA REMOCIÓN DE LA DUREZA.

5.2.1 Proceso Cal – Carbonato (o Cal – Soda).

El proceso Cal – Carbonato es el método químico más importante para el ablandamiento del agua. En este proceso las sales solubles se transforman químicamente en compuestos insolubles que son en parte precipitados y en parte filtrados. Este proceso permite eliminar una parte de los compuestos de calcio y magnesio y reducir la dureza a un valor predeterminado congruente con el control de la formación de incrustaciones, la prevención de la corrosión y otros factores que contribuyen a la obtención de calidad de agua adecuada^[43].

En este proceso generalmente es necesario agregar dos tipos de reactivos, uno para eliminar la dureza temporal provocada por bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio, y el otro, para eliminar la dureza permanente originada principalmente por el sulfato de calcio.

El primer reactivo que se utiliza es una cal hidratada (hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), la cual reacciona con los bicarbonatos solubles de calcio y magnesio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ respectivamente), que son los que causan la dureza por carbonatos y forman carbonato de calcio e hidróxido de magnesio (CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ respectivamente) que son poco solubles y pueden ser precipitados, tal como se muestra en la siguientes reacciones:



En este proceso es necesario ejercer un control preciso de la cantidad de cal para llegar a la dureza mínima teórica, ya que no es posible remover toda la dureza por el hecho de que los compuestos formados no son totalmente insolubles.

La dureza permanente del agua, debida a la presencia del sulfato de calcio (CaSO_4), se elimina con la adición de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y la reacción que ocurre entre el sulfato de calcio y el carbonato de sodio genera carbonato de calcio, el cual se precipita, tal como el sulfato de sodio (Na_2SO_4), como lo representa la siguiente ecuación:



Agregando un exceso de carbonato de sodio del necesario teóricamente, se logra una eliminación más rápida y de manera más completa de la dureza permanente del agua.

Cabe mencionar que usualmente se combinan la cal y el carbonato de sodio para eliminar ambos tipos de dureza en un solo proceso, en el cual las constantes de solubilidad de los productos de las reacciones (CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$) controlan la eficiencia de la remoción, ya que se tienen que encontrar en un ambiente ácido, para que presenten su máxima precipitación (solubilidades mínimas). Otro factor importante en las reacciones es la temperatura, ya que la solubilidad depende de ella, lo que influye en la selección del equipo de tratamiento, por ejemplo, si se precalienta el agua se obtienen mejores resultados que a temperatura ambiente, además se aceleran las velocidades de reacción. En la Tabla 5.1 se presentan las solubilidades en función del pH y la temperatura de los compuestos que se forman en el proceso cal-carbonato.

Tabla 5.1: Solubilidades del Carbonato de Calcio e Hidróxido de Magnesio, como función de la Temperatura y el pH.

pH	CaCO_3 [Mg/l]		$\text{Mg}(\text{OH})_2$ [Mg/L]	
	25°C	60°C	25°C	60°C
7	970	240	---	---
8	79	20	---	---
9	8	2,1	13000	5500
10	1	0,3	130	55
11	0,4	0,13	1,3	0,6
12	0,3	0,11	0,01	---

Fuente: Pérez 1979. [43]

Este proceso de ablandamiento puede ser selectivo en cuanto a la remoción de dureza de calcio y magnesio. El agua que contiene magnesio en bajas concentraciones puede ser tratada con cal para remover el carbonato de calcio que se forma, un exceso de cal es suficiente para remover el magnesio. Cuando se tienen grandes cantidades de magnesio, es necesario agregar cal suficiente para elevar el pH a un valor mínimo de 10,5, que es el punto donde se comienza a obtener la máxima precipitación del hidróxido de magnesio. En caso de tratarse de un no carbonato, este puede reducirse mediante la adición de Na_2CO_3 [43].

Con el tiempo se han ido desarrollando métodos más avanzados para el ablandamiento basados en este mismo proceso, los cuales mejoran significativamente su eficiencia y la velocidad del proceso de precipitación como, por ejemplo, la aplicación de aluminato sódico (NaAlO_2) o carbonato bórico a la reacción, los cuales reaccionan formando productos más insolubles. El problema de estos compuestos, es que se requiere un constante análisis químico del agua para dosificarlo exactamente, además son productos químicos de alto costo y que pueden contaminar el medio ambiente y en algunos casos no son saludables para el usuario [45].

El equipo empleado en el proceso cal-carbonato, lo conforma un estanque con una capacidad diseñada de acuerdo a las necesidades y además requiere un tiempo de retención que viene dado por la velocidad de las reacciones [44].

Este proceso presenta ventajas cuando el caudal a tratar es grande y la calidad del agua efluente mantiene concentraciones uniformes de los compuestos a remover, ya que la dosificación de los agentes ablandadores debe ser precisa.

Un inconveniente del tratamiento por adición de cal es la producción de grandes cantidades de lodos, alcanzando éstos hasta 2.5 veces más de la cantidad de cal empleada inicialmente debido a la combinación de cal con el calcio y magnesio contenidos en el agua y aunado a la formación de lodos en la etapa de coagulación posterior al ablandamiento. La disposición de estos lodos se realiza generalmente en depósitos o canchas de secado, para lo cual se deshidratan para reducir el volumen. Estos lodos también pueden ser recuperados e incorporados nuevamente al proceso de elaboración de la cal. Mediante el proceso de recarbonatación de los lodos y posterior calcinación, es posible recuperar de 1.2 a 1.3 toneladas de cal por cada tonelada de cal usada para el ablandamiento, por lo cual se produce un exceso, el cual puede ser vendido ^[44].

5.2.2 Intercambio Iónico

El intercambio iónico remueve de un agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador iónico, el cual los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra en la matriz del intercambiador de iones. El intercambiador iónico tiene una capacidad limitada para intercambiar iones, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los que sustituyen los indeseables acumulados, dejando al material de intercambio en condición útil ^[4].

Para el ablandamiento del agua por intercambio iónico existen al menos 3 procedimientos utilizados basados en la utilización de determinados tipos de resinas y compuestos regenerantes, y cuya aplicación depende principalmente del nivel al que se quiera reducir la dureza y el contenido de sólidos disueltos totales.

Estos procedimientos son los siguientes:

- a) Resina catiónica: Ciclo del sodio.
- b) Resina catiónica: Ciclo del Hidrógeno
- c) Desmineralización: Ciclo con resinas catiónicas y aniónicas

El proceso de intercambio del ciclo del sodio tiene la ventaja que elimina casi por completo la dureza, pero no reduce los sólidos disueltos totales ni la alcalinidad. El ciclo del hidrógeno elimina completamente la dureza además, reduce la alcalinidad a un nivel determinado y los sólidos disueltos totales en cantidad igual a la alcalinidad. El proceso de

desmineralización remueve prácticamente todos los sólidos disueltos. En caso de no requerir la remoción de sílice, se usa un material de intercambio débilmente básico ^[43].

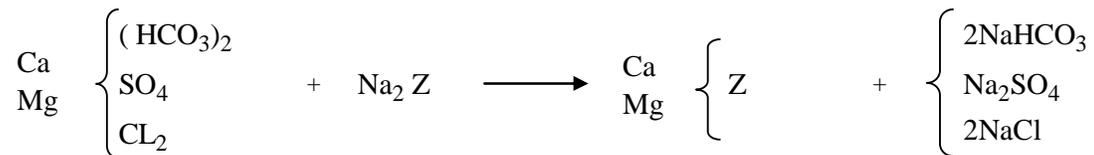
A continuación se entrega una breve descripción de estos procedimientos:

a) Ciclo del sodio. (Ablandamiento con Zeolita)

El ablandamiento con zeolita es el proceso de intercambio iónico más antiguo y más simple, el cual consiste en que se pone agua dura en contacto con la resina del intercambiador iónico, que posee cationes de sodio, elemento que reemplaza a los cationes calcio, magnesio, hierro y manganeso, principales productores de la dureza. Cuando se agota la capacidad de la resina, ésta se regenera con una solución concentrada de cloruro de sodio (NaCl) donde el sodio reemplaza al calcio y el magnesio, siendo estos últimos eliminados en forma de cloruros. En el agua tratada por este método aparece la misma cantidad de aniones originales, todos ellos asociados con el catión sodio. Durante el proceso, la dureza del agua puede variar así como la velocidad del flujo a través del sistema, aunque el lecho intercambiador continúa operando de manera efectiva en la producción de agua blanda. Las resinas más empleadas son las zeolitas naturales, que son silicatos de aluminio y sodio (natrolita y analcita) que tienen la capacidad de eliminar de 7.000 a 12000 gramos de dureza por metro cúbico de zeolitas, pero en los últimos años se han desarrollado zeolitas sintéticas que tienen la propiedad de poder cambiar sus bases y eliminar de 20.000 a 60.000 gramos de dureza por metro cúbico de zeolita ^[3, 44, 46].

Esquemáticamente se producen las siguientes reacciones:

Reacción de Ablandamiento:



Reacción de Regeneración:



La selectividad del intercambiador, se refiere a que éste muestra una mayor afinidad por algunos iones que por otros, en este caso prefiere al calcio sobre el magnesio, por lo que este proceso no es tan eficiente en la remoción de sales de magnesio.

El diseño del equipo es simple, consta de un armazón de acero que soporta el lecho intercambiador de iones provisto de tuberías y válvulas que permiten las operaciones esenciales de ablandamiento, retrolavado, ensalmuerado y enjuagado. Para prevenir la incrustación en el lecho, el agua cruda no debe contener material coloidal o suspendido, bacterias, compuestos orgánicos, ni agentes oxidantes como cloro, grasas o aceites ^[4, 46].

b) Ciclo del Hidrógeno.

El mismo tipo de resina utilizada en ciclo del sodio puede ser empleado en el hidrógeno, con la única diferencia que la regeneración debe realizarse con un ácido. Como regenerante se usa normalmente ácido sulfúrico debido a su menor costo con respecto a otros ácidos minerales.

En este ciclo, al utilizar una resina intercambiadora fuertemente ácida, son reemplazados los cationes de calcio, magnesio y sodio por iones de hidrógeno, convirtiendo las sales efluentes en una cantidad equivalente del correspondiente ácido, es decir, bicarbonatos, sulfatos y cloruros se transforman en ácido carbónico, sulfúrico y clorhídrico respectivamente, los que aparecen en el efluente en concentración diluida. Sólo el ácido carbónico es inestable y se descompone en agua y CO_2 , pudiendo eliminarse este último por aireación.

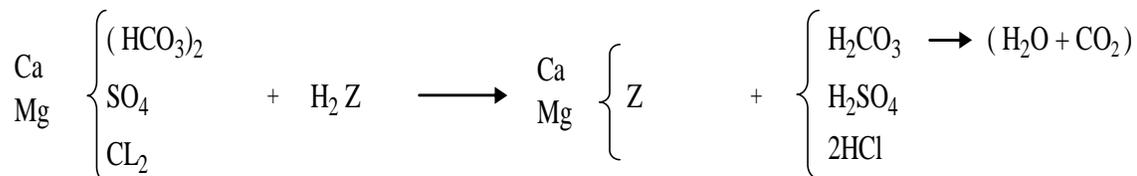
El ciclo del hidrógeno puede utilizarse también con resinas intercambiadoras catiónicas débilmente ácidas, en los cuales el hidrógeno puede reemplazar sólo a los cationes asociados a sales de ácidos débiles principalmente bicarbonatos. Esta resina puede ser utilizada para desalcalinizar el agua cruda al remover toda la dureza en forma de bicarbonatos. En este caso el ciclo de hidrógeno es muy efectivo, con una alta capacidad de intercambio.

En el ciclo del hidrógeno, el regenerante y el agua tratada son ácidos con tendencia corrosiva, por lo que el estanque intercambiador, tuberías y válvulas deben ser protegidos o estar compuestos de materiales resistentes a la corrosión. El agua tratada o efluente del intercambiador del ciclo del hidrógeno debe ser acondicionado para su uso posterior ya que el pH es bajo y contiene CO_2 .

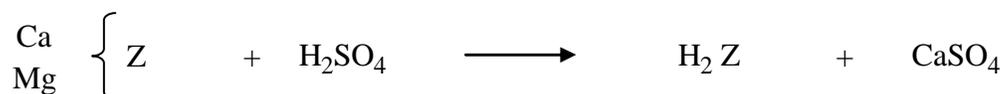
Puede ser una práctica corriente para obtener un agua con bajos niveles de dureza y alcalinidad el utilizar en serie un intercambiador del ciclo hidrógeno seguido de una unidad del ciclo del sodio o bien utilizar dos unidades en paralelo una de cada ciclo, mezclando ambos efluentes.

Esquemáticamente se producen las siguientes reacciones:

Reacción de Ablandamiento:



Reacción de Regeneración:



b) Desmineralización.

La desmineralización por aplicación de intercambio iónico requiere del uso de resinas catiónicas y aniónicas colocadas en unidades en serie o en una sola unidad de lecho intercambiador mixto. Los iones productores de la dureza en el agua son removidos por un intercambiador del ciclo del sodio o del hidrógeno y posteriormente los aniones asociados a ellos son eliminados por resinas aniónicas.

Las resinas de intercambio aniónico se clasifican en dos categorías generales, ellas son base débil y base fuerte, que se utilizan según el tratamiento que se desee. Los intercambiadores débilmente básicos remueven principalmente aniones asociados a ácidos fuertes por un proceso que se parece más a la absorción que al intercambio, no eliminando compuestos de sílice. Estas unidades son aplicables cuando el agua tiene un alto contenido de sulfatos y cloruros. Los intercambiadores fuertemente básicos son capaces de remover prácticamente todos los aniones presentes en el agua incluyendo compuestos de sílice de ciertos ácidos orgánicos. Éstos se encuentran disponibles como geles o lechos de macroporos, que se hacen con espaciamientos internos que incrementan el área de contacto total. Estas resinas tienen mayor resistencia a los esfuerzos físicos y químicos y usualmente tiene mayor resistencia a la incrustación orgánica^[43, 46].

El método de ablandamiento por intercambio iónico presenta ventajas para caudales bajos o medianos por la simpleza del control y operación de éste. Operando en este rango de caudales y para la dureza variable del afluente, se produce un agua de calidad prácticamente constante, y con niveles de remoción mayores a los obtenidos por el método cal-carbonato.

Algunos de los inconvenientes de este método se basan en que, para mantener un funcionamiento eficiente, se debe trabajar con agua con bajos contenidos de sólidos suspendidos para evitar la colmatación del lecho, ya que esto aumenta la presión del circuito y las pérdidas de la capacidad de intercambio de las resinas. Este método además requiere paradas continuas del equipo para la regeneración del medio y se debe tener un control permanente de la calidad de agua afluente y efluente del sistema.

Otros tipos de inconvenientes derivados del ablandamiento doméstico de agua potable por este método, se generan porque el agua ablandada puede tener excesivas concentraciones de sodio, lo que puede generar problemas para personas hipertensas sal dependientes, además se elimina el cloro residual libre, compuesto que mantiene la seguridad bacteriológica de las aguas e impide que se contaminen y nos aporten infecciones, por lo que al desaparecer este compuesto las posibilidades de contaminación son altísimas^[47].

5.3 TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA LA REMOCIÓN DE DUREZA.

5.3.1 Procesos de Membranas

En la purificación de aguas mediante la separación por membrana, el agua pasa a través de una membrana en virtud de una fuerza impulsora o una combinación de fuerzas impulsoras, dejando atrás una porción de impurezas originales que se presentan como un concentrado. El tipo de membrana o barrera, el método de aplicación de las fuerzas impulsoras y las características del agua determinan la cantidad de impurezas eliminadas^[4].

Los procesos de membrana más utilizados son la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la osmosis inversa, siendo éstos dos últimos los más usados para la remoción de la dureza.

La *Osmosis Inversa* (OI) está basada en la búsqueda fundamental del equilibrio. Si dos fluidos que contienen diferente concentración de sólidos disueltos son puestos en contacto, éstos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos fluidos están separados por una membrana semipermeable, uno de ellos (el de menor concentración) se moverá a través de la membrana hacia el fluido que tenga una mayor concentración de sólidos disueltos. La diferencia de altura representa la presión osmótica. Aplicando en la columna del fluido una presión superior a la presión osmótica se obtiene el efecto inverso. Los fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna^[44, 48].

Las presiones utilizadas en este proceso van desde los 5.0 – 8.0 MPa, dependiendo de la aplicación. El proceso de osmosis inversa rechaza los iones monovalentes y compuestos orgánicos de peso molecular mayores a 50, ya que el tamaño de los poros de la membrana es de menos de 0.002 μm ^[49].

Por este método se eliminan el calcio y el magnesio en un 94- 98%, pero también se eliminan el sodio en un 87-93%, los nitratos en 60-75% y los iones de cloruro y fluoruro (87-93%) ^[3].

La *Nanofiltración* (NF), también llamada osmosis inversa a baja presión o desdurecimiento por membrana, en términos de la selectividad de la membrana se encuentra entre las membranas de la osmosis inversa y la ultrafiltración y posee un tamaño de poros típicamente entre 0.001 y 0.01 μm . Estas membranas permiten débilmente el paso de iones monovalentes como el sodio y el potasio, pero rechazan una proporción alta de iones divalentes como el calcio y el magnesio y de moléculas orgánicas de peso molecular mayor a 200. La presión de trabajo usada en la nanofiltración es mucho menor que en la osmosis inversa, normalmente son alrededor de 0.5 a 1.5 MPa ^[48, 49].

Las membranas de NF ofrecen una alternativa de tratamiento singular, ya que eliminan contaminantes específicos de aguas con bajos sólidos disueltos totales (SDT). Este método normalmente elimina en un 80% a 95% de la dureza total y 70 % de iones monovalentes ^[48].

Las membranas semi permeables utilizadas en estos procesos (OI y NF), dependen de algunos factores como el pH, la turbidez y la concentración de cloro. Las membranas de acetato de celulosa generalmente requieren que el agua de alimentación tenga un pH de 5.0 a 6.0 para minimizar la hidrólisis de la membrana. Las membranas de poliamida se dañan con la exposición al cloro. Las configuraciones de membranas más utilizadas son las de fibras finas y las de tejido espiral. Las de tejido de espiral tienen una mayor tolerancia a los sólidos suspendidos y son menos susceptibles a la incrustación, en comparación con la de fibras finas. La eficiencia de los elementos de las membranas puede verse afectadas por la incrustación de componentes insolubles o por la retención de materiales coloidales suspendidos. Por lo anterior, es muy importante considerar en el diseño de estos procesos de membrana (OI y NF) un pretratamiento para proteger la membrana de este tipo de fenómenos, con el objeto de facilitar la limpieza de las membranas ^[44].

Estos procesos presentan una serie de beneficios, como trabajar con una amplia gama de caudales y cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua cruda. Son sistemas automáticos que remueven bacterias y casi todos los contaminantes iónicos, presentan una alta eficiencia en la remoción de dureza.

Cabe destacar que el más utilizado en la remoción de dureza es la nanofiltración, ya que solo remueve la dureza y parcialmente los sólidos disueltos totales, sus membranas tienen menor tendencia al ensuciamiento que las de osmosis inversa y al trabajar con menor presión, disminuye el costo de energía. Por otro lado, la osmosis inversa remueve o elimina todos los elementos que entran a formar parte de la composición del agua como cloruros, sodio, potasio, sulfatos y entre otros los cuales son necesarios para el ser humano. Ambos métodos hacen desaparecer el cloro residual libre presente en el agua potable además del flúor, el cual juega un rol muy importante en la prevención de las caries en la población infantil.

Las limitaciones de estos procesos son los altos niveles de pretratamiento que se requieren en algunos casos, el manejo de sus aguas de desecho y los altos costos de inversión inicial y operación que poseen.

5.3.2 Evaporación – Condensación. ^[44]

Este método constituye un proceso térmico, por medio del cual el agua se somete a calentamiento hasta llegar a su punto de ebullición, colectando posteriormente el vapor en un condensador para obtener agua pura. A medida que se evapora el agua de la solución y el líquido se vuelve más concentrado, se llega a un punto en que se rebasa la solubilidad de la sal, esto provoca la precipitación por lo común en forma de incrustaciones sobre las superficies de transferencia de calor donde el agua es evaporada, las incrustaciones pueden consistir en sales de calcio, magnesio y sílice. Esta incrustación disminuye en gran cantidad la velocidad de transferencia de calor, retarda la evaporación y reduce la eficiencia térmica.

5.3.3 Efecto del Campo Magnético. ^[50]

En los últimos años se ha desarrollado una nueva técnica para el tratamiento de aguas duras que se conoce como Tratamiento Magnético del agua, el cual consiste en hacer pasar el agua dura por un campo magnético alto (del orden de 500 Gauss) con un caudal medio del orden de algunos litros por minuto, luego de lo cual el agua adquiere una propiedad singular: no produce incrustaciones.

El mecanismo por el cual el tratamiento magnético afecta las propiedades del agua dura no ha podido hasta la fecha ser explicado satisfactoriamente, existiendo si ciertos criterios que tratan de explicar de modo cualitativo el proceso. Experimentos efectuados en torno a este fenómeno indican una clara dependencia a la intensidad del campo magnético aplicado y la velocidad del fluido, pero existe duda en el efecto del campo con respecto a la estructura del agua surgiendo dos alternativas, una que implica un reforzamiento del poder de atracción de los iones diluidos u otra que actúa sobre las moléculas de agua rompiendo el fuerte encapsulamiento de los iones. En esta última actúa rompiendo directamente en la solución el enclaustramiento de las impurezas (iones), propiciando así que se liberen en la

misma solución microcristales no ligados al recipiente (arenilla fina), los cuales más tarde precipitan.

El efecto más interesante de la aplicación de campo magnético sobre aguas duras es la formación casi inmediata de microcristales que dependiendo de las condiciones, se mantienen en suspensión y/o se van precipitando. El tipo de microcristales generados dependen principalmente de los constituyentes del agua dura y de los parámetros del tratamiento magnético.

La efectividad del tratamiento magnético se encuentra en la prevención de las incrustaciones, no en la remoción de dureza, ya que prácticamente no remueve dureza. Esta prevención se origina por el efecto del campo magnético sobre el agua y viene dada por la generación de microcristales de la estructura de argonita, la cual se diferencia de la estructura cristalina predominante en las incrustaciones convencionales, que, en el caso del carbonato de calcio, se forma de manera natural la estructura de calcita.

Se han reportado tanto experiencias positivas como negativas de la aplicación de esta técnica, dadas por las condiciones específicas en que se debe realizar el tratamiento magnético, las que dependen críticamente del campo aplicado. Por otro lado se han descrito diversas aplicaciones novedosas del tratamiento magnético en múltiples áreas (agricultura, medicina, veterinaria, etc.) indicando un futuro prometedor de esta técnica. Una de las limitaciones de este tratamiento es que sólo es aplicable a caudales pequeños y se utilizaría para el uso doméstico.

CAPÍTULO VI:
ESTUDIO DE CASO: DUREZA EN
AGUAS CHILENAS

CAPÍTULO VI: ESTUDIO DE CASO: DUREZA EN AGUAS CHILENAS.

6.1 ANTECEDENTES DE DUREZA, CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO EN CHILE.

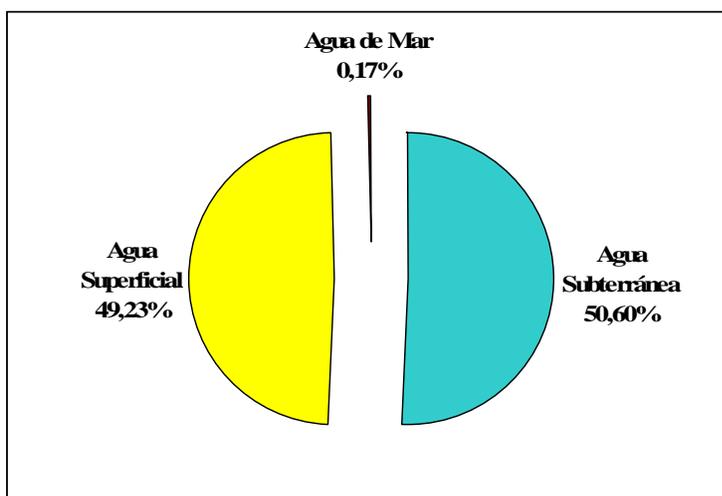
6.1.1 Dureza, Calcio y Magnesio en el Agua Potable.

En Chile, la selección de las fuentes de abastecimiento que utiliza una empresa sanitaria para producir agua potable depende de la disponibilidad del recurso en la zona, la calidad del agua cruda y la factibilidad técnica y económica de su explotación^[51].

Datos estadísticos arrojados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) durante el año 2004, señalan que en la zona norte del país, las empresas sanitarias explotan fundamentalmente fuentes subterráneas debido a la escasez relativa del recurso. En el extremo sur en cambio, el abastecimiento es exclusivamente con fuentes superficiales. En el centro, entre las regiones de Valparaíso y de Los Lagos, las empresas utilizan tanto fuentes superficiales como subterráneas para el abastecimiento de agua potable. A nivel nacional, sin embargo, los datos señalan que la producción se reparte equitativamente entre las fuentes de agua superficial y las fuentes subterráneas.

La capacidad de producción de las captaciones para agua potable reguladas por la SISS en el año 2004, a lo largo de todo el país es de 88.714,4 litros/segundo, de los cuales 44.887,5 litros/segundo (50,06% del total) corresponden a aguas subterráneas y 43.676,9 litros/segundo (49,23% del total) corresponden a aguas superficiales, tal como lo muestra la Figura 6.1. Un caso particular ocurre en Antofagasta donde parte de su abastecimiento es agua de mar desalada, el que alcanza a 150 litros/segundos^[49] representado el 0,17% del total. Estos datos quedan representados en la Figura 6.1.

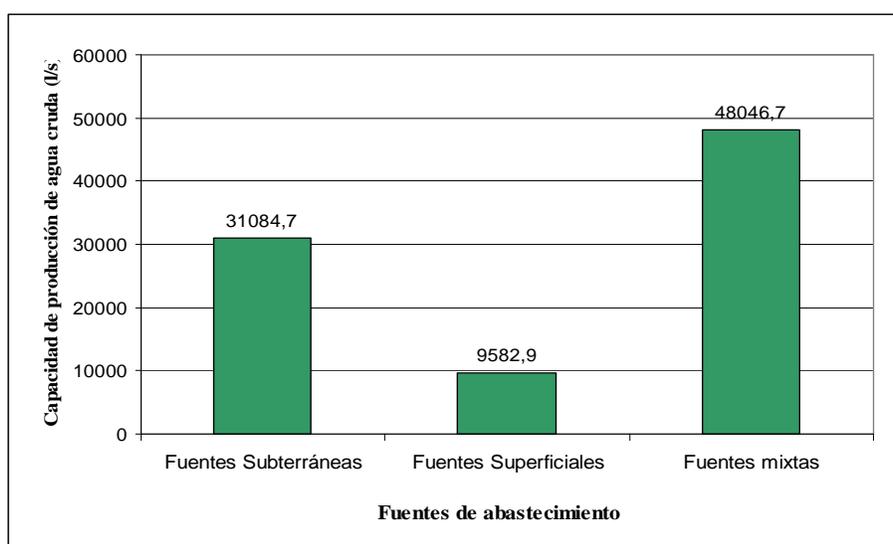
Figura 6.1: Fuentes de agua potable en Chile.



Fuente: SISS 2004 y [49]

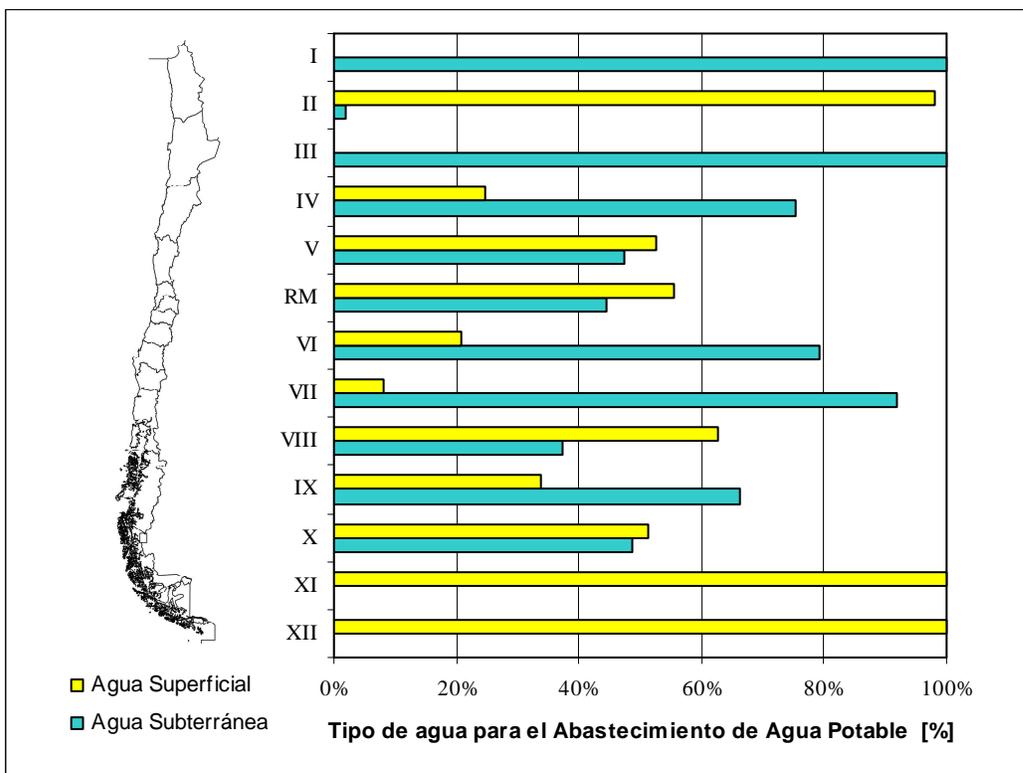
De un total nacional de 293 servicios o sistemas, el 62,5% se abastece exclusivamente con recursos subterráneos; el 22,5% se abastece exclusivamente con recursos superficiales (considerando el agua de mar de como recurso superficial) y el 15% se abastece con recursos mixtos, los cuales fueron representados en el Gráfico 6.1 (Para un análisis más detallado ver Anexo 4). La capacidad de producción de los servicios que se abastecen con fuentes mixtas puede ser muy superior a los de una sola fuente por el mayor grado de seguridad para el abastecimiento, sobre todo cuando el recurso subterráneo actúa como fuente en caso de sequía o períodos de estiaje. Tal es el caso de Aguas Andinas, fundamentalmente por la influencia del Río Maipo ^[51].

Gráfico 6.1: Producción Nacional por tipo de fuente 2004.



Agrupando la capacidad de producción de las captaciones superficiales y subterráneas de las diferentes empresas sanitarias por región, tenemos que la relación agua subterránea y superficial es la que se representa en el Gráfico 6.2.

Gráfico 6.2: Relación entre las producciones de captaciones de agua superficial y subterráneas para el abastecimiento de agua potable en Chile.



Fuente: SISS 2004.

Cabe destacar que esta relación es sólo para los servicios que están regulados por la SISS, quedando excluidos los sistemas que abastecen aguas potables rurales, los que son controlados por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y de los cuales no se posee esta información.

En general, las aguas superficiales utilizadas en el consumo humano en Chile provienen principalmente de los ríos, debido a su fácil acceso y calidad, sin embargo, esta fuente es bastante vulnerable a la contaminación, por el contacto directo que tiene con la atmósfera, suelos y aguas subterráneas. Generalmente las aguas de los ríos son carbonatadas o sulfatadas, siendo las primeras las más comunes, en donde predomina el ión carbonato en su composición media. Estas fuentes presentan composiciones químicas y físicas muy variadas a lo largo de Chile y con respecto, específicamente, a la dureza, calcio y magnesio también se presentan grandes variaciones a nivel nacional, tal como se presentará más adelante.

Las aguas subterráneas son una fuente de agua “pura” por excelencia, que cada día están siendo más utilizadas, y que a pesar de tener un mayor costo de explotación que el agua superficial, presenta en general una calidad superior, requiriendo una menor cantidad de tratamientos a la hora de ser potabilizada. De hecho, en Chile las aguas provenientes de fuentes subterráneas prácticamente reciben sólo el proceso de cloración antes de ser consumidas por la población, lo que resulta de muy bajo costo y de fácil manejo ^[52].

Las aguas subterráneas contienen principalmente bicarbonatos, sulfatos y cloruros de metales alcalinos y alcalino-térreos. Las sales contenidas en estas aguas dependerá de su origen, de la composición de las rocas y suelos adyacentes, y del tiempo que ha estado el agua en contacto con su entorno.

Los agentes físicos y químicos que actúan sobre las aguas subterráneas que se filtran por el suelo y por las rocas pueden ser los siguientes: la evaporación, el intercambio de bases, la adsorción, la oxidación de sulfuros y otras sales, la reducción de los sulfatos, la precipitación de los hidróxidos, la carbonatación de las bases, la pérdida de bicarbonatos y la mezcla con otras aguas ^[1].

La metodología utilizada para la recopilación, procesamiento y análisis de los antecedentes de dureza, calcio y magnesio en el agua potable en Chile, se divide en 3 etapas: recopilación de información; análisis y procesamiento de los antecedentes recopilados y; presentación y análisis de la información procesada.

a) Recopilación de Información.

La calidad de las aguas potables en relación con su composición físico-química compete directamente a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y al Ministerio de Salud. Por ello se solicitaron los antecedentes a la SISS, la cual posee valores de los parámetros registrados en la Nch409/1 Of.2005. Por tal motivo, sólo se utilizan los datos de magnesio pertenecientes al período 2003 – 2004. Los datos que entrega la SISS ^[53] corresponden a los 293 servicios, los cuales en su mayoría pertenecen a centros urbanos.

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) entregó información correspondiente a diferentes años perteneciente a algunas de las comunas rurales. Con relación a la composición química, en todos los casos mencionados solo se logró obtener información respecto al magnesio y en algunos casos, datos de dureza y calcio.

Con estos datos recopilados se realizó la búsqueda de antecedentes de la dureza en Chile y se encontró el estudio realizado por el Sr. Juan D´ Etigny ^[54] en 1983, en el cual se encontraban registrados datos de dureza total y dureza cálcica en mg/L de CaCO₃, de gran parte de los sistemas de distribución a nivel comunal.

Además, se solicitaron a la Dirección General de Aguas (DGA) datos de calcio y magnesio correspondientes a estaciones de calidad del agua, asociadas a fuentes de producción de agua potable.

b) Análisis y Procesamiento de los Antecedentes Recopilados.

Luego de la etapa anterior, se procedió al procesamiento de los datos recopilados. Para obtener la concentración de magnesio de los distintos servicios, se promediaron los valores entregados por la SISS, correspondientes a los años 2003 y 2004. En algunas comunas existen 2 ó más servicios que abastecen a una misma comuna. En estos casos, se optó por asignar a la comuna, el servicio que tiene mayor producción diaria ^[55].

Los datos entregados por la DOH, fueron a su vez procesados. En los casos en que se contaba con más de un comité de agua potable rural asociado por comuna, se optó por dejar sólo el servicio con mayor producción, al igual que para los datos entregados por la SISS.

Con el procesamiento antes señalado, se obtuvieron los datos de magnesio en los sistemas de distribución de una gran cantidad de comunas a nivel nacional. Al no existir registros actuales de dureza se procedió a utilizar los antecedentes reportados por D' Etigny ^[54], el cual entrega una cantidad importante de datos a nivel comunal, como son datos de dureza total y dureza cálcica del año 1983. Estos datos al igual que los otros, fueron revisados y ordenados a nivel comunal, existiendo también en algunos casos 2 servicios asociados a una comuna, donde se tomó la misma decisión antes señalada, asociando a la comuna el servicio de mayor producción.

Con los datos de D' Etigny , se procedió a calcular la dureza magnésica de la siguiente forma :

$$Dureza\ Magnésica\ (DM) = Dureza\ Total\ (DT) - Dureza\ Cálcica\ (DC) \quad (Ec. 6.1)$$

Todos estos datos se encuentran en mg/L de CaCO₃. Entonces teniendo la dureza cálcica y la dureza magnésica, se puede calcular el calcio y el magnesio en mg/L, respectivamente de la siguiente forma:

Para el calcio:

$$DC \left[\frac{mg\ CaCO_3}{L} \right] = \frac{mg\ Ca}{L} \times PEquivalente\ CaCO_3 \quad (Ec. 6.2)$$

Donde:

$$PEquivalente Ca = \frac{P Molecular Ca}{N^{\circ}Valencia Ca} = \frac{40,08}{2} = 20,04 \quad (\text{Ec. 6.3})$$

$$PEquivalente CaCO_3 = \frac{P Molecular CaCO_3}{N^{\circ}Valencia CaCO_3} = \frac{100,06}{2} = 50,03 \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Y evaluando Ec. 6.2 tenemos:

$$DC \left[\frac{mg CaCO_3}{L} \right] = \frac{mg Ca/L}{20,04} \times 50,03 = 2,497 \times mg Ca/L \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Despejando el calcio tenemos:

$$mg Ca/L = \frac{DC \left[\frac{mg CaCO_3}{L} \right]}{2,497} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Para el magnesio:

$$DM \left[\frac{mg CaCO_3}{L} \right] = \frac{mg Mg/L}{PEquivalente Mg} \times PEquivalente CaCO_3 \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Donde:

$$PEquivalente Ca = \frac{P Molecular Mg}{N^{\circ}Valencia Mg} = \frac{24,30}{2} = 12,15 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Y evaluando Ec. 6.7 tenemos:

$$DM \left[\frac{mg CaCO_3}{L} \right] = \frac{mg Mg/L}{12,15} \times 50,03 = 4,118 \times mg Mg/L \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Despejando el magnesio tenemos:

$$mg\ Mg/L = \frac{DM \left[\frac{mg\ CaCO_3}{L} \right]}{4,118} \quad (\text{Ec.6.10})$$

Teniendo las concentraciones de calcio y magnesio del año 1983, se busca la relación entre el calcio y el magnesio de la siguiente forma:

$$meq\ Ca = \frac{mg\ Ca/L}{PEquivalente\ Mg} \quad (\text{Ec.6.11})$$

$$meq\ Mg = \frac{mg\ Mg/L}{PEquivalente\ Mg} \quad (\text{Ec.6.12})$$

$$\text{Relación } \frac{Ca}{Mg} = \frac{meq\ Ca}{meq\ Mg} \quad (\text{Ec.6.13})$$

Teniendo esta relación entre el calcio y el magnesio en el año 1983, se pueden extrapolar los datos del calcio, ya que tenemos la información de magnesio obtenida de la SISS del período 2003-2004.

Debido a que en general ni las condiciones, ni las fuentes de captación fueron cambiadas entre los años 1983 y 2004, se asume que esta extrapolación es correcta, ya que la composición química de las aguas, con respecto al calcio y al magnesio, se mantiene relativamente constante a lo largo de este período de tiempo, debido a que estas sales provienen de la descomposición geológica del terreno y las rocas sedimentarias, condiciones que se pueden suponer, se mantienen constantes. Además, no es común que exista una contaminación antrópica de las fuentes de agua potable con calcio y magnesio, a excepción de algunos tratamientos de desacidificación para el agua subterránea en que se utiliza hidróxido de calcio, lo que podría hacer variar los niveles de estos compuestos.

Cabe destacar que para realizar esta extrapolación se revisaron los casos en donde la relación calcio y magnesio se podía suponer válida y también aquellos casos en que no lo era. Estos son los siguientes:

- Se revisaron las captaciones (subterránea, superficial, mixta) de las comunas con las referencias 54 y 55. Si éstas eran iguales, se aceptaba la relación.
- Si la relación de calcio y magnesio era mayor a 10, se revisaban los casos puntualmente y se comparaban con la realidad provincial y regional. Si éstas diferían mucho de esta realidad, esta relación era eliminada.

Suponiendo las condiciones constantes y validando esta relación a nivel comunal, se procede al cálculo del calcio para el período 2003-2004 de la siguiente forma.

$$meq Ca_{2003-2004} = meq Mg_{2003-2004} \times \left(Rel \frac{Ca}{Mg} \right)_{1983} \quad (Ec.6.14)$$

Y teniendo los datos de calcio y magnesio se procede a calcular la Dureza Total de la siguiente forma, utilizando las ecuaciones 6.5 y 6.9:

$$DT \left[\frac{mg CaCO_3}{L} \right] = 2,497 \times \frac{mg Ca}{L} + 4,118 \times \frac{mg Mg}{L} \quad (Ec.6.15)$$

De los datos solicitados a la DGA, se obtuvieron las concentraciones de calcio y magnesio de algunas de las estaciones de calidad que ésta posee, las cuales se encuentran cerca de las captaciones para el abastecimiento de agua potable de algunas comunas. Estas fuentes de agua cruda fueron obtenidas de la SISS ^[56]. Con esta información se procedió a ubicar las estaciones de la DGA y relacionarlas con las comunas abastecidas.

Los datos de calcio y magnesio de los años 2003 y 2004 de las estaciones de la DGA utilizadas fueron promediados. Teniendo estos datos se procedió a establecer la relación calcio/magnesio (Ec.6.13). Con esta relación se procede a calcular el calcio de la siguiente forma:

$$meq Ca_{2003-2004} = meq Mg_{2003-2004} \times \left(Rel \frac{Ca}{Mg} \right)_{DGA 2003-2004} \quad (Ec.6.16)$$

Teniendo el calcio, se puede calcular la Dureza Total con la Ec.6.15. Es importante indicar que existen comunas en donde se dispone de relaciones Ca/Mg de la Tesis de D' Etigny y de los datos de la DGA. Fueron los de esta última los escogidos para el cálculo de la concentración de calcio, ya que estos datos representan de mejor manera las condiciones actuales.

Cabe destacar que para establecer las relaciones anteriores, las concentraciones de calcio y magnesio, en la planta de tratamiento y en el sistema de distribución de agua potable, se consideraron constantes, lo cual es relativamente válido ya que en la mayoría de las plantas de tratamiento a nivel nacional no existe remoción de calcio y magnesio. Sin embargo, existen casos en Chile (Arica, Antofagasta, Diego de Almagro) en donde el agua se trata por osmosis inversa, lo que efectivamente remueve estos compuestos, pero esta agua tratada, en algunas ocasiones, se mezcla con el agua cruda.

También existen algunas estaciones relacionadas con fuentes de agua cruda que no tienen datos actuales de calcio y magnesio, pero esto no presenta ningún inconveniente, debido a que fueron encontradas en informes de calidad de aguas^[57, 58] realizados por la DGA en 1994, para los cuales se establecieron las mismas relaciones antes señaladas.

En el caso de los datos entregados por la DOH, no existen antecedentes de ellos en el año 1983 en ningún organismo. Por ello, no se puede establecer ninguna relación para estos datos.

c) Presentación y análisis de la Información procesada.

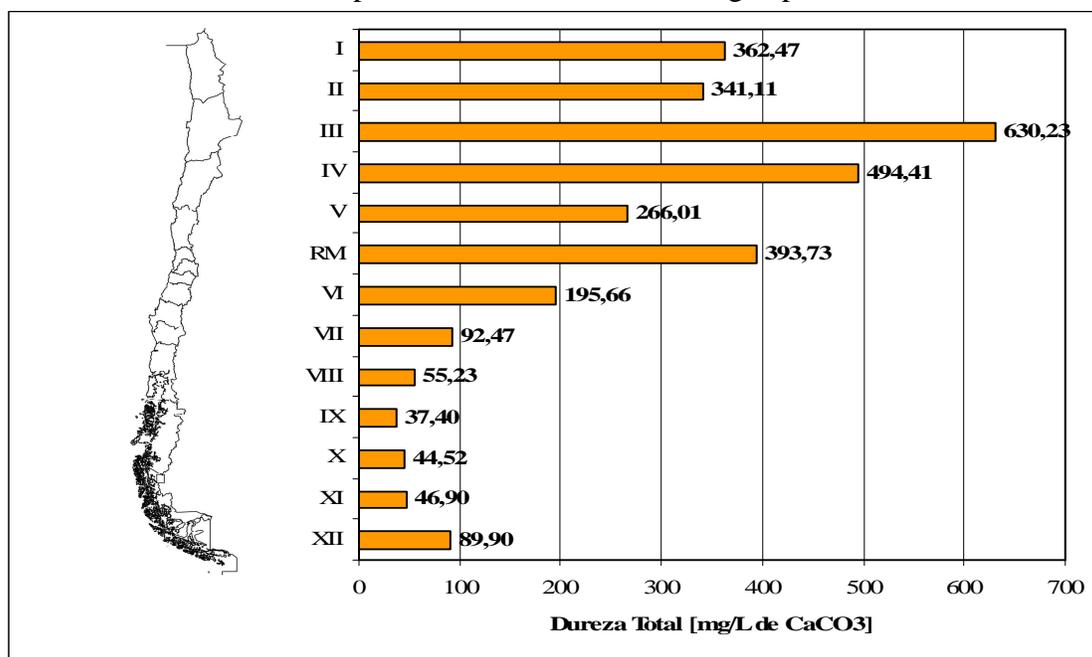
Luego de realizar el procesamiento de los antecedentes de dureza, calcio y magnesio en el agua potable a nivel nacional, se determinó la Dureza Total en mg/L de CaCO_3 , en 272 de las 342 comunas de Chile^[59, 60], correspondiendo al 79,53% del total. En el caso de las concentraciones de magnesio en el agua potable, fueron recopilados 321 de los 342 datos, correspondiendo al 93,86%, siendo en su mayoría recopilados desde la SISS y la DOH. La totalidad de los datos de Dureza, Calcio y Magnesio a nivel comunal de las regiones del país, son presentados en el Anexo 5, así como también la fuente de información, en donde se entrega cómo fue obtenida la información, por ejemplo, T83-SISS 03-04, la cual significa que la relación Ca/Mg utilizada es la correspondiente a la Tesis del año 1983^[54] y los datos de la concentración de magnesio del periodo 2003 -2004 son de la SISS, para el caso de la DOH2001 la información recopilada es de la DOH del año 2001. En este anexo también se entrega de dónde se realiza la captación^[56] y la clasificación según el nivel de dureza del agua propuesta para este estudio presentada en la Tabla 2.2.

Para comenzar el análisis, se entregan los datos de Dureza Total en mg/L de CaCO₃ a nivel nacional separados por regiones, los cuales fueron obtenidos con el promedio de la dureza del agua potable de las comunas que poseen datos en la Región, los cuales se presentan en la Tabla 6.1 y Gráfico 6.3. Las clasificaciones según el nivel de dureza a lo largo del país, fueron tomadas en base al promedio, para obtener una tendencia de la dureza del agua a nivel regional.

Tabla 6.1: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de dureza total en el agua potable en Chile.

Región	Comunas C/Info.	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]			Clasificación Propuesta	Clasificación OMS
		Promedio	Máx.	Min.		
I	6/10	362,47	658,66	11,53	Dura	Muy Dura
II	5/9	341,11	474,31	266,64	Dura	Muy Dura
III	6/9	630,23	880,93	270,64	Muy Dura	Muy Dura
IV	12/15	494,41	1236,85	135,71	Dura	Muy Dura
V	28/38	266,01	569,27	150,30	Moderadamente Dura	Muy Dura
RM	49/52	393,73	996,99	122,10	Dura	Muy Dura
VI	21/33	195,66	367,03	92,88	Moderadamente Dura	Muy Dura
VII	22/30	92,47	201,66	6,52	Blanda	Moderadamente Dura
VIII	49/52	55,23	247,91	5,59	Blanda	Blanda
IX	28/31	37,40	100,96	3,45	Blanda	Blanda
X	34/42	44,52	144,27	3,72	Blanda	Blanda
XI	9/10	46,90	130,42	3,40	Blanda	Blanda
XII	3/11	89,90	120,76	56,19	Blanda	Moderadamente Dura

Gráfico 6.3: Concentraciones promedio de la dureza en el agua potable en Chile.



Al realizar el análisis del gráfico anterior, se observa que el promedio más alto es 630,23 mg/L de CaCO₃ perteneciente a la tercera región, seguido por la cuarta y Región Metropolitana con valores de 494,41 y 393,73 mg/L de CaCO₃ respectivamente. El valor de la dureza del agua en la tercera región, es clasificado como agua muy dura (>500 mg/L de CaCO₃) y puede ser atribuido a que la tercera región se abastece principalmente de agua subterránea, la cual es agua más dura que las superficiales.

El valor más bajo lo tiene la novena región con 37,40 mg/L de CaCO₃, por lo que queda clasificada como agua blanda (<100 mg/L de CaCO₃), la cual puede causar problemas de corrosión.

A nivel país se tiene que la zona norte (I a IV) presenta un tipo de agua dura y muy dura donde los promedios regionales de las cuatro regiones son mayores a 300 mg/L de CaCO₃, en la Zona Central (V a VIII) se visualiza una zona de transición del agua dura al agua blanda, destacando la región metropolitana que presenta agua dura. En la zona sur (IX a XII), el agua según su dureza es mayoritariamente blanda con todos los promedios regionales de dureza total inferiores a 100 mg/L de CaCO₃.

Con respecto a los valores máximos, éstos se encuentran ubicados en la cuarta región y Región Metropolitana, correspondiendo a un agua extremadamente dura con valores de 1236,85 y 996,99 mg/L de CaCO₃ respectivamente. En el caso de la cuarta región, este valor corresponde a la comuna de Monte Patria ubicado en la provincia de Limarí, siendo ésta una comuna cordillerana abastecida por agua subterránea, con una alta relación Ca/Mg obtenida de la Tesis de D' Etigny ^[54]. En el caso de los valores mínimos, éstos se encuentran en la novena y undécima regiones. La comuna de Aysén presenta la menor dureza a nivel nacional con 3,40 mg/L de CaCO₃, teniendo esta comuna una fuente de abastecimiento superficial.

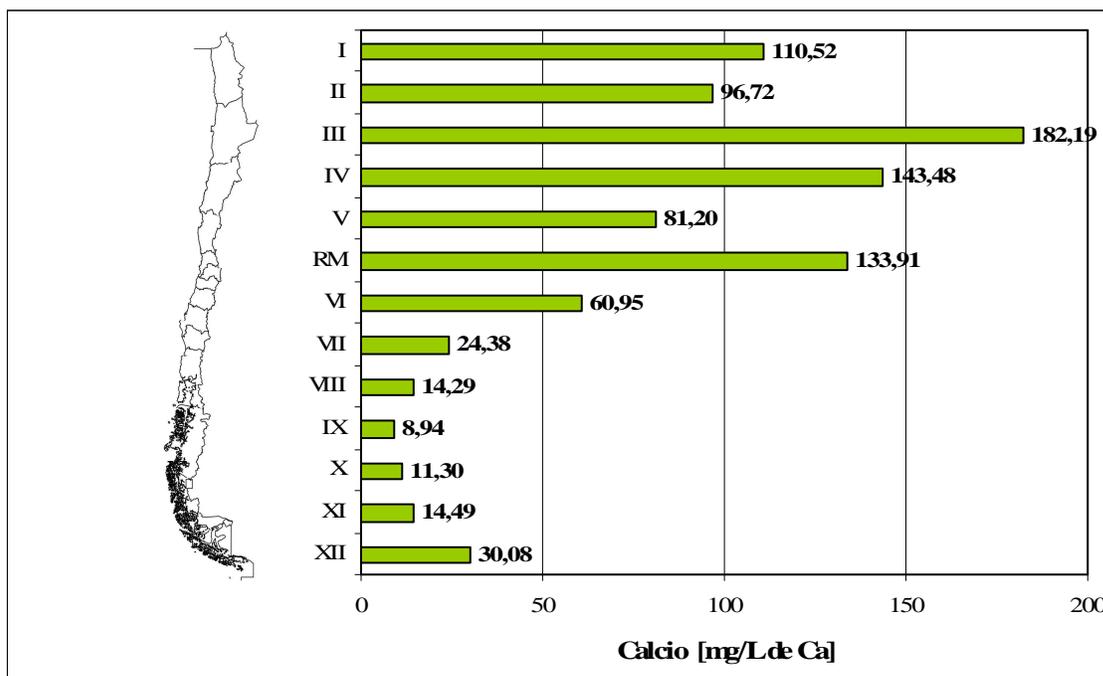
A nivel general se visualiza en el gráfico 6.3 que desde la Región Metropolitana hacia el norte se tiene agua potable mayoritariamente dura y hacia el sur el agua potable es blanda.

Teniendo analizados los datos de la Dureza Total se procede al análisis de los principales componentes, calcio y magnesio. Para el caso del calcio se realiza el mismo procedimiento utilizado para la dureza y obteniéndose el promedio regional con las comunas que poseen datos, los cuales quedan representados en la Tabla 6.2 y Gráfico 6.4.

Tabla 6.2: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Calcio en el agua potable en Chile

Región	Comunas C/Info.	Calcio [mg/L de Ca]		
		Promedio	Max.	Min.
I	6/10	110,52	216,00	4,16
II	5/9	96,72	174,32	66,40
III	6/9	182,19	273,28	90,02
IV	12/15	143,48	428,63	36,13
V	28/38	81,20	195,45	34,96
RM	49/52	133,91	354,66	39,53
VI	21/33	60,95	127,99	22,53
VII	22/30	24,38	59,03	0,98
VIII	49/52	14,29	75,66	0,67
IX	28/31	8,94	21,44	0,28
X	34/42	11,30	29,96	0,75
XI	9/10	14,49	40,49	0,82
XII	3/11	30,08	42,75	17,11

Gráfico 6.4: Concentraciones promedio del calcio en el agua potable en Chile

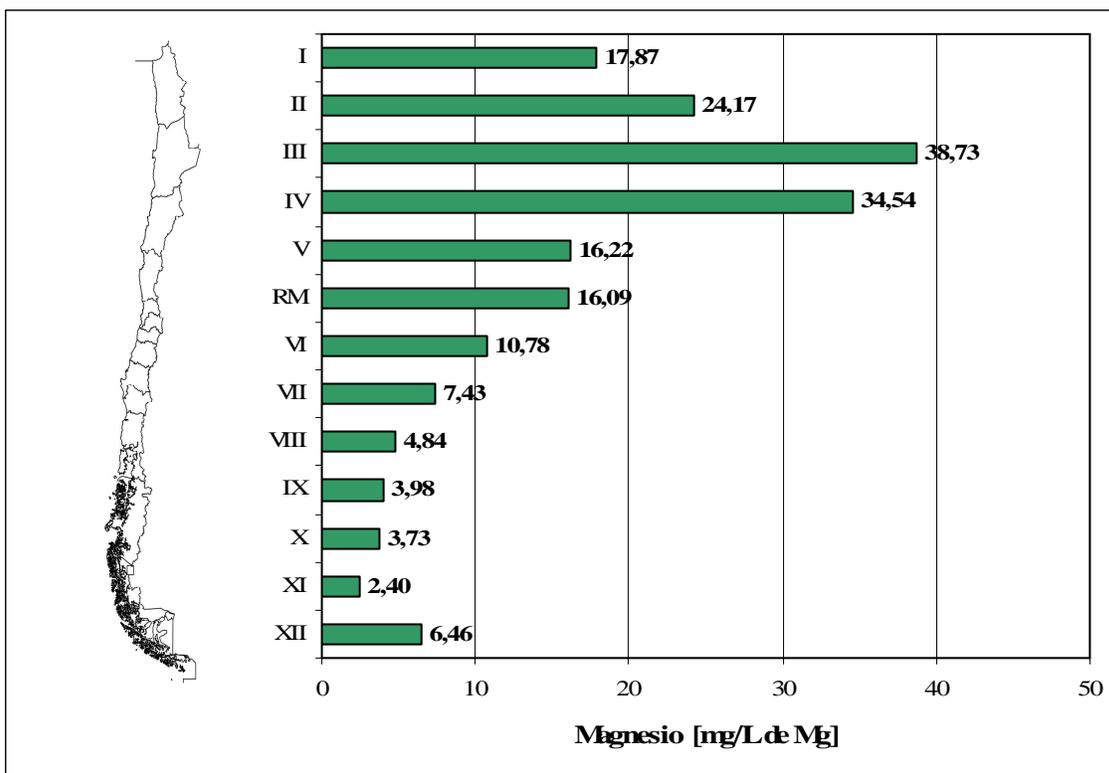


Con el mismo método antes utilizado para la dureza y el calcio, se calculan los promedios para las concentraciones de magnesio, los cuales se entregan en la Tabla 6.3 y Gráfico 6.5.

Tabla 6.3: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Magnesio en el agua potable en Chile

Región	Comunas C/Info.	Magnesio [mg/L de Mg]		
		Promedio	Máx.	Min.
I	9/10	17,87	34,18	0,28
II	6/9	24,17	32,50	9,50
III	9/9	38,73	62,25	11,15
IV	13/15	34,54	69,05	11,05
V	35/38	16,22	40,50	7,50
RM	51/52	16,09	80,80	5,30
VI	33/33	10,78	22,09	0,30
VII	26/30	7,43	14,90	0,99
VIII	51/52	4,84	21,12	0,40
IX	29/31	3,98	13,95	0,67
X	40/42	3,73	16,87	0,45
XI	9/10	2,40	7,13	0,33
XII	3/11	6,46	21,80	1,65

Gráfico 6.5: Concentraciones promedio del Magnesio en el agua potable en Chile.



Al analizar las concentraciones de calcio y magnesio, cabe destacar que los valores de este último son datos de concentraciones realmente medidas en el sistema de distribución, ya que este elemento está regulado en la NCh.409/1 Of. 2005, y por lo tanto, cada empresa sanitaria, cooperativa o comité de agua potable debe entregar estos datos a la SISS o DOH, según corresponda.

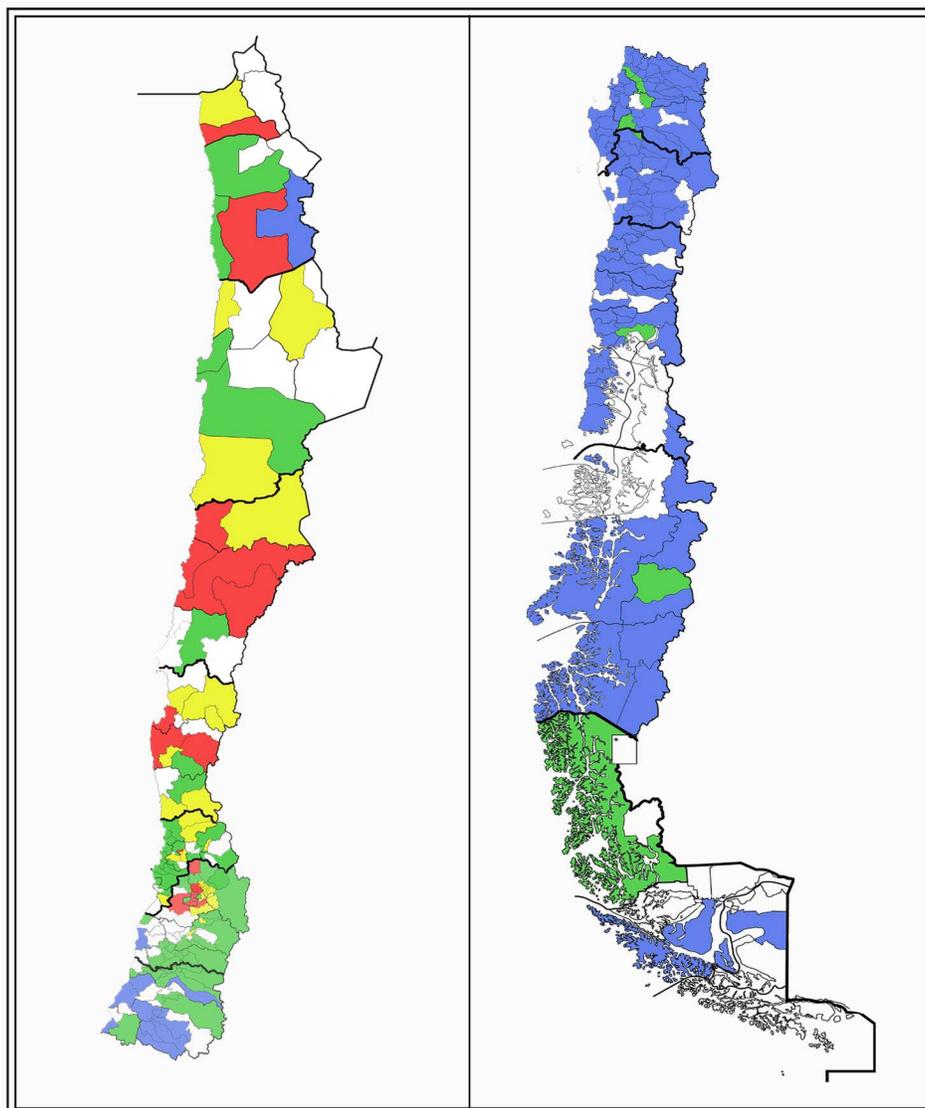
Para el calcio, se observa una distribución a lo largo del país de manera muy similar a cómo se distribuye la dureza, siendo la tercera región la que presenta la mayor concentración promedio a lo largo de Chile, con un valor de 182,19 mg/L, seguida por la cuarta con 182,19 mg/L. El máximo valor de concentración a nivel nacional se encuentra ubicado en la cuarta región y corresponde también a la comuna de Monte Patria, comuna antes señalada con el máximo para los valores de dureza total. Con respecto a la menor concentración promedio, ésta se registró en la novena región, con un valor de 8,94 mg/L al igual que la concentración mínima nacional, correspondiente a la comuna de Angol, con una concentración de 0,28 mg/L. Cabe destacar que ésta corresponde a una comuna costera, ubicada casi en el límite con la octava región, la cual se abastece de 3 captaciones superficiales, siendo la principal la del río Picoiquén. También se puede mencionar que Angol se encuentra ubicado en la cordillera de Nahuelbuta.

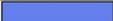
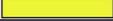
En el caso del magnesio, éste también se distribuye de forma muy similar a la dureza, teniendo sus mayores concentraciones promedio en la tercera y cuarta regiones, con valores de 38,73 mg/L y 34,54 mg/L respectivamente, pero el valor de concentración máxima del país se presenta en la Región Metropolitana, específicamente en la comuna de San Pedro, con un valor de 80,80 mg/L. En lo que se refiere a la menor concentración promedio regional, ésta se presenta en la undécima región, con un valor de 2,40 mg/L. El valor mínimo nacional se registra en la comuna de Pumanque, ubicada en la sexta región, con un valor de 0,30 mg/L, la cual es una comunidad rural de la provincia de Colchagua.

En general, se tiene que las concentraciones promedio de calcio y magnesio en el agua potable desde la primera región a la Región Metropolitana son mayores a las concentraciones obtenidas de la sexta a la duodécima región.

El análisis de los datos a nivel comunal permitió clasificarlas de acuerdo al grado de dureza del agua que las abastece. La figura 6.2 muestra esta información. El detalle región por región se encuentra incluido en el Anexo 6.

Figura 6.2: Niveles de dureza en agua potable, a nivel comunal, en Chile.



Clasificación de aguas según el grado de Dureza Total		
Ca CO ₃ (mg/l)	Tipos de Agua	Codificación
0-100	Blanda	
100-300	Moderadamente Dura	
300-500	Dura	
> 500	Muy Dura	
	Sin información	

De los datos a nivel comunal, se encontraron 21 comunas que sobrepasaron los 500 mg/L de CaCO₃ de Dureza Total, la cual es considerada por la clasificación propuesta como agua muy dura. Estas comunas son presentadas en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Comunas chilenas de dureza en el agua potable mayor a 500 mg/L de CaCO₃.

Región	Provincia	Nombre de la Comuna	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]
I	Iquique	Pozo Almonte	521,62
I	Arica	Camarones	658,66
III	Copiapó	Copiapó	880,93
III	Copiapó	Caldera	785,44
III	Copiapó	Tierra Amarilla	683,45
III	Chañaral	Chañaral	774,71
IV	Elqui	Coquimbo	662,96
IV	Choapa	Canela	628,07
IV	Limarí	Ovalle	682,51
IV	Limarí	Monte Patria	1236,85
V	Quillota	Calera	569,27
RM	Santiago	Cerrillos	695,21
RM	Santiago	Maipú	708,51
RM	Santiago	Pudahuel	572,64
RM	Chacabuco	Tiltil	754,05
RM	Maipo	Buin	503,93
RM	Melipilla	Melipilla	941,20
RM	Talagante	Talagante	743,92
RM	Talagante	Isla de Maipo	723,63
RM	Talagante	Padre Hurtado	836,48
RM	Talagante	Peñaflor	996,99

6.1.2 Dureza, Calcio y Magnesio en el Agua Mineral.

Chile participa de un ambiente muy favorable para la existencia de un importante potencial de aguas minerales, debido a la existencia de diversos factores geográficos, climáticos, tectónicos e hidrogeológicos, vinculados a su carácter de país latitudinal ubicado en el margen de una activa zona de convergencia entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Este potencial se expresa tanto en el número de fuentes identificadas, como en la calidad o concentraciones fisicoquímicas de las aguas.

Mayoritariamente, las aguas minerales afloran en la superficie y conforman vertientes o manantiales de diversa magnitud, originados tanto en unidades rocosas como en suelos, desde las cuales son captadas y aprovechadas comercialmente. En las primeras, las vías propicias para la circulación profunda corresponden a fracturas y/o fallas del terreno.

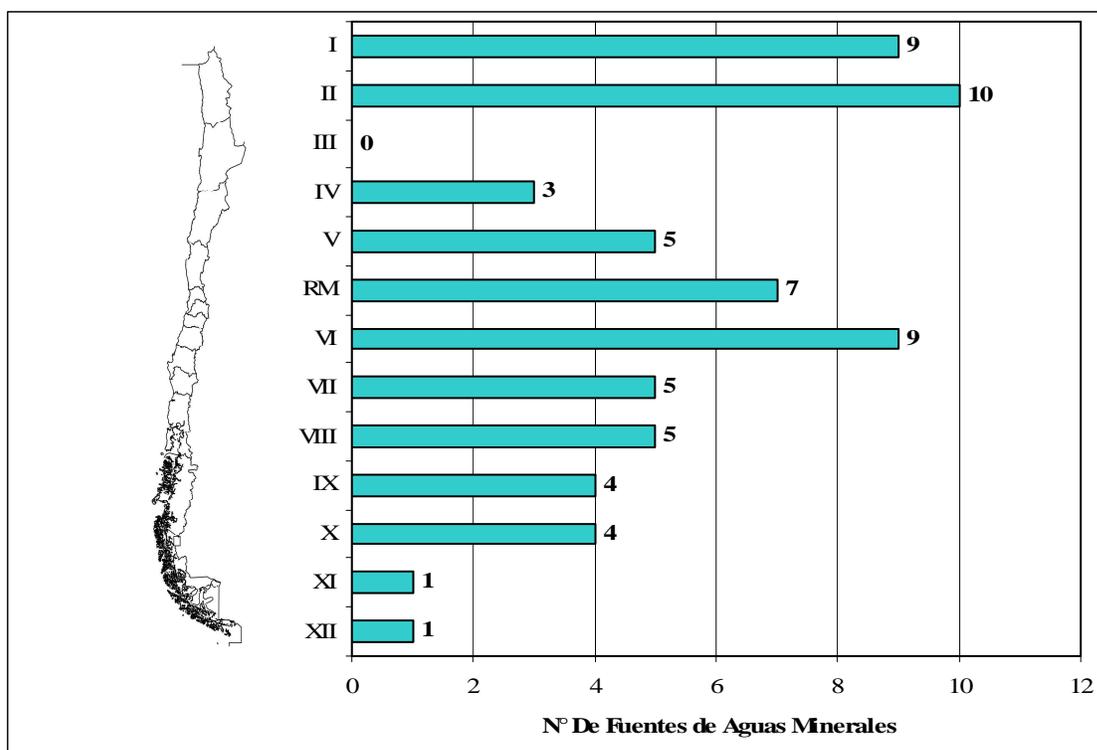
En Chile, la presencia de una gran variedad de rocas, en cuya composición participa una amplia gama de elementos mineralógicos, proporciona la base o configuración química para controlar la composición final de las aguas minerales. El régimen pluvial, nival o

mixto, proporciona las aguas meteóricas necesarias para interactuar en profundidad con las rocas del lugar, activando los procesos de disolución de éstas y la posterior incorporación en solución a las aguas; la tectónica local, capaz de generar deformaciones, fracturas o fallas y zonas de alteración, crea las vías favorables para la efectiva movilización o flujo de las aguas subterráneas. En las rocas permeables por fracturamiento, se genera un contacto menos efectivo con el agua que cuando la permeabilidad es debido a porosidad primaria; por lo tanto, la cesión de sales es más lenta ^[61].

El tiempo durante el cual, mediante circulación profunda, el agua interactúa o está en contacto directo con el medio poroso (tiempo de residencia), ejerce un claro efecto sobre la concentración de las sales en las aguas minerales: a mayores tiempos de residencia se generan aguas con mayores concentraciones de sales disueltas. En zonas montañosas, con dominio de morfologías empinadas, las aguas pluviales circulan superficialmente con gran velocidad; al predominar el escurrimiento superficial, se limita su capacidad para desarrollar aguas minerales en profundidad.

El catastro de Arturo Hauser ^[62] y el Servicio Nacional de Geología y Minería de 2001 identificó 63 fuentes de aguas minerales, distribuidas a lo largo del país, las cuales son representadas en el siguiente gráfico.

Gráfico 6.6: Catastro de fuentes minerales en Chile.



Fuente: Hauser 2001

De acuerdo a estos antecedentes, no es posible establecer zonas precisas que indiquen áreas con marcado dominio de aguas minerales. En cambio, sí es posible establecer que, particularmente, en el segmento territorial comprendido entre los 18° y 33° de latitud Sur (I a V región), los bajos niveles de precipitaciones históricas, resultan decisivos para explicar la escasez del recurso hídrico (superficial y subterráneo). Esta situación ha obligado a desarrollar permanentes campañas de prospección, que junto con ubicar y cuantificar nuevas fuentes del recurso, han permitido localizar numerosos puntos donde se registra surgencia espontánea de aguas. En las cartas topográficas estos puntos reciben múltiples denominaciones: 'puquios', manantiales, vertientes, 'ojos', 'aguadas', y se caracterizan por ser terrenos húmedos: vegas, humedales, bofedales, cuya extensión está controlada por los caudales aflorantes, lo que determina la existencia de un importante número de ellas. La utilización de técnicas de fotointerpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, ha contribuido a la localización de estos puntos de agua, debido a que se trata de sectores con marcado contraste de color respecto al entorno, los que son tácitamente atribuidos por los lugareños a verdaderas "aguas minerales". Esta denominación se asocia a la normal presencia de abundantes eflorescencias salinas y costras multicolores, producto de intensos procesos de evaporación.

La reconocida abundancia de manifestaciones de aguas minerales en terrenos de este segmento (18 y 33° de latitud Sur), tiene directa relación con la presencia de numerosas zonas de alteración hidrotermal. Sus correspondientes mecanismos genéticos, determinan que las rocas registren notables incrementos en las concentraciones de minerales; los procesos tectónicos e intrusivos coligados, junto con crear ambientes favorables (fallas, fracturas, zonas de alteración), facilitan la circulación profunda de las aguas percoladas y/o juveniles y determinan la disolución de las diversas sustancias minerales^[62].

En el resto del país, en el segmento comprendido entre los 33° y 55° de latitud Sur (V a XII región), el sostenido incremento de las precipitaciones pluviales y nivales, aumentan la disponibilidad de agua (superficial y subterránea), junto a un notable descenso en la evaporación, lo que limita la identificación de fuentes a las cuales se les asigna el carácter de minerales.

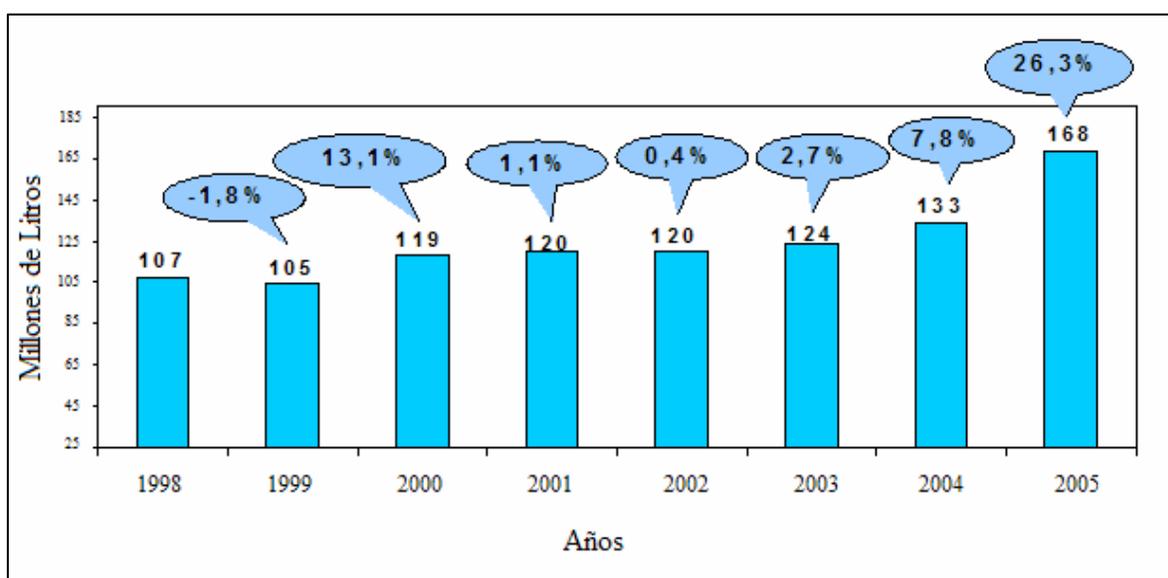
Las consideraciones expuestas restringen la posibilidad de realizar un riguroso catastro, con indicación de la ubicación, que incluya la gran mayoría de las diversas fuentes a cuyas aguas se le puede asignar el carácter de minerales. Por estas razones, se resolvió incorporar en el catastro sólo las fuentes de aguas de reconocido carácter mineral.

De las 63 fuentes registradas, actualmente hay 11 plantas de envasado de agua mineral, debido a que en las últimas tres décadas ciertos problemas económicos determinaron el cierre y/o paralización de 8 plantas. Cabe destacar que en el transcurso de este estudio fue cerrada la fuente de agua mineral Chusmisa, por inconvenientes con los derechos de agua de su fuente, pero para efectos del presente estudio será considerado como en funcionamiento.

Además, 6 de estas 11 fuentes de aguas minerales, correspondientes a las marcas Chusmisa, Mamiña, Socos, Rari-Quinamávida, Chillán y Puyehue, son objeto de aprovechamiento múltiple: balneología y envasado.

En Chile, la producción de agua mineral data aproximadamente desde los inicios de la década de los 60. Sin embargo, debido a consideraciones de estrategia comercial se limita el conocimiento o los registros oficiales de su actual producción. No obstante la Asociación Nacional de Bebidas Refrescantes (ANBER) informó que las ventas del total de gaseosas en el año 2005 alcanzaron los 1.811 millones de litros. Y específicamente en el agua envasada el año 2005 se alcanzaron los 168 millones de litros, registrando un aumento del 26,3 % con respecto al año anterior, tal como lo muestra el Gráfico 6.7, en donde también se visualiza una fuerte tendencia al crecimiento de las ventas de estos productos en los últimos 5 años. Según la ANBER esta tendencia se debe al crecimiento del ingreso de las personas, a los cambios de hábitos de consumo que privilegian crecientemente un estilo de vida sana, dieta equilibrada y prácticas de ejercicios, atributos que están muy asociados al consumo de aguas.

Gráfico 6.7: Total Aguas Ventas 1998 -2005, millones de Litros y tasa de crecimiento.



Fuente: ANBER 2005

Lo anterior refleja que el consumo per cápita de cada chileno es de 10 litros al año de agua envasada, lo cual está muy por debajo de los otros países del continente como Argentina y Uruguay que presentan un consumo per cápita promedio el año 2004 de 20,9 y 36,2 litros respectivamente, de agua envasada^[63]. Este bajo consumo en Chile refleja el estándar relativamente alto del agua potable en la mayoría de las zonas del país. Sin embargo, también es un fenómeno de ingresos: en Europa, donde el agua potable en su mayoría es de alto estándar, el consumo de agua embotellada llega casi a los 100 litros por persona, en algunos países.

Cabe destacar que el agua envasada en Chile, se divide en 3 tipos de aguas: el agua mineral, el agua purificada y las aguas saborizadas. En el año 2004, el agua mineral representó el 93% de las ventas de agua embotellada en los supermercados, pero esta cifra descendió a un 57 % en los primeros nueve meses del 2005, en tanto el agua purificada representó un 23% y el agua saborizada un 20%^[63]. Diferente a las aguas minerales, las aguas purificadas no necesitan ser embotellada de una fuente de agua en particular. En vez de esto, el agua es sometida a un tratamiento para retirar algunos minerales y agregar otros.

En particular en este estudio se analizarán las aguas minerales cuya producción proviene de 11 plantas de envasado, de acuerdo al detalle presentado en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Plantas de envasado de aguas minerales en Chile.

Región	Denominación	Marca Comercial
I	Baños de Chusmisa	Chusmisa
I	Baños de Mamiña	Mamiña
IV	Termas de Socos	Socos
V	Vertiente Porvenir	Porvenir
VI	Fuente Copequén	Cachantún
VI	Fuente Chanqueahue	Vital
VI	Vertiente Edén	Edén
VII	Vertiente Pichiboque	Villa Alegre
VII	Rari-Quinamávida	Rari
VIII	Termas de Chillan	Chillán
X	Termas Puyehue	Puyehue

La distribución porcentual de la producción total de agua mineral posee dos actores principales, Cachantún con el 59,37% y Vital con el 31,39%^[64] de la producción total de agua mineral. Se asume que las restantes 9 plantas regionales de envasado de agua mineral participarían de un porcentaje menor al 10%, junto con las importadas.

La metodología utilizada para la recopilación, procesamiento y análisis de los antecedentes de dureza, calcio y magnesio en el agua mineral en Chile, es la misma que se utilizó para el agua potable.

a) Recopilación de Información.

En Chile, la calidad de las aguas minerales en relación con su composición físico-química compete directamente al Ministerio de Salud (MINSAL), al cual las empresas que se encargan de la explotación de las fuentes, deben hacer llegar un análisis de su composición

fisicoquímica dos veces por año, estos informes deben ser presentados al Servicio de Salud correspondiente^[39]. Estos análisis entregados al MINSAL no poseen datos de concentraciones de dureza, calcio y magnesio, ya que estos compuestos no están estipulados en el Reglamento de Aguas Minerales.

Sin datos en los organismos competentes, se procedió a buscar antecedentes bibliográficos del tema, de los cuales fueron encontrados los boletines ^[62] generados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y desarrollados específicamente por el Geólogo Arturo Hauser. Además de estos datos, también se recopiló la información proveniente de las etiquetas de las diferentes aguas minerales que se expenden en Santiago y algunas de regiones.

b) Análisis y Procesamiento de los Antecedentes Recopilados.

Los datos entregados por Hauser, corresponden en algunos casos a concentraciones de dureza total, dureza carbonatada, dureza no carbonatada, calcio y magnesio. En los casos en donde no existía la concentración de dureza, ésta era calculada con las concentraciones de calcio y magnesio con la ecuación 6.15.

Los datos corresponden a un análisis efectuado en las mismas fuentes de agua mineral y corresponden a un total de 24 fuentes de las 63 catastradas. También se entregan concentraciones de calcio y magnesio estipuladas en las etiquetas de cada una de las aguas minerales chilenas. Para las aguas minerales importadas también se entregan las concentraciones de calcio y magnesio.

Finalmente, se entrega un análisis efectuado por el SERNAGEOMIN, a partir de las muestras tomadas de los envases de aguas minerales nacionales.

c) Presentación y Análisis de la Información Procesada

Para comenzar, se presenta la información correspondiente al análisis efectuado al agua mineral en su fuente de origen. Estos datos corresponden a los datos entregados por Hauser el 2001, los cuales están representados en la Tabla 6.6. La totalidad del análisis fisicoquímico se encuentra en Anexo 7

Tabla 6.6: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de fuentes de aguas minerales chilenas.

Denominación	Región	Dureza			Ca [mg/L]	Mg [mg/L]
		Total	Carb.	No Carb.		
Baños de Chusmisa	I	76,0	28,0	48,0	30,0	0,2
Baños de Mamiña	I	68,0	37,5	30,5	25,4	1,1
Termas de Socos	IV	182,7			73,2	
Termas de Jahuel	V	305,0	139,0	166,0	81,0	25
Vertiente Porvenir	V	121,0	121,0	0,0	27,0	13,0
Vertiente Valle los Naranjos	RM	124,0	61,2	62,9	25,2	14,90
Vertiente Vital Apoquindo	RM	1156,0	40,0	1116,0	440,0	14,0
Fuente Millaje	RM	43,0	43,0	0,0	15,0	1,3
El Belloto	RM	221,0	216,0	5,0	73,01	9,4
Vertiente Mostazal	VI	*165,1			48,3	10,8
Fuente de Copequén	VI	266,0	144,0	122,0	90,0	10,0
Fuente de Chanqueahue	VI	67,0	67,0	0,0	23,0	2,3
Vertiente Edén	VI	*171,3			62,0	4,0
Fuente de la Iglesia	VI	90,0	90,0	0,0	27,0	5,3
Baños Tanguao	VII	95,0	14,0	81,0	38,0	0,04
Vertiente Pichiboque	VII	168,0	168,0	0,0	36,0	19,0
Termas de Panimávida	VII	51,0	21,0	34,0	22,0	
Termas de Quinamávida	VII	3,7	3,7	0,0	1,5	0,04
Temas de Chillán	VIII	111,7			33,6	6,7
Baños Huechulepún	IX	430,0	430,0	0,0	18,0	94,0
Termas de Puyehue	X	78,0			24,0	4,0
Manantial Yelcho	X	675,0	675,0	0,0	122	90
Baños Moraga	X	74,0	74,0	0,0	13	10
Vertiente Laguna Amarga	XII	*1088,2			360	46

* Estos datos fueron calculados con la Ecuación 6.15

Fuente: Hauser 2001.

Analizando la tabla anterior se tienen 10 fuentes de agua minerales que se podrían clasificar como agua blanda (< 100 mg/L), siendo la más blanda la fuente de agua mineral de las termas de Quinamávida, ubicada en la VII región, que además tiene uso termal. Esta agua posee tres nombres comerciales, se le conoce como agua mineral Rari, Quinamávida y en estos últimos años esta siendo envasada por los hipermercados Líder.

Como moderadamente dura (100-300 mg/L), se puede clasificar a 9 fuentes de agua mineral que se encuentran ubicadas entre la cuarta y octava regiones, destacando que de las 9 fuentes mencionadas, 6 cuentan con su planta de envasado actualmente en operación. La más destacada de este grupo es la fuente Copequén, que es la fuente del agua mineral más vendida en Chile con el nombre comercial de Cachantún, perteneciente a la Compañía de Cervecerías Unidas (CCU).

Solo dos fuentes se pueden clasificar como agua dura (300-500 mg/L), una ubicada en la V región y la otra en la novena región. Cabe destacar que la fuente ubicada en la V región en el pasado era objeto de explotación, con la denominación de agua mineral Jahuel.

Para la denominación de aguas muy duras o sea con niveles mayores a 500 mg/L de dureza total, existen 3 fuentes ubicadas en la décima, duodécima y Región Metropolitana, pero el mayor valor se encuentra en la Región Metropolitana, en la fuente llamada Vital Apoquindo, con una dureza total de 1156 mg/L y donde destaca el valor de la concentración de calcio con 440 mg/L y también la predominante dureza no carbonatada o permanente.

Según la clasificación Argentina para aguas minerales, descrita en el capítulo IV, se tiene que existen aguas cálcicas (>150 mg/L de calcio) y magnésicas (>50 mg/L de magnesio).

Con respecto a las aguas cálcicas hay 2 aguas que entrarían a esta clasificación, las vertientes Vital Apoquindo y Laguna Amarga, esta última ubicada en la duodécima región, la cual en el pasado poseía planta de envasado. Esta agua contribuye a la mineralización de huesos y dientes, junto con la dieta.

En el caso de las magnésicas, existe sólo una fuente que se clasificaría como agua magnésica, la cual se encuentra ubicada en la novena región, en la fuente de Baños Huechulepún. Esta fuente se encuentra cercana a la Cordillera de los Andes, y la dureza total es dominada por la dureza de los carbonatos. Esta agua al igual que el agua cálcica, ayuda a la mineralización de los huesos y dientes entre otras funciones.

Cabe destacar que la totalidad de las fuentes de agua mineral tienen una concentración de magnesio menor a 125 mg/L, valor límite admisible que establece la NCh 409/1 Of2005.

Realizado este análisis, se procedió a agrupar los datos por región, los cuales fueron promediados para obtener la dureza total de las aguas minerales asociadas por región, junto con su respectiva clasificación utilizada por este estudio. La información así procesada se muestra en Tabla 6.7 y Figura 6.3.

Tabla 6.7: Concentraciones promedio de dureza del agua mineral a nivel nacional.

Región	Denominación	Dureza Total [mg/L de CaCO₃]	Clasificación Propuesta
I	Baños de Chusmisa	72,0	Blanda
I	Baños de Mamiña		
IV	Termas de Socos	182,7	Moderadamente Dura
V	Termas de Jahuel	213,0	Moderadamente Dura
V	Vertiente Porvenir		
RM	Vertiente Valle los Naranjos	386,0	Dura
RM	Vertiente Vital Apoquindo		
RM	Fuente Millahue		
RM	El Belloto		
VI	Vertiente Mostazal	151,9	Moderadamente Dura
VI	Fuente de Copequén		
VI	Fuente de Chanqueahue		
VI	Vertiente Edén		
VI	Fuente de la Iglesia		
VII	Baños Tanguao	79,4	Blanda
VII	Vertiente Pichiboque		
VII	Termas de Panimávida		
VII	Termas de Quinamávida		
VIII	Temas de Chillán	111,7	Moderadamente Dura
IX	Baños Huechulepún	430,0	Dura
X	Termas de Puyehue	275,7	Moderadamente Dura
X	Manantial Yelcho		
X	Baños Moraga		
XII	Vertiente Laguna Amarga	1088,2	Muy Dura

Figura 6.3: Clasificación regional de aguas minerales según los niveles de dureza en Chile.



Siguiendo con el análisis se tienen los datos obtenidos de las etiquetas de los envases, de las referencias anteriores o de las consultas realizadas a las empresas encargadas de la producción de agua mineral en Chile para obtener las concentraciones de calcio y magnesio de las 11 marcas nacionales que se encuentran en el mercado. Estas concentraciones y la dureza calculada por la Ecuación 6.15 están representadas en la Tabla 6.8. Cabe destacar que la única empresa que entregó su análisis físico-químico fue el agua mineral Puyehue, el cual se encuentra en el Anexo 7. Las concentraciones de los demás elementos se encuentran también se encuentran en el Anexo 7.

Tabla 6.8: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de fuentes de aguas minerales envasadas.

Marca	Región	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]	Obt. Información
Chusmisa	I	24,3	6,5	87,43	Hauser 2001
Mamiña	I	3,06	<0,01	7,68	Etiqueta 2006
Socos	IV	80,2	0,1	200,76	Hauser 2001
Porvenir	V	29,0	14,0	130,05	Etiqueta 2006
Cachantún	VI	76,0	10,0	230,91	Etiqueta 2006
Vital	VI	13,70	6,0	58,91	Sernac 2001
Edén	VI	31,5	6,4	104,87	Etiqueta 2006
Villa alegre	VII	34,4	20,7	171,12	Hauser 2001
Rari - Quinamávida- Líder	VII	0,90	<0,1	2,66	Etiqueta 2006
Chillán	VIII	33,6	6,67	111,35	Etiqueta 2006
Puyehue	X	<0,5	<0,2	2,07	Mail Puyehue 2006

Los valores obtenidos que tienen el signo <, para el calculo de la dureza este fue tomado como =.

En el caso de las aguas minerales importadas, se aplicaron los mismos procedimientos explicados anteriormente, por lo que se tiene las concentraciones de calcio y magnesio con lo cual se puede calcular la dureza total. Estas concentraciones se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de aguas minerales importadas.

Denominación	País	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Referencia
Evian	Francia	293,55	78,0	24,0	Etiqueta 2006
Perrier	Francia	400,80	149,0	7,0	Etiqueta 2006
San Pellegrino	Italia	739,57	208,0	53,5	Etiqueta 2006
Apollinaris	Alemania	784,85	100,0	130,0	Sernac 2001
Fontemilla	España	289,21	78,9	22,4	Hauser 2001

Analizando las aguas minerales importadas, tenemos que éstas varían de moderadamente dura a muy dura según la clasificación utilizada para este estudio, siendo las más duras las de San Pellegrino y la Apollinaris, las cuales son italianas y alemanas respectivamente.

Cabe destacar que esta última sobrepasa el límite establecido por la NCh 409/1 Of2005 con respecto al magnesio ya que es mayor a 125 mg/L (130 mg/L) y también se puede mencionar que es del tipo magnésica (> 50 mg/L). Además se puede mencionar que el agua mineral San Pellegrino es del tipo cálcica (> 150 mg/L).

Dentro de las marcas más reconocidas a nivel mundial se encuentra Evian, procedente de una localidad francesa que actualmente posee la planta embotelladora de agua mineral más grande del mundo, embotellando 1.500 millones de litros de agua mineral, que vende a 150 países ^[65].

Continuando con el análisis de las aguas minerales chilenas, se procede a entregar los resultados de un análisis realizado por el Sernageomin a muestras de agua mineral tomado desde el envase y publicado por Hauser en el 2001. Estos resultados se presentan en la Tabla 6.10. Las concentraciones de los otros elementos se encuentran en el Anexo 7.

Tabla 6.10: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio de aguas minerales chilenas, a partir de muestras tomadas desde envases (valores en mg/L).

Denominación	Región	Dureza			Ca	Mg	Laboratorio
		Total	Carb.	No Carb.			
Chusmisa	I	81,0	39,0	42,0	32,0	0,2	SNGM
Mamiña	I	65,0	31,0	34,0	26,0	<0,05	SNGM
Socos*	IV	90,0	12,0	78,0	36,0	<0,05	SNGM
Porvenir*	V	117,0	117,0	0,0	27,0	12,0	SNGM
Cachantún*	VI	285,0	148,0	137,0	96,0	11,0	SNGM
Vital*	VI	63,0	63,0	0,0	21,0	2,6	SNGM
Edén*	VI	104,0	96,0	8,0	32,0	5,8	SNGM
Villa Alegre*	VII	147,0	147,0	0,0	31,0	17,0	SNGM
Rari-Quinamávida	VII	4,0	4,0	0,0	1,6	<0,05	SNGM
Puyehue	X	76,0	76,0	0,0	24,0	4,0	CESMEC

* Estas agua minerales son sin gas y las demás son gasificadas.

Teniendo estos datos se pueden establecer algunas comparaciones entre las diferentes marcas comercializadas en nuestro país y también algunas variaciones en la calidad y en el proceso de envasado. Para esto, en la Tabla 6.11 se comparan las concentraciones de dureza en las diferentes etapas del proceso de comercialización de un agua mineral.

Tabla 6.11: Comparación de la concentración de dureza en el agua mineral, en la fuente, el envase y un análisis realizado al agua mineral en los envases.

Región	Denominación	Marca Comercial	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]		
			Fuentes	Etiquetas	Análisis F-Q
I	Baños de Chusmisa	Chusmisa	76,0	87,4	81,0
I	Baños de Mamiña	Mamiña	68,0	7,7	65,0
IV	Termas de Socos	Socos	182,7	200,8	90,0
V	Vertiente Porvenir	Porvenir	121,0	130,0	117,0
VI	Fuente de Copequén	Cachantún	266,0	230,9	285,0
VI	Fuente de Chanqueahue	Vital	67,0	58,9	63,0
VI	Vertiente Edén	Eden	171,3	104,9	104,0
VII	Vertiente Pichiboque	Villa alegre	168,0	171,1	147,0
VII	Termas de Quinamávida	Rari - Quinamávida- Líder	3,7	2,7	4,0
VIII	Termas de Chillán	Chillán	111,7	111,3	
X	Termas de Puyehue	Puyehue	78,0	2,1	76,0

Teniendo esta comparación se puede visualizar que casi la mayoría de las aguas mantienen sus composiciones químicas en el envasado, existiendo solo algunas en las que se puede apreciar alguna variación, como en el caso de Mamiña, que en el envase presenta un valor muy bajo de dureza con respecto a la de la fuente, lo que puede ser explicado por su concentración de magnesio, la cual es muy baja y de hecho no detectable por el método utilizado por su medición. Un caso muy similar al agua mineral Mamiña es el del agua mineral Puyehue que posee valores muy pequeños de calcio y magnesio. Cabe destacar que estos datos fueron obtenidos de la misma empresa, por lo cual es muy difícil objetarlos. Otro caso es el del agua mineral Socos, que presenta una variación en el proceso, lo que puede ser explicado por la diferencia en las concentraciones de calcio.

Individualizadas estas variaciones en los procesos de envasado, se puede mencionar que 5 de las aguas minerales comercializadas en Chile son aguas blandas (<100 mg/L) y el resto son aguas moderadamente duras (100-300 mg/L).

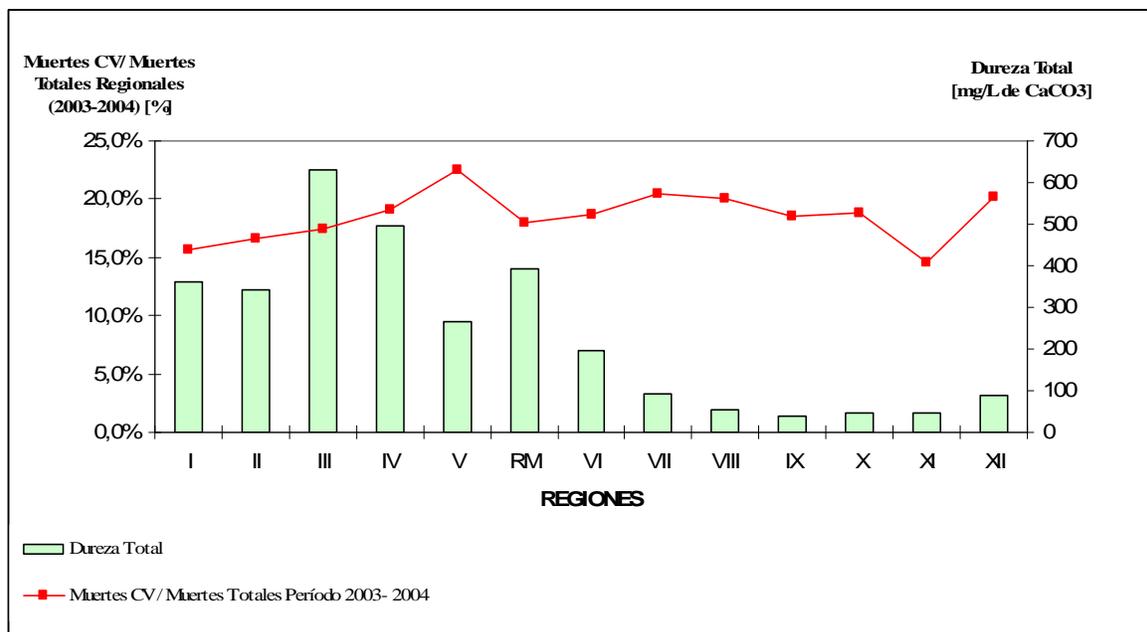
Particularmente se puede mencionar que las aguas minerales, Mamiña y Chusmisa, se ubican en la zona prealtiplánica de la I Región, donde abundan secuencias volcánicas ácidas; Socos se localiza en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa, en la IV Región; la fuente Cachantún surge al pie de una serie de serranías situadas en el flanco sur del valle del río Cachapoal, en el margen oriental de la Cordillera de la Costa, en la VI Región; finalmente, las fuentes Chillán y Puyehue, en las regiones VIII y X, respectivamente, se ubican en la zona andina, en las laderas de los volcanes nevados de Chillán y Puyehue; en ambas predominan rocas volcánicas, andesita y basaltos.

Las fuentes de Edén, Porvenir, Vital y Villa Alegre están ubicadas en la depresión central, en el segmento medio del país, distantes de los centros volcánicos activos. Sus respectivos niveles de mineralización se vincularían a fuentes cuyas recargas estarían asociadas a aguas meteóricas modernas y, por tanto, con bajo tiempos de residencia. Esta singularidad, al minimizar el tiempo de interrelación agua/roca, resta efectividad a los procesos de dilución^[62].

6.2 IMPACTOS EN LA SALUD DEBIDO A LA DUREZA EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO EN CHILE.

El agua de consumo humano, en particular el agua potable, ha tenido distintos efectos en la salud de las personas, los cuales han sido largamente estudiados a lo largo de los años. La dureza, específicamente, ha sido relacionada con enfermedades cardiovasculares y en menor proporción con la presencia de urolitiasis, sin determinar todavía de manera tajante si existe relación directa o inversa con estas enfermedades. En Chile, habiendo recopilado gran parte de los antecedentes de dureza a nivel nacional y teniendo la base de datos del Ministerio de Salud, del período 2000-2003 de las muertes por enfermedades cardiovasculares, se procede a establecer una relación preliminar entre las enfermedades cardiovasculares y la dureza total en Chile, la cual se presenta en el Gráfico 6.8.

Gráfico 6.8: Relación entre las enfermedades cardiovasculares y la dureza en Chile.

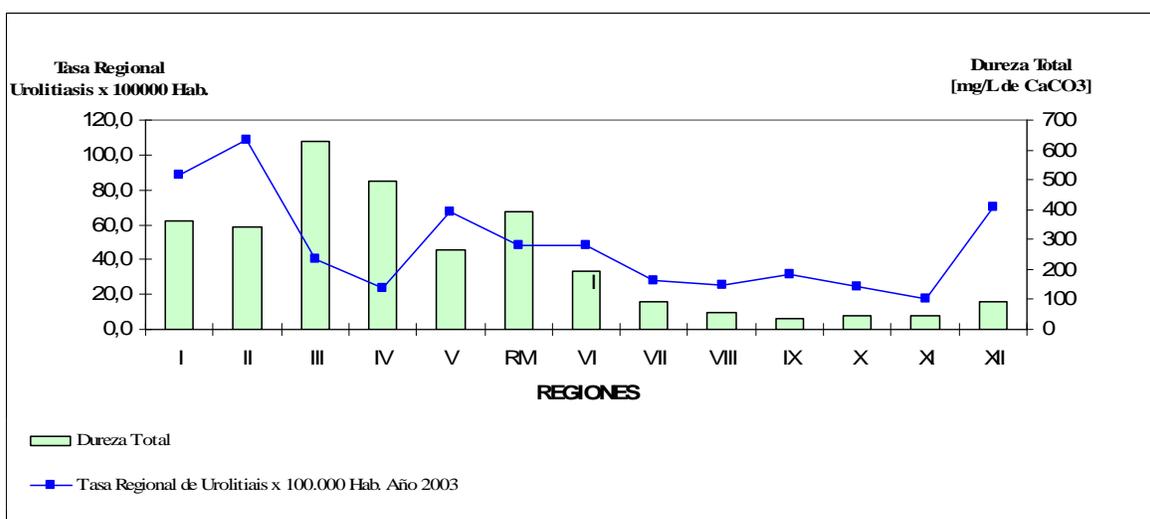


Analizando el gráfico anterior, se podría inferir que no existiría relación entre la dureza y las enfermedades cardiovasculares en Chile. Cabe destacar que esta relación preliminar entre estos dos factores ha sido establecida con concentraciones regionales promedio, que

no incluirían los casos particulares de algunas comunas. Estos antecedentes tampoco se han limpiado de factores confundentes como por ejemplo: los climáticos, geográficos y socioeconómicos.

En el caso de la urolitiasis, y teniendo los egresos hospitalarios del año 2003 a causa de esta enfermedad, se obtiene la siguiente relación, representada en el Gráfico 6.9.

Gráfico 6.9: Relación entre urolitiasis y dureza en Chile.



Analizando de manera preliminar esta relación, se observa una buena correlación entre la urolitiasis y la dureza de las aguas a nivel nacional. Cabe destacar que existen tres regiones (III, IV y XII) en donde no se manifiesta esta relación, lo que debería analizarse más en profundidad, por los muchos factores que pueden estar interviniendo en esta correlación.

6.3 IMPACTOS DE LA DUREZA EN AGUAS DE USO INDUSTRIAL Y AGRICOLA EN CHILE

6.3.1 Antecedentes

En Chile, según un estudio realizado por la Dirección General de Aguas (DGA) ^[66], la cantidad de agua utilizada alcanza aproximadamente un flujo continuo de 2.000 m³/seg, cifra que podría duplicarse en los próximos 25 años. De esta cantidad, el 67.8% corresponde a usos hidroeléctricos o no consuntivos (llamado así porque el agua no es totalmente consumida) y el 32.2% a usos consuntivos (las aguas no son devueltas a su cauce luego de ser utilizadas). Estos últimos representan un flujo continuo de alrededor de 650 m³/s, desglosados de la siguiente forma ^[67]:

- Riego: 84.5%, con un caudal medio continuo de 546 m³/seg
- Minería: 5%, con un caudal continuo de 32.5 m³/seg.
- Industria: 7%, con un caudal continuo de 45.5 m³/seg.
- Usos domésticos: 4.4%, con un caudal continuo de unos 35 m³/seg.

Estas cantidades varían de una región a otra, ya que el agua se distribuye en forma desigual dependiendo de la ubicación geográfica y del clima, que en Chile va, de norte a sur, desde extremadamente seco a extremadamente lluvioso. Por ejemplo el riego tiene una mayor demanda en las regiones I, IV, V, VI, VII, VIII, IX y RM, mientras que en las regiones II, III y X a XII, los sectores más demandantes son el minero e industrial ^[66].

Los recursos hídricos, en general, que se utilizan en Chile son básicamente superficiales y de hecho la mayor parte de los ríos del país están agotados desde el punto de vista de los derechos de aprovechamientos permanentes que otorga la Dirección General de Aguas (DGA), y de los cuales no se hace un uso efectivo necesariamente. El uso de aguas subterráneas es inferior al agua superficial, para lo cual en estos últimos años se han desarrollado diferentes técnicas para masificar su explotación.

Nuestro país es privilegiado por la cantidad de recursos hídricos que posee. Sin embargo, durante mucho tiempo no se consideró el caudal ecológico de algunos cauces, lo que provocó el agotamiento de la mayoría de ellos de la VIII Región al norte. Existen humedales en la zona norte que se han secado y los usos no consuntivos han significado variaciones importantes en los niveles de algunos lagos (Lago Chapo, Laguna de la Laja, entre otros).

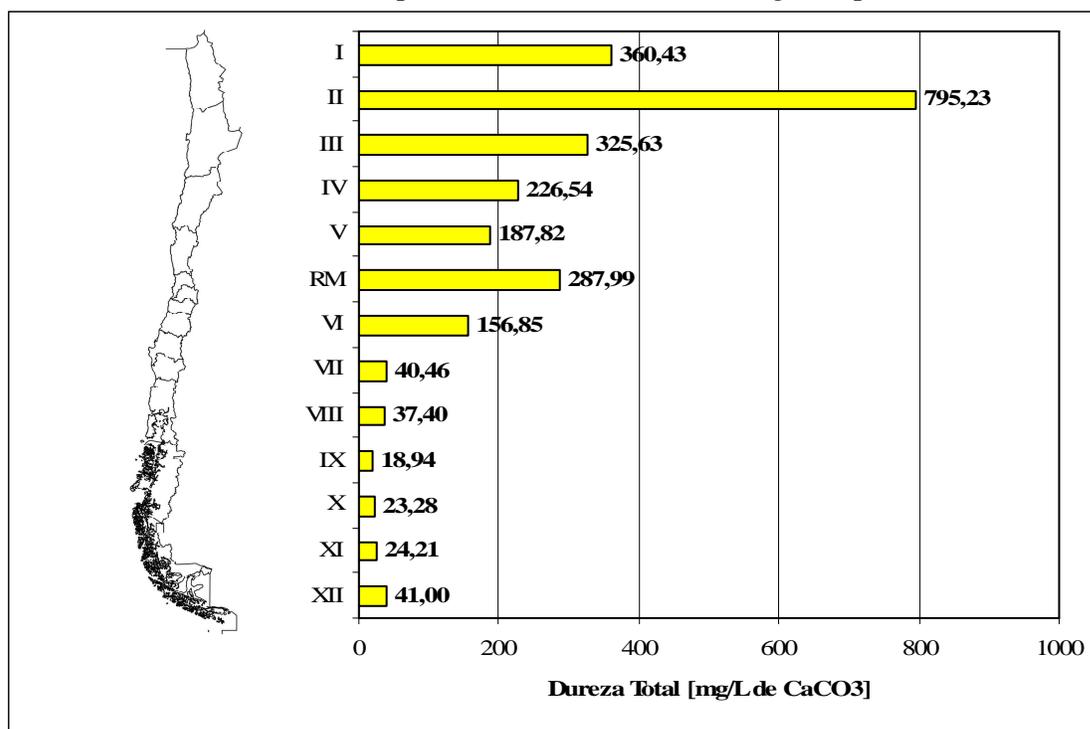
Como antes se menciona que el agua que más se utiliza en Chile es primordialmente superficial y en este caso se tienen antecedentes de calcio y magnesio del agua de las cuencas superficiales entregados por la DGA ^[57, 58]. Con estos datos procesados se obtiene la dureza total en mg/L de CaCO₃ con la ecuación 6.15 de cada una de las regiones, los cuales fueron obtenidos como el promedio de calcio y magnesio de las estaciones de calidad de la DGA permanentes de cada una de las regiones, los datos del análisis anterior

se presentan en la Tabla 6.12 y gráfico 6.10 . El detalle de las estaciones utilizadas para el cálculo de las concentraciones de calcio y magnesio de cada región se encuentran en el Anexo 8.

Tabla 6.12: Concentraciones de dureza, calcio y magnesio del agua superficial en Chile.

Región	N° Est.	Período [años]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Dureza Total [mg de CaCO ₃ /L]	Clasificación Propuesta
I	21	80-92	95,38	29,70	360,43	Dura
II	16	83-92	165,49	92,79	795,23	Muy Dura
III	10	80-92	96,39	20,64	325,63	Dura
IV	35	80-93	65,99	15,01	226,54	Moderadamente Dura
V	19	80-92	54,19	12,76	187,82	Moderadamente Dura
RM	18	80-93	91,39	14,53	287,99	Moderadamente Dura
VI	9	80-92	50,31	7,59	156,85	Moderadamente Dura
VII	16	80-92	10,45	3,49	40,46	Blanda
VIII	29	80-92	7,63	4,46	37,40	Blanda
IX	17	83-92	4,93	1,61	18,94	Blanda
X	19	84-92	5,01	2,62	23,28	Blanda
XI	19	83-92	7,66	1,24	24,21	Blanda
XII	8	90-92	11,13	3,21	41,00	Blanda

Gráfico 6.10: Concentraciones promedio de la dureza en el agua superficial en Chile



Teniendo estos antecedentes de dureza, calcio y magnesio del agua superficial, se procede al análisis de la influencia de la dureza, sobre las actividades productivas del país. Cabe destacar que este análisis sólo corresponde al agua superficial utilizada en las industrias, dejando fuera de este análisis las aguas subterráneas, ya que no se poseen antecedentes de la calidad de las aguas subterráneas a lo largo del país.

6.3.2 Dureza en aguas en el uso industrial en Chile.

En el caso de las concentraciones requeridas de dureza, calcio y magnesio en el agua para el uso industrial, en Chile no existe legislación al respecto, por lo que se procedió a revisar la normativa internacional que regula la calidad del agua para el uso industrial, en donde se encontró las Guías de Calidad para el Uso Industrial en Canadá^[68], las cuales son representadas en la Tabla 6.13

Tabla 6.13: Concentraciones de CaCO₃ y MgCO₃ Recomendadas para el Uso Industrial.

Tipo de Industria	CaCO ₃ mg/L	Mg CO ₃ mg/L
1. Generación eléctrica vapor	<1,0	-
2. Industria de Acero y Hierro	<100	-
3. Pulpa y papel	<20	<20
4. Petróleo	<350	<25
5. Alimentos y bebidas		-
5,1 Gaseosas	200-250	-
5,2 Lechería	<180	-
5,3 Refinería - azúcar	<100	-
5,4 Enlatados	<50	-
5,5 Panaderías	-	-
5,6 Destilería	-	-
5,7 Empacadora de Carne	-	-
5,8 Fabrica de Hielo	<70	-
6. Química orgánica	<250	-
7. Textiles	<25	-
8. Curtiembres	<150	-

Fuente: Guías de Calidad para el uso Industrial en Canadá.

También se consulto el documento de USEPA, Quality Criteria for Water. Hardness^[69], en el que se indican los límites admisibles de dureza de agua para el uso en los diferentes tipos de industrias. Estos antecedentes se muestran en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14: Máximos niveles de dureza del agua cruda afluyente, aceptados por la Industria.

Tipo de Industria	Concentración Máxima [CaCO ₃ , mg/L]
1. Generación eléctrica	5000
2. Textiles	120
3. Pulpa y papel	475
4. Química orgánica	1000
5. Petróleo	900
6. Metales Primarios	1000

Fuente: Quality Criteria for Water. EPA. 1976

Otro documento relacionado es el Water Quality Criteria de 1968 ^[70] en donde se entregan los criterios de calidad del agua superficial para ser utilizada en los diferentes tipos de industria. Estos criterios se presentan en la Tablas 6.15 y 6.16.

Tabla 6.15: Resumen de las concentraciones recomendadas de calcio, magnesio y dureza del agua superficial para ser utilizada como fuente de abastecimiento para el uso industrial.

Tipo de Industrias	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Dureza Total [mg/L de CaCO ₃]
1.- Generación de Vapor (calderas)	--	--	500
2.- Sistemas de Enfriamiento			
2.1.- Agua Dulce	500	--	850
2.2.- Agua Salada	1200	--	7000
3.- Metales Primarios	--	--	1000
4.- Pulpa y papel	--	--	475
5.- Petróleo	220	85	900
6.- Alimentos			
6.1.- Gaseosas	--	--	--
6.2.- Enlatados	120	--	310
7.- Química Orgánica	200	100	1000
8.- Textiles	--	--	120
9.- Curtiembres	--	--	--
10.- Cementos	150	--	500

Tabla 6.16: Resumen de las concentraciones recomendadas de calcio, magnesio y dureza del agua superficial, a punto de ser utilizada en el proceso industrial.

Tipo de Industrias	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Dureza Total [mg/L de CaCO₃]
1.- Generación de Vapor (calderas)	--	--	--
2.- Sistemas de Enfriamiento			
2.1.- Agua Dulce	200	--	850
2.2.- Agua Salada	400	--	6250
3.- Metales Primarios	--	--	100
4.- Pulpa y papel	20	12	100
5.- Petróleo	75	30	350
6.- Alimentos			
6.1.- Gaseosas	--	--	--
6.2.- Enlatados	100	--	250
7.- Química Orgánica	68	19	250
8.- Textiles	--	--	25
9.- Curtiembres	60	--	150
10.- Cementos	--	--	--

Referente a los dos primeros tipos de industrias de la tablas 6.15 y 6.16, están no son industrias propiamente tal, si no que son procesos utilizados en gran cantidad de industrias. Con estos criterios recomendados sobre dureza, calcio y magnesio, para los diferentes tipos de industrias, se tiene para Chile lo siguiente:

En la zona norte (I a IV regiones) se tiene agua superficial preferentemente dura, según la clasificación propuesta para este estudio. Sólo cabe destacar la dureza de la cuarta región que corresponde a moderadamente dura (100 a 300 mg/L de CaCO₃). En esta zona la minería es la principal actividad productiva de las regiones, según el censo del 2002, siendo la más destacada la minería del cobre que en la segunda región el año 2004, alcanzó a 2.854.118 toneladas, representando el 52,7% de la producción total del país.

Para la minería se establecen requerimientos recomendados de dureza del agua superficial que será utilizada como fuente de abastecimiento para este tipo de industria (metales primarios) de 1000 mg/L de mg/L de CaCO₃, los cuales se cumplen en las aguas superficiales de la zona norte, ya que ninguna región sobrepasa este valor. En el caso que estas aguas superficiales estén a punto de ser utilizadas en el proceso, éstas debieran de ser tratadas para reducir su dureza a 100 mg/L de CaCO₃, como lo plantea la recomendación estipulada en la tabla 6.16.

En la zona central (V a VIII regiones), se concentra la mayor cantidad de la población, por lo que su sector industrial es muy variado. Esta zona presenta fuentes de aguas superficiales moderadamente duras (V, RM y VI) y blandas (VII y VIII). En la V región el sector industrial es muy diversificado, posee industrias de cemento, conservas, tabaco y refinería de petróleo entre otras. De acuerdo a la dureza, calcio y magnesio en sus aguas superficiales éstas no debieran tener problemas para ser fuentes de abastecimiento de agua para el uso en industrias de cemento, conservas y petróleo, según la tabla 6.15, como tampoco se deberían someter a algún tratamiento de remoción de dureza para ser utilizadas en el proceso. En la Región Metropolitana, la cual es el núcleo administrativo, industrial y comercial, financiero y cultural del país, se debiera tener cuidado en las industrias textiles (según tabla 6.15) que se abastecen con agua superficiales. Para ser utilizadas en los procesos de industrias químicas y curtiembres, esta agua debe ser tratada. En la VIII región se sustenta una fuerte base exportadora proveniente principalmente de la actividad forestal, donde el producto que concentra uno de los mayores envíos es la celulosa. En este caso los requerimientos de dureza, calcio y magnesio para este tipo de industrias, se encuentran justo dentro de los rangos aceptados y no es necesario en tratamiento de las agua para el proceso.

En la zona sur (IX a XII regiones), la dureza de las aguas se clasifica como blanda (menor a 300 mg/L de CaCO_3), por lo que no excede los requerimientos recomendados para la industria de ningún tipo, razón por la cual tampoco sería necesario tratarla para ser utilizada en los procesos.

Los sistemas de generación de vapor (calderas) y de enfriamiento antes mencionado son procesos utilizados en la gran mayoría de las industrias. En Chile y de acuerdo a la Tabla 6.15, los sistemas de generación de vapor tendrían problemas al utilizar agua superficial en la segunda región, ya que su concentración de dureza es mayor al límite recomendado ($795,23 > 500$ mg/L de CaCO_3), por lo que sería necesario reducir la dureza de la fuente. Para los sistemas de enfriamiento, abastecidos mayoritariamente en Chile por agua dulce, no existiría problema de utilizar el agua superficial de las diferentes regiones, pues el salto térmico es bajo.

Cabe destacar que una parte importante del agua superficial en Chile es utilizada en la generación de energía eléctrica. Esta agua puede emplearse en sistemas termoeléctricos o hidroeléctricos para generar energía. En el primer caso, se imponen algunas restricciones en cuanto a la calidad del agua para evitar la obstrucción y corrosión de calderas y tuberías. Si el agua ha de circular por turbinas hidráulicas, en las especificaciones se habrá de mencionar la corrosividad de las aguas. En el caso nacional, las centrales hidroeléctricas se ubican mayoritariamente en el sur del país, donde el agua superficial tiene bajas concentraciones de calcio y magnesio por lo que no deberían provocar problemas en el proceso de generación eléctrica.

6.3.3 Dureza en aguas en el uso agrícola en Chile.

En Chile según la Comisión Nacional de Riego (CNR), considerando los factores clima, suelo y agua, así como consideraciones técnicas, económicas y ambientales, la superficie potencial de riego en Chile se estima en unos 2,5 millones de ha.^[71]

En cuanto al origen del agua de riego, se estima que unas 330.000 ha. son derivadas desde los embalses existentes, unas 600 ha. se bombean de forma directa desde los ríos y cerca de 60.000 ha se riegan a partir del agua de pozos. La superficie restante, se riega mediante la derivación de cauces superficiales.

Referente a las técnicas de riego, en forma significativa predomina el riego por superficie y sólo en los últimos 10 años se ha introducido el riego presurizado (aspersión y localizado). De la superficie regada en la temporada 1996-97, el 91% se regaba por superficie, el 3% por aspersión y el 6% restante por riego localizado.

En Chile, no existe normativa para las concentraciones de dureza, calcio y magnesio en el agua de riego. Revisando la normativa internacional, el estado de California^[72] (EE.UU.) señala que una concentración admisible de magnesio en el agua de riego es de 20 mg/L y para el calcio de 40 mg/L. Además se establece que la razón de absorción de sodio (SAR) debe ser menor a 10 meq/L.

Los impactos de las concentraciones de dureza, calcio y magnesio en el agua para riego se producen en sus sistemas de distribución, por incrustaciones o corrosión de tuberías. En Chile, la zona norte, presenta muy bajos niveles de la utilización de tierras para la agricultura, salvo la utilización de algunos valles (Copiapó, Elquí, entre otros), donde el agua superficial utilizada no presenta niveles muy altos de dureza (> 300 mg/L de CaCO₃), por lo que no habría tendencia a las incrustaciones.

En la zona central los sectores agrícolas han ido aumentando su producción al correr de los años, destacando la producción de frutas de exportación en la VI y VII regiones. En esta zona la dureza de las aguas superficiales varían de moderadamente dura (100 - 300 mg/L de CaCO₃) a blanda (<100 mg/L de CaCO₃), en la regiones que el agua es moderadamente dura (V, RM y VI regiones) no debería existir problemas con las incrustaciones o corrosión en los sistemas de distribución utilizado para el riego. Sin embargo las regiones VII y VIII presentan aguas superficiales blandas las cuales pueden provocar corrosión en las tuberías utilizadas para riego.

En la zona sur la agricultura se centra principalmente en IX y X regiones, en donde se tienen aguas superficiales blandas (<100 mg/L de CaCO₃). Cabe destacar que el riego en la agricultura, en esta zona, se produce naturalmente por la acción de las precipitaciones, la cual se encuentran presentes gran parte del año, por lo que no existirían grandes redes de distribución de agua para riego.

Con respecto la norma del Estado de California, el valor del calcio (40 mg/L) sería superado desde la primera a la sexta región y el del magnesio (20 mg/L) de la primera a la tercera región.

6.4 REMOCIÓN DE LA DUREZA EN CHILE.

La calidad de agua, en particular nuestro país, varía ampliamente de una zona a otra, por lo que cada zona necesita soluciones diferentes, referente a los procesos de remoción de calcio y magnesio.

En Chile, en la gran mayoría de las plantas de tratamiento de agua potable, se utilizan los tratamientos convencionales (coagulación-floculación, sedimentación, filtración, cloración), los cuales en particular no remueven calcio y magnesio, por lo que sus concentraciones se mantienen constantes durante el proceso de tratamiento, siendo muy similares a las concentraciones de las fuentes de abastecimiento. Sin embargo, cabe destacar que existen comunas como Arica, Antofagasta y Diego de Almagro que utilizan procesos de osmosis inversa, los cuales si remueven calcio y magnesio. En el caso de Arica la planta de osmosis trata una parte de la producción total de agua potable, lo que genera agua con una cantidad muy reducida de minerales, la cual es mezclada con agua cruda, logrando una concentración adecuada para el consumo humano. Para Antofagasta la osmosis inversa es utilizada para el tratamiento del agua de mar, la cual es mezclada con el agua obtenida de las fuentes superficiales.

En los últimos años en Chile, se han promovido los tipos de ablandamiento domésticos, los cuales son muy utilizados en Europa y Estados Unidos. Este tipo de ablandamiento presenta una serie de ventajas, de la que podemos destacar:

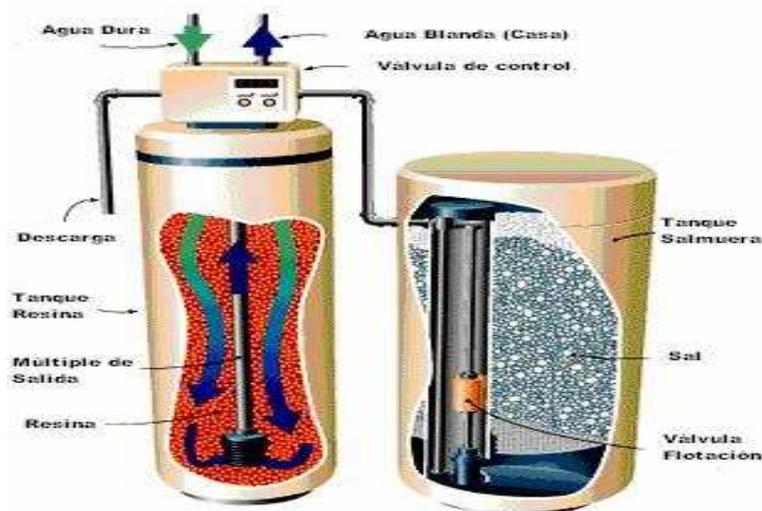
- Ahorro de jabón y detergentes.
- Mejora el lavado de las ropas y la loza.
- Mejora el sabor de alimentos y verduras.
- Se cuidan las instalaciones sanitarias, previniendo las incrustaciones.
- Mejora la eficiencia de los calentadores de agua.

El tipo de ablandamiento doméstico más utilizado es el intercambio iónico. En Chile, existen empresas que se dedican a vender este tipo de ablandamiento, de las que se pueden destacar AQUANOVA, AMITEK y COTACO. Estas empresas ofrecen dos tipos de modelos para el ablandamiento por intercambio iónico: el de gabinete (ver figura 6.4), el cual posee una capacidad limitada y ocupa un espacio mínimo; y el modelo dos estanques (ver Figura 6.5), en donde los dos estanques de resina operan independientes controlados por una válvula, para entregar un suministro continuo de agua blanda. Estos últimos tienen un amplio rango de capacidades, desde equipos pequeños hasta los de mayor capacidad para el sector residencial, son adecuados para familias de gran tamaño e importante consumo de agua.

Figura 6.4: Ablandador Doméstico: Modelo Gabinete.



Figura 6.4: Ablandador Doméstico: Modelo dos Estanques.



Referente a los costos de estos equipos, se solicitó la información a las distintas empresas. En la Tabla 6.17 se entrega un resumen de los costos de los equipos de ablandamiento doméstico. Cabe señalar que este costo es sólo por el valor del equipo.

Tabla 6.17: Costos de equipos de ablandamiento doméstico.

Empresa	Modelo	Capacidad almacenamiento resina [Kg]	Caudal [lt/min]	Precio [\$]
Aquanova	Gabinete	22	48	\$ 450.000
Aquanova	Dos estanques	22	48-150	\$ 350.000
Amitek	Gabinete	115	65	\$ 1.380.000
Cotaco	Dos estanques	--	5-8	\$ 517.000

La resina utilizada es catiónica. Se regenera con salmuera. Los equipos son totalmente automáticos. Lo único que debe observarse es que el salero tenga sal.

En las industrias en nuestro país, se utilizan diferentes procesos para la remoción de dureza, ya que esta puede ser muy compleja o relativamente simple, dependiendo de las propiedades de agua cruda o recirculada que este siendo utilizada en los procesos industriales. En la gran mayoría de las industrias chilenas se utiliza los procesos básicos para la remoción de dureza (cal- carbonato e intercambio iónico), pero si se desean remover otros minerales además del calcio y el magnesio, se utilizan otros procesos como la osmosis inversa.

**CAPÍTULO VII:
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Dadas las características geográficas, condiciones ambientales y actividades productivas del país, se puede deducir que la distribución de la dureza en aguas, ya sea de consumo humano o uso industrial y agrícola, no es homogénea a lo largo de Chile. Este comportamiento puede ser explicado fundamentadamente por las diferentes características geológicas de sus cuencas superficiales y subterráneas de donde se obtiene el agua. En la zona norte (I a IV región) predominan las rocas sedimentarias como las calizas, luego éstas comienzan a desaparecer en la zona central (V a VII región), donde se tiene una zona de transición entre las calizas y rocas impermeables como el granito, el cual es predominante en la zona sur del país (IX a XII región).

El agua de consumo humano en Chile es, en general, de carácter potable. Respecto a la dureza, se pueden establecer claramente tres zonas a lo largo del país: la zona norte, con agua dura (300 - 500 mg/L de CaCO_3) y muy dura (< 500 mg/L de CaCO_3), la cual puede ser altamente incrustante en las redes de distribución; la zona central, ubicada entre la V y VIII región, donde se observa una zona de transición entre el agua dura y el agua blanda, exceptuando el caso de la Región Metropolitana, que posee un valor promedio de 393,73 mg/L de CaCO_3 , la cual se puede definir como agua dura; y la zona sur, que posee concentraciones de dureza promedio que no superan los 100 mg/L de CaCO_3 , por lo que se puede definir como agua blanda. Cabe destacar, en el caso de la Región Metropolitana, que ésta representa aproximadamente el 40,1% de la población total del país, la cual es abastecida con agua dura que proviene principalmente de captaciones superficiales realizadas en el Río Maipo. Este grado de dureza del Río Maipo, puede ser atribuido a la existencia de minerales de yeso en la cabecera del río.

Con respecto a la normativa nacional vigente para el agua potable (NCh 409/1 Of.2005), se tiene que en el caso del magnesio la concentración nunca es superada en el agua potable del país. El procesamiento de la información recopilada en este estudio muestra que 21 comunas sobrepasaron los 500 mg/L de CaCO_3 de dureza, valor considerado como máximo permitido por la gran mayoría de las normativas internacionales revisadas. La OMS, al respecto, no menciona inconveniente con este tipo de valores, sólo que este tipo de agua tiene una tendencia a causar la aparición de incrustaciones en los sistemas de distribución y, con respecto a una dureza inferior a los 100 mg/L de CaCO_3 , que en el caso nacional corresponden a 127 del total de comunas del país, se puede tener una capacidad amortiguante reducida y resultar, por lo tanto, más corrosiva para las tuberías.

Respecto al tema de las aguas minerales en Chile, se tiene la calidad de las aguas minerales chilenas que se encuentran en el comercio son de moderadamente dura a blanda, siendo la más importante el agua mineral Cachantún, que presenta niveles de dureza de 266 mg/L de CaCO_3 , en la fuente de extracción. Se puede mencionar que las aguas minerales importadas, presentan un alto grado de mineralización y de dureza.

El agua mineral en Chile no tiene normativa en relación a las concentraciones límites de dureza, calcio y magnesio, y, para este estudio, se consideró el límite establecido por el magnesio en la NCh.409/1 Of.2005, el cual sólo fue sobrepasado por el agua mineral importada Apollinaris. También se puede mencionar que en el análisis físico-químico practicado a las fuentes de aguas minerales, tres sobrepasaron los 500 mg/L de CaCO₃ de dureza total correspondiendo a fuentes que no poseían plantas envasadoras.

En Chile, en un análisis preliminar de los antecedentes de la dureza del agua potable y su relación con la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, se podría inferir que no existiría relación entre ellas. También se realizó una relación entre la dureza y la urolitiasis, de la cual se observa una buena correlación. Cabe destacar que este análisis es preliminar y no se han limpiado los datos de los factores confundentes.

El agua para uso industrial, proviene de fuentes primordialmente superficiales. La zona norte (I a IV regiones), donde la principal actividad productiva es la minería, presenta aguas superficiales con altos niveles de dureza, lo que puede provocar problemas de incrustaciones en las cañerías y equipos utilizados en la industria minera, por lo cual se debe remover las concentraciones de calcio y magnesio llegando a niveles aceptables. La zona central (V a RM regiones) posee una gran diversificación de los tipos de industrias y el agua superficial presenta una zona de transición de moderadamente dura (100-300 mg/L de CaCO₃) a blanda (<100 mg/L de CaCO₃). En esta zona se deben analizar individualmente los requerimientos de calidad de los distintos tipos de industrias. La gran mayoría de las industrias utilizan los sistemas de generación de vapor y sistemas de enfriamiento, y en particular esta zona no debiera tener inconvenientes en este tipo proceso ya que las concentraciones de dureza, calcio y magnesio encontradas en el agua superficial están en un rango aceptable, según las recomendaciones del Water Quality Criteria. La zona sur (IX a XII regiones) con agua superficial blanda puede presente problemas de corrosión.

La agricultura en Chile, se desarrolla mayoritariamente en la zona centro-sur del país, y el agua superficial utilizada para riego presenta niveles de dureza aceptables. De la VII región al sur el agua presenta niveles de dureza muy bajos, los cuales pueden ocasionar problemas de corrosión en los sistemas de distribución utilizados para el riego.

Con respecto a los procesos para la remoción de dureza, se tiene que los más utilizados son los procesos de intercambio iónico y el proceso de cal-carbonato, en donde la desventaja de estos procesos es que cambian el calcio y el magnesio por otros minerales, los cuales pueden ser nocivos para la salud. Uno de los procesos de membrana más utilizados para la remoción de dureza es la nanofiltración. En estos últimos años, se han venido desarrollando una serie de tratamientos para la remoción de dureza, los cuales sólo se encuentran a nivel de laboratorio, por lo cual no fueron presentados en el presente estudio. En Chile el proceso más utilizado para el ablandamiento doméstico es el intercambio iónico.

7.2 RECOMENDACIONES

La información recopilada sobre el tema y los análisis realizados, permiten el planteamiento de las siguientes recomendaciones:

Respecto a la normativa del agua potable, se cree necesario establecer límites para las concentraciones de dureza, ya que éstas en algunos sectores del país sobrepasan largamente los valores establecidos en las normativas internacionales revisadas. Además, es importante destacar que las normativas internacionales más actuales están definiendo rangos de dureza para así no disminuir totalmente sus grados de mineralización. Referente a la concentración de magnesio exigida por la norma, se puede revisar el alto valor exigido por esta (125 mg/L).

En el caso de la normativa para las aguas envasadas, minerales y otras, se recomienda estudiar más a fondo la calidad de éstas, ya que representan un porcentaje no despreciable dentro de la dieta alimenticia.

Observando la relación preliminar entre la dureza y las diferentes enfermedades asociadas a ella es recomendable iniciar estudios más acabados, eliminando los factores confundentes, para establecer las reales consecuencias de la dureza y su relación con las enfermedades cardiovasculares y la urolitiasis. Junto con ello, se recomienda la realización de monitoreos y estudios más específicos en las zonas que podrían representar un mayor riesgo para la salud de la población (alta y baja dureza).

Para el agua de uso industrial y agrícola, es necesario investigar los requisitos de calidad de agua de alimentación, para así establecer los procesos de remoción de dureza a utilizar. También se debiera evaluar la factibilidad de los diferentes procesos de remoción de dureza en el agua de uso industrial y agrícola.

Sería también importante estudiar la eficiencia de los tratamientos domésticos de remoción de calcio y magnesio, de modo que la cantidad de compuestos removidos sean sólo los suficientes para que el agua tratada contenga las cantidades de minerales que son necesarios para el consumo.

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- VITORIA I, ARIAS T. 2000. Importancia nutricional del agua de consumo público y del agua de bebida envasada en la alimentación del lactante. Estudio descriptivo de base poblacional. Asociación Española de Pediatría.70 p
- 2.- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). 1987. Guías para la calidad del agua potable. 2ª ed., Vol. 2, Criterios relativos a la salud y otra información de base.
- 3.- VITORIA I. 2002. Calcio en el agua de bebida en la infancia: ¿molesto o necesario?. Acta Pediátrica Española 60: 99-109
- 4.- NALCO CHEMICAL COMPANY. 1982. Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. 1ª ed Ed. Mc Graw-Hill. Tomo III.
- 5.- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 2004 Guidelines for drinking-water quality. Vol 1. Recommendations, 2nd ed.Geneva.
- 6.- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 1976. “Manual de aguas para usos industriales” Ed. Limusa. 3ª ed. 457 p
- 7.- APHA, AWWA, WPCF. 1998 Standard methods for the examination of water and wastewater. Methods 2340. Washington18th ed.
- 8.- AQUASALUD, Monraval i Grau SL. 2003. “Descalcificación”. Disponible en: <<http://www.aquasalud.com/descalcificacion>> [consulta: 14 marzo de 2006]
- 9.- HARING B, VAN DELFT W. 1981. Changes in the mineral Composition of food as a result of cooking in hard and soft waters. National Institute for Water Supply. The Netherlands. Vol. 36, N° 1. 33-35 p.
- 10.- KOZÍSEK F, M.D., 2003 Health significance of drinking water calcium and magnesium..
- 11.- FOOD AND NUTRITION BOARD, Institute of Medicine. 2000. Dietary Reference Intakes for calcium, phosphorus, magnesium, vitamin D and fluoride. National Academy Press
- 12.- MINISTERIO DE SALUD (MINSAL). 2004. Documento Excel “Base de datos de muertes cardiovasculares por comunas”
- 13.- MONARCA S, ZERBINI I, DONATO F. 2004 World Health Organization (WHO). Drinking-water hardness and cardiovascular diseases: A review of epidemiological studies.1979-2004. 27 p

- 14.- MACKINNON AU, TAYLOR SH. 1980 Relationship between sudden coronary deaths and drinking water hardness in five Yorkshire cities and towns. *Int J Epidem* 1980; 9: 247-249.
- 15.- FLATTEN T, BOLVIKEN B. 1991 Geographical associations between drinking water chemistry and mortality and morbidity of cancer and some other diseases in Norway. *Sci. Total Environ.* Vol.102, 75-100 p.
- 16.- POCOCK S, SVARDSUDD K, EK J, TIBBIN G. 1980. British Regional Heart Study: geographic variations in cardiovascular mortality and the role of water quality. *Br Med Jou*; 280: 1.243-1.249
- 17.- YANG C, CHIU J, CHIU H, ET AL. 1996 Relationship between water hardness and coronary mortality in Taiwan. *J Toxicol Environ Health* 49: 1-9.
- 18.- NERBRAND C, AGREUS L, LENNER R, NYBERG P, SVARDSUDD K. 2003 The influence of calcium and magnesium in drinking water and diet on cardiovascular risk factors in individuals living in hard and soft water areas with differences in cardiovascular mortality. *BMC Public Health.* 3 (1): 21.
- 19.- NERBRAND C, SVARDSUDD K, EK J, TIBBLIN G. 1992 Cardiovascular mortality and morbidity in seven counties in Sweden in relation to water hardness and geological settings. *Eur Hearh J.* 13 (6): 721-727.
- 20.- MORA D, PORTUGUÉS C, ALFARO N. Agua para consumo humano: Aporte de calcio y magnesio a la dieta del costarricense y su efecto sobre la salud. 22° Congreso de Centroamérica y Panamá de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 21-24 Agosto. Tegucigalpo.
- 21.- MEDINA E, ZAIDI M, REAL E, OROZCO S. 2003 Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. *Sal. Pub. Méx.* 44 (6): 541-545.
- 22.- ALLWIGHT SP. 1974 Mortality and water hardness in three, matched communities in Los Angeles. *Lancet* 2: 860.
- 23.- CAUDARELLA R, RIZZOLI E, BUFFA A, BOTTURA A, STEFONI S. 1998 .Comparative study of the influence of 3 types of mineral water in patients with idiopathic calcium lithiasis. *J Urol* 159: 658-663.
- 24.- SCHWARTZ B, SCHENKMAN N, BRUCE J, LESLIE S, STOLLER M. 2002 Calcium nephrolithiasis: effect of water hardness on urinary electrolytes. *Urology* 2002; 60: 23-27.
- 25.- SHUSTER J, FINLAYSON B, SCHEAFFER R, SIERAKOWSKI R, ZOLTEK J, DZEGEDE S. 1982 Water hardness and urinary stone disease. *J Urol.* 128:422-425.

- 26.- SHUSTER J, FINLAYSON B, SCHEAFFER R, SIERAKOWSKI R, ZOLTEK J, DZEGEDE S. 1985 Primary liquid intake and urinary stone disease. *J Chron Dis* 38: 907-914.
- 27.- YANG, C.Y., CHIU, H.F., 1998. Calcium and magnesium in drinking water and risk of death from rectal cancer. *Int. J. Cancer* 77, 528–532.
- 28.- YANG, C, CHIU H, CHIU J, TSAI S, CHENG M. 1997. Calcium and magnesium in drinking water and risk of death from colon cancer. *Jpn. J. Cancer Res.* 88: 928–933.
- 29.- YANG C, CHENG M, TSAI S, HSIEH Y. 1998. Calcium, magnesium and nitrate in drinking water and risk of death from gastric cancer. *Jpn. J. Cancer Res.* 89: 124–130.
- 30.- YANG C, CHIU H, CHENG M, TSAI S, HUNG C, TSENG Y. 1999 Pancreatic cancer mortality and total hardness in Taiwan's drinking water. *J. Toxicol. Environ. Health* 56: 361–369.
- 31.- YANG C, CHIU H, CHENG B, HSU T, CHENG M, WU T. 2000. Calcium and magnesium in drinking water and the risk of death from breast cancer. *J Toxicol Environ Health* 60: 231–241.
- 32.- YANG C, CHIU H, TSAI S, CHENG M, LIN M, SUNG F. 2000 . Calcium and magnesium in drinking water and risk of death from prostate cancer. *J Toxicol Environ Health* 60: 17–26.
- 33.- CASTRO R, HERNÁNDEZ J, AGUILAR G. 2004. Evaluación del crecimiento de alevines de tres especies de Tilapia (*Oreochromis sp.*) en aguas duras en la región de Cañada, Oaxaca, México. *AquaTIC*. N° 20: 38-43
- 34.- AYRES, R.S. AND D.W.WESTCOT. 1976. Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper No. 29. rev. 1 reprinted 1989, 1994 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome.
- 35.- CEPIS/OPS-OMS. TRUQUE P, 2005. Armonización de los Estándares de Agua Potable en las Américas. Disponible en: <<http://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>> [consulta: 4 abril de 2006]
- 36.- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 1996. Guidelines for drinking-water quality. Vol 2. Health criteria and other supporting information, 2nd ed.Geneva.
- 37.- INSTITUTO NACIONAL de Normalización (INN). 2005. Agua potable, Parte I: Requisitos. Norma Chilena Nch 409/1, Of 2005. Santiago de Chile. INN.
- 38.- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSIONS.1997 Norma para las aguas minerales naturales. CODEX STAN 108-1981, Rev. 1-1997

- 39.- MINISTERIO DE SALUD (MINSAL). 2001. Dpto. de Asesoría Jurídica. Reglamento de aguas minerales. Decreto N° 106, actualizado al 2001.
- 40.- CEPIS/OPS-OMS.2005 Comparación de las normas de calidad de agua potable entre la OMS y los países. En: <<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/normas.html>> [consulta: 14 abril de 2006]
- 41.- DIRECTIVA 80/778/CEE del Consejo de 15 de julio de 1980, relativa a las aguas destinadas al consumo humano. DOCE, 1980.
- 42.- CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO (CAA) Actualizado, 1998. Bebidas hídricas, agua y agua gasificada. Capítulo XII. Agua Mineral, Art. 985. De La Canal, S.R.L., Buenos Aires, Argentina, 332–333.
- 43.- PÉREZ O. 1979. Métodos de enfriamiento control de dureza en aguas industriales. Aplicación a un caso práctico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 146 p
- 44.-VALENZUELA T. 2004. Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso. Tesis para optar a la Licenciatura en Ingeniería Química de la Universidad de las Américas.Puebla.
- 45.- SAGAN- GEA. 2006.Otros Métodos de Tratamiento de Aguas Residuales. Ablandamiento del agua con carbonato bórico y cal. En: <http://www.sagan-gea.org/hojared_Agua/paginas/29agua.html>[consulta: 13 Mayo de 2006]
- 46.- SÁMANO M. 2005. Estudios de opciones eficientes de tratamientos de agua para remoción de algunos contaminantes a bajos costos considerando los impactos ambientales resultantes de los mismos. Tesis para optar a la Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Química de la Universidad de las Américas, Puebla.
- 47- PITALUGA L, GONZÁLEZ M, FERNÁNDEZ M. 2001. Problemática derivada del ablandamiento de Domésticos de Aguas. Documento de trabajo, Laboratorio del Colegio Oficial de Farmacéuticos de Alicante.
- 48.- ANSELME C, ET AL. Tratamiento del agua por procesos de membrana, Principios, procesos y aplicaciones. American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa. Edit. McGrawHill. Madrid.1998.
- 49.- DESPOUY I. 2005. Caracterización de fuentes y análisis crítico de los tratamientos de agua potable en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 197 p

- 50.- ZAVALETA M, VARELA A. 1998.Efecto de Campo magnético en el tratamiento de aguas Duras. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú. Tecnia. Vol. 8, N°1: 69-76 p.
- 51.- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS). 2004. Informe de Gestión del sector Sanitario.
- 52.- ACUÑA A. 2005. Presencia de pesticidas en fuentes de agua potable en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 165 p
- 53.- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS). 2005. Documento Excel “Calidad química de las redes de agua potable período 2003-2004”.
- 54.- D’ETIGNY J. 1983. Estudio sobre la presencia de asbesto en el agua potable, aplicación a la Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- 55.- CHIU D. Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2005. División de Concesiones. Informe Consolidado Control de Fuentes.
- 56.- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS). 2005. Documento Excel “Tratamiento de las fuentes de agua potable en Chile”
- 57.- MOP. 1994. Dirección General de Aguas (DGA) Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres, estadística hidroquímica nacional. Etapa I, I-VII Regiones. Chile
- 58.- MOP. 1994 Dirección General de Aguas (DGA) Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres, estadística hidroquímica nacional. Etapa II, VIII-XII Regiones. Chile
- 59.- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE), 2004. Departamento de Informática. Base de Datos por entidades de población y categorías censales. Censo 2002
- 60.- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE), Departamento de Geografía y Censos. Chile: ciudades, pueblos, aldeas y caseríos. 2005. En: <<http://www.ine.cl>> [consulta: 20 Mayo de 2006]
- 61.- HAUSER A.1997 Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. Boletín N°50, 77 p.
- 62.- HAUSER A. 2001.Las Aguas Minerales Chilenas. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago Boletín N°60, 44 p.
- 63.- AZZOPARDI T. Saciando la sed de Chile. Informe especial. En: <www.businesschile.cl> [consulta: 20 Junio de 2006]

- 64.- DEROSAS F, CAHMI J. 2005. Vital para quienes aprecian lo natural. Reportaje diario El Mercurio, Economía y Negocios. Enero 2005, Santiago. Chile.
- 65.- FAMILIA.CL. 2006 ¿Cuál es la gracia de las aguas minerales?. Disponible en: <http://www.familia.cl/naturaleza/agua_mineral/mineral.htm>[consulta: 20 Junio de 2006]
- 66.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP), Dirección General de Aguas (DGA). Política Nacional de Recursos Hídricos 1999. Diciembre de 1999.Santiago de Chile.
- 67.- INDUAMBIENTAL.CL. 2006,El Agua, Funciones y Usos. Disponible en: <<http://www.induambiental.cl> >[consulta: 4 Junio de 2006]
- 68.- CANADIAN COUNCIL OF MINISTRES OF THE ENVIRONMENT.1993 Canadian water quality guidelines. Industrial water supplies. Ottawa, Ontario, Canadá, pág. 5.1-5.7
- 69.- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 1976. Quality Criteria for Water, Hardness. Washington, DC, US.
- 70.- FEDERAL WATER POLLUTION CONTROL ADMINISTRATION US. 1968. Water Quality Criteria
- 71.- FAO. 2006. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Perfiles Hídricos por País. El Riego en Chile. En: <<http://www.rlc.fao.org/paises/h2o/chile.html> > [consulta: 1 Julio de 2006]
- 72.- PORRAS, J. y THAUVIN, J. 1978. Agua subterráneas. Cuadernos del Centro Internacional de formación en ciencias Ambientales (CIFCA), Madrid, España. 81p.