

## **SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS**

# **ANÁLISIS DE PARÁMETROS NO INCLUIDOS EN LAS NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE**

**Informe final**

**Santiago, diciembre de 2014**

## **ANÁLISIS DE PARÁMETROS NO INCLUIDOS EN LAS NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE**

### **Resumen ejecutivo**

Los mayores valores de dureza en Chile se presentan entre las regiones I y Metropolitana, con concentraciones superiores a 1.000 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  en fuentes de agua en la primera región. Los problemas más fácilmente perceptibles para la población están asociados a la formación de incrustaciones, especialmente en los equipos calentadores de agua, el sabor y la formación de jabones insolubles y depósitos en los artefactos sanitarios. Las estadísticas de reclamos por "sarro y dureza" disponibles en la Superintendencia de Servicios Sanitarios no presentan una buena correlación con la distribución de la dureza, observándose las mayores tasas de reclamo en regiones con bajos niveles.

La bibliografía que relaciona dureza del agua de bebida con la salud de la población no presenta resultados concluyentes, principalmente debido a que el agua representa sólo entre 5 y 20% de la ingesta de calcio y magnesio, siendo mucho más importante el aporte dietético. Las enfermedades más estudiadas son las cardiovasculares y la formación de cálculos. La evidencia indica que la dureza del agua, principalmente el magnesio, tiene más bien un efecto benéfico en relación a las enfermedades cardiovasculares y no hay evidencia conclusiva que permita asociar la formación de cálculos con la dureza del agua ni menos con otras enfermedades.

La tecnología de remoción de la dureza más usada en Chile es el intercambio iónico, que se aplica principalmente a nivel industrial y que por su simpleza también se utiliza en los sistemas de ablandamiento a nivel domiciliario. El intercambio iónico tiene el inconveniente de sustituir el calcio y el magnesio por sodio, por lo que no es recomendable para aplicar al agua de bebida.

La literatura técnica indica que, a nivel central, la tecnología más económica de remoción de dureza es la precipitación con cal, similar al tratamiento físico químico convencional pero incluyendo dosificación de cal, manejo de grandes cantidades de lechada de carbonato de calcio y la recarbonatación del agua para restituir el pH y eliminar el hidróxido de calcio remanente. La precipitación con cal remueve la dureza hasta niveles del orden de 80 a 100 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . La osmosis inversa y la nanofiltración permiten remover la dureza del agua prácticamente en su totalidad pero, por su alto costo, sólo se justifican cuando se aplican adicionalmente para remover otros contaminantes disueltos en el agua potable.

El análisis de beneficio costo del ablandamiento centralizado muestra que, efectivamente, la precipitación con cal es el sistema de tratamiento más económico para remover la dureza. Sin embargo, debido a las dificultades tecnológicas de su implementación, sólo se justifica en instalaciones de escala grande o mediana. La osmosis inversa o el tratamiento por nanofiltración tienen un costo que es casi cuatro veces el de la precipitación con cal y no se justifican sólo para remover dureza. El ablandamiento a nivel domiciliario es el sistema más caro en términos de costo por metro cúbico, debido a los bajos niveles de producción. El ablandamiento a nivel central sólo se justifica cuando la población mayoritariamente percibe los inconvenientes asociados al agua dura y está dispuesta pagar por el costo adicional que significa su remoción, ya sea a nivel domiciliario o centralizado, condición que difícilmente puede ser evaluada sin un procedimiento de consulta ciudadana.

Debido a que el efecto de la dureza del agua en la salud humana es sujeto de fuertes controversias y que, al parecer, habría más efectos benéficos que perjudiciales, es poco recomendable su inclusión en una normativa de agua potable. Resulta más conveniente establecer una recomendación de dureza máxima de 300 a 500 mg/l, que entramparse en una normativa cuyo cumplimiento presentará dificultades de carácter tanto tecnológico como económico.

## ANÁLISIS DE PARÁMETROS NO INCLUIDOS EN LAS NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE

### Tabla de contenido

	Pág.
1.- Introducción.....	1
1.1.- Objetivos del estudio.....	1
1.1.1 Objetivo General.....	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2.- Conceptos generales.....	3
1.2.1.- Definición.....	3
1.2.2.- Efectos de la dureza.....	3
1.2.3.- Clasificación de la dureza.....	4
1.2.4.- Origen de la dureza del agua.....	4
1.2.5.- Dureza temporal y dureza permanente.....	5
1.2.6.- Determinación de la dureza.....	5
2.- Distribución de la dureza en Chile.....	7
3.- Problemas de dureza en los servicios de agua potable en Chile.....	18
4.- Efectos de la dureza en la salud.....	29
5.- Otros efectos de la dureza.....	33
5.1.- Sabor.....	33
5.2.- Corrosión y formación de sarro.....	33
5.3.- Acondicionamiento del agua.....	33
5.4.- Desalación.....	34
5.5.- Reuso del agua.....	34
5.6.- Agua envasada.....	35
5.7.- Aguas naturalmente blandas.....	35
5.8.- Agua lluvia recolectada.....	35
5.9.- Tratamiento a nivel domiciliario.....	35
5.10.- Conclusiones.....	36
6.- Tecnologías de remoción de la dureza.....	37
6.1.- Calentamiento del agua.....	37
6.2.- Intercambio iónico.....	37
6.3.- Precipitación con cal.....	38
6.4.- Tratamiento convencional del agua.....	39
6.5.- Osmosis inversa.....	40
6.6.- Nano filtración.....	41
6.7.- Campos magnéticos.....	41
7.- Factibilidad y conveniencia de incorporación de dureza y otros parámetros a la norma NCh409.....	43
7.1.- Análisis comparativo de diversas normativas.....	43
7.2.- Selección de parámetros para incorporar a la norma de agua potable nacional.....	50
7.3.- Otros parámetros.....	57
7.4.- Conclusiones.....	59
8.- Análisis de beneficio-costos de remoción centralizada de dureza.....	62
8.1.- Costo de tratamiento centralizado.....	64
8.1.1.- Precipitación con cal.....	64
8.1.2.- Nanofiltración - Osmosis inversa.....	69
8.2.- Ablandamiento a nivel domiciliario.....	73
8.3.- Resumen de costos.....	76
9.- Conclusiones y recomendaciones.....	79
Bibliografía.....	81

Anexo. Efectos de la dureza en la salud

<b>Lista de Tablas</b>		<b>Pág.</b>
Tabla N° 1. Clasificación de la Dureza.....		4
Tabla N° 2: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> ) en el agua potable en Chile.....		7
Tabla N° 3: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Calcio (mg/L de Ca) en el agua potable en Chile.....		8
Tabla N° 4. Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Magnesio (mg/l de Mg) en el agua potable en Chile.....		9
Tabla N° 5. Dureza en las fuentes de la I Región.....		10
Tabla N° 6. Dureza en las fuentes de la II Región.....		11
Tabla N° 7. Dureza en las fuentes de la III Región.....		12
Tabla N° 8. Dureza en localidades de la IV Región.....		13
Tabla N° 9. Dureza en localidades de la V Región.....		15
Tabla N° 10. Agua cruda en las fuentes de la Región Metropolitana.....		17
Tabla N° 11. Reclamos en la Primera Región: AGUAS DEL ALTIPLANO S. A.....		18
Tabla N° 12. Reclamos en la Segunda Región: AGUAS ANTOFAGASTA S. A.....		18
Tabla N° 13. Reclamos en la Tercera Región: AGUAS CHAÑAR S. A.....		18
Tabla N° 14. Reclamos en la Cuarta Región: AGUAS DEL VALLE S. A.....		19
Tabla N° 15. Reclamos en la Quinta región: ESVAL S. A.....		19
Tabla N° 16. Reclamos en la Quinta Región: Varias empresas.....		20
Tabla N° 17. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS ANDINAS S. A.....		20
Tabla N° 18. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS CORDILLERA S. A.....		20
Tabla N° 19. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS MANQUEHUE S. A.....		21
Tabla N° 20. Reclamos en la Región Metropolitana: SMAPA.....		21
Tabla N° 21. Reclamos en la Región Metropolitana: Varias empresas.....		21
Tabla N° 22. Reclamos en la Sexta Región: ESSBIO S. A.....		21
Tabla N° 23. Reclamos en la Séptima Región: AGUAS NUEVO SUR MAULE S. A.....		22
Tabla N° 24. Reclamos en la Octava Región: ESSBIO S. A.....		23
Tabla N° 25. Reclamos en la Octava Región: AGUAS SAN PEDRO S. A.....		24
Tabla N° 26. Reclamos en la Novena Región: AGUAS ARAUCANIA S. A.....		24
Tabla N° 27. Reclamos en la Décima Región: ESSAL S. A.....		25
Tabla N° 28. Reclamos en la Décima región: Aguas Décima S. A.....		25
Tabla N° 29. Reclamos en la Undécima Región: AGUAS PATAGONIA DE AYSÉN S. A.....		25
Tabla N° 30. Reclamos en la Duodécima Región: AGUAS MAGALLANES S. A.....		26
Tabla N° 31. Resumen de reclamos por Región.....		26
Tabla N° 32. Reclamos/millón de habitantes por Región.....		27
Tabla N° 33. Requisitos Microbiológicos del Agua Potable en la Normativa Internacional y Chilena.....		43
Tabla N° 34. Constituyentes inorgánicos del Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena.....		44
Tabla N° 35. Constituyentes orgánicos del Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena.....		45
Tabla N° 36. Pesticidas en el Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena.....		46
Tabla N° 37. Desinfectantes y subproductos de desinfección en el Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena.....		47
Tabla N° 38. Sustancias químicas sin significancia en la salud en las concentraciones normalmente encontradas en agua potable.....		48
Tabla N° 39. Constituyentes radiactivos del agua potable.....		48
Tabla N° 40. Sustancias y Parámetros que pueden dar lugar a quejas.....		49
Tabla N° 41. Cantidad de parámetros en normativa de agua potable por país u organismo internacional.....		50
Tabla N° 42. Lista de los parámetros ausentes en la norma chilena contenidos en las normas nacionales e internacionales.....		51
Tabla N° 43. Contenidos máximos permisibles de dureza, calcio y magnesio en el agua potable (mg/l).....		60

<b>Lista de Tablas</b>		<b>Pág.</b>
Tabla N° 44. Ejemplos de casos de ablandamiento de agua a nivel central.....		61
Tabla N° 45. Ejemplo de casos de ablandamiento de agua a nivel central.....		62
Tabla N° 46. Tipos de agua y tipo de tratamiento para la remoción de dureza a nivel central.....		64
Tabla N° 47.- Información de costos de inversión plantas de tratamiento convencional.....		66
Tabla N° 48. Supuestos para estimar valor anual.....		67
Tabla N° 49. Costo de inversión para plantas físico químicas seleccionadas (M\$/año).....		67
Tabla N° 50. Costos operacionales de las plantas convencionales a dic. 2014.....		68
Tabla N° 51. Estimación del agregado de reactivos químicos.....		69
Tabla N° 52. Resumen de costos de precipitación con cal.....		69
Tabla N° 53. Costos de inversión plantas de osmosis inversa.....		71
Tabla N° 54. Valor anual del costo de inversión (M\$).....		71
Tabla N° 55. Estimación de consumo unitario de energía y costo por m <sup>3</sup> para Aguas del Altiplano.....		72
Tabla N° 56. Gasto Productos Químicos por localidad.....		72
Tabla N° 57. Resumen de costos de osmosis inversa.....		73
Tabla N° 58. Consumo por cliente por empresa s/último proceso tarifario.....		74
Tabla N° 59. Estimación del costo de inversión del ablandamiento domiciliario.....		74
Tabla N° 60. Estimación de los costos operacionales del ablandamiento del agua a nivel domiciliario.....		75
Tabla N° 61. Resumen del costo de ablandamiento a nivel domiciliario.....		75
Tabla N° 62. Resumen de costos unitarios de tratamiento (\$/m <sup>3</sup> ).....		76
Tabla N° 63. Estimación de costos limpieza de cañerías.....		77
Tabla N° 64. Estimación de costos equipo electromagnético.....		77

<b>Lista de figuras</b>		<b>Pág.</b>
Figura N° 1. Valores máximo, medio y mínimo de la dureza en el agua potable por región.....		8
Figura N° 2. Valores máximo, medio y mínimo de calcio en el agua potable por región.....		9
Figura N° 3. Valores máximo, medio y mínimo de magnesio en el agua potable por región.....		10
Figura N° 4. Dureza promedio en el período 2012-2014 en fuentes de la I Región.....		11
Figura N° 5. Dureza promedio en el período 2007-2011 en fuentes de la II Región.....		12
Figura N° 6. Dureza promedio en el período 2012-2014 para localidades de la III Región.....		13
Figura N° 7. Dureza promedio en el período 2005-2014 para localidades de la IV Región.....		14
Figura N° 8. Dureza promedio en el período 2005-2014 para localidades de la V Región.....		16
Figura N° 9. Dureza promedio en el período 2011-2013 para fuentes de la Región Metropolitana.....		17
Figura N° 10. Reclamos por millón de habitantes por Región.....		27
Figura N° 11. Reclamos por dureza por millón de habitantes por Región.....		28
Figura N° 12. Valores máximo, medio y mínimo de dureza por Región.....		28
Figura N° 13. Comparación entre la dureza del agua cruda y tratada para varios servicios de la Región Metropolitana de Santiago.....		39
Figura N° 14. Dureza del agua cruda, agua tratada por osmosis inversa y agua remineralizada en tres servicios de la primera Región.....		40
Figura N° 15. Correlación entre Conductividad y Sólidos Disueltos Totales para las fuentes de agua de la Segunda Región.....		58
Figura N° 16. Correlación entre Conductividad y Sólidos Disueltos Totales para las fuentes de agua de la Región Metropolitana (promedios/localidad).....		58
Figura N° 17. Costo de inversión (M\$) de plantas de tratamiento físico químico convencional entre la II Región y Metropolitana.....		65
Figura N° 18. Costo de inversión (M\$ de dic. 2014) de plantas de tratamiento por osmosis inversa entre la I y III regiones.....		70

## 1.- Introducción

La Superintendencia de Servicios Sanitarios ha ejercido históricamente su competencia fiscalizadora de los servicios de producción y distribución de agua potable a través de diversas acciones tendientes a asegurar el cumplimiento de los requisitos contenidos en la norma NCh 409. Sin embargo, existen diferentes parámetros que, si bien no se encuentran incluidos en la actual norma de calidad del agua potable, provocan quejas o reclamos reiterados de las autoridades y de la población en general por la presencia de “sarro” en el agua, asociado a niveles altos de dureza, calcio, conductividad u otros parámetros, por lo que son motivo de permanente preocupación y alerta de la SISS. Estas características del agua se presentan en zonas en que hay una alta mineralización de las aguas, que generalmente obedece a causas naturales.

De ahí que se haya estimado necesario evaluar el impacto técnico y económico que tendría la inclusión de los parámetros señalados u otros de similar naturaleza en la normativa vigente con miras a una actualización, tanto de las instrucciones como del marco normativo que regula la calidad del agua potable suministrada a la población del país.

Cabe destacar que la remoción de dureza del agua potable, así como de otros contaminantes de similar naturaleza, ha sido sujeto de una antigua controversia en que sus partidarios privilegian la importancia de sus efectos en los consumidores y sus detractores el alto costo asociado al ablandamiento de todo el suministro de agua versus la remoción in situ sólo para aquellos usos afectados por la dureza, principalmente por la incrustación de equipos y sistemas de distribución (calentadores de agua, calderas, aguas para usos industriales específicos, etc.). En general, las industrias han enfrentado exitosamente el ablandamiento del agua in situ pero no es fácil implementar soluciones masivas a nivel domiciliario, por lo que los efectos en este ámbito resultan importantes a la hora de tomar una decisión.

La revisión de la literatura técnica existente en el mundo no permite establecer a ciencia cierta la relación entre la ingesta de aguas duras, que contribuiría a lo más en un 20 % de la ingesta total de calcio y magnesio de las personas, y los efectos de ésta en la salud humana. Algunos autores atribuyen a la dureza un efecto en la morbilidad por litiasis urinaria, es decir formación de cálculos en las vías urinarias. Otros atribuyen un posible efecto en la protección frente a enfermedades cardiovasculares, aunque también existen autores que asocian a la dureza con una prevalencia de estas mismas enfermedades. También, en este respecto, existe evidencia que atribuye roles muy diferentes al calcio y al magnesio.

### 1.1. Objetivos del estudio

#### 1.1.1 Objetivo General.

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis del costo-beneficio que tendría la inclusión de ciertos parámetros que en la actualidad no se encuentran incluidos en la norma de calidad del agua potable, NCh409 – Parte 1: Aguas Potable Requisitos, y que provocan reiteradas quejas o reclamos por parte de las autoridades y de la población en general por sus posibles daños a la salud de la población o bien por el deterioro que causan en las instalaciones domiciliarias y artefactos domésticos.

El trabajo se plantea como una continuación del estudio “Análisis de Presencia de Contaminantes No Controlados en Agua Potable”, contratado por la SISS en el año 2001, que concluyó con la necesidad de normar algunos parámetros y de realizar mayores estudios en relación al parámetro dureza entre otros, tomando en consideración los avances logrados y los actuales niveles de conocimiento del sector.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del estudio son las siguientes:

- Realizar un análisis de los parámetros dureza, calcio, conductividad u otros, que provocan quejas o reclamos reiterados de las Autoridades y de la población en general y que no han sido considerados, actualmente, en la normativa de agua potable, en base a análisis comparativos con normativas o recomendaciones internacionales, complementado con una contextualización en la realidad nacional que considera antecedentes de calidad natural de aguas, vulnerabilidad de fuentes de agua, geología del territorio, actividad socioeconómica y factibilidad de su remoción.
- Realizar la recopilación de exámenes analíticos y otros antecedentes que permitan precisar las reales concentraciones de la dureza en el agua potable, tanto en ciertas fuentes de abastecimiento como en algunos servicios de agua potable, definidos entre el consultor y esta Superintendencia, de las regiones de Tarapacá, Coquimbo y Metropolitana.
- Recopilar los avances en la investigación científica sobre el impacto en la salud pública como en la calidad del servicio que provoca la dureza, cuando se encuentra en el agua potable en diferentes concentraciones (agua dura, agua blanda).
- De acuerdo a los antecedentes recopilados, análisis detallado de la factibilidad técnica y económica de incorporar algunos de estos parámetros en la norma de agua potable, incorporando factores como:
  - Distribución geográfica de las distintas zonas que presentan altos niveles de dureza del agua en el país.
  - Metodologías disponibles y factibilidad técnica de implementación para el abatimiento de los parámetros seleccionados, según el caudal de producción y los distintos niveles de concentración determinados, según la recopilación de información de la calidad del agua cruda de las fuentes de abastecimiento analizadas.
  - Sistemas para la eliminación o disposición de los nuevos residuos generados en estos sistemas de tratamiento.
  - Costos promedio por metro cúbico de agua producida. Se deberá desglosar los costos involucrados en infraestructura y en operación para los sistemas más factibles de ser implementados.
  - Plazos estimados en que se podrían implementar estas nuevas exigencias al sector sanitario, tomando en consideración los tiempos de calificaciones ambientales, construcción, puesta en marcha y entrada en operación de nuevos sistemas de tratamiento.
- Realizar una proposición de aquellos nuevos parámetros que se debería incluir en una futura actualización de la Norma Chilena de Calidad del Agua Potable. Dicha propuesta deberá incluir el límite normativo para cada parámetro seleccionado así como un detallado análisis de la factibilidad técnica y económica de incorporar estos parámetros en la norma de agua potable.

## 1.2.- Conceptos generales

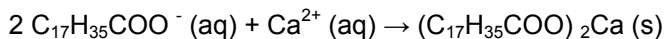
### 1.2.1.- Definición

Originalmente la dureza del agua se entendía como una medida de la capacidad del agua para precipitar el jabón por lo que el agua dura requiere considerablemente más jabón para producir espuma y a menudo produce un depósito perceptible a simple vista de precipitado (e.g. metales, jabones o sales insolubles) en los recipientes que la contienen, incluyendo el anillo que se forma en la tina de baño. El jabón es precipitado principalmente por los iones calcio y magnesio presentes, aunque otros cationes polivalentes (e.g. aluminio, bario, hierro, manganeso, estroncio y zinc)<sup>1</sup> también pueden precipitar el jabón, pero a menudo se presentan en forma de complejos, frecuentemente asociados con compuestos orgánicos y su contribución a la dureza puede ser mínima y difícil de definir. Por ello es común expresar la dureza total como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas ambas como carbonato de calcio equivalente, en miligramos por litro.<sup>2</sup>

### 1.2.2.- Efectos de la dureza

El agua dura forma depósitos que obstruyen las tuberías. Estos depósitos, denominados "incrustaciones", se componen principalmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) y sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ). Los carbonatos de calcio y magnesio tienden a depositarse como sólidos en las superficies interiores de tuberías e intercambiadores de calor. Esta precipitación (formación de un sólido insoluble) es causada principalmente por la descomposición térmica de iones bicarbonato, pero también ocurre cuando el ión carbonato alcanza la concentración de saturación. La consiguiente acumulación de incrustaciones restringe el flujo de agua en las tuberías. En calderas, estos depósitos ejercen un efecto aislante, obstruyen el flujo de calor en el agua, reduciendo la eficiencia de la calefacción y permitiendo que los componentes de metal de la caldera se sobrecalienten. En un sistema presurizado, este recalentamiento puede conducir incluso a la falla de la caldera. El daño causado por los depósitos de carbonato de calcio varía en la forma cristalina que adoptan, por ejemplo, calcita o aragonito.

También con el agua dura las soluciones de jabón forman un precipitado blanco (sarro) en vez de producir espuma, porque los iones  $2+$  destruyen las propiedades tensoactivas del jabón mediante la formación de un precipitado sólido. Un componente importante de ese sarro es el estearato de calcio, que se forma a partir del estearato de sodio, principal componente de jabón:



Los detergentes sintéticos no forman estos depósitos, por lo que su uso no es afectado mayormente por la dureza.

En las piscinas, el agua dura se manifiesta por un aspecto turbio o lechoso. Los hidróxidos de calcio y magnesio son solubles en agua. La solubilidad de los hidróxidos de los metales alcalinotérreos al que pertenecen el calcio y magnesio (grupo 2 de la tabla periódica) aumenta a medida que se mueve abajo en la columna. Las soluciones acuosas de los hidróxidos metálicos absorben dióxido de carbono del aire, formando los carbonatos insolubles, dando lugar a la turbiedad. Esto a menudo resulta en un pH

<sup>1</sup> WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

<sup>2</sup> APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 10th Edition. 1995.

excesivamente alto ( $\text{pH} > 7,6$ ) por lo que una solución común al problema consiste en, manteniendo la concentración de cloro en el nivel adecuado, bajar el pH mediante la adición de ácido clorhídrico, estando el rango óptimo entre 7,2 a 7,6.<sup>3</sup>

Adicionalmente a los efectos descritos, existe controversia en la literatura respecto al posible impacto de la dureza en la salud de los consumidores. Los principales puntos de esta controversia se refieren a las enfermedades cardiovasculares, en las que la dureza, principalmente en forma de magnesio, podría jugar un papel benéfico al ayudar a prevenir, e incluso tratar, estas enfermedades. El otro punto importante son las litiasis urinarias, es decir la formación de cálculos en las vías urinarias, respecto a lo cual existe una mayor controversia, existiendo estudios que muestran un impacto importante mientras otros describen lo contrario. Por último, está la posibilidad de que la dureza pueda tener impacto en otras enfermedades, frente a lo cual no existe al parecer evidencia concluyente.

En el capítulo 4 y en el Anexo 2 de este informe se presenta mayores detalles respecto al posible impacto de la dureza en la salud humana.

### 1.2.3.- Clasificación de la dureza

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido la clasificación de la dureza en el agua que se presenta en la tabla N° 1.<sup>4</sup>

Tabla N° 1. Clasificación de la Dureza

Dureza (mg/l de $\text{CaCO}_3$ equivalente)	Clasificación
<60	Blanda
60-120	Moderadamente dura
120-180	Dura
>180	Muy dura

Fuente: McGowan, 2000, Referencia 4

Es interesante tener en cuenta que en Chile hay fuentes de agua potable que tienen durezas superiores a 1.000 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  equivalente y numerosas fuentes bordean los 500 o más mg/l. También es interesante notar que el tratamiento por precipitación con cal es eficiente para generar durezas poco inferiores a 100 mg/l que, de acuerdo con la clasificación de la OMS calificarían como **moderadamente duras**.

### 1.2.4.- Origen de la dureza del agua

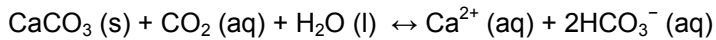
La dureza del agua se determina por la concentración de cationes polivalentes en el agua. Los cationes polivalentes son cationes (complejos metálicos cargados positivamente) con una carga mayor que 1+. Generalmente, los cationes tienen la carga de 2+. Cationes comunes encontrados en aguas duras incluyen  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

Los iones causantes de la dureza ingresan en el agua por lixiviación de minerales dentro de un acuífero. Minerales comunes que contienen calcio son la calcita y el yeso. Un mineral de magnesio común es la dolomita (que también contiene calcio). El agua de lluvia y el agua destilada son blandas, porque

<sup>3</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Hard\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Hard_water)

<sup>4</sup> WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1. Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2011

contienen pocos iones. La disolución y formación de carbonato cálcico se describe por la siguiente reacción de equilibrio:



La lluvia, que contiene dióxido de carbono disuelto, puede reaccionar con el carbonato de calcio y disolver y transportar con el agua los iones del calcio. El carbonato de calcio puede ser re-depositado a medida que el dióxido de carbono se pierde a la atmósfera, formando a veces estalactitas y estalagmitas.

### 1.2.5.- Dureza temporal y dureza permanente<sup>5</sup>

La dureza también puede ser expresada en términos de dureza de carbonatos (temporal) y dureza no carbonatada (permanente). Cuando la dureza es numéricamente mayor que la suma de alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, la parte de la dureza equivalente a la alcalinidad se denomina "dureza de carbonatos"; la dureza asociada al exceso sobre esta última se denomina "dureza no carbonatada". Cuando la dureza es numéricamente igual o menor a la suma de la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, se asume que toda la dureza es carbonácea y que no existe dureza no carbonácea.

#### Dureza temporal

La dureza temporal es un tipo de dureza del agua causada por la presencia de minerales de bicarbonato disueltos (bicarbonato de calcio y bicarbonato de magnesio). Cuando estos minerales se disuelven generan cationes de calcio y magnesio ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones de carbonato y bicarbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ). La presencia de cationes metálicos hace que el agua sea dura. Sin embargo, a diferencia de la dureza permanente causada por compuestos de sulfato y cloruro, esta dureza "temporal" puede reducirse ya sea hirviendo el agua o por la adición de cal (hidróxido de calcio) mediante el proceso de ablandamiento por cal. La ebullición promueve la formación de carbonato a partir del bicarbonato y el carbonato de calcio precipita de la solución, dejando un agua que es más blanda una vez enfriada.

#### Dureza permanente

La dureza permanente no se puede eliminar al hervir el agua. Generalmente es causada por la presencia de sulfato de calcio o sulfato de magnesio en el agua, que no precipitan a medida que aumenta la temperatura. Los iones que causan la dureza permanente del agua pueden eliminarse mediante un ablandador de agua consistente en una columna de intercambio iónico.

### 1.2.6.- Determinación de la dureza<sup>6</sup>

La dureza se puede determinar por cálculo a partir de mediciones calcio y magnesio, método que da la mayor precisión, o por el método de titulación utilizando ácido etilendiamintetraacético (EDTA), que forma un complejo soluble en presencia de los cationes calcio y el magnesio.

La dureza calculada a partir del calcio y el magnesio, denominada también dureza teórica, tiene la siguiente expresión:

$$\text{Mg equivalentes de CaCO}_3 = 2,497 (\text{Ca, mg/l}) + 4,118 (\text{Mg, mg/l})$$

<sup>5</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Hard\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Hard_water)

<sup>6</sup> APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 10<sup>th</sup> Edition. 1995.

En esta relación los factores se derivan de la relación de los pesos moleculares entre el calcio, magnesio y carbonato de calcio.

Además de la forma tradicional de expresión en términos de mg/l de CaCO<sub>3</sub> equivalente, la dureza se puede expresar también en unidades alternativas como las siguientes:

Grado Alemán (°D)	=	17,85 mg CaCO <sub>3</sub> /l
Grado Francés (°F)	=	10,00 mg CaCO <sub>3</sub> /l
Grado Inglés (°E)	=	14,25 mg CaCO <sub>3</sub> /l

## 2.- Distribución de la dureza en Chile

En la memoria de título de Marco A. de Neira<sup>7</sup> se estimó la dureza a lo largo del territorio nacional haciendo uso de la información de Mg contenida en los controles del agua potable SISS 2003-2004, información de Ca y Mg a nivel comunal, de la memoria de Juan D'Etigny<sup>8</sup>, de 1983, e información de varios años recopilada en diferentes estaciones de calidad de agua de la Dirección General de Aguas y de la Dirección de Obras Hidráulicas recopiladas en sistemas agua potable rural. Con la relación Ca/Mg en cada comuna se estimó las concentraciones de Ca y la dureza total, resultados que se presentan en las tablas N° 2, 3 y 4 y en las figuras 1, 2 y 3.

De la información presentada se observa que los mayores valores promedio de dureza, calcio y magnesio (a nivel comunal) se encuentran en la Tercera Región, aunque los mayores valores de dureza y calcio se encuentran en la IV Región y el mayor valor de magnesio en la Región Metropolitana.

También se observa que la dureza es alta desde la Región Metropolitana al norte, tanto para las expresiones en términos de calcio y magnesio, con promedios más altos de dureza total y calcio en las regiones III, IV, Metropolitana y I. Los promedios de magnesio siguen un orden similar, pero se invierte la relación entre las regiones Metropolitana y I.

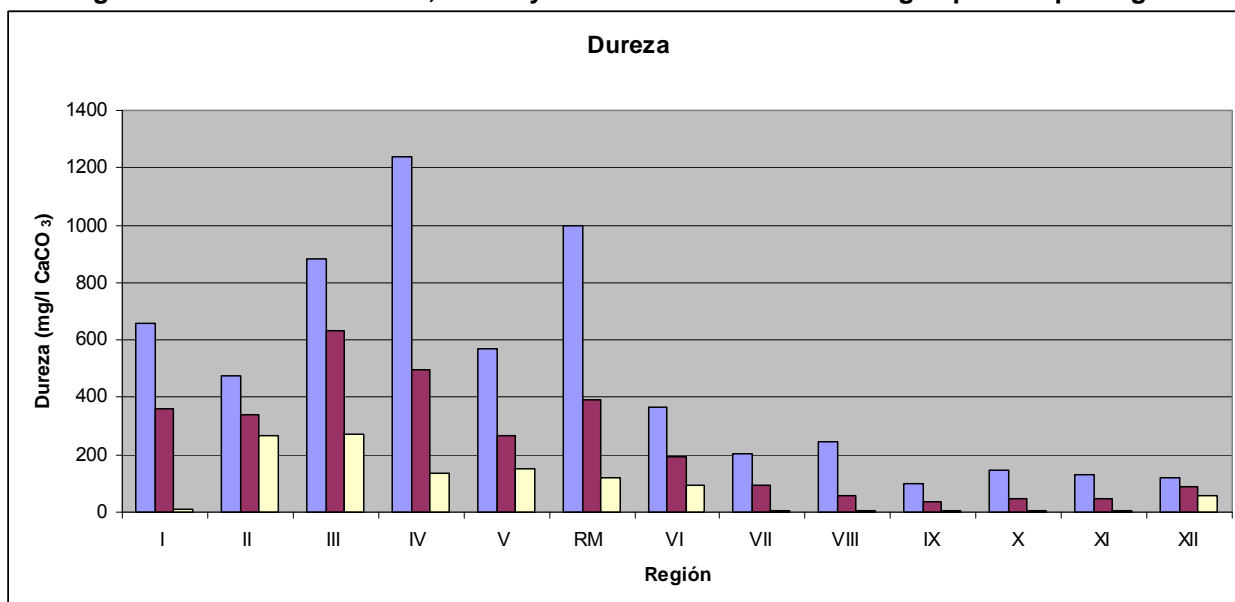
En las regiones VI hacia el sur el promedio comunal de la dureza no supera los 200 mg/l, reduciéndose gradualmente, igual que el calcio, hasta la IX Región y aumentando levemente desde esta hasta la XII Región. El Magnesio se reduce hasta la XI Región y luego aumenta en la XII.

**Tabla N° 2: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de dureza total (mg/L de CaCO<sub>3</sub>) en el agua potable en Chile.**

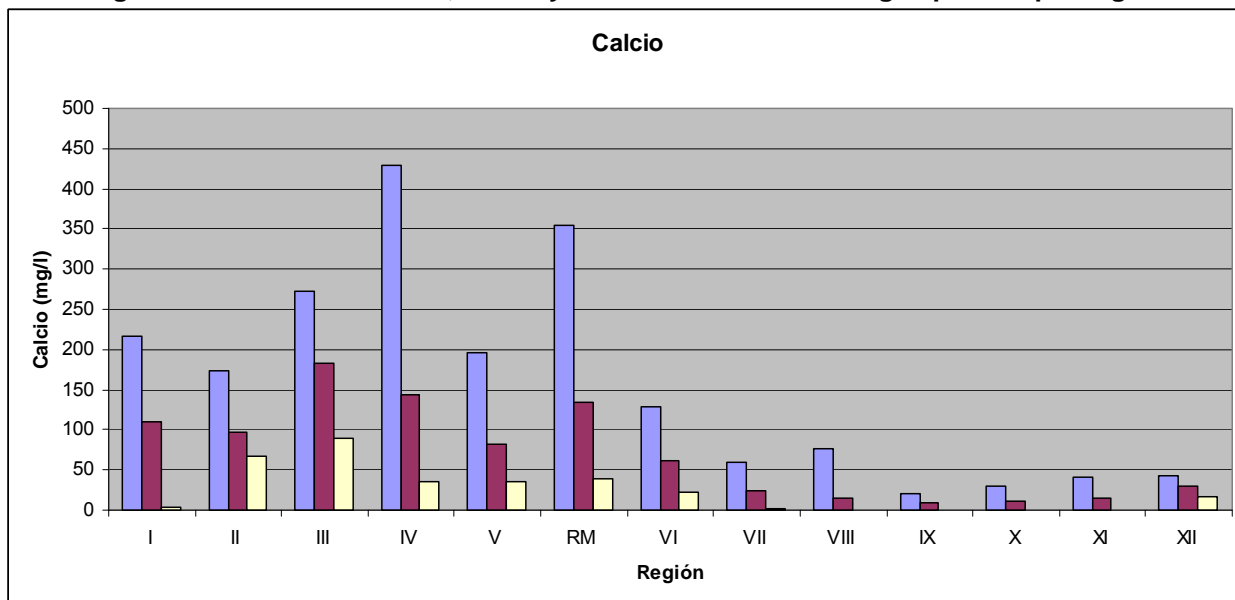
Región	Comunas C/Info.	Máximo	Promedio	Mínimo
I	6/10	659	362	12
II	5/9	474	341	267
III	6/9	881	630	271
IV	12/15	1.237	494	136
V	28/38	569	266	150
RM	49/52	997	394	122
VI	21/33	367	196	92,9
VII	22/30	202	92,5	6,5
VIII	49/52	248	55,2	5,6
IX	28/31	101	37,4	3,5
X	34/42	144	44,5	3,7
XI	9/10	130	46,9	3,4
XII	3/11	121	89,9	56,2
Tot/prom.	272/342	472	235	86,8

<sup>7</sup> Marco A. Neira Gutiérrez. **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, Universidad de Chile, Escuela de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2006

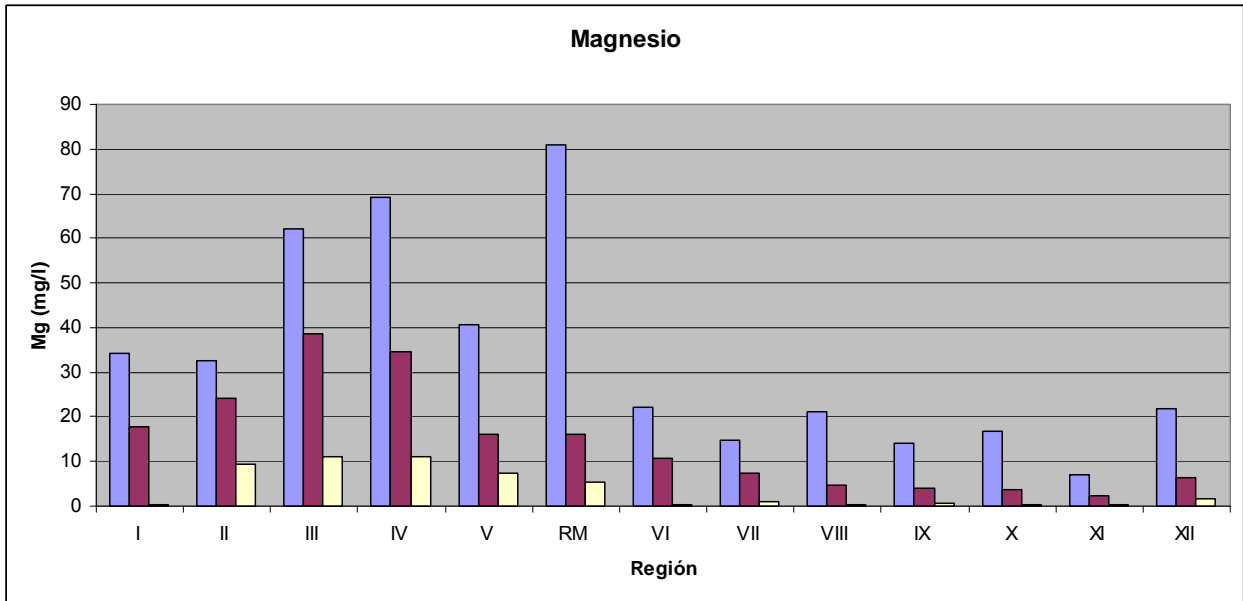
<sup>8</sup> Juan D'Etigny J. **Estudio sobre la presencia de asbesto en el agua potable, aplicación a la Región Metropolitana.** Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile, Escuela Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1983.

**Figura N°1. Valores máximo, medio y mínimo de la dureza en el agua potable por región**

**Tabla N° 3: Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Calcio (mg/L de Ca) en el agua potable en Chile**

Región	Comunas C/Info.	Máximo	Promedio	Mínimo
I	6/10	216	111	4,2
II	5/9	174	96,7	66,4
III	6/9	273	182	90,0
IV	12/15	429	143	36,1
V	28/38	195	81,2	35,0
RM	49/52	355	134	39,5
VI	21/33	128	61,0	22,5
VII	22/30	59,0	24,4	1,0
VIII	49/52	75,7	14,3	0,7
IX	28/31	21,4	8,9	0,3
X	34/42	30,0	11,3	0,8
XI	9/10	40,5	14,5	0,8
XII	3/11	42,8	30,1	17,1
Tot/prom.	272/342	157	70,2	24,2

**Figura Nº 2. Valores máximo, medio y mínimo de calcio en el agua potable por región**

**Tabla Nº 4. Concentraciones promedio, máximos y mínimos de Magnesio (mg/l de Mg) en el agua potable en Chile**

Región	Comunas C/Info.	Máximo	Promedio	Mínimo
I	9/10	34,2	17,9	0,3
II	6/9	32,5	24,2	9,5
III	9/9	62,3	38,7	11,2
IV	13/15	69,1	34,5	11,1
V	35/38	40,5	16,2	7,5
RM	51/52	80,8	16,1	5,3
VI	33/33	22,1	10,8	0,3
VII	26/30	14,9	7,4	1,0
VIII	51/52	21,1	4,8	0,4
IX	29/31	14,0	4,0	0,7
X	40/42	16,9	3,7	0,5
XI	9/10	7,1	2,4	0,3
XII	3/11	21,8	6,5	1,7
Tot/prom.	314/342	33,6	14,4	3,8

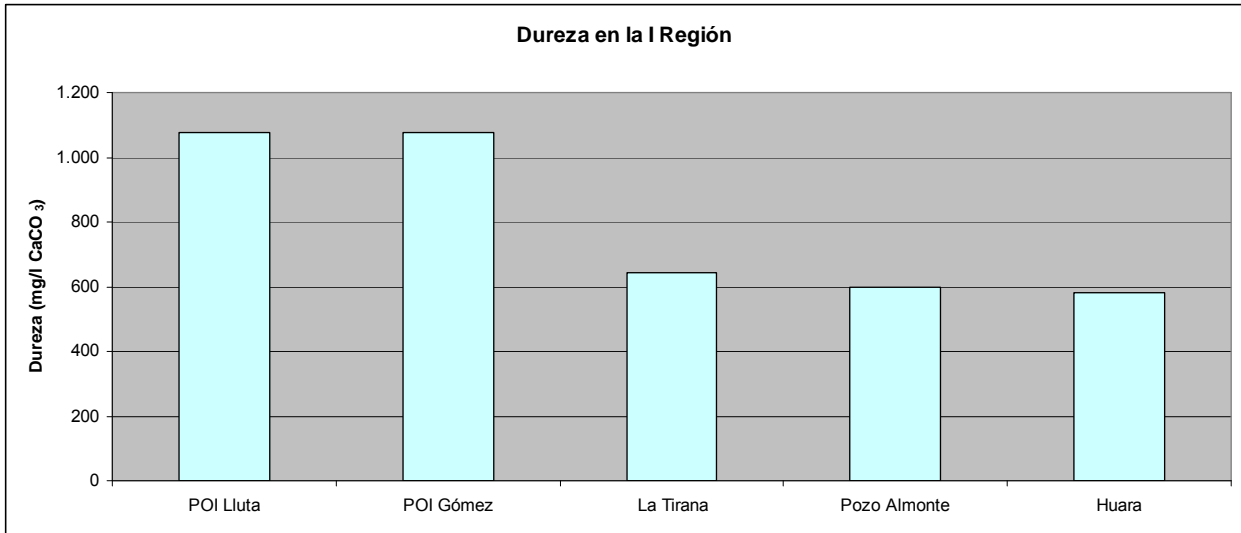
**Figura N° 3. Valores máximo, medio y mínimo de magnesio en el agua potable por región**


Recientemente la Superintendencia de Servicios Sanitarios inició un control de algunos de los parámetros que no se encuentran incluidos en la Norma de agua potable NCh 409, entre los que se encuentra la dureza, existiendo ya algunos avances de dicha información. Adicionalmente, para efectos de este estudio, se solicitó información sobre dureza en el agua potable a las empresas que operan en las regiones con mayores niveles de calcio y magnesio, que incluyen Aguas del Altiplano en la I región, Aguas Antofagasta en la II, Aguas Chañar en la III, ESVAL en la IV y V región y Aguas Andinas (Grupo Aguas) en la Región Metropolitana, la que se presenta en forma resumida a continuación.

En la tabla N° 5 se presenta los promedios anuales de dureza en las principales fuentes de la I Región, con valores entre 2012 y 2014. Se observa que los niveles más altos se presentan en las fuentes ubicadas en la cuenca del río Lluta (aguas subterráneas salobres) y en la que abastece a Pago de Gómez, ambas tratadas mediante osmosis inversa, con niveles de dureza total superiores a los 1.000 mg/l de CaCO<sub>3</sub> equivalente. La siguen La Tirana, Pozo Almonte y Huara, también tratadas mediante osmosis inversa, y con niveles en torno a los 600 mg/l. En la figura N° 4 se presenta gráficamente los promedios interanuales de dureza en las localidades indicadas.

**Tabla N° 5. Dureza en las fuentes de la I Región**

Servicio	2012	2013	2014	General
Pta. osmosis inversa Lluta	1.124	1.041	1.075	1.078
Pta. osmosis inversa Pago de Gómez	742	636	807	1.078
La Tirana		643	640	641
Pozo Almonte		604	594	599
Huara		580	585	583

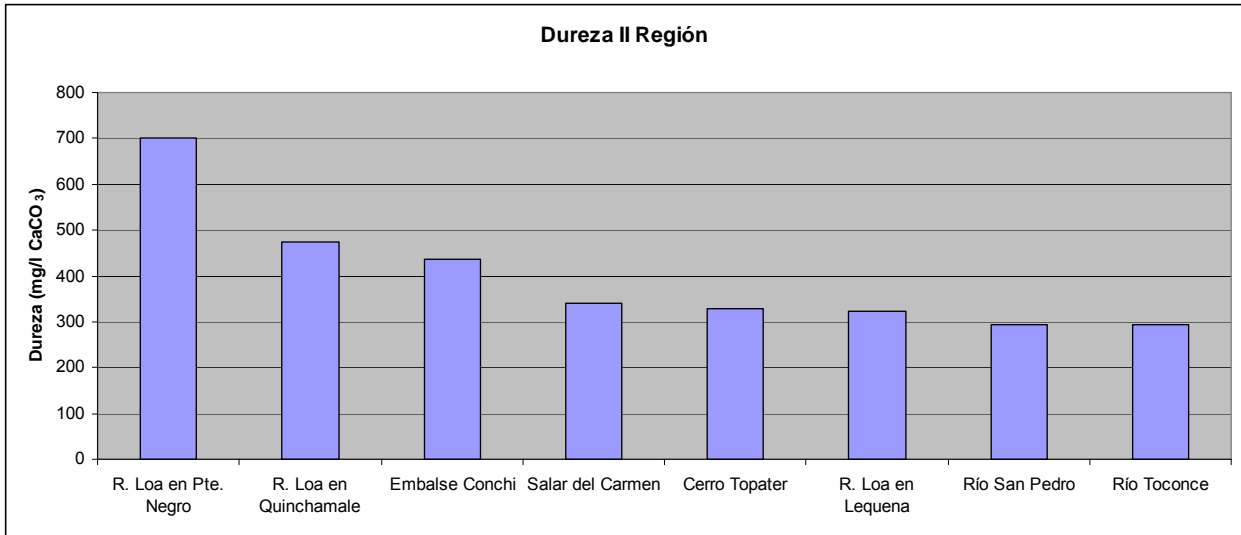
**Figura N° 4. Dureza promedio en el período 2012-2014 en fuentes de la I Región**


En la tabla N° 6 se presenta los niveles de dureza para las principales fuentes de la II Región, con promedios anuales desde 2007 hasta 2014, y el promedio general. Se observa que los mayores niveles corresponden al río Loa en Puente Negro, a la altura de Calama, en torno a los 700 mg/l, y que estos niveles se reducen hacia aguas arriba, lo que es característico de los procesos de mineralización progresiva. Los afluentes al río Loa, San Pedro y Toconce muestran valores similares a los del río Loa en el punto de recepción de estos aportes, pero inferiores a los que se observan en la zona más mineralizada.

**Tabla N° 6. Dureza en las fuentes de la II Región**

Fuente/año	2007	2008	2009	2010	2011	Promedio
Río Loa en Puente Negro	761	754	708	717	617	700
Río Loa en Quinchamale	545	490	521	387	504	475
Embalse Conchi		505	376	413	400	436
A. cruda Salar del Carmen (Antofagasta)			299		360	340
A. cruda Cerro Topáter (Calama)					330	330
Río Loa en Lequena	278	333	322	339	317	323
Río San Pedro	306	300	277	290	308	294
Río Toconce	223	253	321	332	316	294

En la figura N° 5 se presenta gráficamente los niveles medios de dureza en las fuentes indicadas.

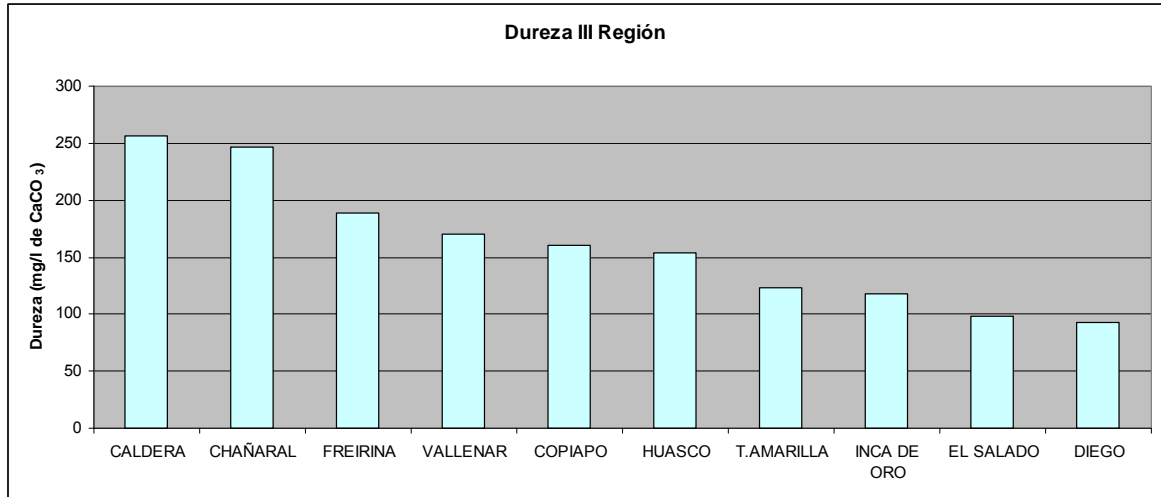
**Figura Nº 5. Dureza promedio en el período 2007-2011 en fuentes de la II Región**


En la tabla Nº 7 se presenta los niveles de dureza para las principales fuentes de la III Región, con promedios anuales desde 2012 hasta 2014, y el promedio general. Se observa que los mayores niveles corresponden al agua de Caldera y Chañaral, en tanto El Salado y Diego de Almagro presentan los niveles más bajos. Si bien los niveles de dureza son todos inferiores a 267 mg/l y en términos comparativos muy inferiores a las fuentes de la I Región y a algunas de la II, el agua correspondiente a agua muy dura de acuerdo con la clasificación propuesta por la Organización Mundial de la Salud.

**Tabla Nº 7. Dureza en las fuentes de la III Región**

Localidad/Año	2012	2013	2014	Promedio
Caldera	240	267	262	256
Chañaral	235	258		247
Freirina	156	157	253	189
Vallenar	175	172	165	171
Copiapó	148	172		160
Huasco	156	158	148	154
Tierra Amarilla	66	180		123
Inca De Oro	120	119	113	117
El Salado	101	96		99
Diego de Almagro	96	97	85	93

En la figura Nº 6 se presenta gráficamente los niveles medios de dureza en las fuentes indicadas.

**Figura N° 6. Dureza promedio en el período 2012-2014 para localidades de la III Región**


Para la IV Región ESVAL cuenta con información de dureza desde el año 2005 al 2014 y en la tabla N° 8 se presenta el promedio de todas las determinaciones hechas en el agua potable de cada localidad, ordenadas de mayor a menor. La mayor dureza corresponde a las localidades de Guanaqueros, Andacollo y Tongoy, todas próximas y en una zona geográfica homogénea, y las menores a Salamanca, Illapel y Combarbalá, todas ubicadas en la cuenca del río Choapa.

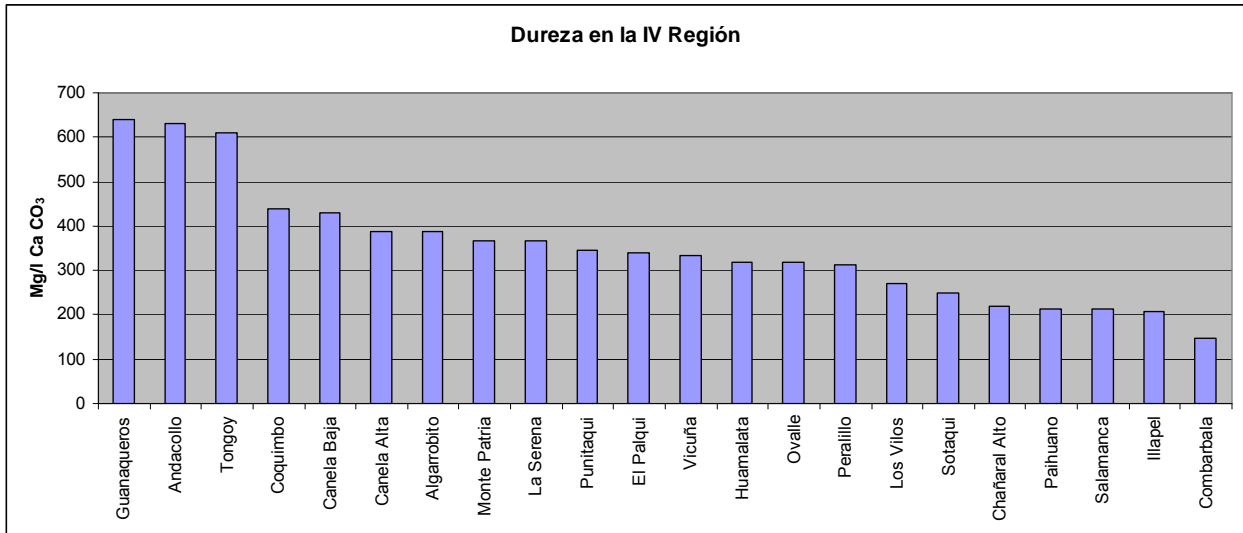
No se observa una variación temporal de la dureza en los 10 años para los que se cuenta con estadística, con excepción de una reducción en el año 2011, el que cuenta con pocos valores y algunos de ellos muy lejanos a la tendencia.

**Tabla N° 8. Dureza en localidades de la IV Región**

Localidad	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	General
Guanaqueros	567	634	660	566	676	690	724	532	570	667	639
Andacollo	655	620	660	639	631	761	608	420	569	710	632
Tongoy	590	585	649	641	654	687		488	576	592	609
Coquimbo	327	329	321	282	307	283		527	491	398	439
Canela Baja	396	408	467	419	543	444	36	580	533	459	430
Canela Alta	426	466	228	426	485	396	65	456	453	521	388
Algarrobito	340	344	337	332	334	370	341	389	539	514	387
Monte Patria	343	384	448	299	258	275		402	435		368
La Serena	296	334	304	301	282	316	376	411	432	534	366
Punitaqui	399	384	406	405	419		165	397	344		346
El Palqui	289	306	490	318	203	276		316	410		340
Vicuña	355	340	296	302	350	309		330	407	336	335
Huamalata	334	327	296	336	372	314		288	292		319
Ovalle	284	340	223	391	316	351		298	331		318
Peralillo	379	413	277	273	310	288	11	351	366	383	312
Los Vilos	203	265	237	307	379		50	347	314	375	270
Sotaquí	349	261	170	295	221	262		305	174		248
Chañaral Alto	168	225	244	246	336	142		217	306		220
Paihuano	204	278	173	172	249	180		188	241	227	215
Salamanca	204	225	207	204	188			240	214		212
Illapel	134	191	202	146	182		227	268	264		207
Combarbalá	81	198	131	99	109	119	265	138	194	111	148
Promedios	333	357	337	336	355	359	261	359	384	448	352

En la figura N° 7 se presenta gráficamente los niveles medios de dureza en las fuentes indicadas.

**Figura N° 7. Dureza promedio en el período 2005-2014 para localidades de la IV Región**



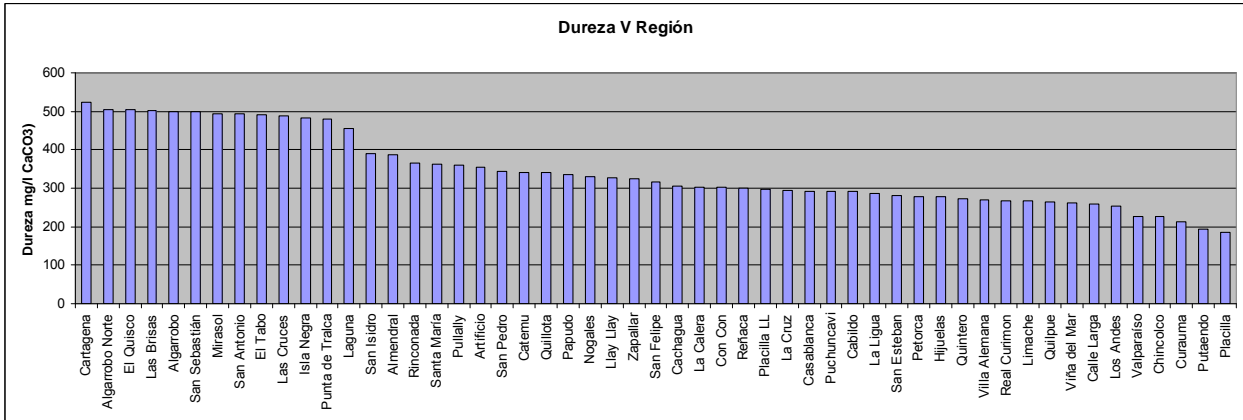
Para la V Región ESVAL también cuenta con información de dureza desde el año 2005 al 2014 y en la tabla N° 8 se presenta los promedios anuales y el promedio general de todas las determinaciones hechas en el agua potable de cada localidad, ordenadas de mayor a menor. La mayor dureza corresponde a los balnearios del litoral central, y la menor a Curauma y Placilla, cercanas al lago Peñuelas, y Putaendo, en la cuenca del río del mismo nombre. Las localidades más importantes desde el punto de vista de la población, Valparaíso y Viña del Mar, tienen dureza relativamente bajas, pero superiores a 180 mg/l de CaCO<sub>3</sub> equivalente, por lo que de acuerdo con la clasificación de la Organización Mundial de la Salud corresponden a aguas muy duras.

Se observa un incremento sostenido de la dureza desde 2005 a 2010, experimentando el año 2011 una reducción y, de ahí en adelante, un leve crecimiento.

En la figura N° 8 se presenta gráficamente los niveles medios de dureza en las fuentes indicadas, ordenadas de mayor a menor.

**Tabla Nº 9. Dureza en localidades de la V Región**

Localidad	2005	2006	2007	2.008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Promedio
Cartagena	330	396	452	366	477	691	533	512	812	620	519
El Quisco	336	392	461	366	488	702	546	559	540	632	502
Algarrobo Norte	322	393	456	412	475	685	567	542	526	642	502
Las Brisas	324	398	466	366	490	681	563	533	534	646	500
Algarrobo	334	396	455	410	490	673	549	518	528	632	498
San Sebastián	336	388	457	370	477	694	561	528	524	646	498
San Antonio	328	398	472	362	480	682	534	493	544	636	493
Mirasol	323	392	458	406	493	688	549	507	490	620	492
El Tabo	333	391	458	353	478	693	528	505	532	642	491
Las Cruces	332	391	441	357	476	695	527	511	524	626	488
Isla Negra	330	389	455	347	486	694	544	496	526	512	478
Punta de Tralca	338	394	465	319	474	692	530	538	530	406	468
Laguna	440	529	550	255	314	384	787	397	502	306	446
San Isidro	390	388	248	382	396	522	369	484	308	402	389
Almendral	282	395	356	396	378	623	379	390	314	366	388
Rinconada	402	249	238	236	455	658	452	340	322	430	378
Santa María	260	352	364	368	475	495	346	348	306	330	364
Artificio	284	351	356	340	388	484	334	364	316	346	356
San Pedro	254	251	317	364	290	574	369	364	326	406	352
Pullally	278	249	277	292	327	234	373	336	663	380	341
Catemu	250	367	218	302	483	495	323	284	312	360	339
Quillota	252	293	315	332	339	470	374	343	279	392	339
Papudo	294	252	278	346	319	436	339	413	325	314	332
Llay Llay	326	305	305	288	455	408	298	300	266	336	329
Nogales	329	340	317	340	359	305	329	340	296	322	328
Zapallar	292	252	273	298	314	430	326	398	331	324	324
San Felipe	224	238	271	296	392	427	329	360	334	360	323
Casablanca	173	164	475	186	581	269	164	246	186	618	306
Cachagua	290	246	274	266	289	389	323	375	324	258	303
La Calera	183	223	262	305	321	361	287	405	285	388	302
Placilla LL	249	226	267	286	323	416	269	304	334	332	301
Cabildo	160	220	232	246	331	786	207	328	264	228	300
Con Con	158	216	284	280	309	378	341	369	326	290	295
Reñaca	180	227	240	282	300	378	341	336	342	312	294
Puchuncavi	231	251	253	266	364	521	254	255	232	296	292
La Cruz	146	249	242	214	306	387	302	380	312	374	291
San Esteban	210	231	249	294	428	364	263	272	202	358	287
La Ligua	250	226	228	248	323	378	201	332	339	346	287
Hijuelas	220	209	214	260	355	495	209	254	304	318	284
Petorca	147	227	281	306	325	427	274	208	394	242	283
Quintero	156	228	232	223	280	332	281	370	283	318	270
Villa Alemana	184	221	212	286	300	347	250	302	281	294	268
Limache	187	223	244	231	284	333	242	316	255	352	267
Real Curimon	175	200	232	231	279	326	384	253	236	346	266
Quilpue	184	218	235	266	312	338	264	290	247	258	261
Calle Larga	175	208	210	230	329	321	247	281	233	370	260
Viña del Mar	181	216	209	272	279	359	252	277	269	268	258
Los Andes	175	200	237	224	266	274	338	261	224	338	254
Chincolco	123	133	152	196	252	389	201	364	276	266	235
Valparaíso	42	46	225	172	286	353	262	258	269	300	221
Curauma	38	42	157	225	279	182	232	286	273	440	215
Putendo	64	148	159	128	406	199	117	138	233	382	197
Placilla	38	43	132	88	228	188	227	287	258	410	190
Promedios	242	275	308	292	374	466	358	367	358	403	344

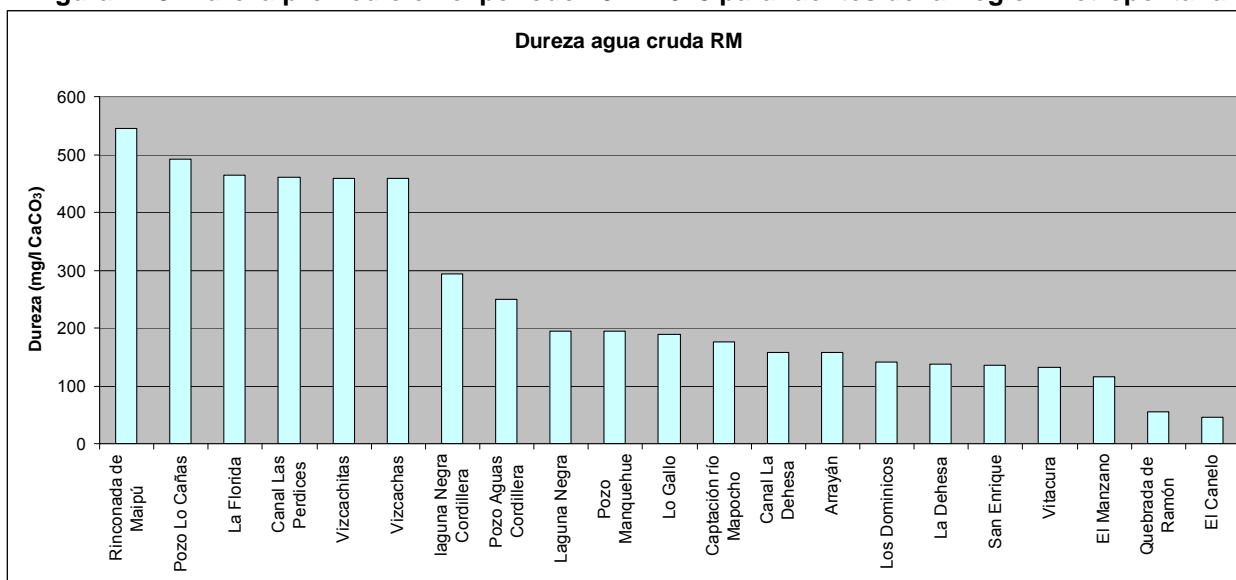
**Figura N° 8. Dureza promedio en el período 2005-2014 para localidades de la V Región**


Para la Región Metropolitana se cuenta con información de dureza proporcionada por Aguas Andinas desde el año 2011 al 2014 y en la tabla N° 10 se presenta el promedio anual y promedio general de todas las determinaciones hechas en el agua potable de cada localidad, ordenadas de mayor a menor. La mayor dureza corresponde a Rinconada de Maipú y luego las fuentes del río Maipo, incluyendo las plantas de tratamiento de Vizcachas y Vizcachitas, con niveles medios en el rango de los 460 a 600 mg/l de CaCO<sub>3</sub> equivalente. Las menores durezas corresponden a la Quebrada de Ramón y Estero El Canelo, con valores en torno a los 50 mg/l, que corresponde a aguas blandas, de acuerdo con la clasificación de la Organización Mundial de la Salud.

En la figura N° 9 se presenta gráficamente los niveles medios de dureza en las fuentes indicadas, ordenadas de mayor a menor.

**Tabla N° 10. Agua cruda en las fuentes de la Región Metropolitana**

Fuente	2011	2012	2013	Promedio
Rinconada de Maipú	535	531	598	545
Pozo Lo Cañas	486	498	473	492
La Florida	472	454	467	465
Canal Las Perdices	463	450	471	461
Vizcachitas	472	444	461	459
Vizcachas	462	452	461	458
Laguna Negra Cordillera	303	246	321	293
Pozo Aguas Cordillera	239	260		249
Laguna Negra	205	173	213	195
Pozo Manquehue	182	207		195
Lo Gallo	171	217	178	189
Captación río Mapocho	179	184	167	176
Canal La Dehesa	155	174	146	159
Arrayán	152	168	155	158
Los Dominicos	151	143	128	141
La Dehesa	127	149	140	138
San Enrique	142	150	115	137
Vitacura	138	139	124	132
El Manzano	91	182	101	116
Quebrada de Ramón	54	58	51	55
El Canelo	37	45	59	46
Promedio	248	254	254	250

**Figura N° 9. Dureza promedio en el período 2011-2013 para fuentes de la Región Metropolitana**


### 3.- Problemas de dureza en los servicios de agua potable en Chile

La Superintendencia de Servicios Sanitarios posee estadísticas de reclamos hechos a lo largo del país por los consumidores en relación a la calidad del servicio de abastecimiento de agua potable. Estos reclamos incluyen diversos aspectos de la calidad del servicio, pero en este informe se considera sólo aquellos relacionados con la calidad del agua, especialmente aquellos que pueden ser percibidos a simple vista o en forma indirecta por los consumidores, tales como color extraño, exceso de cloro, olor extraño, otro problema, sabor extraño, sarro y dureza y turbiedad.

Los reclamos por sarro y dureza no necesariamente corresponden al mismo efecto, ya que algunos usuarios atribuyen algún tipo de sarro a la dureza, aunque tenga una causa diferente.

En las tablas números 11 a 30 se presenta la cantidad de reclamos asociados a la calidad del agua para las diferentes empresas de cada Región, generados entre enero de 2011 y septiembre de 2013. En la tabla N° 31 se presenta la cantidad de reclamos por problema específico y por Región y en la tabla N° 32 la cantidad de reclamos por cada millón de habitantes, para mostrar la frecuencia relativa de reclamos de cada tipo.

**Tabla N° 11. Reclamos en la Primera Región: AGUAS DEL ALTIPLANO S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Alto Hospicio		4		19			40	63
Arica		3		22			44	69
Huara							2	2
Iquique		2		17			40	59
La Huayca							1	1
Matilla				2			3	5
Pica				2			1	3
Pozo Almonte		1		1			10	12
<b>Total</b>		<b>10</b>		<b>63</b>			<b>141</b>	<b>214</b>

**Tabla N° 12. Reclamos en la Segunda Región: AGUAS ANTOFAGASTA S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Antofagasta	41	13	26	6	29		44	159
Calama	21	3	4	5	2	4	27	66
Mejillones	5			5			11	21
Tal Tal	3	1		1	2	1	6	14
Tocopilla	7		3	2	3	1	8	24
<b>Total</b>	<b>77</b>	<b>17</b>	<b>33</b>	<b>19</b>	<b>36</b>	<b>6</b>	<b>96</b>	<b>284</b>

**Tabla N° 13. Reclamos en la Tercera Región: AGUAS CHAÑAR S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Caldera	14		1	2		2	13	32
Chañaral	2	2		1			1	6
Copiapó	36	5	6	10	9	6	33	105
Diego de Almagro	1						3	4
El Salado	2						1	3
Freirina	1			1	1		2	5
Huasco	8						1	9
Inca de Oro							1	1
Tierra Amarilla	6		1	1			3	11
Vallenar	7	2			1	1	4	15
<b>Total</b>	<b>77</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>62</b>	<b>191</b>

**Tabla Nº 14. Reclamos en la Cuarta Región: AGUAS DEL VALLE S. A.**

Empresa/Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Andacollo	2					1	7	10
Canela Baja		1			1			2
Chañaral Alto			1				2	3
Combarbalá		1		1			2	4
Coquimbo	33	10	15	20	24	23	38	163
El Palqui	1						1	2
Guanaqueros	1				1		2	4
Huamalata	1							1
Illapel	6	1	3		5		9	24
La Serena	32	6	12	7	20	13	32	122
Los Vilos	3	8	2	3	6	2	5	29
Monte Patria	1						2	3
Ovalle	30	5	6	6	6	4	35	92
Peralillo de Vicuña	1						1	2
Punitaqui	4	2	3	1	4		6	20
Salamanca	2				2		4	8
Sotaquí	4		1				3	8
Tongoy	3				1	2	3	9
Vicuña				1	1		2	4
<b>Total</b>	<b>124</b>	<b>34</b>	<b>43</b>	<b>39</b>	<b>71</b>	<b>45</b>	<b>154</b>	<b>510</b>

**Tabla Nº 15. Reclamos en la Quinta región: ESVAL S.A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Algarrobo	10	1	4	1	3	1	11	31
Almendral						1	3	4
Artificio	2					1	2	5
Cabildo	5			2	2	1	2	12
Cachagua	5		2		6	1	9	23
Calle Larga	11		3	3	1		13	31
Cartagena	6	1	2	4	8	1	9	31
Casablanca	2	2	1		4	1		10
Catemu	1				1			2
Chincolco	1				1			2
Concón	26	1	8	14	19	4	28	100
Curauma	23		5	3	10	2	27	70
El Quisco	9	3	2	2	11	1	19	47
El Tabo	4	1	1	2	2		3	13
Hijuelas	4		1	1	2		3	11
Isla Negra	1					1	5	7
La Calera	7	1	1	2	4		12	27
La Cruz	5	1	2		1		6	15
La Laguna	2		3		2		5	12
La Ligua	14		4		2		14	34
Las Cruces	4		1	2	1		7	15
Limache	12	3	4	1	2		20	42
Llay Llay			1		2	1	2	6
Los Andes	26	2	6	3	14	3	39	93
Nogales	6		1		1		4	12
Papudo	4	1	3	3	4	2	3	20
Petorca	1		2	1			1	5
Placilla de La Ligua	2	1		1			6	10
Placilla de Peñuelas	16		7	5	7		18	53
Puchuncaví	5	1	1	2	5		6	20
Punta de Tralca					3		4	7
Putendo	3			4	1		6	14

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Quillota	28		3	3	12	2	35	83
Quilpue	27	2	9	5	24	2	33	102
Quintero	18	1	16	6	11		24	76
Real Curimón	6		1	2	3	1	11	24
Reñaca	24	2	9	4	14	1	26	80
Rinconada	7				2	1	3	13
San Antonio	26	3	7	7	11	4	32	90
San Esteban	2	1			1		2	6
San Felipe	6	1	4		9	10	24	54
San Pedro				1				1
San Sebastián	2	1	1	1	2		3	10
Santa María					1		5	6
Valparaíso	31	1	10	9	20	2	33	106
Villa Alemana	25	2	7	5	13		31	83
Viña del Mar	33	4	21	23	27	7	35	150
Zapallar	3		5	2	6		12	28
San Isidro S. A.		1		1		1	7	10
Labranza		1		1		1	7	10
<b>Total</b>	<b>455</b>	<b>37</b>	<b>158</b>	<b>124</b>	<b>275</b>	<b>51</b>	<b>596</b>	<b>1.696</b>

**Tabla N° 16. Reclamos en la Quinta Región: Varias empresas**

Empresa	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Coopagua (Rocas de Santo Domingo)	1	1	12				3	17

**Tabla N° 17. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS ANDINAS S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Buín – Paine – Linderos – Maipo – Alto Jahuel	15	9			8		37	69
Calera de Tango	4	2			4		19	29
Curacaví		1			1		8	10
El Monte – El Paico	3	2					11	16
Gran Santiago	45	45	42		45		45	222
Isla de Maipo		3			1		5	9
La Rinconada	17	8	2		9		20	56
Las Vertientes – El Canelo – La Obra	8	3	1		4		15	31
Malloco-Peñaflor	9	5	4		9		28	55
Melipilla	2	12	7		4		35	60
Padre Hurtado	3	1	1		3		13	21
Pirque	2						5	7
Pomaire		1			1		1	3
San José de Maipo	5	2					14	21
Talagante	9	7	1		5		26	48
Til Til	2	1	1				4	8
<b>Total</b>	<b>124</b>	<b>102</b>	<b>59</b>		<b>94</b>		<b>286</b>	<b>665</b>

**Tabla N° 18. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS CORDILLERA S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Aguas Cordillera	39	30	26		36		45	176
Villa los Dominicos	9		5		4		28	46
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>30</b>	<b>31</b>		<b>40</b>		<b>73</b>	<b>222</b>

**Tabla Nº 19. Reclamos en la Región Metropolitana: AGUAS MANQUEHUE S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Chicureo	2	7	3		3		8	23
El Chamisero		3	1		5		1	10
Los Trapenses	3	3			1		19	26
Santa María de Manquehue	7				5		19	31
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>4</b>		<b>14</b>		<b>47</b>	<b>90</b>

**Tabla Nº 20. Reclamos en la Región Metropolitana: SMAPA**

Empresa/Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Las Lomas de Maipú						1		1
Los Bosquinos				1		2		3
Maipú	6	15	2	28	3	34	12	100
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>29</b>	<b>3</b>	<b>37</b>	<b>12</b>	<b>104</b>

**Tabla Nº 21. Reclamos en la Región Metropolitana: Varias empresas**

Empresa	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Aguas Santiago Poniente	1	2		3	2	13	5	26
Cossbo					1		3	4
Sembcorp Aguas Chacabuco S.A.								
Ayres de Chicureo	1					1	1	3
Colina-Esmeralda	14	7	1	1	5	9	23	60
Sembcorp Aguas Lampa.	3	7	1		4	2	13	30
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>48</b>	<b>74</b>	<b>212</b>

**Tabla Nº 22. Reclamos en la Sexta Región: ESSBIO S. A.**

Empresa/Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Chepica			1		2		3	6
Chimbarongo	3	3			1		4	11
Codegua	2	1	1		1	1	3	9
Coinco	1							1
Coltauco	11	1	2		1	2	23	40
Coya	2		3		1		6	12
Doñihue		2					5	7
Graneros	3	1	1		3	2	10	20
La Punta	2					1	2	5
Las Cabras	3				1	2		6
Lo Miranda	1	3				1	3	8
Lolol		2						2
Machalí	23	7	7		6	5	41	89
Malloa							1	1
Nancagua		1					5	6
Navidad							2	2
Olivar Alto		1			1			2
Palmilla					2		3	5
Pelequén					1		1	2
Peralillo							3	3
Peumo		2	1			1	4	8
Pichidegua		2					8	10
Pichilemu	9	2	2		3	1	12	29
Pinto		1						1

Placilla							
Población	1					2	3
Puente Negro		1	1		1	1	4
Quinta de Tilcoco						1	1
Rancagua	41	26	15		22	35	184
Rengo	4	4	4		4	15	31
Requinoa			1			1	2
Rosario		1				2	5
San Carlos	3				5	4	12
San Fernando	8	5	2		9	1	49
San Francisco de Mostazal	2		2			3	11
San Rosendo	2	3				1	6
S. Vicente de T. Tagua	8	3	1		3	14	29
Santa Cruz	2	1			1	1	11
<b>Total</b>	<b>131</b>	<b>73</b>	<b>44</b>	<b>0</b>	<b>68</b>	<b>58</b>	<b>633</b>

**Tabla Nº 23. Reclamos en la Séptima Región: AGUAS NUEVO SUR MAULE S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Cauquenes	3	1	3		5	3	2	17
Chanco		1	1				3	5
Constitución	8	4	2		6	3	19	42
Curanipe		1					3	4
Curepto			1				1	2
Curico	16	11	3		10	1	16	57
Empedrado		1					1	2
Hualañé						1		1
Iloca	1		1		3		2	7
Licantén	8				2		15	25
Linares	12	3	3		8	3	22	51
Longaví						1	2	3
Lontué	1	3			2		5	11
Los Queñes	1							1
Molina	6	2	2				7	17
Parral	1	1			1	11	22	36
Pelarco	2							2
Pelluhue						2	4	6
Putu		1					2	3
Rauco		1			1		1	3
Retiro							3	3
Romeral			1				1	2
San Clemente	2	2			3	1	4	12
San Javier	4	1			1		6	12
San Rafael		1					1	2
Talca	24	10	7		12	8	40	101
Teno	1	1	1		1		3	7
Villa Alegre	2				2		4	8
Yerbas Buenas							2	2
<b>Total</b>	<b>92</b>	<b>45</b>	<b>25</b>		<b>57</b>	<b>34</b>	<b>191</b>	<b>444</b>

Tabla N° 24. Reclamos en la Octava Región: ESSBIO S. A.

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Arauco	20	13	6		3	7	39	88
Bulnes	13	4	1		1	3	25	47
Cabrero	2		3				4	9
Cañete	7	1			3	1	17	29
Carampangue			2		2			4
Chiguayante	12	10	3		12	4	25	66
Chillan	20	10	21		22	9	36	118
Cobquecura	1						4	5
Coelemu	1	3			2	2	3	11
Coihueco		1					1	2
Concepcion	31	23	13		22	10	45	144
Contulmo					1		1	2
Coronel	34	12	7		7	30	44	134
Curanilahue	3	2	3				7	15
Dichato	2						8	10
El Carmen					1		1	2
Florida	3				1	1	2	7
Hualqui	10	8			3	2	27	50
Huepil	1		1			1		3
Laja	15	3	4		2	11	38	73
Lebu	7				3		32	42
Lomas Coloradas	2	2	1				7	12
Los Alamos		2	1				3	6
Los Ángeles	13	6	5		8	4	26	62
Lota	9	2	2		9	2	14	38
Monte Águila	7		1		1		9	18
Mulché	3	2	1		1	2	13	22
Nacimiento	1	7					4	12
Negrete			1					1
Ninhue								
Ñipas	5				1		12	18
Pemuco	1						3	4
Penco – Lirquén	6	8	6		9	1	13	43
Punta de Parra	2		1		3		1	7
Quilaco		1						1
Quilleco								
Quillón	3	2			1	3	9	18
Quirihue	1		2			1	4	8
Rafael	1				1		4	6
Ramadillas							1	1
San Ignacio								
San Pedro de la Paz	11	11	4		8	3	27	64
Santa Bárbara	1	1				2	4	8
Santa Clara	1				1			2
Santa Juana					2	1	8	11
Talcahuano	36	28	22		18	15	44	163
Tomé	9	5	3		8	2	18	45
Tucapel	8					2	17	27
Yumbel	13					3	29	45
Yungay							5	5
<b>Total</b>	<b>315</b>	<b>167</b>	<b>114</b>	<b>0</b>	<b>156</b>	<b>122</b>	<b>634</b>	<b>1508</b>

**Tabla Nº 25. Reclamos en la Octava Región: AGUAS SAN PEDRO S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Alerce Sur		1					1	2
Estación Buin		3		7	1	6	3	20
Parque Industrial Coronel	7	18	16	28	9	6	24	108
San Luis Brisas Norte						1		1
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>35</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>131</b>

**Tabla Nº 26. Reclamos en la Novena Región: AGUAS ARAUCANIA S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Angol				17			18	35
Cajón		2					2	4
Capitán Pastene				1				1
Carahue		1		5			17	23
Cherquenco		1						1
Chol Chol							3	3
Collipulli		1		2			13	16
Curacautín		1					6	7
Ercilla							6	6
Freire		1		1				2
Galvarino				2			2	4
Lautaro		4		2			4	10
Lican-Ray							2	2
Loncoche		1		4			6	11
Los Sauces				1			1	2
Lumaco				1			4	5
Mininco							1	1
Nueva Imperial		1		3			6	10
Nueva Toltén							1	1
Padre Las Casas		1		5			14	20
Pitrufquén		1		3			2	6
Pucón		2		1			5	8
Puerto Saavedra				1			2	3
Purén				3				3
Quitratué							2	2
Renaico				5			12	17
Temuco		26		25			41	92
Traiguén		3		3			8	14
Victoria		1		2			14	17
Vilcún				1			2	3
Villarrica		4		10			22	36
<b>Total</b>		<b>51</b>		<b>98</b>			<b>216</b>	<b>365</b>

**Tabla Nº 27. Reclamos en la Décima Región: ESSAL S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Achao	7						9	16
Alerce	4	6	3	1	1		8	23
Ancud	19	2	5	2	1	1	21	51
Calbuco	28	4	1	1	1		22	57
Castro	22	4	5		1		22	54
Chaitén	4	1				1	4	10
Chinquihue	10	1					5	16
Chonchi	4		1				2	7
Corral					1		3	4
Corte Alto							1	1
Dalcahue	1	1		2			1	5
Fresia		1						1
Frutillar	2			1			2	5
Futaleufú	1							1
Futrono			1	1			2	4
La Unión	4	3	2		3		7	19
Lago Ranco	1		1	1				3
Lanco	1			1	1		1	4
Llanquihue	2	1	1	2			3	9
Los Lagos	5	1	1			1	2	10
Los Muermos		2			2			4
Máfil	10	1		1			10	22
Mauilín	1		1				1	3
Osorno	39	4	13	4	10	3	36	109
Paillaco	6		2	2			9	19
Panguipulli	3	1	1	1			1	7
Puerto Montt	45	22	20	7	35	3	42	174
Puerto Varas	10		4		6	1	6	27
Purranque	13	3	1	2	1		8	28
Quellón	16	4	3	3			11	37
Río Bueno	7	3		1	1		5	17
Río Negro	1	3			3			7
San José de la Mariquina	2					1	2	5
San Pablo	3						3	6
<b>Total</b>	<b>271</b>	<b>68</b>	<b>66</b>	<b>33</b>	<b>67</b>	<b>11</b>	<b>249</b>	<b>765</b>

**Tabla Nº 28. Reclamos en la Décima región: Aguas Décima S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Valdivia	10	11	8	5	11	3	45	93

**Tabla Nº 29. Reclamos en la Undécima Región: AGUAS PATAGONIA DE AYSÉN S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Chile Chico				2			2	4
Coyhaique	21		3	20	4		25	73
Puerto Aysén	3			8	2	1	3	17
Puerto Chacabuco				1			2	3
Puerto Cisnes	1			1	2		1	5
Puerto Ibáñez				1				1
<b>Total</b>	<b>25</b>		<b>3</b>	<b>33</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>33</b>	<b>103</b>

**Tabla N° 30. Reclamos en la Duodécima Región: AGUAS MAGALLANES S. A.**

Localidad	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
Porvenir				2			17	19
Puerto Natales		7		11			16	34
Punta Arenas		13		35			45	93
Total		20		48			78	146

**Tabla N° 31. Resumen de reclamos por Región**

Región	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
I+XV	0	10	0	63	0	0	141	214
II	77	17	33	19	36	6	96	284
III	77	9	8	15	11	9	62	191
IV	124	34	43	39	71	45	154	510
V	456	39	170	125	275	52	606	1.723
RM	209	176	98	33	163	62	463	1.204
VI	131	73	44	0	68	58	259	633
VII	92	45	25	0	57	34	191	444
VIII	322	189	130	35	166	135	662	1.639
IX	0	51	0	98	0	0	216	365
X+XIV	281	79	74	38	78	14	294	858
XI	25	0	3	33	8	1	33	103
XII	0	20	0	48	0	0	78	146
Total	1.794	742	628	546	933	416	3.255	8.314
%	21,6	8,9	7,6	6,6	11,2	5,0	39,2	100,0

Se observa que de todos los reclamos relacionados con la calidad del agua, a nivel nacional, aquellos relacionados con sarro y dureza del agua representan sólo el 5%. La mayor proporción de reclamos está asociada a la turbiedad, siguiéndole en importancia color extraño, sabor extraño, exceso de cloro y olor extraño. Las mayores cantidades de reclamos por sarro y dureza por Región se presentan en la VIII, siguiéndole en cantidad la Región Metropolitana, VI, V y IV, la X más XIV (Región de los Lagos más Región de los Ríos, cuya suma corresponde a la antigua X), II y XI. Tanto la I+XV Regiones (Región de Tarapacá más Región de Parinacota, cuya suma corresponde a la antigua I) como la XII Región no registran reclamos sobre dureza en el período considerado.

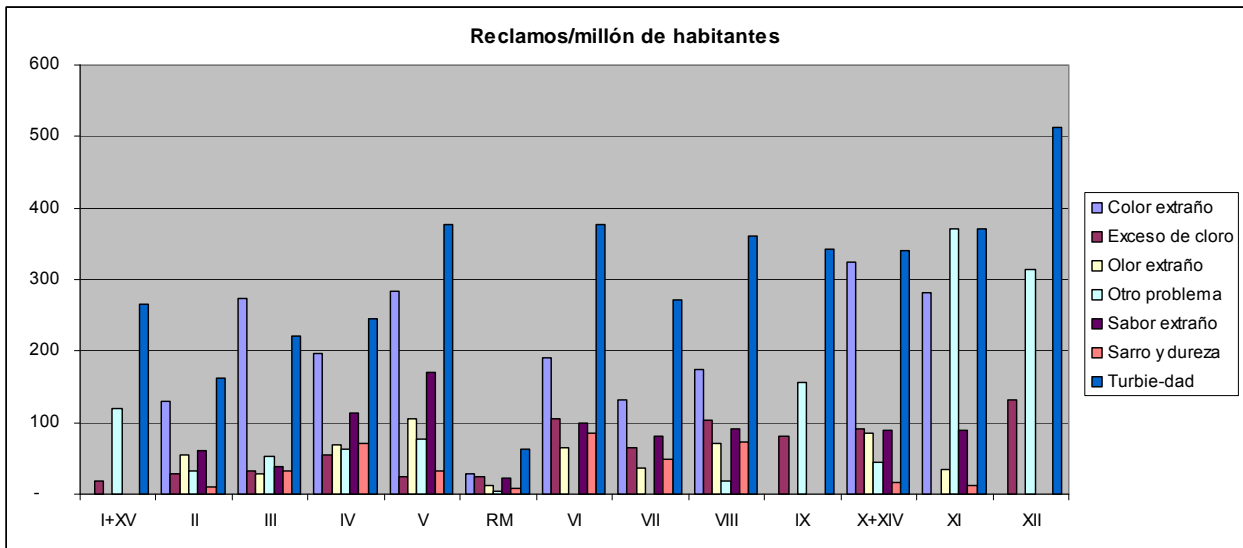
En la tabla N° 32 y en la figura N° 10 se presentan los reclamos por millón de habitantes, para tener una base común y evitar que las regiones con más habitantes tengan una ponderación mayor, observándose que las regiones con mayor cantidad de reclamos relativos a la población son la VI y VIII, siguiéndoles la IV, III, V, X+XV, XI, II y Región Metropolitana.

Si se compara la cantidad de reclamos por dureza en cada región con los niveles de dureza medidos a nivel comunal, como se observa en las figuras números 11 y 12, se observa que existe una buena correspondencia en las regiones II, III, IV y V. En la Región Metropolitana y en la I + XV la cantidad de reclamos es proporcionalmente muy inferior a la dureza medida (no hay reclamos en la I+XV) y en la regiones de la VI al sur aparecen desproporcionadamente altos los números de reclamos en relación a los niveles de dureza medidas, con excepción de las regiones IX y XII, que no presentan reclamos por este ítem.

**Tabla Nº 32. Reclamos/millón de habitantes por Región**

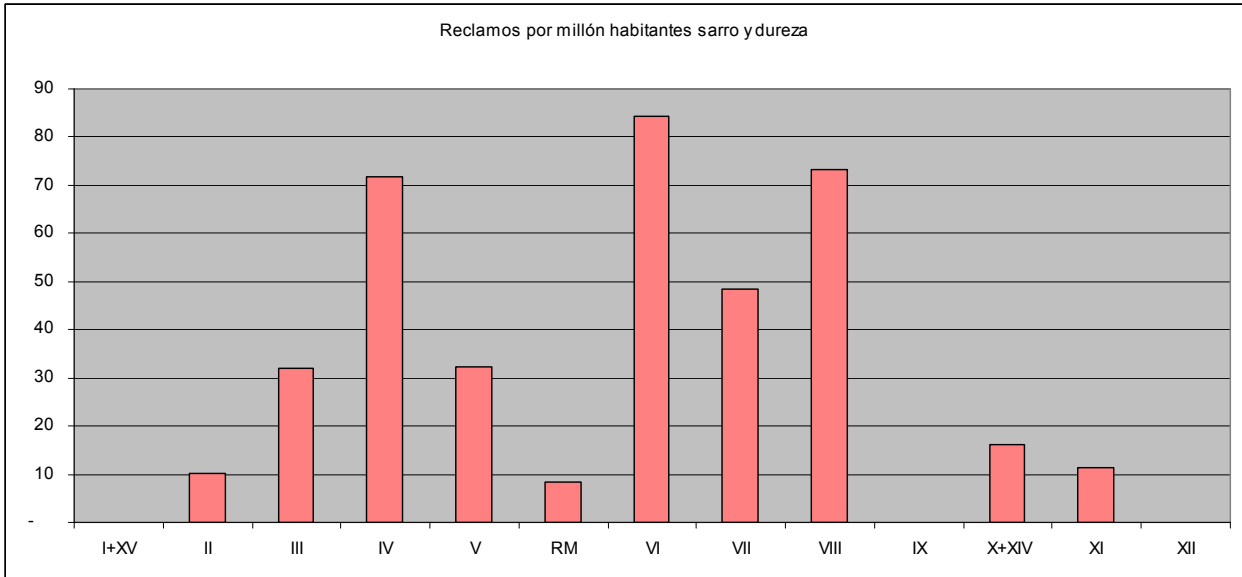
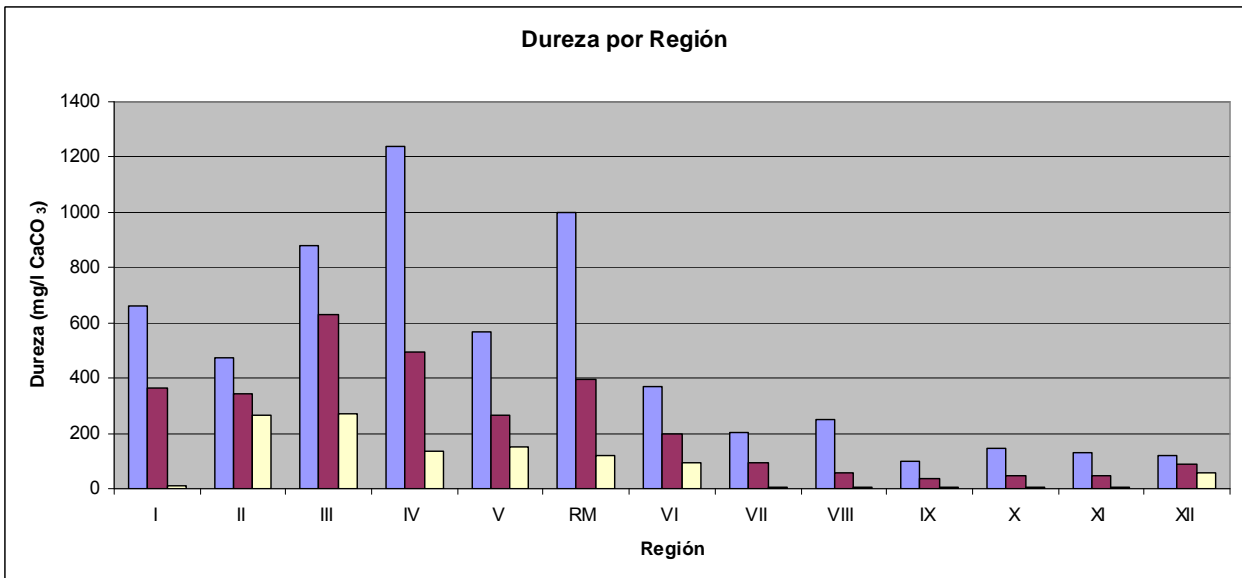
Región	Población*	Color extraño	Exceso de cloro	Olor extraño	Otro problema	Sabor extraño	Sarro y dureza	Turbiedad	Total
I+XV	531.150	-	19	-	119	-	-	265	403
II	595.199	129	29	55	32	60	10	161	477
III	280.395	275	32	29	53	39	32	221	681
IV	628.309	197	54	68	62	113	72	245	812
V	1.610.584	283	24	106	78	171	32	376	1.070
RM	7.467.689	28	24	13	4	22	8	62	161
VI	686.915	191	106	64	-	99	84	377	922
VII	703.275	131	64	36	-	81	48	272	631
VIII	1.839.369	175	103	71	19	90	73	360	891
IX	629.305	-	81	-	156	-	-	343	580
X+XIV	865.386	325	91	86	44	90	16	340	991
XI	88.880	281	-	34	371	90	11	371	1.159
XII	152.373	-	131	-	315	-	-	512	958

Población servida por Región según información SISS para 2013

**Figura Nº 10. Reclamos por millón de habitantes por Región**


Los resultados del análisis de reclamos por millón de habitantes en relación las mediciones de dureza a nivel regional indican que no existiría una relación directa entre estas dos variables. Es posible que los reclamos a nivel comunal o local o por servicio de agua (entendido como el asociado a una fuente determinada) sean más representativos de posibles problemas en la calidad del agua o del servicio que los agregados a nivel regional. Por ejemplo, en las regiones VI, VII y VIII los reclamos se concentran principalmente en las localidades de Rancagua, Parral y Coronel, con 60, 32 y 25% de los reclamos regionales, respectivamente. Cabe mencionar que en la VI Región se considera 38 localidades, 29 en la VII y 50 en la VIII.

Sería interesante contar con la información de dureza de todas las regiones, ya que las ubicadas al sur de la Región metropolitana, si bien no son importante a nivel Regional, sí pueden tener problemas importantes a nivel local.

**Figura N° 11. Reclamos por dureza por millón de habitantes por Región**

**Fig. N° 12. Valores máximo, medio y mínimo de dureza por Región.**


#### 4.- Efectos de la dureza en la salud

Existe mucha información acerca del efecto que podría tener en la salud la presencia de dureza en el agua de bebida. Sin embargo, debido a que el típico aporte del agua al balance de calcio y magnesio está sólo en el rango 5 – 20% (OMS, 1973; Consejo Nacional de investigaciones, 1977; Neri & Johansen, 1978)<sup>9</sup>, la mayoría de los estudios no son concluyentes porque no consideran un balance diferenciado del aporte de estos elementos entre el agua y la dieta alimentaria. El aporte dietético de calcio y magnesio es sobre el 80% de la ingesta diaria total, del cual se absorbe aproximadamente el 30% de calcio y el 35% de magnesio. La biodisponibilidad de calcio y magnesio de la leche y el agua son del orden del 50% (Ong, Grandjean & Heaney, 2009).

Existen antecedentes de estudios desde la década de 1950 (Kobayashi, 1957 en Japón y Schroeder, 1960, en Estados Unidos) que han intentado relacionar la presencia de dureza en el agua de bebida con la prevalencia – morbilidad por diversas enfermedades. Entre éstas, las más estudiadas son las enfermedades cardiovasculares, principalmente las asociadas con el estrechamiento y acumulación de materias grasas en las arterias, diversas formas de litiasis, es decir, formación de cálculos principalmente renales, y un tercer grupo de enfermedades de variada naturaleza y para las cuales se ha generado menos información, en forma más dispersa y menos conclusiva (enfermedades a la piel, cáncer, etc.).

El calcio y el magnesio son minerales esenciales y beneficiosos para la salud humana en varios aspectos. La ingesta inadecuada de cualquier nutriente puede ocasionar consecuencias adversas para la salud y las ingestas diarias recomendadas de cada elemento se han establecido a nivel nacional e internacional. No obstante, los individuos varían considerablemente en sus necesidades y el consumo de estos elementos.

La ingesta inadecuada de calcio se ha asociado con mayores riesgos de osteoporosis, nefrolitiasis (cálculos renales), cáncer colorrectal, hipertensión y accidente cerebrovascular, enfermedad coronaria, resistencia a la insulina y la obesidad. La mayoría de estos trastornos tienen tratamientos, pero no son curables. Debido a la falta de evidencia acerca del rol del calcio como elemento contributivo en lo referente a estas enfermedades, se han hecho estimaciones del requisito de calcio sobre la base de los resultados de salud ósea, con el objetivo de optimizar la densidad mineral ósea.

La evidencia epidemiológica indica que el calcio disponible en la dieta reduce la incidencia de cálculos renales. En contraste, los resultados de un ensayo aleatorio amplio sugieren un mayor riesgo de cálculos renales asociados con suplementos de calcio, posiblemente porque el calcio es en este caso ingerido como un bolo y no con alimentos, o bien, porque los suplementos fueron tomados por personas que superaron el nivel de consumo recomendado de 2.500 mg/día.

Aunque la hipertensión es de origen multifactorial, la ingesta adecuada de calcio se ha asociado con un menor riesgo de hipertensión arterial en algunos estudios, aunque no en todos ellos. No ha sido identificado claramente el mecanismo que explica la participación del calcio, aunque los electrolitos probablemente desempeñan un papel importante. Se ha asociado el consumo de productos lácteos, más que el calcio *per se*, con una baja presión arterial y con un menor riesgo de accidente cerebrovascular en estudios prospectivos.

---

<sup>9</sup> Organización Mundial de la Salud. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

En un estudio publicado por la Organización Mundial de la Salud en 2005<sup>10</sup>, se presenta una revisión bibliográfica de estudios epidemiológicos que correlacionan la dureza del agua de bebida con enfermedades cardiovasculares.

Los estudios muestran poca evidencia que apoye una asociación entre la dureza del agua o la concentración de Ca en el agua de bebida y enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, la información disponible de estudios experimentales, clínicos y epidemiológicos apoya la hipótesis de que una menor ingesta de magnesio en relación a la recomendada es una condición que aumenta el riesgo de morir y posiblemente desarrollar enfermedades cardiovasculares, accidente cerebrovascular o hipertensión. Se han alcanzado conclusiones similares acerca de los beneficios del magnesio en el agua por otros estudios. Aunque algunos científicos pueden argumentar que se necesita información adicional para establecer la causalidad, la siguiente información apoya fuertemente las conclusiones alcanzadas:

- Los estudios in vitro muestran que la exposición de las células endoteliales a bajos niveles Mg causan algunos de los eventos implicados en la patogénesis de la aterosclerosis;
- Los estudios en animales muestran que una dieta baja en Mg causa la inflamación y elevados niveles de colesterol séricos, particularmente el colesterol LDL, favoreciendo así el desarrollo de la aterosclerosis y, a la inversa, que la alta ingesta de Mg protege contra los efectos ateroscleróticos del estrés oxidativo y dietas inducen hipercolesterolemia;
- En pacientes con enfermedad coronaria, el Mg en dosis farmacológicas ha demostrado reducir las lesiones endoteliales y es un útil agente anti-isquémico y antiarrítmico;
- La mayoría de los estudios de correlación muestran una alta mortalidad por enfermedades cardiovasculares y por accidentes cerebrovasculares en poblaciones con baja concentración de Mg en el agua potable y viceversa;
- Algunos estudios transversales y de cohorte muestran que las personas con niveles séricos bajos de magnesio corren un mayor riesgo de hipertensión arterial, enfermedad coronaria y accidente cerebrovascular;
- Ensayos de dietéticos muestran una dieta rica en verduras y frutas, es decir, ricos en magnesio, reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares.

Debido a que más de 3/4 de los cálculos renales están generalmente compuestos de sal de calcio, siempre se ha asociado la ingesta de calcio con este tipo de problemas, pero la evidencia científica no totalmente conclusiva en este respecto.

Algunos estudios sugieren que en el enfoque preventivo de la nefrolitiasis de calcio, la ingesta de agua blanda ha sido preferible al agua dura, ya que se asocia con un menor riesgo de recurrencia de los cálculos de calcio<sup>11</sup>.

En uno de esos estudios<sup>12</sup> se evalúa si la dureza del agua potable consumida fuera de las comidas modifica el riesgo de cálculos de calcio y los resultados sugieren que la ingesta de agua blanda entre comidas es preferible al agua dura, ya que está asociada con un menor riesgo de recurrencia de los cálculos de calcio.

<sup>10</sup> WHO, **Nutrients in Drinking Water, Capítulo 11. Drinking Water Hardness and Cardiovascular Diseases: A Review of the Epidemiological Studies, 1979-2004** (Silvano Monarca, Francesco Donato, Maria Zerbinì)

<sup>11</sup> Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water**. International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.

<sup>12</sup> Bellizzi V, De Nicola L, Minutolo R, Russo D, Cianciaruso B, Andreucci M, et al. **Effects of water hardness on urinary risk factors for kidney stones in patients with idiopathic nephrolithiasis**. *Nephron*. 1999;81:66–70.

En otro estudio realizado en la parte baja del río Chili, en Arequipa, Perú,<sup>13</sup> se concluye que la morbilidad por litiasis de riñón y uréter es mayor en lugares donde la dureza de agua de consumo es mayor. Sin embargo, en este estudio no se tomó en consideración la ingesta de calcio y magnesio por fuentes diferentes al agua.

Los resultados de varios estudios han sugerido, aunque sin llegar a demostrar la causalidad, que una variedad de otras enfermedades están también inversamente correlacionadas con la dureza del agua, incluyendo la anencefalia y varios tipos de cáncer. Sin embargo, la significancia de estos resultados es incierta y se ha sugerido que las correlaciones pueden reflejar patrones de enfermedad que pueden ser explicados más por factores sociales, climáticos y ambientales, que la dureza del agua.

En un trabajo realizado en India por Pallav Sengupta<sup>14</sup> se presentan antecedentes de varias enfermedades que podrían estar asociadas a la dureza del agua potable, entre las que se incluye el cáncer, enfermedades cerebro vasculares, malformaciones del sistema nervioso central, eczema, densidad de los huesos, salud reproductiva, salud digestiva y estreñimiento.

En varios estudios realizados en Taiwán se encuentra una asociación estadística negativa de diversos tipos de cáncer con la dureza del agua y calcio, destacando los resultados relativos a la posible asociación entre el riesgo de cáncer gástrico y los niveles de calcio y magnesio. En otros estudios se encontró una posible asociación entre el riesgo de los niveles de cáncer al colon y la dureza del agua potable de fuentes municipales en Japón (el análisis de tendencia obtenido muestra una probabilidad creciente para el cáncer a medida que disminuye la dureza en el agua potable). Tendencias epidemiológicas similares se obtuvieron por las relaciones entre los niveles de dureza en el agua potable y el riesgo de cáncer rectal y mortalidad de cáncer de páncreas; sin embargo, los investigadores no encontraron ninguna asociación con los niveles de magnesio (las probabilidades ajustadas no fueron estadísticamente significativas para la relación entre las concentraciones de magnesio en el agua potable y el cáncer rectal). Una de las más fuertes evidencias epidemiológicas del efecto protector de la ingesta de magnesio del agua potable fue la que dio para el riesgo de cáncer de esófago y cáncer de ovario.

Algunos informes indican que hay un efecto protector significativo de la ingesta de magnesio del agua potable en el riesgo de enfermedades cerebrovasculares. Los estudios epidemiológicos han demostrado que los impactos potenciales en la salud por causa del calcio ingerido desde agua dura están asociados inversamente con la presión arterial.

En un estudio realizado en 1957<sup>15</sup> se especula que las variaciones geográficas observadas en la incidencia de anencefalia (desarrollo de embriones con ausencia parcial o total del cerebro) podrían sugerir la existencia de un agente causal, como la presencia o ausencia de elementos traza en el suministro de agua. En otro estudio<sup>16</sup> se correlacionó datos sobre anencefalia para 10 áreas diferentes en el Reino Unido y encontró que la frecuencia de anencefalia estaba significativamente relacionada con las mediciones de la dureza total, contenido de calcio y pH de los suministros de agua locales. En un tercer estudio<sup>17</sup> se examinó las tasas medias de mortalidad anual para las malformaciones congénitas en las 15 regiones de hospital de Inglaterra y Gales, encontrándose que las tasas de mortalidad fueron más altas en zonas caracterizadas por agua blanda.

<sup>13</sup> Willevaldo Melitón León Hancco, **Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú.** [wleohancco@hotmail.com](mailto:wleohancco@hotmail.com)

<sup>14</sup> Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water.** International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.

<sup>15</sup> Penrose, L. S. **Genetics of anencephaly.** J. Ment. Defic. Res. 1957; 1:4–15.

<sup>16</sup> Fedrick, J. **Anencephalus and the local water supply.** Nature. 1970;227:176–7.

<sup>17</sup> Stocks P. **Incidence of congenital malformations in the regions of England and Wales.** Br J Prev Soc Med. 1970;24:67–7.

También se ha sugerido que la exposición a agua dura es un factor de riesgo que podría exacerbar el eczema, aunque son numerosos los factores ambientales que también pueden incidir en ella, como el polvo, nilón, champú, sudor, natación y lana. Se cree que la exposición a agua dura es un factor de riesgo para el eccema lo que se podría explicar porque el aumento del uso de jabón genera residuos de sales insolubles de metal o jabón que se adhieren en la piel o en la ropa de donde no son fácilmente enjuagados y que pueden producir irritación por contacto. Hay informes que muestran una relación entre la dureza agua y eczema atópica, desde 1 año hasta toda la vida, entre los niños de la enseñanza básica.<sup>18, 19</sup>

La correlación entre el calcio y magnesio en el agua potable y su impacto en la salud ósea están sin identificar, aunque hay algunas pruebas de que el agua alta en calcio es beneficiosa para los huesos.

Hay pocos informes sobre el efecto de la dureza del agua sobre la salud reproductiva de los hombres y la mayoría de ellos puso énfasis en el efecto de sus constituyentes calcio y magnesio, mostrando la ocurrencia de fallas reproductivas y muerte fetal en la India en regiones de aguas duras. Algunos de los estudios muestran el efecto del exceso de calcio en el sistema reproductivo y su influencia negativa en la fertilidad. Por el contrario, en mujeres, el sulfato de magnesio presente en el agua dura pareciera prevenir la eclampsia en pacientes con pre-eclampsia (hipertensión aguda causada por el embarazo) y la Organización Mundial de la Salud considera que el sulfato de magnesio es la droga más recomendable para la prevención de la eclampsia en pacientes que sufren de pre-eclampsia.

Por último, se ha reportado que incluso la salud gastrointestinal se beneficia del agua dura, ya que proporciona efectos que potencialmente alivian la aparición del estreñimiento en el 85% de los casos. Un agua rica en calcio y magnesio, en una combinación adecuada, ayuda a combatir el estreñimiento. El calcio en el agua dura se hace cargo del exceso de bilis y de sus grasas residentes para eliminar el jabón como sustancias insolubles, las que se emiten desde el cuerpo durante la defecación. Por su parte, la sal de magnesio tiene un conocido efecto laxante.

En el Anexo N° 2 se presenta con más detalle parte de la información disponible que relaciona la salud humanan con los niveles de dureza en el agua potable.

---

<sup>18</sup> Organización Mundial de la Salud. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

<sup>19</sup> Pallav Sengupta. Department of Physiology, Vidyasagar College for Women, University of Calcutta, Kolkata, West Bengal, India. International Journal of Preventive Medicine. **Potential Health Impacts of Hard Water.** Aug 2013; 4(8): 866–875. PMID: PMC3775162

## 5.- Otros efectos de la dureza

Además de los potenciales efectos de la dureza en la salud humana, revisados en el capítulo 4, la dureza puede tener numerosos efectos adicionales que pueden afectar a los consumidores, lo que se comentan a continuación:<sup>20</sup>

### 5.1.- Sabor

Los minerales disueltos contribuyen al sabor del agua potable en diversos grados. La aceptabilidad del agua generalmente dependerá de gusto y familiaridad de los usuarios individuales. El agua desmineralizada suele tener un sabor plano y los productores de agua desmineralizada embotellada o envasada a menudo añaden algunos minerales para el sabor. Algunas aguas minerales embotelladas tienen excepcionalmente altas concentraciones minerales y son atractivas para algunos consumidores, pero no se considerarían aceptables para la mayoría de los suministros públicos de agua. Las concentraciones de calcio y magnesio y otros elementos disueltos en el agua que son detectables por los consumidores se pueden manejar mediante el tratamiento o la mezcla con aguas potable de diferentes características.

### 5.2.- Corrosión y formación de sarro

Dependiendo de las interacciones con otros factores, como el pH y alcalinidad, el agua dura puede causar un mayor consumo de jabón y deposición de sarro en el sistema de distribución de agua, así como en aplicaciones de agua caliente, donde se forman carbonatos metálicos insolubles, recubriendo las superficies y reduciendo la eficiencia de los intercambiadores de calor. El agua excesivamente dura también puede tener una tendencia a la corrosión. El agua blanda que no se ha estabilizado tiene una gran tendencia a causar corrosión en superficies metálicas y tuberías, dando como resultado la presencia de ciertos metales pesados, tales como cadmio, cobre, plomo y zinc, en el agua potable (National Research Council, 1977). La corrosión puede estar asociada con riesgos para la salud (por efecto de lixiviados tales como plomo, cobre y otros metales) y la reducción de la vida útil de la red de distribución y equipos que utilizan agua (como por ejemplo, los calentadores de agua). Por otra parte, el agua blanda o ablandada tiene el beneficio de generar una mínima formación de sarro y permite, por lo tanto, una mayor eficiencia en la transferencia de calor en los intercambiadores y probablemente una mayor duración de los calentadores de agua.

En una publicación holandesa se afirma que una razón para ablandar el agua a nivel central es que la solubilidad del cobre sería proporcional al parámetro Carbón Inorgánico Total (TIC, por sus siglas en inglés), por lo que aguas muy duras podrían generar un mayor disolución de las tuberías de este material y, por consiguiente, aumentar su concentración en el agua potable.<sup>21</sup>

### 5.3.- Acondicionamiento del agua

Cuando se realiza acondicionamiento del agua, normalmente su objetivo es lograr equilibrio de bicarbonato y niveles convenientes de pH y alcalinidad. Otros iones, como los sulfatos, nitratos y cloruros pueden estar implicados en la corrosividad.

---

<sup>20</sup> WHO. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

<sup>21</sup> Jan Hofman, Onno Kramer, Jan Peter van der Hoek, Maarten Nederlof, Martijn Groenendijk. **Twenty years of experience with central softening in The Netherlands: Water quality – Environmental benefits – Costs.** Water Treatment, Feb. 2007.

Ya es una práctica común que el ablandamiento centralizado generalmente involucra el empleo de cal (óxido de calcio hidratado) o cal y soda (cal y carbonato de sodio). Estos productos químicos aumentan la precipitación del carbonato de calcio y magnesio, reduciendo la dureza del agua tratada. Estas aguas deben ser equilibradas de manera de minimizar la post precipitación de la cal y deben ser estabilizadas según sea necesario para controlar la corrosividad.

Existen diferencias significativas entre el agua naturalmente blanda, incluyendo el agua de lluvia o el agua blanda desionizada, y el agua que ha sido ablandada mediante intercambio catiónico, en donde los cationes divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.) han sido sustituidos por sodio. El agua ablandada mediante intercambio catiónico, aunque contiene cantidades considerables de sodio y cloruro, no es necesariamente corrosiva. Las aguas naturalmente blandas también requieren de una estabilización similar y tratamiento de reducción de la corrosión antes de su distribución.

#### 5.4.- Desalación

La desalación de agua de mar o agua salobre reduce el contenido de sólidos disueltos del agua. Los procesos de tratamiento de la desalación de agua por nanofiltración, que es bastante selectiva para la eliminación de iones divalentes, membranas de osmosis inversa o desalinización térmica eliminan el contenido mineral y aumentan su corrosividad. Estas aguas desmineralizadas son altamente agresivas y deben ser estabilizadas antes de su distribución mediante la adición de cal y alcalinidad y posiblemente quelantes, tales como el fosfato. Algunas aguas desaladas son mezclados con agua cruda de la fuente original para aumentar un poco la mineralización y reducir corrosividad<sup>22</sup>.

Las prácticas de estabilización deben garantizar que el proceso global no reduce significativamente la ingesta total de nutrientes como el calcio y el magnesio por debajo de los valores recomendados. Basado en circunstancias locales, los proveedores de agua y las autoridades de salud pública podrían desear modificar aún más la composición definitiva del agua potable a la luz de los requisitos de nutrición mineral.

#### 5.5.- Reúso del agua

La reutilización indirecta de aguas residuales consiste en la extracción de agua de fuentes que tienen aportes de descargas de aguas residuales. La reutilización indirecta planificada de aguas residuales, donde las descargas de aguas residuales están situadas cerca de puntos de extracción de agua potable, es una fuente creciente de agua potable en algunas localidades. Dicha reutilización planificada, generalmente considera el empleo de medidas de tratamiento avanzado.

El contenido total de sólidos disueltos de las aguas residuales domésticas es mayor que el del agua potable original. En algunos contextos, las aguas residuales se tratan mediante tecnologías de membrana para reducir los niveles de sólidos totales disueltos, así como para efectos de la purificación.

Si la recarga de aguas subterráneas o el almacenamiento de aguas subterráneas es parte del proceso, es posible que se requiera de estabilización adicional después del retiro del agua y antes de su distribución.

Las prácticas de tratamiento y estabilización deberían asegurar que el proceso global no reduce significativamente la ingesta total de nutrientes como calcio y magnesio por debajo de los valores recomendados. Basado en las circunstancias locales, los proveedores de agua y las autoridades de salud

---

<sup>22</sup> Cotruvo, Joseph. **Aspectos de Salud Relacionados con la Presencia de Calcio y Magnesio en el Agua Potable**. Aqualatinoamérica. Vol. 6, número 3. 2006.

pública pudieran desear modificar la composición definitiva del agua potable a la luz de los requisitos de nutrición mineral.

### **5.6.- Agua envasada**

Las aguas envasadas pueden provenir de manantiales, agua mineral o simplemente agua potable de la red antes de ser embotellada. Debido a la extrema variación en la composición mineral del agua embotellada que se comercializa, con niveles de sólidos totales disueltos desde casi cero a varios mil miligramos por litro y con una variación similar en las concentraciones de elementos esenciales, el público debe tener acceso a la información sobre la composición mineral del agua embotellada o envasada.

### **5.7.- Aguas naturalmente blandas**

El agua naturalmente blanda puede tener propiedades agresivas hacia el material de la tubería a través del cual se distribuye. Para evitar la corrosión de materiales de tuberías, normalmente el agua se acondiciona o estabiliza. Con frecuencia, esto implica aumentar la alcalinidad o incorporar sustancias inhibidoras de corrosión (por ejemplo fosfatos) en alguna forma. La elección de la tecnología de acondicionamiento más apropiada dependerá de las circunstancias locales (por ejemplo problemas de calidad de agua, materiales de tubería, corrosión). Basándose en las circunstancias locales, los proveedores de agua y las autoridades de salud pública pudieran desear modificar la composición de agua potable a la luz de los requerimientos de nutrición mineral.

### **5.8.- Agua lluvia recolectada**

La recolección de aguas lluvias se refiere a la colección a nivel comunitario local o doméstico para uso local. El agua de lluvia es blanda y generalmente ligeramente ácida. Si se distribuye a través de un sistema de cañerías, se debería aplicar las mismas consideraciones que para el agua naturalmente blanda. En algunas configuraciones se agrega piedras de cal (carbonato de calcio) a los tanques de almacenamiento de agua de lluvia para contribuir al aporte de calcio y la prevención de la corrosión.

### **5.9.- Tratamiento a nivel domiciliario**

En algunos hogares se utilizan equipos de intercambio iónico en el punto de uso para quitar dureza (calcio, magnesio) y el hierro del agua. En estos equipos cada ión bivalente (como el  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ ) en el agua es sustituido por dos iones de sodio. El ablandamiento puede tener varios efectos beneficiosos dentro del hogar, desde el punto de vista estético, tales como reducción de sarro en las tuberías y accesorios calentadores y mejorar las características del lavado, pero también aumenta el contenido de sodio del agua potable. En estos casos el consumo de calcio y magnesio en el agua potable será menor a menos que el agua de consumo no se ablande o se remineralice.

El tratamiento mediante osmosis inversa y destilación elimina prácticamente todos los minerales del agua y puede eliminar varios tipos de potenciales contaminantes que pueden estar presentes a nivel traza en el agua cruda, así como quitar nutrientes minerales. Si bien el agua tratada de esta manera no necesita acondicionamiento si se utilizan materiales inoxidables después del tratamiento, el agua potable resultante estará desprovista de minerales. Así, el uso de estos dispositivos puede resultar en la reducción de la ingesta total de nutrientes minerales por los consumidores.

Los usuarios de estos dispositivos deben tomar conciencia de los cambios en la composición mineral que se presentan y las posibles consecuencias para la ingesta total de nutrientes. Por ejemplo, se puede

promover que los vendedores o instaladores de estos dispositivos llamen la atención a los usuarios de estos dispositivos sobre la posibilidad de ingesta reducida de minerales.

Un enfoque para asegurar que el agua utilizada para beber y cocinar no es desmineralizada consiste en ablandar solamente la línea de agua caliente lo que proporciona varios beneficios y también reduce los costos. Además, los fabricantes de estos ablandadores de agua pueden proporcionar un bypass de una porción de agua para mantener un cierto nivel de estos minerales en el agua que se consume en la práctica (por ejemplo a un grifo de cocina) o desarrollar y agregar una unidad remineralizante apropiada en la línea de agua antes del punto de consumo.

### **5.10.- Conclusiones**

Las aguas naturales y tratadas tienen una amplia gama de contenido mineral, desde niveles muy bajos en las aguas lluvias y naturalmente blandas, a niveles moderados y muy altos en aguas naturalmente duras y aguas con alto contenido de sólidos disueltos totales. Las aguas embotelladas y envasadas pueden ser naturalmente mineralizadas, naturalmente blandas o desmineralizadas. Por lo tanto, el agua potable que se consume y la que se usa para cocinar pueden variar ampliamente, dependiendo de la fuente de agua, tratamiento y ubicación.

El grado de dureza del agua potable es importante para la aceptabilidad del punto de vista estético por parte del consumidor y para las consideraciones económicas y operativas. Muchas aguas duras se ablandan por esas razones usando varias tecnologías aplicables, lo que afectará significativamente su composición mineral. La elección de la tecnología de acondicionamiento más apropiada dependerá de las circunstancias locales (por ejemplo problemas de calidad de agua, materiales de tubería, corrosión). Es posible ablandar el agua en una planta de tratamiento central y también en casas individuales. La modificación de las concentraciones de calcio y magnesio en el agua potable por razones de salud debe cumplir con los requisitos técnicos para proporcionar agua apta para su distribución y no debe afectar la desinfección. Basado en las circunstancias locales y deficiencias de nutrientes, los proveedores de agua y las autoridades de salud pública pudieran desear modificar la composición de agua potable de acuerdo a los requisitos de la nutrición mineral.

Los consumidores deben ser informados de la composición mineral de su agua, ya sea si ésta es modificada o no. El aporte de minerales del agua potable para nutrición mineral debe considerarse cuando se proponen cambios en el suministro o cuando se procesa y explota fuentes de agua potable menos tradicionales, como el agua reciclada, agua de mar o agua salobre. Muchas de las técnicas de tratamiento que se usan en estos casos requieren que el agua sea estabilizada antes de su distribución, y la adición de cal es un método común y de bajo costo.

El agua potable puede contribuir en la dieta de calcio y magnesio y podría ser importante para aquellas personas cuya ingesta de calcio y magnesio por otras fuentes es deficiente. Donde las fuentes de agua potable se suplementan con o son reemplazadas por agua desmineralizada que requiere acondicionamiento, se debería considerar la adición de sales de calcio y magnesio para lograr concentraciones similares a las que la población recibió de la fuente original. Si bien el ablandamiento con cal es una práctica común, la adición de calcio y a veces magnesio, es también una práctica común por razones técnicas y porque puede ser beneficioso para la ingesta. El agua naturalmente blanda también requiere muchas veces la estabilización para el control de la corrosión y también se debería considerar tratamientos similares de mineralización.

Aunque existe cierta evidencia de estudios epidemiológicos relativos al efecto protector del magnesio o dureza sobre la mortalidad cardiovascular, la evidencia está siendo debatida y no permite probar causalidad. Se están realizando estudios adicionales. No hay datos suficientes para sugerir

concentraciones mínimas o máximas de minerales en este momento y, por ello, la Organización Mundial de la Salud no ha propuesto valores guías.

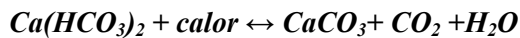
## 6.- Tecnologías de remoción de la dureza

Existen numerosas tecnologías para remover la dureza del agua, la mayoría basada en procesos físicos y físico-químicos. El proceso más comúnmente utilizado en Chile es la remoción por intercambio iónico, aplicado por la mayoría de las industrias que cuentan con calderas en sus procesos productivos para reducir la acumulación de sarro e incrustaciones en éstas. También se usa en muy pequeña escala en las máquinas lavadoras de vajilla, en que se reduce la dureza para evitar que las gotas de agua generen manchas en la loza.

A continuación se presenta una descripción de las principales tecnologías aplicables a la remoción de la dureza.

### 6.1.- Calentamiento del agua

El calentamiento del agua reduce la solubilidad del anhídrido carbónico (o dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ) reduciendo su concentración por pérdida hacia la atmósfera o acumulación en forma de burbujas. Esto causa que los bicarbonatos de Ca y Mg presentes en el agua precipiten en forma de carbonatos dejando el agua con una dureza reducida. Esta precipitación es uno de los efectos más conocidos de la dureza, que causa daño principalmente en sistemas de agua caliente, y a la vez, constituye una posible alternativa tecnológica para remover la dureza. Las ecuaciones involucradas en esta reacción son las siguientes:

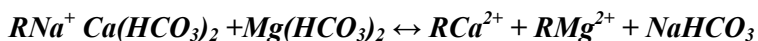


A pequeña escala es muy fácil hervir el agua, dejarla decantar y, de esta manera, eliminar parte de su dureza. Sin embargo, a una mayor escala los altos costos de la energía más los costos adicionales asociados a la remoción de la dureza precipitada, hacen que esta tecnología no sea de frecuente aplicación. Además, la precipitación térmica de la dureza sólo permite remover la denominada dureza temporal asociada a los bicarbonatos, pero no la permanente, principalmente asociada a los sulfatos.

### 6.2.- Intercambio iónico

El intercambio iónico es la tecnología de ablandamiento del agua más utilizada en Chile a pequeña escala, especialmente a nivel industrial, donde se utiliza para reducir la acumulación de incrustaciones en sistemas de vapor o calentamiento de agua.

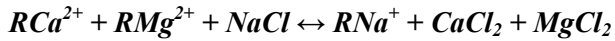
Esta tecnología se basa en el uso de resinas sintéticas de intercambio catiónico donde se produce el intercambio de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  con iones de sodio,  $\text{Na}^+$ , de modo que se genera bicarbonato de sodio, mientras los iones calcio y magnesio quedan retenidos en la resina. En la ecuación siguiente se representa esquemáticamente la reacción de intercambio iónico.



Es importante notar que este proceso, si bien elimina la dureza, sólo reemplaza los bicarbonatos de calcio y magnesio por bicarbonato de sodio, es decir, no reduce el contenido salino, sino se incrementa levemente (se reemplaza cada átomo de calcio o magnesio intercambiado, con pesos atómicos de 40,08 y 24,305, respectivamente, por 2 átomos de sodio con peso atómico 23 cada uno). En el caso del agua

potable, su ablandamiento por esta tecnología generaría una concentración molar de sodio equivalente al doble de la concentración molar de calcio más magnesio, con lo cual se podría fácilmente alcanzar el nivel máximo recomendado por la OMS para sodio, por condiciones organolépticas, de 200 mg/l<sup>23</sup>.

A medida que se usa la resina va perdiendo los iones de sodio y se va saturando con los iones de calcio y magnesio, hasta el punto en que se torna ineficiente, momento en que se debe regenerar la resina. Esto se hace comúnmente aplicando a la resina una solución concentrada de cloruro de sodio, que revierte el proceso y devuelve el calcio y magnesio en forma de cloruros, como se indica en la reacción siguiente:

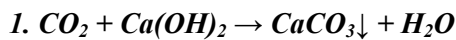


El proceso de regeneración de las resina de intercambio genera todo el calcio y magnesio retenido en forma de cloruros y, además, descarga cantidades importantes del cloruro de sodio no asimilados en el proceso.

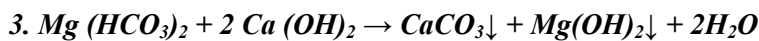
### 6.3.- Precipitación con cal

La precipitación de la dureza con cal es quizás el método más simple y económico aplicable a mayor escala que la usada para el intercambio iónico. Consiste en aplicar una dosis de cal al agua con lo cual los bicarbonatos de calcio y magnesio se transforman en carbonatos insolubles, los que precipitan y pueden ser removidos por sedimentación con la ayuda de coagulantes.

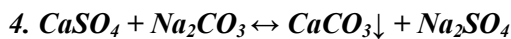
La cal reacciona con el dióxido de carbono formando carbonato de calcio insoluble, el que precipita., de acuerdo a la siguiente reacción:



La remoción del CO<sub>2</sub> produce un aumento de pH y predispone al bicarbonato de calcio y magnesio para pasar a carbonatos insolubles. Por otra parte, la propia cal reacciona con los bicarbonatos de calcio y magnesio de acuerdo con la reacción siguiente:



La dureza permanente ejercida por los sulfatos de calcio, cloruros, etc., se puede remover mediante la adición de carbonato de sodio, el que reacciona con las sales de la dureza formando compuestos insolubles:

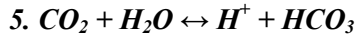


Las reacciones anteriores requieren que el pH sea alto, ya que la solubilidad del carbonato de calcio a 25° C es de 970 mg/l a pH 7 y de 0,4 mg/l a pH 11<sup>24</sup>, por lo que el efluente de este proceso tiene un pH entre 10 y 11. Por esta razón, una vez removido el carbonato de calcio, generalmente por sedimentación

<sup>23</sup> WHO. **Guidelines for Drinking-water Quality** FOURTH EDITION, 2011.

<sup>24</sup> Omar Pérez F. **Métodos de enfriamiento y Control de dureza en Aguas Industriales. Aplicación a un caso práctico.** Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Escuela de Ingeniería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1979.

floculenta, el agua debe ser estabilizada de manera de volver a una condición aproximadamente neutra. Como el agua ha perdido casi todo el dióxido de carbono, generalmente se neutraliza por recarbonatación, es decir por la incorporación de dióxido de carbono que se hace burbujear para facilitar la transferencia. La recarbonatación genera con el agua ácido carbónico, el que al disociarse permite recuperar la acidez natural del agua, de acuerdo a la siguiente reacción:



#### 6.4.- Tratamiento convencional del agua

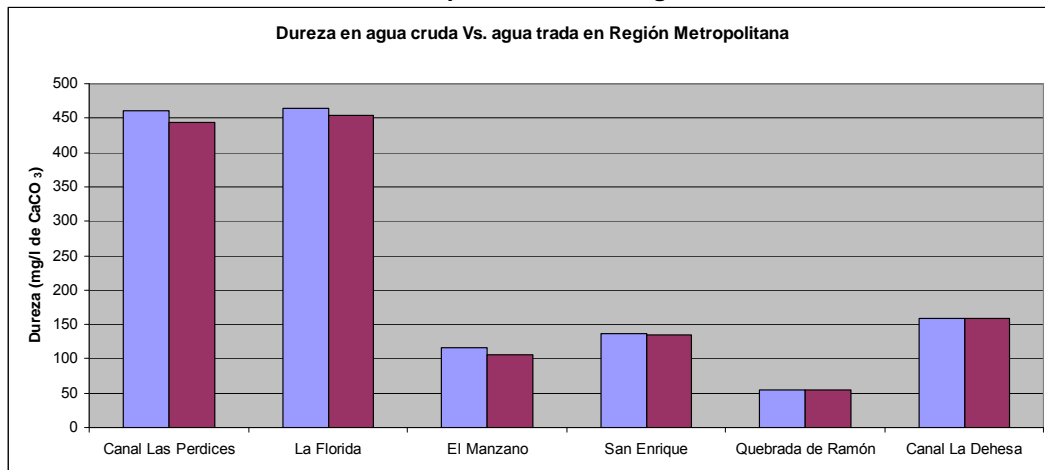
El tratamiento físico químico convencional del agua mediante coagulación-floculación, generalmente va precedido por un acondicionamiento de pH, para evitar la acidificación por efecto de los coagulantes más comúnmente usados, que son de naturaleza ácida, como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, y luego de la coagulación viene una etapa de sedimentación y/o filtración, donde es posible remover, junto con la turbiedad, las sales de carbonato precipitadas. El acondicionamiento de pH se hace generalmente con cal, con lo cual se consigue la precipitación de parte de la dureza del agua, en forma similar a como ocurre con el método de la precipitación con cal. Si bien en este último se alcanzan valores del pH en torno a 11 para lograr una buena precipitación de la dureza, en el tratamiento convencional se llega sólo a pH entre 7 y 8, por lo que la remoción es mucho menor.

La información de dureza disponible muestra que en los servicios donde se cuenta con sistemas convencionales de tratamiento de agua potable se logra una disminución secundaria de la dureza.

En forma similar, los sistemas de tratamiento no convencionales dirigidos a remover principalmente las impurezas disueltas inorgánicas del agua, como la desalación por osmosis inversa y tecnologías de nano filtración, en general removerán junto con los cloruros otras sales como los bicarbonatos de calcio y magnesio, principales causantes de la dureza en el agua.

En la figura N° 13 se muestra una comparación entre la dureza del agua cruda y tratada para varios servicios de la Región Metropolitana de Santiago en que se tratan aguas superficiales mediante tratamiento físico químico convencional, mostrando que éste produce una leve reducción de la dureza.

**Figura N° 13 Comparación entre la dureza del agua cruda y tratada para varios servicios de la Región Metropolitana de Santiago**



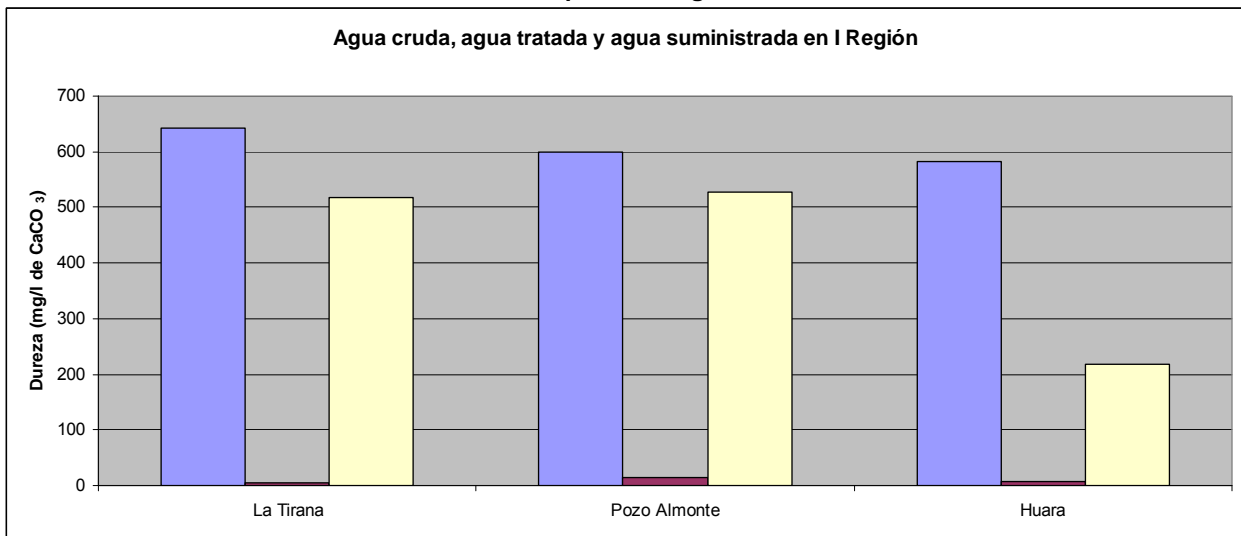
### 6.5.- Osmosis inversa.

La osmosis inversa consiste en revertir el fenómeno de osmosis en una membrana semipermeable mediante la aplicación de altas presiones, superiores a la presión osmótica. Las presiones utilizadas en este proceso van desde los 20 a 100 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de la aplicación.<sup>25</sup> El proceso de osmosis inversa rechaza los iones monovalentes y compuestos orgánicos de peso molecular mayores a 50 o 100, y así permite remover las impurezas disueltas del agua en un alto porcentaje, cercano al 95%. La separación en la osmosis inversa se basa en las diferencias de solubilidad y difusividad de los solutos en los materiales de las membranas (mecanismo de disolución-difusión). Las moléculas de agua pasan en el espacio intermolecular de la membrana y no existen poros propiamente tal, aunque se define por simplicidad que éste es equivalente a un tamaño de menos de 1 nm (10<sup>-9</sup> m).<sup>26</sup>

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%).

Este proceso requiere de un completo pretratamiento de las aguas que elimine totalmente las partículas suspendidas para evitar que se adhiera a la membrana y reduzca su efectividad y la dañen. Las aguas tratadas mediante osmosis inversa resultan con un contenido tan bajo de minerales que pueden tener problemas de sabor o ser corrosivas, razón por lo que se deben remineralizar para alcanzar un adecuado equilibrio iónico. La remineralización se puede hacer mediante el agregado de cal y otros minerales y/o mediante la mezcla con parte de las aguas crudas. Las sales removidas del agua tratada se concentran en el denominado rechazo, el que puede equivaler a entre 20 y 50% del agua afluente, dependiendo de sus características, y que debe ser dispuesta como un residuo. En la figura N° 14 se muestra la dureza del agua cruda, agua tratada por osmosis inversa y agua remineralizada en tres servicios de la primera Región.

**Fig. N° 14. Dureza del agua cruda, agua tratada por osmosis inversa y agua remineralizada en tres servicios de la primera Región.**



<sup>25</sup> Lorch, Walter (Ed.). **Handbook of Water Purification**. McGraw-Hill Book Co. (UK) Limited. 1981.

<sup>26</sup> Cuartas Uribe, Beatriz E. **Estudio del Proceso de Nanofiltración para la Desmineralización de Lactosuero Dulce. Tesis doctoral**. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Valencia, 2005.

## 6.6.- Nano filtración

La nanofiltración (NF) es una técnica que combina características de ultrafiltración y osmosis inversa, pues su mecanismo de separación se basa tanto en diferencias de tamaños, propio de la ultrafiltración, como en el modelo de disolución – difusión, tal como ocurre en ósmosis inversa. La NF es un proceso que opera a media - baja presión, que deja pasar sólo las partículas de tamaño menores de 1 nanometro (10 Å), de aquí el término de nanofiltración. Las membranas de nanofiltración operan en rangos más altos de corte de peso molecular (300 – 500 g/mol) que las de osmosis inversa, mientras que las membranas de osmosis inversa son menos permeables que las de nanofiltración. Otra propiedad de las membranas de nanofiltración es la ligera carga superficial que poseen. La interacción de la carga juega un papel importante, y este principio sirve para separar iones de diferente valencia.

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 300. La presión de trabajo usada en la nanofiltración es mucho menor que en la osmosis inversa, la que normalmente es de alrededor de 8 a 50 kg/cm<sup>2</sup>.

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. Las membranas semi permeables utilizadas en estos procesos (OI y NF), dependen de algunos factores como el pH, la turbiedad 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 fibra hueca 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 hueca. 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.

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. La tecnología más utilizada en la remoción de dureza es la nanofiltración, ya que al remover la dureza y parcialmente los sólidos disueltos totales, sus membranas tienen menor tendencia al ensuciamiento que la 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 forman 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. 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.

## 6.7.- Campos magnéticos

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 adquiriría la propiedad de no producir 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 sí ciertos criterios que tratan de explicar de modo cualitativo el proceso. Experimentos efectuados en torno a este fenómeno indican una clara dependencia de la intensidad del campo magnético aplicado y de 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 radica en la prevención de las incrustaciones, no en la remoción de dureza, ya que prácticamente no remueve dureza. Esta prevención se originaría por el efecto del campo magnético sobre el agua que activa y polariza las moléculas de agua, produciendo una fuerte interacción con las especies iónicas presentes, más fuerte que las de estas especies con las superficies metálicas modificadas (superficies internas de tuberías de intercambiadores de calor, calderas, calefactores de agua, etc.), propiciando la formación en el seno del agua de cristales finos de carbonato de calcio con estructura de argonita. Éstos quedan en suspensión y pueden ser retirados con facilidad posteriormente por sedimentación (calefactores de agua) o retirados por purga (calderas de vapor) y su generación evita la formación de cristales de calcita (carbonato de calcio) sobre las superficies metálicas.

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.

En un estudio realizado en el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Chile<sup>27</sup> se concluyó que el acondicionamiento magnético del agua podría permitir ahorros en reactivos antiincrustantes, ahorro en costos de mantención y aumento de la vida útil de los sistemas de intercambio de calor.

---

<sup>27</sup> Herrera, Leandro; José Hernández y Jorge Castillo. **Optimización Preliminar de Caldera Piro-tubular Utilizando Dispositivos Magnéticos.** Dpto. Ing. Química. Fac. Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

## 7.- Factibilidad y conveniencia de incorporación de dureza y otros parámetros a la norma NCh409

### 7.1.- Análisis comparativo de diversas normativas

Uno de los criterios más primarios para establecer la conveniencia o necesidad de incorporar nuevos parámetros a una determinada normativa es la comparación con normas similares existentes en otros países, o bien, con normas internacionales respaldadas por organismos que agrupan a varios países. En el estudio "Análisis de Presencia de Contaminantes no Controlados en Agua Potable", realizado en 2001 para la Superintendencia de Servicios Sanitarios por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, se presenta un análisis comparativo de la normativa sobre calidad del agua potable chilena en relación a las existentes en otros países y propuestas por organismos internacionales. En las tablas números 33 a 40 se presenta una comparación resumida de ausencia-presencia de 162 parámetros incluidos parcialmente en la Norma Chilena NCh 409 Of 2005 y las guías de la OMS, Comunidad Europea y EPA más las normas nacionales de Canadá, México y Japón.

**Tabla N° 33. Requisitos Microbiológicos del Agua Potable en la Normativa Internacional y Chilena**

Nº	Microorganismos	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
1	E. Coli o bacterias coliformes o termotolerantes	X		X	X	X		X
2	Bacterias coliformes totales	X	X		X	X	X	X
3	Cryptosporidium		X		X			
4	Giardia lamblia		X		X			
5	Recuento en placa de heterotróficos (HPC)		X		X			
6	Legionella		X					
7	Virus (entéricos)		X					
8	Enterococos			X				

En la tabla N° 41 se presenta para cada país u organismo internacional el número de parámetros considerado en sus respectivas normas o criterios para el agua potable, ordenadas de mayor a menor, advirtiéndose que el número de parámetros no está necesariamente relacionado con el nivel de desarrollo del país o comunidad de países.

La inclusión o exclusión de parámetros en la norma de agua potable de un determinado país obedece a razones más técnicas que un simple análisis comparativo. Una norma de agua potable con muchos parámetros dará una mayor protección a los consumidores si efectivamente se controlan todos los parámetros contenidos en la norma pero, en caso contrario, es posible que el costo de control asociado a un número muy grande de parámetros sirva de pretexto para controlar sólo algunos de ellos, con lo cual se da pie a una aplicación parcial.

El análisis comparativo de normas debe diferenciar entre normas nacionales de aplicación obligatoria y algunos documentos guías a nivel internacional con diferentes grados de obligatoriedad para los países involucrados. Las normas nacionales obedecen a condiciones medioambientales locales o nacionales, en cambio las normas o guías internacionales sólo consideran las concentraciones de determinados contaminantes y su relación con la salud de los consumidores, independientemente de la probabilidad de encontrar dichos contaminantes en el agua de consumo. Por ello, el objetivo de las guías internacionales no es su aplicación al control de la calidad del agua potable sino servir de documento base para la

confección de normas nacionales o estatales. Por ejemplo en el documento de la Organización Mundial de la Salud<sup>28</sup> se indica lo siguiente:

“La finalidad de las Guías es apoyar el desarrollo y la ejecución de estrategias de gestión de riesgos que garanticen la inocuidad del abastecimiento de agua por medio del control de los componentes peligrosos del agua. Estas estrategias pueden incluir normas nacionales o regionales desarrolladas basándose en la información científica que proporcionan las Guías. Las Guías describen los requisitos mínimos razonables que deben cumplir las prácticas seguras para proteger la salud de los consumidores, y determinan «valores de referencia» numéricos de los componentes del agua o los indicadores de la calidad del agua. Para definir límites obligatorios es preferible considerar los valores de referencia en el contexto de las condiciones locales o nacionales de tipo medioambiental, social, económico y cultural.”

**Tabla Nº 34. Constituyentes inorgánicos del Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena**

Nº	Inorgánicos	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
9	Antimonio	X	X	X	X		X	
10	Arsénico	X	X	X	X	X	X	X
11	Bario	X	X		X	X		
12	Berilio	X	X					
13	Boro	X		X	X		X	
14	Cadmio	X	X	X	X	X	X	X
15	Cromo	X	X	X	X	X	X	X
16	Cobre	X	X	X	X	X	X	X
17	Cianuro	X	X	X	X	X	X	X
18	Fluoruro	X	X	X	X	X	X	X
19	Plomo	X	X	X	X	X	X	X
20	Manganeso	X	X	X	X	X	X	X
21	Mercurio (total)	X	X	X	X	X	X	X
22	Molibdeno	X					X	
23	Niquel	X	X	X			X	
24	Nitrato	X	X	X	X	X	X	X
25	Nitrito	X	X	X		X	X	X
26	Selenio	X	X	X	X	X	X	X
27	Uranio	X	X		X			

Más adelante establece aún más claramente el objetivo de las guías:

“El motivo principal para no promover la adopción de normas internacionales sobre la calidad del agua de consumo es que es preferible crear normas y reglamentos nacionales basados en un método de análisis de riesgos y beneficios (de tipo cualitativo o cuantitativo). Además, el mejor modo de aplicar las Guías es por medio de un marco integrado de gestión preventiva de la seguridad, aplicado desde la cuenca de captación hasta el consumidor. Las Guías proporcionan una base científica que pueden utilizar las autoridades nacionales como

<sup>28</sup> Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la Tercera Edición. Volumen 1. Recomendaciones. 2006.

punto de partida para el desarrollo de reglamentos y normas sobre el agua de consumo adecuadas para la situación de su país. En el desarrollo de normas y reglamentos, debe procurarse evitar desviar innecesariamente recursos escasos al desarrollo de normas y el monitoreo de sustancias cuya importancia para la salud pública es relativamente menor. El método que aplican estas Guías tiene por finalidad generar normas y reglamentos nacionales que puedan aplicarse y hacerse cumplir fácilmente y que protejan la salud pública.”

**Tabla Nº 35. Constituyentes orgánicos del Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena**

Nº	Alcanos clorados	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
28	Tetracloruro de carbono	X	X		X		X	
29	Diclorometano	X	X		X		X	
30	1,1 dicloroetano	X	X		X		X	
31	1,2 dicloroetano	X	X	X	X		X	
32	1,1,1 tricloroetano	X	X		X		X	
	<b>Etenos clorados</b>							
33	Cloruro de vinil	X	X	X	X			
34	1,1 dicloroetano	X	X		X			
35	1,2 dicloroetano	X	X		X			
36	Tricloroetano	X	X	X			X	
37	Tetracloroetano	X	X	X	X		X	X
	<b>Hidrocarburos aromáticos</b>							
38	Benceno	X	X	X	X		X	X
39	Tolueno	X	X		X		X	X
40	Xilenos	X	X		X		X	X
41	Etilbenceno	X	X		X			
42	Stireno	X	X					
43	Benzo (a) pireno (PAHs)	X	X	X	X			
	<b>Bencenos clorados</b>							
44	Monoclorobenceno	X	X		X			
45	1,2 diclorobenceno	X	X		X			
46	1,3 diclorobenceno	X	X					
47	1,4 diclorobenceno	X	X		X			
48	Triclorobencenos (total)	X	X					
	<b>Misceláneos</b>							
49	di (2-ethylhexyl) adipate	X	X					
50	Di (2-ethylhexyl) phtalate	X	X				X	
51	Acrylamide	X	X	X				
52	Epichlorohydrin	X	X	X				
53	Hexaclorobutadeno	X						
54	ac. Edético (EDTA)	X						
55	ac. Nitrotriacético (NTA)	X		X				
56	Dialkyltins	X						
57	Oxido tributilin	X						

**Tabla N° 36. Pesticidas en el Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena**

N°	Pesticidas	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
58	Alaclor	X	X	X				
59	Aldicarb	X	X	X	X			X
60	Aldrin/dieldrin	X		X	X			
61	Atrazina	X	X	X	X			
62	Bentazone	X		X				
63	Carbofuran	X	X	X	X			X
64	Clordano	X	X	X				
65	Clorotoluron	X		X				
66	DDT	X		X				X
67	1,2 dibromo 3 cloropropano	X	X	X				
68	2,4 D	X	X	X	X			X
69	1,2 dicloropropano	X	X	X				
70	1,3 dicloropropano	X		X				
71	1,3 dicloropropeno	X		X			X	
72	Etilen dibromuro	X		X				
73	Heptaclor y heptaclor epoxide	X	X	X				
74	Hexacloro benceno	X	X	X				
75	Isoproturon	X		X				
76	Lindano	X	X	X				X
77	MCPA	X		X				
78	Metoxyclor	X	X	X	X			X
79	Metolaclor	X		X	X			
80	Molinate	X		X				
81	Pendimetalin	X		X				
82	Pentaclorofenol	X	X	X				X
83	Permetrin	X		X				
84	Propanil	X		X				
85	Piridate	X		X				
86	Simazina	X	X	X			X	
87	Trifluralin	X		X				
88	2,4 DB	X		X				
89	Dicloroprop	X		X				
90	Fenoprop	X		X				
91	MCPB	X		X				
92	Mecocrop	X		X				
93	2,4,5-T	X	X	X				

**Tabla N° 37. Desinfectantes y subproductos de desinfección en el Agua Potable de Significancia en Salud en la normativa internacional y chilena**

N°	Desinfectantes	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
94	Monocloramina	X	X					X
95	Dy tricloramina	X	X					
96	Cloro	X	X			X		X
97	Dióxido de cloro	X	X					
98	Yodo	X						
	<b>Sub-productos de desinfección</b>							
99	Bromato	X	X		X			
100	Clorato	X						
101	Clorito	X	X					
102	Clorofenoles							
103	2-clorofenol	X						
104	2.4-diclorofenol	X						
105	2.4.6-triclorofenol	X						
106	Formaldehido	X			X			
107	MX	X						
108	Trihalometanos	X	X					
109	Bromoformo	X	X	X	X			
110	Dibromoclorometano	X	X	X	X			
111	Bromodiclorometano	X	X	X	X			
112	Cloroformo	X	X	X	X		X	X
113	Ac. Acéticos clorados		X					
114	Ac. Monocloroacéticos	X						
115	Ac. Dicloroacético	X						
116	Ac. Tricloroacético	X						
117	Cloral hidrato							
118	Tricloroacetaldehido	X						
119	Cloroacetona	X						
	<b>Acetonitrilos halogenados</b>							
120	Dicloroacetoneitrilo	X						
121	Dibromoacetoneitrilo	X						
122	Bromocloroacetoneitrilo	X						
123	Tricloroacetoneitrilo	X						
124	Cloruro de cianógeno	X						
125	Cloropicrin	X						

Finalmente, refuerza el carácter nacional o local que deben tener las normas de calidad de agua potable:

“Las normas sobre el agua de consumo pueden diferir, en naturaleza y forma, de unos países o regiones a otros. No hay un método único que pueda aplicarse de forma universal. En la elaboración y la aplicación de normas, es fundamental tener en cuenta las leyes vigentes y en proyecto relativas al agua, a la salud y al gobierno local, así como evaluar la capacidad para desarrollar y aplicar reglamentos de cada país. Los métodos que pueden funcionar en un país o región no necesariamente podrán transferirse a otros países o regiones. Para desarrollar un

marco reglamentario, es fundamental que cada país examine sus necesidades y capacidades. La determinación de la seguridad, o de qué riesgo se considera aceptable en circunstancias concretas, es un asunto que concierne al conjunto de la sociedad. En último término, es responsabilidad de cada país decidir si las ventajas de adoptar como norma nacional o local alguna de las directrices o valores de referencia justifican su costo.”

**Tabla Nº 38. Sustancias químicas sin significancia en la salud en las concentraciones normalmente encontradas en agua potable**

Nº	Sustancia	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
126	Asbestos	X	X					
127	Plata	X	X					
128	Estaño	X						

**Tabla Nº 39. Constituyentes radiactivos del agua potable**

Nº	Constituyente	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
129	Actividad alfa	X	X					X
130	Actividad beta	X	X					X

Asimismo, con relación a la Directiva Europea sobre calidad del agua potable<sup>29</sup>, sin bien es cierto la intención de sus autores es que sea un documento de referencia para todos los países de la Comunidad Europea y que eventualmente todos los países miembros suscriban sus contenidos y sean aplicadas por ellos, en los considerandos iniciales establece lo siguiente:

- (4) Considerando que, de acuerdo con el principio de subsidiariedad, las diferentes características naturales y socioeconómicas de las regiones de la Unión requieren que la mayoría de las decisiones sobre el seguimiento, el análisis y las medidas que deben adoptarse para corregir los incumplimientos se tomen a nivel local, regional o nacional, en la medida en que dichas diferencias no supongan un perjuicio para el establecimiento del marco legislativo, reglamentario y administrativo contemplado en la presente Directiva;
- (29) Considerando que conviene autorizar a los Estados miembros a que, en determinadas condiciones, puedan establecer excepciones a la presente Directiva; que es necesario establecer un marco adecuado para la concesión de tales excepciones, siempre y cuando éstas no puedan constituir un peligro para la salud humana y el suministro de agua destinada al consumo humano en la zona no pueda mantenerse por ningún otro medio razonable;

Las normas de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, USEPA, también están destinadas al cumplimiento por parte de todos los Estados individuales, pero se hace una distinción entre las denominadas normas primarias, de carácter obligatorio para todos los Estados, y las normas denominadas secundarias, que establecen metas u objetivos, pero no son necesariamente obligatorias, a menos que los propios Estados así lo decidan. A continuación se presenta una traducción de parte del contenido de los preámbulos que explica mejor esta idea:

“La EPA es responsable por las Normas Primarias Nacionales de Agua Potable, que son las normas relacionadas con la salud que establecen los niveles máximos de contaminantes (NMCs). Los NMCs son el nivel máximo permitido de un contaminante en el agua suministrada a los usuarios de un sistema público de agua. Los NMCs

<sup>29</sup> Consejo de la Comunidad Europea. Directiva 98/83/CE del Consejo relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano de 3 de noviembre de 1998. L 330/32 ES Diario Oficial de las Comunidades Europeas 5.12.98

son obligatorios y exigibles en virtud de la Ley de Agua Potable Segura. La EPA ha establecido también metas no exigibles para los niveles máximos de contaminante objetivo (NMCOS) en los niveles donde no ocurren efectos adversos conocidos o previstos sobre la salud y que permitan un adecuado margen de seguridad. El NMC exigible se encuentra tan cerca de los NMCOS como sea razonable, tomando en consideración los costos y técnicas de tratamiento disponibles para los sistemas públicos de agua. Las recomendaciones de salud proporcionan información sobre los contaminantes que pueden causar efectos sobre la salud humana y se sabe o se prevé que podrían estar en el agua potable. Las recomendaciones de salud son valores de orientación basados en efectos sobre la salud no asociados a cáncer para diferentes duraciones de exposición (por ejemplo, un día, diez días, a más largo plazo y toda la vida).”

**Tabla Nº 40. Sustancias y Parámetros que pueden dar lugar a quejas**

Nº	Sustancia	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)
131	Color	X	X	X	X	X		X
132	Sabor y olor	X	X	X	X	X		X
133	Temperatura	X			X			
134	Turbiedad	X	X	X	X	X		X
	<b>Constituyentes inorgánicos</b>							
135	Aluminio	X			X	X		
136	Amonio	X	X	X				X
137	Cloruro	X	X	X	X		X	X
138	Cobre	X		X	X	X		X
139	Dureza	X		X		X		
140	Sulfuro de hidrógeno	X	X		X		X	
141	Fierro	X	X	X	X	X	X	X
142	Manganeso	X		X	X			X
143	Oxígeno disuelto	X	X					
144	PH	X		X	X	X		X
145	Sodio	X	X	X	X			
146	Sulfato	X	X	X	X	X		X
147	Sólidos disueltos totales	X	X		X		X	X
148	Cinc	X	X		X	X		X
	<b>Constituyentes orgánicos</b>							
149	Tolueno	X	X		X			X
150	Xyleno	X	X		X			X
151	Etilbenceno	X	X					
152	Styreno	X	X					
153	Monoclorobenceno	X	X		X			
154	1.2 diclorobenceno	X	X		X			
155	1.4 diclorobenceno	X	X					
156	Triclorobenceno	X	X					
157	Detergentes sintéticos	X	X					
	Cloro	X	X					X
159	Clorofenoles	X						
160	2-clofenol	X						
161	2.4-diclorofenol	X	X					
162	2.4.6-triclorofenol	X			X			

**Tabla N° 41. Cantidad de parámetros en normativa de agua potable por país u organismo internacional**

<b>País u organismo</b>	<b>Parámetros</b>
OMS (1)	153
EPA (2)	103
CEE (3)	78
Canadá (4)	70
Chile(8)	45
Japón (6)	35
México (5)	26

“Las Normas Secundarias Nacionales de Agua Potable son las pautas federales no exigibles relativas a sabor, olor, color y otras características estéticas del agua. La EPA les recomienda a los Estados como metas razonables, pero la ley federal no requiere que sistemas de abastecimiento de agua deban cumplirlas.”

Los comentarios anteriores se incluyen para advertir que la presencia de un determinado parámetro en una guía internacional o federal, como en el caso de los Estados Unidos, no se debe interpretar como que éste está incluido en una norma de agua potable equivalente a nuestra NCh 409. Esta, a su vez, es obligatoria una vez que es validada y establecida como tal por un organismo público nacional con potestad para establecer una norma de agua potable. En este caso, fue declarada Oficial de la República de Chile por Decreto Exento 446 de 16 de junio 2006 del Ministerio de Salud, publicado en el Diario Oficial del 27 de junio de 2006.

## **7.2.- Selección de parámetros para incorporar a la norma de agua potable nacional**

Sin perjuicio de los comentarios incluidos en los párrafos precedentes en relación al uso de la comparación de normativas para definir las normas de agua potable nacionales, en la tabla N° 42 se presenta la lista de los parámetros ausentes en la norma chilena de agua potable pero que se encuentran contenidos en las normas nacionales revisadas, más la Guía de la OMS, las Directivas de la Comunidad Europea y las definidas como primarias por la USEPA. Los parámetros contenidos en las normas secundarias de calidad del agua potable de la USEPA no han sido considerados por no corresponder a normativas equivalentes.

Para cada categoría se ha ordenado los parámetros según el número de normativas en que aparecen, entre las indicadas, priorizando a igualdad de condiciones las normas de carácter nacional por sobre las guías internacionales y las guías de carácter obligatorio, como la correspondiente a la Comunidad Europea, por sobre las guías propiamente tal, como la de la OMS. De este modo, los primeros parámetros son los que aparecen incorporados en un mayor de número de normas, con las salvedades indicadas.

Los parámetros de calidad contenidos en la tabla N° 42 pueden servir como una primera lista de prioridades para los parámetros candidatos a ser incorporados en la norma chilena de agua potable, manteniendo la propuesta de dos grupos, uno de parámetros obligatorios y otro como guías de referencia con parámetros que serían incorporados en la medida que las condiciones ambientales y socio-culturales locales, así como el análisis técnico económico, lo justifiquen.

**Tabla Nº 42. Lista de los parámetros ausentes en la norma chilena contenidos en las normas nacionales e internacionales**

Parámetros	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)	Nº de Xs
<b>Requisitos Microbiológicos</b>								
<b>Microorganismos</b>								
Cryptosporidium		X		X				2
Giardia lamblia		X		X				2
Recuento en placa de heterotróficos (HPC)		X		X				2
Enterococos			X					1
Legionella		X						1
Virus (entéricos)		X						1
<b>Constituyentes inorgánicos</b>								
Antimonio	X	X	X	X		X		5
Bario	X	X		X	X			4
Boro	X		X	X		X		4
Níquel	X	X	X			X		4
Uranio	X	X		X				3
Berilio	X	X						2
Molibdeno	X					X		2
<b>Constituyentes orgánicos</b>								
<b>Alcanos clorados</b>								
1,2 dicloroetano	X	X	X	X		X		5
Tetracloruro de carbono	X	X		X		X		4
Diclorometano	X	X		X		X		4
1,1 dicloroetano	X	X		X		X		4
1,1,1 tricloroetano	X	X		X		X		4
<b>Etenos clorados</b>								
Cloruro de vinil	X	X	X	X				4
Tricloroetano	X	X	X			X		4
1,1 dicloroetano	X	X		X				3
1,2 dicloroetano	X	X		X				3
<b>Hidrocarburos aromáticos</b>								
Benzo (a) pireno (PAHs)	X	X	X	X				4
Etilbenceno	X	X		X				3
Stireno	X	X						2
<b>Bencenos clorados</b>								
Monoclorobenceno	X	X		X				3
1,2 diclorobenceno	X	X		X				3
1,4 diclorobenceno	X	X		X				3
1,3 diclorobenceno	X	X						2
Triclorobencenos (total)	X	X						2
<b>Misceláneos</b>								

Parámetros	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)	Nº de Xs
Di (2-ethylhexyl) phtalate	X	X				X		3
Acrylamide	X	X	X					3
Epichlorohydrin	X	X	X					3
Ác. Nitritotriacético (NTA)	X		X					2
di (2-ethylhexyl) adipate	X	X						2
Hexaclorobutadeno	X							1
Ác. Edético (EDTA)	X							1
Dialkyltins	X							1
Oxido tributilin	X							1
<b>Pesticidas</b>								
Atrazina	X	X	X	X				4
Alaclor	X	X	X					3
Aldrin/dieldrin	X		X	X				3
1,3 dicloropropeno	X		X			X		3
Metolaclor	X		X	X				3
Simazina	X	X	X			X		4
Clordano	X	X	X					3
1,2 dibromo 3 cloropropano	X	X	X					3
1,2 dicloropropano	X	X	X					3
Heptaclor y heptaclor epoxide	X	X	X					3
Hexacloro benceno	X	X	X					3
2,4,5-T	X	X	X					3
Clorotoluron	X		X					2
Bentazone	X		X					2
1,3 dicloropropano	X		X					2
Etilen dibromuro	X		X					2
Isoproturon	X		X					2
MCPA	X		X					2
Molinate	X		X					2
Pendimetalin	X		X					2
Permetrin	X		X					2
Propanil	X		X					2
Piridate	X		X					2
Trifluralin	X		X					2
2,4 DB	X		X					2
Dicloroprop	X		X					2
Fenoprop	X		X					2
MCPB	X		X					2
Mecocrop	X		X					2
<b>Desinfectantes y subproductos de desinfección</b>								
<b>Desinfectantes</b>								
Dy tricloramina	X	X						2
Dióxido de cloro	X	X						2

Parámetros	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)	Nº de Xs
Yodo	X							1
<b>Sub-productos de desinfección</b>								
Bromoformo	X	X	X	X				4
Dibromoclorometano	X	X	X	X				4
Bromodichlorometano	X	X	X	X				4
Bromato	X	X		X				3
Clorito	X	X						2
Formaldehido	X			X				2
Trihalometanos	X	X						2
Asbestos	X	X						2
Plata	X	X						2
Ac. Acéticos clorados		X						1
Clorato	X							1
2-clorofenol	X							1
2.4-diclorofenol	X							1
2.4.6-triclorofenol	X							1
MX	X							1
Ac. Monocloroacéticos	X							1
Ac. Dicloroacético	X							1
Ac. Tricloroacético	X							1
Tricloroacetaldehido	X							1
Cloroacetona	X							1
Dicloroacetoneitrilo	X							1
Dibromoacetoneitrilo	X							1
Bromocloroacetoneitrilo	X							1
Tricloroacetoneitrilo	X							1
Cloruro de cianogeno	X							1
Cloropicrin 3,6	X							1
Estaño	X							1
<b>Parámetros</b>								
Temperatura	X			X				2
<b>Constituyentes inorgánicos</b>								
Sulfuro de hidrógeno	X	X		X		X		4
Sodio	X	X	X	X				4
Aluminio	X			X	X			3
Dureza	X		X		X			3
Monoclorobenceno	X	X		X				3
1.2 diclorobenceno	X	X		X				3
Oxígeno disuelto	X	X						2
Etilbenceno	X	X						2
Styreno	X	X						2
1.4 diclorobenceno	X	X						2

Parámetros	OMS (1)	EPA (2)	CEE (3)	Canadá (4)	México (5)	Japón (6)	Chile (7)	Nº de Xs
Triclorobenceno	X	X						2
Detergentes sintéticos	X	X						2
<b>Desinfectantes y sub-productos de desinfección</b>								
2.4.6-triclorofenol	X			X				2
2.4-diclorofenol	X	X						2
Clorofenoles	X							1
2-clorfenol	X							1

El análisis de las condiciones ambientales y socio-culturales permitirá definir la real probabilidad de encontrar un determinado contaminante en el agua de bebida, en qué regiones, comunas o servicios y en qué niveles. También permitirá definir si su presencia obedece a causas naturales o antrópicas y si es posible controlar su origen en la fuente en lugar de su presencia en el agua potable. La información epidemiológica disponible, ya sea a nivel local o internacional, permitirá evaluar los riesgos para la salud. Asimismo, será necesaria la evaluación de efectos no relacionados directamente con la salud humana, tales como ocurre con las incrustaciones o el poder corrosivo del agua. El análisis técnico-económico permitirá evaluar la conveniencia de incluir un determinado parámetro en la norma, la factibilidad técnica de eliminarlo o reducirlo mediante tecnologías de tratamiento y los costos asociados a diferentes eficiencias de remoción.

En el estudio realizado por la Universidad de Chile<sup>30</sup> se concluye que los únicos parámetros que ameritan su inclusión en la normativa nacional del agua potable son el Aluminio y el Boro, con límites de 0,2 y 5,0 mg/l, respectivamente, en consideración a la existencia de fuentes naturales o antrópicas e información hidrológica. Esta selección se sustenta principalmente antecedentes medioambientales pero no incluye un análisis epidemiológico ni técnico económico.

A continuación se presenta algunas de las características de estos elementos desde el punto de vista de su impacto en la salud, según información disponible en la Organización Mundial de la Salud.

### Aluminio<sup>31</sup>

El aluminio es el elemento metálico más abundante y constituye alrededor del 8% de la corteza terrestre. Es frecuente la utilización de sales de aluminio en el tratamiento del agua como coagulantes para reducir el color, la turbiedad y el contenido de materia orgánica y de microorganismos. Este uso puede incrementar la concentración de aluminio en el agua tratada; una concentración residual alta puede conferir al agua color y turbiedad no deseables. La concentración de aluminio que da lugar a estos problemas es, en gran medida, función de varios parámetros de calidad del agua y factores relativos al funcionamiento de la planta de tratamiento del agua. La principal vía de exposición al aluminio de la población general es el consumo de alimentos, sobre todo de los que contienen compuestos de aluminio utilizados como aditivos alimentarios. La contribución del agua de consumo a la exposición total por vía oral al aluminio suele ser menos del 5% de la ingesta total.

Al parecer, el ser humano absorbe mal el aluminio y sus compuestos, aunque la tasa y grado de absorción no se han estudiado adecuadamente para todos los sectores de la población. El grado de

<sup>30</sup> Superintendencia de Servicios Sanitarios. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile. **Análisis de Presencia de Contaminantes no Controlados en Agua Potable.** 2001.

<sup>31</sup> Organización Mundial de la Salud. **Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la Tercera Edición. Volumen 1. Recomendaciones.** 2006

absorción del aluminio es función de varios parámetros, como el tipo de sal de aluminio administrada, el pH (que influye en la especiación y solubilidad del aluminio), la biodisponibilidad y factores nutricionales. Estos parámetros deben tenerse en cuenta en la dosimetría de tejidos y evaluación de la respuesta. Debido a estas consideraciones específicas acerca de la toxicocinética y toxicodinámica del aluminio, no es adecuado determinar un valor de referencia basado en los estudios con animales disponibles actualmente.

Hay escasos indicios de que la ingestión de aluminio por vía oral produzca toxicidad aguda en el ser humano, a pesar de la frecuente presencia del elemento en alimentos, agua de consumo y numerosos antiácidos. Se ha sugerido la hipótesis de que la exposición al aluminio es un factor de riesgo para el desarrollo o aparición temprana de la enfermedad de Alzheimer en el ser humano. La monografía de la OMS de 2003<sup>32</sup> sobre el aluminio de la serie Criterios de Salud Ambiental (CSA) concluye que, en definitiva, la correlación positiva entre el aluminio del agua de consumo y la enfermedad de Alzheimer, detectada en varios estudios epidemiológicos, no se puede descartar totalmente. No obstante, es preciso plantear reservas importantes respecto de la inferencia de una relación causal, dado que estos estudios no han tenido en cuenta factores de confusión demostrados ni la ingesta total de aluminio de todas las fuentes.

En su conjunto, los riesgos relativos de enfermedad de Alzheimer por exposición a concentraciones de aluminio en el agua de consumo mayores que 100 µg/l, según determinan estos estudios, son bajos (menores que 2,0). Pero, dado que las estimaciones del riesgo son imprecisas, por diversos motivos de tipo metodológico, no se puede calcular con precisión un riesgo atribuible poblacional. Estas predicciones imprecisas pueden, no obstante, ser útiles para adoptar decisiones relativas a la necesidad de controlar la exposición al aluminio de la población general.

En otra referencia<sup>33</sup> se señala que en circunstancias especiales, tales como la insuficiencia renal y la exposición masiva a aluminio en ciertas ocupaciones, el aluminio puede causar patología cerebral similar a la enfermedad de Alzheimer. Sin embargo, no habría evidencia definitiva de la función de este metal en la causalidad o el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. En una encuesta de 88 distritos en Inglaterra y Gales, se estimó las tasas de enfermedad de Alzheimer en personas menores de 70 años a partir de los registros de los scanners tomográficos computarizados (STC) y se relacionaron con las concentraciones de aluminio. Las tasas fueron ajustadas para compensar las diferencias en la distancia desde la unidad más cercana de exploración de STC y las diferencias en el tamaño de la población atendida por las unidades. Las concentraciones de aluminio en agua durante los últimos 10 años se obtuvieron de las autoridades y las compañías de agua. El riesgo de la enfermedad de Alzheimer resultó 1,5 veces mayor en los distritos donde la concentración media de aluminio superaba los 0,11 mg/l que en distritos en que las concentraciones eran inferiores a 0,01 mg/l.

Debido a las limitaciones de los datos de estudios con animales como modelo para el ser humano y la incertidumbre a la que están sujetos los datos de estudios con personas, no puede calcularse actualmente un valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el aluminio.

En el informe de la OMS se reconocen los efectos beneficiosos del uso de aluminio como coagulante en el tratamiento del agua. Teniendo esto en cuenta, y también los posibles efectos perjudiciales para la salud del aluminio (es decir, su posible neurotoxicidad), se calcula una concentración factible, basada en la optimización del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua de consumo que utilizan

<sup>32</sup> WHO. **Aluminium in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** WHO/SDE/WSH/03.04/53. English only. 2003

<sup>33</sup> Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water.** International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.

coagulantes que contienen aluminio, para reducir al mínimo las concentraciones de aluminio en aguas tratadas. Existen varios métodos para reducir al mínimo las concentraciones residuales de aluminio en aguas tratadas: realizar el proceso de coagulación a un pH óptimo, evitar el uso de dosis excesivas de aluminio, mezclar el coagulante adecuadamente en el lugar de aplicación, ajustar la velocidad de las paletas en la floculación a su valor óptimo, y filtrar de forma eficiente el floculo de aluminio. En condiciones operativas adecuadas, la concentración de aluminio puede reducirse hasta 0,1 mg/l o menos en instalaciones de tratamiento del agua de gran tamaño. En instalaciones pequeñas (como las que dan servicio a poblaciones de menos de 10 000 personas) puede ser difícil alcanzar esta concentración, ya que las plantas pequeñas tienen poca capacidad para amortiguar las fluctuaciones en la operación; además, estas instalaciones suelen contar con recursos escasos y un acceso limitado a los conocimientos necesarios para solucionar problemas operativos específicos. En estas instalaciones pequeñas, es factible alcanzar una concentración de 0,2 mg/l o menos de aluminio en el agua tratada.

Las *Normas internacionales para el agua potable* de la OMS de 1958, 1963 y 1971 no hicieron referencia al aluminio. En la primera edición de las *Guías para la calidad del agua potable*, publicada en 1984, se estableció un valor de referencia de 0,2 mg/l para el aluminio, basado en consideraciones relativas a las características organolépticas del agua (como valor de compromiso, teniendo en cuenta la utilidad del uso de compuestos de aluminio en el tratamiento del agua y el objetivo de evitar la coloración del agua que puede observarse si quedan concentraciones superiores a 0,1 mg/l en el agua distribuida). Las Guías de 1993 no recomendaron ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud, pero confirmaron una concentración de 0,2 mg/l en el agua de consumo como valor de compromiso entre la utilidad práctica del uso de sales de aluminio en el tratamiento del agua y el objetivo de evitar la coloración del agua distribuida. En el apéndice a las Guías publicado en 1998 no se determinó un valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el aluminio debido a las limitaciones de los datos de estudios con animales como modelo para el ser humano y a la incertidumbre a la que están sujetos los datos de estudios con personas. No obstante, teniendo en cuenta los efectos beneficiosos del uso de aluminio como coagulante en el tratamiento del agua y también los posibles efectos perjudiciales para la salud del aluminio (es decir, su posible neurotoxicidad), se calculó una concentración factible, basada en la optimización del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua de consumo que utilizan coagulantes que contienen aluminio, para reducir al mínimo las concentraciones de aluminio en aguas tratadas. En condiciones operativas adecuadas, la concentración de aluminio puede reducirse hasta 0,1 mg/l o menos en instalaciones de tratamiento del agua de gran tamaño. En instalaciones pequeñas, es factible alcanzar una concentración de 0,2 mg/l o menos de aluminio en el agua tratada.

### Boro<sup>34</sup>

Los compuestos de boro se utilizan en la fabricación de vidrio, jabones y detergentes, y también como ignífugos. La mayor exposición al boro de la población general es mediante el consumo de alimentos, ya que se encuentra naturalmente en muchas plantas comestibles. El boro se encuentra de forma natural en aguas subterráneas, pero su presencia en aguas superficiales con frecuencia es consecuencia del vertido en aguas superficiales de efluentes de aguas residuales tratadas (a las que accede por su utilización en ciertos detergentes). En nuestro país existen importantes yacimientos de boro, en forma de boratos, en las regiones I y II, por lo que es común encontrarlo en aguas superficiales y subterráneas.<sup>35</sup>

<sup>34</sup> Organización Mundial de la Salud. **Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la Tercera Edición. Volumen 1. Recomendaciones.** 2006.

<sup>35</sup> Chong, Guillermo; Juan J. Pueyo y Cecilia Demergasso. **Los yacimientos de boratos de Chile.** Rev. Geol. Chile v.27 n.1 Santiago jul. 2000

Las exposiciones, tanto breves como prolongadas, de animales de laboratorio al ácido bórico o al bórax por vía oral han demostrado, invariablemente, su toxicidad para el aparato reproductor masculino. Se han observado lesiones testiculares en ratas, ratones y perros a los que se suministró ácido bórico o bórax en los alimentos o en el agua de consumo. Se ha demostrado experimentalmente su embriotoxicidad en ratas, ratones y conejos. Los resultados negativos de numerosas pruebas de mutagenia indican que el ácido bórico y el bórax no son genotóxicos. En estudios a largo plazo en ratones y ratas, el ácido bórico y el bórax no aumentaron la incidencia de tumores.

Las *Normas internacionales para el agua potable* de la OMS de 1958, 1963 y 1971 no hicieron referencia al boro. La primera edición de las *Guías para la calidad del agua potable*, publicada en 1984, concluyó que no era preciso adoptar medidas con respecto al boro. En las Guías de 1993 se estableció un valor de referencia basado en efectos sobre la salud de 0,3 mg/l para el boro, y se señaló que la eliminación del boro mediante el tratamiento del agua de consumo parece ser deficiente. Este valor de referencia se aumentó a 0,5 mg/l en el apéndice a las Guías publicado en 1998 y se designó como provisional porque, con la tecnología de tratamiento disponible, será difícil alcanzarlo en zonas con concentraciones naturales de boro altas.<sup>36</sup>

En el estudio de la Universidad de Chile además se recomienda la confección de un Reglamento de Operación de Sistemas de Tratamiento de Agua potable, complementario a la Norma, que asegure el control de aquellos parámetros que se relacionan directa o indirectamente con la calidad del agua potable y “que resultaría de alto costo determinar en forma rutinaria”. Además, se recomienda realizar estudios adicionales en una primera etapa que incluyan la caracterización del contenido de trazas metálicas y carbón orgánico total de fuentes de agua potable en Chile y caracterización de patrones de ocurrencia de microorganismos patógenos emergentes en fuentes de agua potable en Chile.

Por último, se recomienda, en una segunda etapa, hacer estudios sobre la presencia de boro, litio, pesticidas y dureza en fuentes de agua potable y aguas de consumo humano, incluyendo estudios epidemiológicos, estudios sobre procesos de remoción de molibdeno y níquel, parámetros indicadores de la presencia de materias precursoras de formación de subproductos de desinfección y conteo de partículas y su relación con la presencia de protozoos en aguas tratadas.

### **7.3.- Otros parámetros**

Dentro de los objetivos de este estudio está hacer un análisis de los parámetros dureza, calcio, conductividad u otros, que pueden provocar quejas o reclamos reiterados de las Autoridades y de la población en general y que, actualmente, no están incluidos en la normativa de agua potable. Este análisis considera la comparación con normativas o recomendaciones internacionales, complementando con una contextualización en la realidad nacional que considera antecedentes de calidad natural de aguas, vulnerabilidad de fuentes de agua, geología del territorio, actividad socioeconómica y factibilidad de su remoción.

#### **Dureza, calcio y magnesio**

En los capítulos 2, 3, 4, 5 y 6, así como en el Anexo 2, se presenta información relativa a la distribución regional y local de dureza, calcio y magnesio, el procesamiento de la información de reclamos por parte de los usuarios por dureza o sarro causados por el agua potable, los efectos en la salud de las personas que consumen agua potable con altos contenidos de dureza, otros efectos de la presencia en el agua de consumo y una descripción de las tecnologías disponibles de remoción de dureza. En la segunda parte

<sup>36</sup> OMS, 2003: *Boron in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud. (WHO/SDE/WSH/03.04/54).

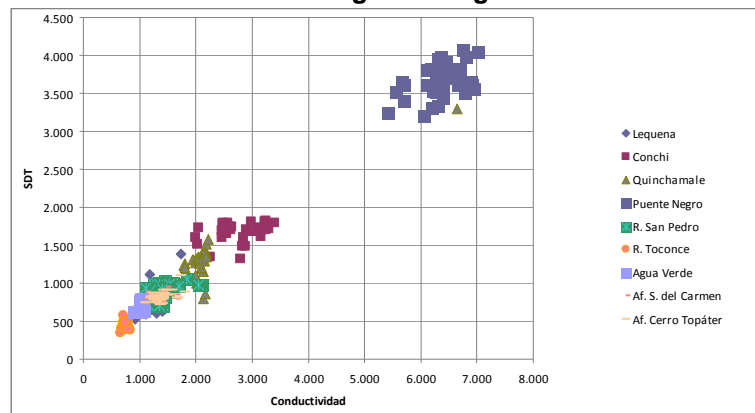
del estudio se incorporará información acerca de los costos del tratamiento y los costos asociados a la presencia de dureza en los abastecimientos de agua potable que permita un análisis de factibilidad técnica económica que permita evaluar la posible conveniencia de incluir estos parámetros en la norma de agua potable nacional y así hacer exigible su control y cumplimiento.

### Conductividad

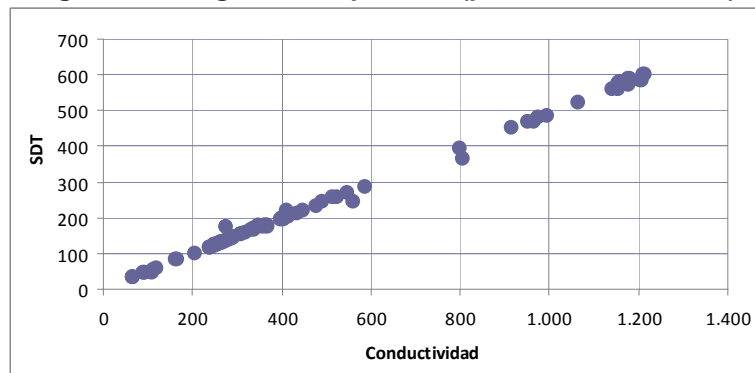
La conductividad es otro de los parámetros indicados específicamente en los objetivos del estudio para analizar su conveniencia de incluir en la norma de agua potable. La conductividad del agua mide su capacidad de transmitir una corriente eléctrica cuando se le aplica una diferencia de potencial y está directamente relacionada con la concentración de iones del agua. Dado que la sal ionizable más abundante en la naturaleza es el cloruro de sodio, la conductividad es una medida indirecta de la concentración de cloruros del agua, así como de la concentración de sodio. Pero también influye en su valor la presencia de otros iones, incluyendo el calcio y magnesio, carbonatos y bicarbonatos, por lo que la conductividad proporciona también información similar a los sólidos disueltos.

En las figuras N° 15 y 16 se presenta correlaciones entre Conductividad y Sólidos Disueltos Totales para las fuentes de agua de la Segunda Región y la Región Metropolitana (promedios/localidad para esta última), mostrándose la buena relación existente entre ambas variables.

**Figura N°15. Correlación entre Conductividad y Sólidos Disueltos Totales para las fuentes de agua de la Segunda Región**



**Figura N° 16. Correlación entre Conductividad y Sólidos Disueltos Totales para las fuentes de agua de la Región Metropolitana (promedios/localidad)**



Al igual que la dureza la conductividad es un parámetro inespecífico, es decir, que no mide directamente la presencia de un elemento o compuesto en el agua sino una propiedad de ésta que está relacionada con varios posibles componentes del agua. Por esta misma razón, no es fácil identificar efectos dañinos en el agua potable asociados a la conductividad, ni en la salud humana ni de otro tipo, y es difícil que los usuarios identifiquen alguna molestia con este parámetro.

Un exceso de sales en el agua potable podría causar sabor indeseable, o bien, podría inhabilitar el agua potable para el riego de jardines. Sin embargo, la norma chilena ya contempla estas situaciones a través de la exigencia de que el agua potable debe ser insípida y que las concentraciones de cloruros y de sólidos disueltos totales están limitados a 400 y 1.500 mg/l, respectivamente.

Por las razones anteriores, no parece necesario ni conveniente proponer la inclusión del parámetro conductividad en la norma de requisitos del agua potable.

#### **7.4.- Conclusiones**

La sola presencia de parámetros en normativas de agua potable extranjeras o internacionales no amerita su inclusión en nuestra normativa nacional, ya que ello debería ser resultado de estudios específicos ambientales, geológicos, hidrogeológicos o hidroquímicos que demuestren su presencia o riesgo de ella en las aguas nacionales, ya sea por causa naturales o antrópicas, y el riesgo de presencia en el agua potable que se distribuye a la población.

En el caso de contaminantes que pueden afectar la salud humana se requiere de estudios epidemiológicos tanto para evaluar su potencial impacto en la salud como para evaluar el posible efecto que ya haya tenido en los consumidores. Para los estudios epidemiológicos generales hay mucha información disponible a nivel internacional que permite relacionar diferentes niveles de concentración de contaminantes con sus efectos en la salud.

La definición de los niveles máximos admisibles debería considerar los estudios epidemiológicos y un estudio técnico económico que permita identificar las tecnologías de tratamiento que permiten su remoción, evaluar los niveles de remoción alcanzables y el costo asociado a éstos.

En el caso específico de la dureza, motivo central de este estudio, más adelante se presenta una evaluación técnico-económica para determinar la conveniencia de remover la dureza, ya sea en forma centralizada mediante sistemas de abastecimiento de agua potable o mediante equipos de pequeño tamaño a nivel domiciliario o industrial. Dependiendo de los resultados de este estudio será posible determinar la conveniencia de incluir a la dureza como un nuevo parámetro en la normativa de agua potable. En la tabla N° 43 se presenta a modo ilustrativo una lista de valores máximos admisibles de dureza, calcio y magnesio en diversas normas extranjeras.

Idealmente, la norma de agua potable debería incluir dos grupos de parámetros. El primero, con carácter de control obligatorio en los servicios de abastecimiento público de agua potable, donde aparezcan los parámetros de presencia más comunes en el agua y que pueden estar asociados principalmente a problemas de salud de los consumidores. El segundo grupo, podría ser equivalente a una guía, e incluir parámetros asociados a contaminantes cuya presencia es posible o probable, pero que no se justifica su determinación rutinaria y obligatoria en todo el territorio nacional. De entre este grupo la autoridad sanitaria podría exigir para cada servicio el control de aquellos parámetros para los cuales existan antecedentes que lo justifiquen, dependiendo de las características geográficas del lugar en donde se encuentra el servicio. Por ejemplo los elementos radiactivos y las actividades radiactivas Alfa y Beta están en la práctica en una situación similar a la descrita porque, estando incorporadas en la norma de agua potable, normalmente no son exigidos en los análisis rutinarios, sin que ello obedezca a un criterio

consignado en la norma. Por otra parte, la presencia de contaminantes en zonas o sectores muy específicos del territorio nacional no justifica la inclusión de los parámetros indicativos de esa contaminación en las normas aplicables a todo el territorio nacional. Por ejemplo, sabemos que hay altos niveles de arsénico en las aguas naturales chilenas, principalmente de las regiones II, III y IV; sin embargo, debido a la inclusión del contenido de Arsénico en nuestra norma se mide reiteradamente los niveles de Arsénico en lugares donde nunca ha habido presencia detectable de este elemento, con el consiguiente desperdicio de recursos.

**Tabla N° 43. Contenidos máximos permisibles de dureza, calcio y magnesio en el agua potable (mg/l)**

País	Dureza	Calcio	Magnesio	Año	Nombre normativa
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° 84
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
República 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

## 8.- Análisis de beneficio-costos de remoción centralizada de dureza

La mayoría de los procesos de tratamiento que se utilizan para remover dureza del agua sirven también para remover otros contaminantes. Por ejemplo en la precipitación con cal, el elevado valor del pH y el empleo de coagulantes y floculantes permite remover, adicionalmente a la dureza, la turbiedad asociada a partículas en suspensión, incluidas bacterias y protozoos; este proceso es muy similar al que se utiliza en el tratamiento físico-químico convencional, sólo que con valores de pH muchos más altos. Algunas formas de dureza, como el hierro y el manganeso, se consideran contaminantes por sí mismos y al utilizar el proceso de precipitación con cal su remoción será adicional a la de calcio y magnesio. La remoción de dureza por nanofiltración permite remover adicionalmente otros iones y sales disueltas, dependiendo de las características de la membrana. La osmosis inversa permite remover prácticamente la totalidad de las sustancias disueltas contenidas en el agua, incluida la dureza, así como bacterias e incluso virus. El intercambio iónico permitirá remover otros parámetros dependiendo del grado de selectividad de la resina de intercambio que se utilice. La precipitación de dureza por calentamiento del agua es uno de los pocos procesos que, en general, remueven básicamente la dureza y no otras formas de contaminantes. El tratamiento por campos magnéticos, más que remover la dureza cambia las propiedades de los iones contenidos en el agua, evitando su precipitación.

Los múltiples efectos de los sistemas de tratamiento que permiten remover dureza dificultan la evaluación económica del ablandamiento ya que, en estricto rigor, se requiere asignar a cada uno de ellos una parte de los costos.

En la tabla N° 44 se presenta un resumen de los efectos adicionales a la remoción de dureza de los diferentes procesos de tratamiento que se utilizan para este fin.

**Tabla N° 44 Resumen de los efectos adicionales a la remoción de dureza de los diferentes procesos de tratamiento y requisitos del agua cruda**

Proceso	Efectos adicionales al ablandamiento	Requisitos del agua cruda	Disposición de residuos
Remoción con cal	Remoción de turbiedad, Fe, Mn, bacterias, protozoos.	No tiene	Lechada de cal, deshidratado
Nanofiltración	Remoción de otros iones del agua	Agua libre de sólidos	Rechazo concentrado
Osmosis inversa	Remoción de otros iones del agua, desinfección.	Agua libre de sólidos	Rechazo concentrado
Intercambio iónico	Remoción de otros iones, dependiendo de la resina de intercambio	Agua libre de sólidos	Regeneración de resinas, cloruro de sodio, dureza
Calentamiento	Desaireación, eliminación de gases y sustancias volátiles en general.	No tiene	No tiene
Campos magnéticos	No tiene otros efectos conocidos	No tiene	No tiene

La mayoría de los antecedentes de plantas de tratamiento existentes en el mundo para remover dureza a nivel centralizado aprovechan el proceso de ablandamiento del agua para remover, adicionalmente, otros contaminantes. Existen numerosas plantas de tratamiento físico químico que aprovechan la etapa de clarificación inicial para precipitar calcio y magnesio mediante el agregado de cal en exceso. Posteriormente, debido al elevado pH que se alcanza, generalmente se introduce una etapa de recarbonatación con CO<sub>2</sub>. Ejemplos de estas plantas son las que se incluye en la tabla N° 45.

**Tabla N° 45. Ejemplo de casos de ablandamiento de agua a nivel central**

Localidad	Descripción
Newark, Ohio	<p>Abastece a 47.000 personas. Se usa cal para remover la dureza y desde 1998 se agrega sulfato férrico para mejorar la remoción de otros contaminantes.</p> <p>Un subproducto del ablandamiento con cal es el lodo de cal, consistente en el 99,5% de agua y el 0,5% restante una mezcla de cal y arcilla. Una tasa promedio diaria de producción agua de 8 MGD (8 millones galones por día = 350 l/s) genera 500.000 galones de lodos de cal por día. Para almacenar y eventualmente deshidratar tan enormes cantidades de lodo de cal, se opera y mantiene 3 lagunas de acumulación. Las lagunas de cal se sitúan en 37 acres (15 Há). Las lagunas N° 1 y N° 2 fueron construidas en 1964, mientras que la laguna N° 3 fue construida a mediados de los años 90.</p> <p>Para manejar los lodos de cal desde el punto de vista reglamentario la ciudad de Newark desarrolló en 1998 un plan de manejo de lodos (PML) incluyendo el uso de los lodos generados en la planta de tratamiento de agua en tierras agrícolas. El lodo de cal deshidratado que se acumula es extraído periódicamente las lagunas y aplicado a las tierras agrícolas de propiedad los agricultores locales a través de un acuerdo contractual con el municipio. El encalado agrícola es una técnica de mejoramiento del suelo utilizada por la comunidad agrícola para aumentar el pH y para suplementar el nitrógeno para mejorar la producción de cultivos. El encargado de este programa, contratado por el municipio, opera bajo una licencia de materiales de encalado otorgada por el Departamento de Agricultura del Estado de Ohio.</p>
Kapuskasing, Ontario.	<p>Remueve dureza por precipitación con cal, seguida de recarbonatación. Capacidad: 6.566 m<sup>3</sup>/día, caudal: 6.010 m<sup>3</sup>/día; dureza tratada: 80 mg/l; agua cruda: 151-280 mg/l; objetivo de Ontario: 80-100 mg/l.</p>
Miramar, Florida.	<p>Una planta en el lado Este remueve dureza por precipitación con cal, produce 6 mgd. Planta en sector oeste utiliza tratamiento por membrana para producir 7,5 mgd (328,6 l/s)</p>
Fargo, North Dakota	<p>Usa agua dura del río Red y reduce la dureza de 17 a 7 grains/gal (291 a 120 mg/l). Su capacidad es de 30 mgd (1.314 l/s) y el caudal promedio es de 11 mgd (482 l/s).</p> <p>A continuación de la pre-sedimentación, el agua fluirá a tres líneas de ablandamiento de 10 MGD (438 l/s) cada una, donde se agregará cal, ceniza de soda y aluminato de sodio en las zonas de mezcla. De las cuencas de ablandamiento primarias, el agua circulará a las cámaras de mezcla rápida donde tendrá lugar la dispersión rápida y efectiva de los productos químicos. Los productos químicos que se alimentan a las cámaras de mezcla rápida son la ceniza de soda, polímero coagulante, sulfato férrico y dióxido de carbono. De las cámaras de mezcla rápida, el agua entra en la parte inferior de cada estanque de ablandamiento secundario a través de una tubería de 42 pulgadas centrada dentro de una zona de mezcla y floculación. El agua tratada de estas cuencas ablandamiento secundarios será recogido por vertederos de orificio sumergido y conducida a los estanques de contacto del ozono. El diseño del proceso de ablandamiento se basa en una dureza total del agua tratada de 120 miligramos por litro (mg/l) y una dureza de magnesio que no exceda de 40 mg/l.</p>
Pleasanton, California	<p>Para mejorar la gestión de la dureza y mejorar el sabor y olor del agua potable, la Zona 7 junto con Pleasanton y los otros productores de agua del Valle, completaron un extenso estudio — el Programa de Gestión de Calidad del Agua (WQMP).</p>
Santa Mónica	<p>El sistema de tratamiento utiliza filtración con carbón activado granular para tratar el agua de los tres pozos contaminados ubicados en el campo de Charnock. El proyecto también proporciona mejoras a la planta de tratamiento de agua existentes incluyendo la construcción de nuevos sistemas para la desinfección del agua potable, ablandamiento y fluoruración.</p>
Kilkenny county, Irlanda	<p>Ahora estará disponible para su uso, principalmente por la industria en Belview y también para uso general en Kilkenny sur un volumen de 3.300 m<sup>3</sup> de agua por día. Los costos del proyecto, de 13 millones de Euros, han sido financiados principalmente por IDA Ireland (€ 11 millones) y por el Consejo del Condado de Kilkenny (€ 2 millones). No hay límite superior establecido para el calcio o la dureza. Sin embargo hay un límite para "Conductividad", establecido en 2.500 unidades. El agua de Kilmacow es dura, aunque no usualmente dura. Su dureza es aproximadamente 260 miligramos por litro (mg/L), y su conductividad es de alrededor de 550 unidades (muy por debajo del límite de 2500 unidades). Recomiendan ablandar el agua a nivel domiciliario.</p>
Valencia (Wisconsin) water company	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Población atendida 113.000;</li> <li>• Suministro de agua es 28,4 MGD (1.244 l/s);</li> <li>• Dureza total ~ 350 mg/L.</li> </ul> <p>Las tecnologías estudiadas incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystalactor,</li> <li>• intercambio iónico,</li> <li>• procesos de membrana,</li> <li>• OI,</li> <li>• nanofiltración,</li> <li>• electrodiálisis</li> </ul>

Localidad	Descripción
	Ventajas del proceso (Crystalactor), <ul style="list-style-type: none"> <li>• elimina el residuos líquido (no hay rechazo / agua de lavado), • No hay deshidratación de lodos</li> <li>• reduce o elimina cloruros y sales</li> <li>• una mayor eficiencia de la OI</li> <li>• requiere de una mínima mano de obra</li> <li>• totalmente automatizado</li> <li>• pequeño impacto (ej. 8' diámetro = 2MGD= 87,6 l/s)</li> </ul>
Palm Coast, Florida	Remoción de dureza con cal, y clorohidrato de aluminio. Corrección de pH con ácido sulfúrico. Filtración. Lodo es espesado y agua recirculada y concentrado llevado a laguna para secado y disposición con camiones. 6 mgd. Hay, además, dos plantas de osmosis inversa de baja presión de 775 y 780 gpm,
Des Mines, IA	<p>La planta de Fleur Drive tiene capacidad para impulsar 100 millones de galones por día (4.381 l/s) y la planta de tratamiento en Embalse Maffitt puede impulsar 25 MGD (1.095 l/s). Se ha completado una etapa de pretratamiento en la planta de Fleur Drive en el cual se utiliza carbón en polvo con el agua del río para reducir la materia orgánica disuelta. Esta materia orgánica resulta de la descomposición natural de hojas y vegetación además de descargas de aguas residuales municipales y agrícolas. La planta de tratamiento de agua L. D. McMullen no necesita este tratamiento previo porque las aguas subterráneas poco profundas y el Lago Maffitt no tienen sedimentos para eliminar.</p> <p>Ablandamiento con cal es el próximo paso en el proceso de tratamiento para ambas plantas. Mediante el ablandamiento con cal se remueve la dureza, gérmenes y bacterias. Luego el agua se filtra a través de arena y grava para remover todas las partículas. Cuando los niveles de nitratos son inusualmente altos en la planta de Fleur, una fracción del agua recibe tratamiento para eliminación de nitrato a través de un proceso de intercambio iónico y se mezcla con el resto del agua filtrada quedando por debajo de los límites permitidos para la salud.</p>
Mount Pleasant, Michigan	Agua de pozo, aireación para oxidar fierro y remover CO <sub>2</sub> , remoción de dureza con cal, recarbonatación con CO <sub>2</sub> , filtración, costo de construcción (1995): 8,5 MUS\$, capacidad: 8 mgd, 5.139 usuarios, Q medio 2,7 mgd (118,3 l/s), Q max: 4,8 mgd (210 l/s), Tiene laguna de recepción del lodo de cal, con capacidad para 2 años. 1 mgd=43,8 l/s.
North Miami Beach, Florida.	32.800 conexiones con medidor, población base de más de 170.000 personas. Esta planta de tratamiento de agua era originalmente una planta de ablandamiento con cal, con una capacidad de producción de 16 millones de galones por día (701 l/s). Antes de la finalización del programa de expansión, aproximadamente 12 a 14 MGD (526 a 613 l/s) eran adquiridos a Departamento de agua y alcantarillado de Miami-Dade a través de 8 interconexiones para satisfacer la demanda. El proceso de tratamiento de agua incluyó ablandamiento con cal, remoción de hierro y color, seguido de estabilización, filtración y desinfección. El proceso también incluye la adición de polímeros para facilitar el proceso de ablandamiento con cal, polifosfato para el control de la corrosión y fluoruro para la salud dental. La desinfección se logra mediante cloraminas, agregando amoníaco antes del cloro. El agua tratada cumple o excede todas las regulaciones actuales, tanto locales como estatales y federales. Después de cuidadosos análisis de factibilidad y evaluaciones, la Ciudad decidió mantener proceso de ablandamiento con cal existente y ampliar la planta mediante tecnología de membranas. Previendo limitación de los recursos hídricos del tradicional acuífero Biscayne, la ciudad añadió el Acuífero Floridano, más profundo, como una fuente adicional de agua cruda. La capacidad inicial para el sistema de tratamiento de membranas es 15 MGD (657 l/s), que incluye 9 MGD (394 l/s) de nanofiltración y 6 MGD (263 l/s) de agua de tratamiento por osmosis inversa de baja presión. El sistema es ampliable a 20 MGD (876 l/s), con un tren adicional de nanofiltración de 3 MGD (131,4 l/s) y membrana osmosis inversa adicional para 2 MGD (87,6 l/s).
Wichita Falls, Texas.	<p>Cuenta con dos instalaciones de tratamiento: Jasper y Cypress.</p> <p>La planta de tratamiento de agua de Jasper fue originalmente construida en 1941 y ampliada en 1951 y otra vez en el año 2005. El tratamiento combinado de las plantas de 1951 y 2005 es de 25,8 millones de galones de agua por día (1.130 l/s).</p> <p>La planta de tratamiento de agua de Cypress fue originalmente construida en 1961 y amplió en 1987. En el año 2001 se añadió una planta osmosis inversa/Micro filtración (MF/RO). Una nueva planta convencional está en construcción y le ayudará a aumentar la capacidad de la planta tratamiento. El tratamiento combinado de las plantas de 1961 y 1987 es de 32 millones de galones de agua por día. La planta MF/RO aumentó el tratamiento diario a 44 MGD. Después de completar el proyecto 2010 la capacidad total del tratamiento es 54 MGD. La ciudad ablanda el agua potable mediante la adición de cal en el proceso, el que termina con recarbonatación con CO<sub>2</sub> para justar el pH al nivel al que se detiene el ablandamiento (de 11 a 8 o algo así).</p>

No existe un proceso de ablandamiento del agua que pueda ser considerado universal y su selección depende de las características del agua cruda y de la existencia de otros contaminantes, además de la dureza, que requieran remoción. En la tabla N° 46 se presenta una lista de los tipos de agua más característicos y el tipo de tratamiento adecuado para la remoción de dureza a nivel central, en cada caso.

**Tabla N° 46. Tipos de agua y tipo de tratamiento para la remoción de dureza a nivel central**

<b>Tipo de agua</b>	<b>Tratamiento recomendado para ablandamiento</b>
Agua de pozo, sólo dureza	Precipitación con cal
Agua de pozo con otros contaminantes (Fe, Mn, As)	Nanofiltración u osmosis inversa, según el rango de los contaminantes.
Agua superficial limpia	Precipitación con cal
Agua superficial con turbiedad baja	Precipitación con cal
Agua superficial con turbiedad, media o alta	Precipitación con cal

## 8.1.- Costo de tratamiento centralizado

### 8.1.1.- Precipitación con cal

Según lo que indica la literatura, la precipitación con cal debería ser el sistema más barato de tratamiento de la dureza a gran escala. Como se establece más arriba, un sistema de tratamiento por precipitación con cal removerá no sólo la dureza, sino la turbiedad del agua, por lo que el sistema es ideal cuando se trata de aguas superficiales que, además de presentar turbiedad, contienen dureza. Un sistema de precipitación con cal es similar al tratamiento físico químico convencional pero tiene como procesos adicionales la dosificación de la cal, la recarbonatación para restituir el pH y el manejo de lodos. El volumen de éstos es superior a los generados por un sistema convencional porque a la precipitación de los sólidos suspendidos se suma la precipitación de carbonato de calcio tanto en la etapa de remoción de dureza como en la etapa de recarbonatación. Las etapas de un sistema de remoción de dureza por precipitación con cal son las siguientes:

- Dosificación de cal, coagulantes y floculantes
- Floculación
- Decantación primaria
- Recarbonatación
- Decantación secundaria
- Desinfección

Los costos operacionales son similares a los de un sistema de tratamiento físico químico convencional excepto por la adición de cal, la adición de dióxido de carbono y el manejo y disposición de grandes cantidades de lodo.

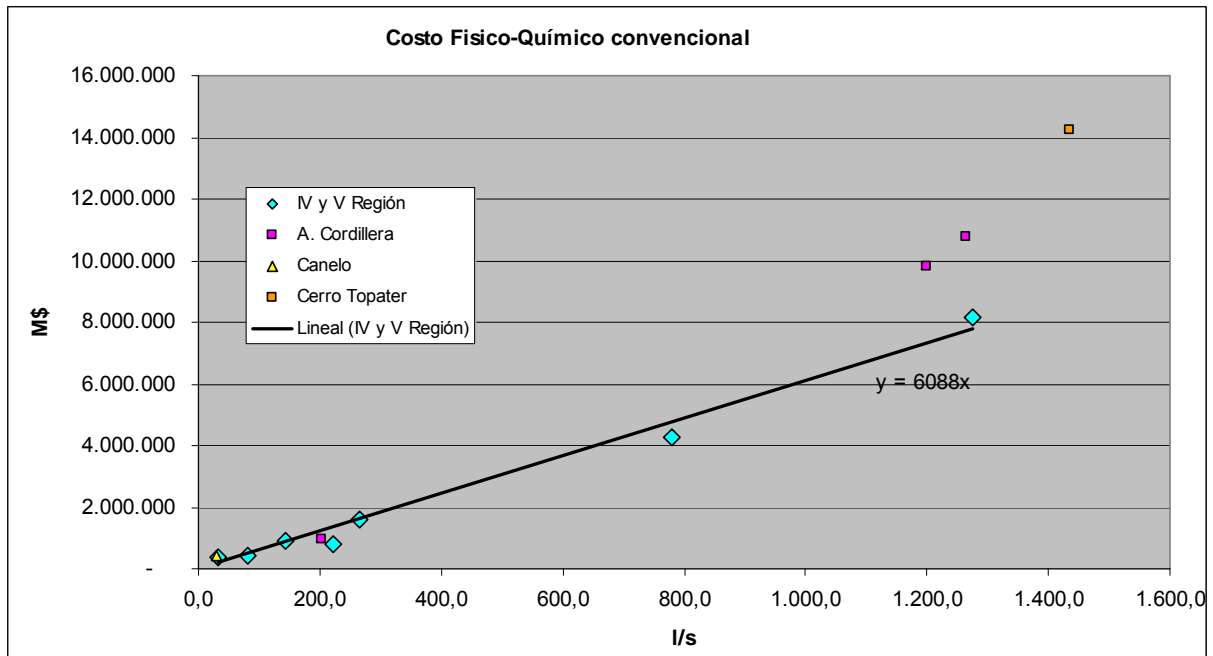
En Chile no se cuenta con sistemas de remoción de dureza por precipitación con cal a nivel centralizado, por lo que resulta difícil obtener costos realistas para este tratamiento. Por ello, se ha estimado el costo de este tipo de tratamiento a partir de la información disponible en la Superintendencia de Servicios Sanitarios para sistemas de tratamiento físico químico convencionales que se encuentra en los archivos de los últimos procesos tarifarios. Estos costos se complementan con costos adicionales para estimar la dosificación con cal, la recarbonatación, la decantación secundaria y la disposición extra de lodos.

### Costo de inversión

La información disponible de costo de inversión de sistemas de tratamiento físico químico convencional, en el rango de interés, de 1.000 a 100.000 habitantes entre las regiones I y Metropolitana, se circunscribe básicamente a la IV y V regiones. En la II Región hay plantas de tratamiento físico químico pero que tratan aguas con baja turbiedad pero con el propósito de remover arsénico y en la Región Metropolitana hay plantas de tratamiento que están fuera del rango de caudales de interés, con excepción de El Canelo de Aguas Andinas, o que deben abatir altos valores de turbiedad, como Padre Hurtado y San Enrique, pertenecientes a Aguas Cordillera, por lo que su costo es mayor al normal. En las regiones ubicadas al sur de la Región Metropolitana existen plantas de tratamiento físico químico pero no se ha considerado su información de costos por corresponder a realidades geográficas muy diferentes a aquellas de la zona norte, de mayor interés para la remoción de dureza.

En la figura N° 17 se presenta el costo de inversión, en miles de \$ de diciembre de 2014, de plantas de tratamiento físico químico convencional entre la II Región y Metropolitana, calculadas mediante el sistema de modelación y evaluación de costos de la SISS. Este sistema considera básicamente dos variables, el caudal de diseño y la turbiedad del agua cruda, pero la primera variable es mucho más relevante que la segunda, razón por la que se obtiene una buena correlación entre el costo en función sólo del caudal de diseño.

**Fig. N° 17. Costo de inversión (M\$) de plantas de tratamiento físico químico convencional entre la II Región y Metropolitana**



En la figura se observa que las plantas de tratamiento de Cerro Topater, en la II Región, así como dos plantas de tratamiento de Aguas Cordillera (Padre Hurtado y San Enrique) están fuera de la línea de tendencia de los costos de inversión de las plantas ubicadas en las IV y V regiones. El costo de las plantas de tratamiento de El Canelo (Aguas Andinas) y El Arrayán (Aguas Cordillera) si bien se encuentran dentro de la tendencia general de las plantas de las regiones IV y V, el costo de inversión por

m<sup>3</sup> de agua producida resulta muy superior en la planta El Canelo que en el resto de las plantas consideradas.

La línea de tendencia por ajuste de mínimos cuadrados da una constante negativa por lo que la ecuación adoptada, que se muestra en el gráfico, corresponde a la línea forzada a pasar por el punto (0,0). Las diferencias en torno a la línea de tendencia se producen por las diferencias en la turbiedad del agua cruda.

En la tabla N° 47 se presenta la información básica que permite construir la curva de costos de la figura N° 10.1.

**Tabla 47.- Información de costos de inversión plantas de tratamiento convencional**

Región	Planta	Obras civiles	Tuberías y accesorios.	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas	Total (M\$)	Caudal de Diseño (l/s)	Turbiedad (UNT)
II	Cerro Topáter	7.768.657	462.984	5.425.065	564.599	14.221.305	1.435,0	3,6
IV	Las Rojas	247.017	38.055	72.748	16.582	374.622	80,3	110
V	Putendo	216.790	13.752	64.377	12.449	307.369	31,8	489
	La Cruz	559.354	78.409	139.166	25.533	802.462	143,0	660,6
	Concón	473.472	75.909	119.635	19.946	688.961	220,9	50
	El Sauce	999.972	152.170	227.043	32.882	1.412.066	264,3	479
	San Juan	2.604.189	454.540	575.352	80.905	3.714.987	779,4	1000
	Las Vegas	4.973.988	868.170	1.098.920	154.528	7.095.607	1.275,5	700,7
<b>Metropolitana</b>	<b>A. Andinas</b>							
	Canelo	238.682	15.238	158.861	11.942	424.723	29,3	500
	<b>A. Cordillera</b>							
	El Arrayán	594.120	92.085	257.971	21.969	966.145	202,0	500
	P. Hurtado	149.100,57	21.945,60	244.549,97	24.729,16	9.816.625	1.200,0	500
	San Enrique	158.120,31	19.108,47	280.064,45	24.761,43	10.746.941	1.263,0	??

Fuente: SISS. Procesos tarifarios.

La información de costos de inversión contenida en la tabla N° 47 corresponde a diferentes años y es necesario uniformar los costos, de manera que éstos sean comparables. En la tabla N° 48 se presenta las vidas útiles contables de los diversos componentes de las plantas de tratamiento y la tasa de interés utilizada para estimar el costo de inversión anual, todas basadas en los mismos supuestos utilizados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios en la estimación de costos de inversión para las plantas de tratamiento en los procesos tarifarios, lo que permite llevar el costo de inversión a un valor anual y, aplicando una estimación de la producción de agua, permite calcular un costo por m<sup>3</sup>. Para estimar la producción anual se utilizó el caudal de diseño de las plantas de tratamiento.

**Tabla N° 48. Supuestos para estimar valor anual**

Variable	Valor asumido
Vidas útiles contables (años)	
Obras civiles	26
Tuberías y accesorios	16
Equipos electromecánicos	5
Instalaciones eléctricas	6
Tasa de interés	7%

Fuente: SISS. Procesos tarifarios.

El valor anual del costo de inversión se calcula mediante la siguiente fórmula

$$Anualidad = Inversión \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

En que *Anualidad* es el monto anual

*Inversión* es el valor presente de la inversión

*i* es la tasa de interés y

*n* es el número de períodos.

En la tabla N° 49 se presenta la información de costos de inversión anualizados para las plantas seleccionadas llevadas a valores de miles de pesos (M\$) de diciembre de 2014 y el cálculo del costo de inversión en términos de \$/m<sup>3</sup> de agua producida.

**Tabla N° 49. Costo de inversión para plantas físico químicas seleccionadas (M\$/año)**

Planta	Obras civiles	Tuberías y accesorios	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas	Total (M\$)	Producción anual estimada (m <sup>3</sup> )	\$/m <sup>3</sup>
<b>IV Región</b>							
Las Rojas	24.563	4.737	20.864	4.091	54.254	2.532.341	21,4
<b>V Región</b>							
Putendo	21.045	1.671	18.024	2.998	43.739	1.002.845	43,6
La Cruz	54.299	9.528	38.964	6.149	108.941	4.509.648	24,2
Concón	45.962	9.225	33.495	4.804	93.486	6.966.302	13,4
El Sauce	97.072	18.492	63.568	7.919	187.051	8.334.965	22,4
San Juan	252.800	55.237	161.088	19.485	488.610	24.579.158	19,9
Las Vegas	482.846	105.502	307.677	37.217	933.242	40.224.168	23,2
<b>Metropolitana</b>							
El Arrayán	57.674	11.190	72.227	5.291	146.382	6.370.272	23,0
Porcentaje	54,3	11,3	37,5	4,6	100,0	<b>Costo promedio</b>	<b>23,9</b>

Nota: Costos corresponden a diciembre de 2014

Los costos de inversión estimados en la tabla 10.6 corresponden a las plantas de tratamiento de agua potable físico-químicas convencionales seleccionadas. Las plantas de ablandamiento por precipitación con cal son similares, pero además de los procesos considerados en las plantas convencionales incluyen

la dosificación de cal, la recarbonatación y el manejo y disposición de lodos. Para incluir estos costos, se considerará para éstos un valor equivalente a un 30% del costo original, es decir, se estimará un costo de inversión de  $23,9 \cdot 1,3 = 31,1 \text{ \$/m}^3$ .

### Costos operacionales de producción

En la información contenida en los archivos de los procesos tarifarios de la SISS se cuenta con estimaciones de costos de operación pero a nivel de empresas, por lo que no resulta fácil extrapolarla a nivel de plantas de tratamiento. Por ello, para efectos de estimar los costos operacionales, se ha hecho uso de la información de las regiones IV y V, por contar principalmente con plantas de tratamiento físico químico convencional, las mismas que han sido utilizadas para estimar los costos de inversión. En la tabla N° 50 se presenta la información de costos operacionales de las plantas convencionales extraída de los documentos de los procesos tarifarios de la SISS, llevados a diciembre de 2014. Los costos que aparecen en la tabla N° 50 corresponden a los costos estrictamente operacionales y no incluyen el resto de los gastos generales de las empresas.

**Tabla N° 50. Costos operacionales de las plantas convencionales a dic. 2014**

Empresa	M\$/año (1)	m <sup>3</sup> /año (2)	\$/m <sup>3</sup>	Fecha de la información	\$/m <sup>3</sup> a Dic. 2014
Aguas del Altiplano (I)	4.384.202	29.675.461	147,7	Dic. 2011	163,2
Aguas Antofagasta (II)	4.668.199	30.550.930	152,8	Dic. 2009	179,7
Aguas Chañar (III)	897.773	14.979.674	59,9	Dic. 2008	68,8
Aguas del Valle (IV)	1.758.088	31.114.531	56,5	Dic. 2008	66,4
ESVAL (V)	3.709.480	91.740.054	40,4	Dic. 2008	46,4
<b>Promedio*</b>					<b>56,4</b>

(1) Fuente: SISS. Tablas A.\$ 50. Anexos 7. Procesos tarifarios, llevados a diciembre de 2014

(2) Capítulo 3. SISS. Informes de procesos tarifarios

\*Aguas del Valle y Esval

En la tabla N° 50 se observa que los costos de producción de agua en las regiones I y II resultan significativamente superiores a los de las regiones IV y V, debido a que en las primeras existen muchas plantas por osmosis inversa, con altos costos operacionales en términos de energía, recambio de membranas y reactivos anti-incrustantes.

El costo operacional de  $56,4 \text{ \$/m}^3$  adoptado de los datos de la tabla N° 50, corresponde a una estimación de los costos de las plantas físico químicas convencionales y no incluye los costos adicionales asociados a la dosificación de cal y otros reactivos (principalmente cenizas de soda,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), recarbonatación con  $\text{CO}_2$  y disposición de lodos.

En la tabla N° 51 se presenta una estimación de los costos asociados al consumo de reactivos.

**Tabla N° 51. Estimación del agregado de reactivos químicos**

Hipótesis de cálculo		Estimación de costos			
Calidad agua cruda	mg/l	Item	Valor (1)	Unidad	\$/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	25	Dosis de cal requerida	542	mg/l	
Dureza de C	600	Costo de la cal	36,7	\$/kilo	19,9
Mg	50	Dosis de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	102	mg/l	
Dureza no C	95	Costo de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	275	\$/kilo	27,9
Dureza efluente	100	Dosis de CO <sub>2</sub>	22	mg/l	
		Costo del CO <sub>2</sub>	1.821	\$/kilo	40,0
				Total	<b>87,9</b>

(1) Precios de reactivos a diciembre de 2014

**Disposición de lodos:**

Para una dosis de cal de 542 mg/l, utilizada en los cálculos de costo de reactivos, resulta una producción de CaCO<sub>3</sub> de 732 mg/l. para una humedad de los lodos de 99%, este valor equivale a una producción de lodos, principalmente lechada de carbonato de calcio, de 73 litros/m<sup>3</sup>.

**Resumen**

En la tabla N° 52 se presenta un resumen de los costos de inversión y operación unitarios asociados a las plantas de tratamiento de dureza por precipitación con cal. A los costos de operación adicionales se ha sumado un 15 % para incluir otros costos operacionales con considerados, como costo de energía, disposición de lodos, etc., totalizando un costo de 188,6 \$/m<sup>3</sup>.

**Tabla N° 52. Resumen de costos de precipitación con cal**

Item	\$/m <sup>3</sup>
Inversión	31,1
Operación planta convencional	56,4
Operación adicional	
Productos químicos	87,9
Otros gastos (energía, disposición de lodos, etc.)	13,2
Sub-total	101,1
Costo total	<b>188,6</b>

**8.1.2.- Nanofiltración - Osmosis inversa**

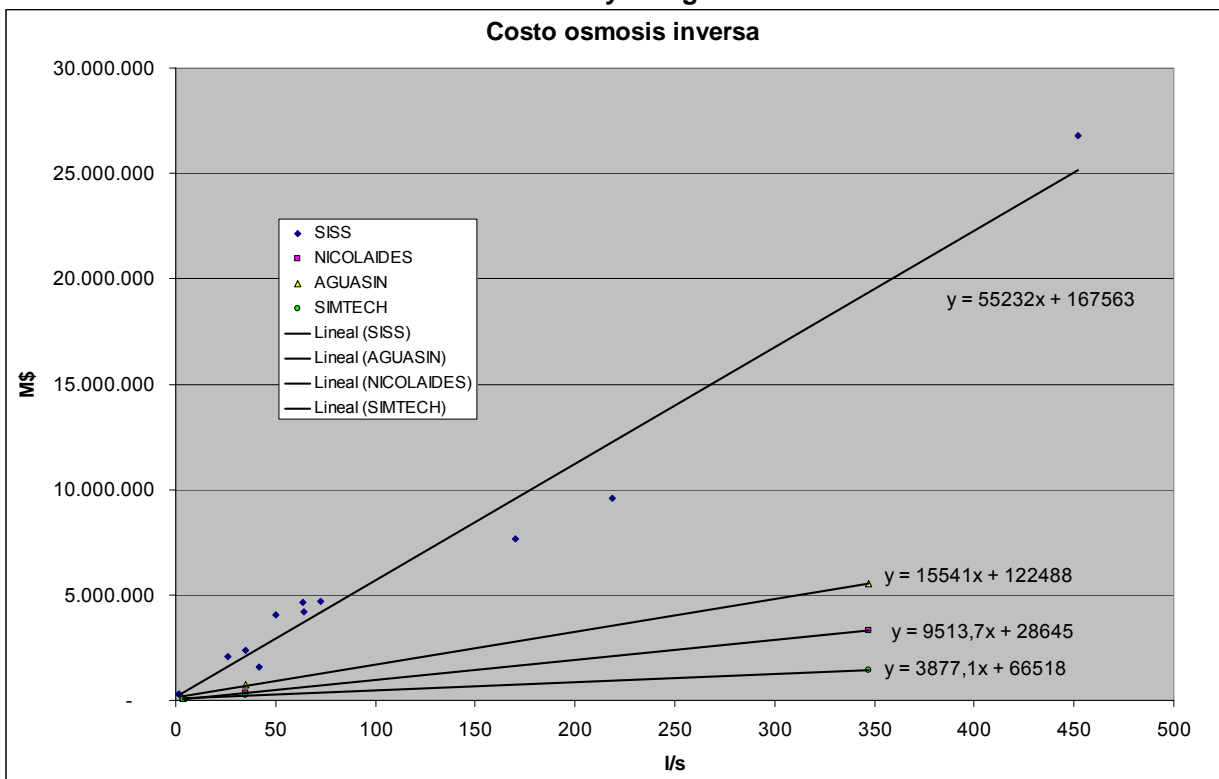
Los costos asociados a las tecnologías de nanofiltración y osmosis inversa son similares, aunque la nanofiltración tiene un costo de inversión levemente mayor y un menor costo de operación, por trabajar con presiones inferiores. Por otra parte, la nanofiltración tiene una menor capacidad de remoción de sustancias y elementos disueltos. Los proveedores de equipos afirman que es difícil establecer las diferencias sin contar con un proyecto para un caso específico, por lo que para efectos de las estimaciones de costos se asumirá que la nanofiltración y la osmosis inversa son equivalentes.

Chile cuenta con numerosas plantas de tratamiento por la tecnología de osmosis inversa, especialmente entre la I y II regiones. La mayoría de estas plantas se han instalado para remover la salinidad del agua en forma de cloruros o el arsénico. Sin embargo, estas plantas también remueven prácticamente toda la dureza del agua.

### Costo de inversión

En la figura N° 18 se presenta los costos de inversión de plantas de tratamiento por osmosis inversa, en miles de \$ de diciembre de 2014, entre la I y la II regiones, también calculados mediante el sistema de modelación y evaluación de costos de la SISS. En este sistema, la principal variable es el caudal de diseño, influyendo adicionalmente la concentración de sales en la definición del porcentaje de rechazo. También se presenta, a modo de comparación, costos entregados por las empresas SIMTECH, NICOLAIDES y AGUASIN, para diferentes caudales de diseño, junto con sus respectivas curvas de ajuste lineal. Los costos entregados por estas empresas son significativamente inferiores a los entregados por las planillas de los procesos tarifarios porque sólo consideran el equipamiento básico, con diferentes grados de acabado, pero no consideran otros costos importantes asociados a la inversión, tales como el terreno, edificaciones, equipamiento general, etc.

**Fig. N° 18. Costo de inversión (M\$ de dic. 2014) de plantas de tratamiento por osmosis inversa entre la I y III regiones**



Los valores del monto de inversión de las plantas de osmosis inversa entre la I y III regiones correlacionan bastante bien con el caudal de diseño. La línea de tendencia por ajuste de mínimos cuadrados da una constante positiva en este caso y las diferencias en torno a la línea de tendencia se producen por las diferencias en la salinidad del agua cruda.

El costo de inversión resulta ser proporcional al caudal de diseño más una constante, de acuerdo a la expresión siguiente:

$$\text{Costo Inversión (M\$)} = 55.232 \cdot \text{Caudal de diseño (l/s)} + 167.563$$

En la tabla N° 53 se presenta los costos de inversión de las diferentes plantas incluidas en los estudios tarifarios de la SISS utilizados para generar el gráfico de la figura N° 10.2, llevados a diciembre de 2014, y en la tabla N° 54 los costos llevados a valor anual considerando las mismas vidas útiles y tasa de interés contenidas en la tabla N° 48. Utilizando el caudal de diseño de las plantas de tratamiento para estimar la producción anual de éstas, resulta un costo de inversión unitario de 514,2 \$/m<sup>3</sup>.

**Tabla N° 53. Costos de inversión plantas de osmosis inversa**

Localidad	Planta	Caudal de diseño (l/s)	Obras civiles	Tuberías y accesorios	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas	Total (M\$)
<b>I Región</b>	El Carmelo	50	2.649.491	35.795	1.159.183	188.270	4.032.740
	Arica-Lluta	170	2.439.423	-	3.927.139	1.278.054	7.644.615
	Arica-Pago de Gómez	42	346.265	35.795	1.032.321	154.226	1.568.607
	La Tirana	1,7	101.484	11.233	164.926	34.577	312.222
	Huara	1,6	97.905	11.233	162.337	34.577	306.052
<b>II Región</b>	Taltal	35,2	399.078	14.324	1.806.228	166.351	2.385.981
	Tocopilla	72,7	664.549	65.838	3.741.540	210.669	4.682.597
	La Chimba	452,0	2.691.900	262.432	23.099.580	718.869	26.772.780
<b>III Región</b>	Diego de Almagro-El Salado	26,2	30.532	-	1.771.466	270.557	2.072.554
	Copiapó-Tierra Amarilla (S3)	63,8	467.130	913.862	3.080.550	170.237	4.631.778
	Caldera-Chañaral	64,2	467.130	469.817	3.080.550	170.237	4.187.733
	Copiapó-Tierra Amarilla (S4)	218,6	965.666	-	8.382.864	232.121	9.580.652

Fuente: SISS, procesos tarifarios.

**Tabla N° 54. Valor anual Del costo de inversión (M\$)**

Localidad	Planta	Producción (m <sup>3</sup> /año)	Obras civiles	Tuberías y accesorios	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas	Total (M\$)	\$/m <sup>3</sup>
<b>I Región</b>	El Carmelo	1.741.812	224.044	3.789	282.714	39.498	550.045	349
	Arica-Lluta	5.922.161	206.280	0	957.793	268.130	1.432.203	267
	Arica-Pago de Gómez	1.463.122	29.280	3.789	251.773	32.356	317.199	239
	La Tirana	59.222	8.582	1.189	40.224	7.254	57.249	1.068
	Huara	55.738	8.279	1.189	39.593	7.254	56.315	1.116
<b>II Región</b>	Taltal	1.305.347	33.746	1.516	440.522	34.900	510.685	460
	Tocopilla	2.695.988	56.195	6.970	912.527	44.198	1.019.889	445
	La Chimba	16.761.849	227.630	27.780	5.633.773	150.816	6.039.998	424
<b>III Región</b>	Diego de Almagro-El Salado	948.510	2.582	0	432.044	56.762	491.388	595
	Copiapó-Tierra Amarilla (S3)	2.309.730	39.501	96.739	751.317	35.715	923.273	459
	Caldera-Chañaral	2.324.211	39.501	49.734	751.317	35.715	876.267	433
	Copiapó-Tierra Amarilla (S4)	7.913.903	81.658	0	2.044.503	48.698	2.174.858	315
		Porcentaje	7	1	87	5	Costo promedio	<b>514,2</b>

Fuente: SISS, procesos tarifarios y elaboración propia

### Costos operacionales de producción

La información de costos operacionales de producción contenida en las planillas de cálculo de la SISS de los procesos tarifarios permite calcular el costo de la producción a nivel de empresa, pero no por tipo de planta de tratamiento. Por ello, se estiman los costos operacionales a través de los principales ítemes de este costo que son la energía y el suministro de productos químicos, principalmente anti-incrustantes. Un costo de operación importante es el recambio de membranas, cada cinco años aproximadamente, pero este costo ya está incluido en el valor anualizado del equipamiento que se presenta en la tabla N° 54.

En la tabla N° 55 se presenta una estimación del costo de la energía basada en estimaciones del consumo unitario de energía disponibles para Aguas del Altiplano y el costo actual (diciembre de 2014) de la energía eléctrica, según la tarifa AT 3, que es la comúnmente usada para los equipos eléctricos de esta naturaleza.

**Tabla N° 55. Estimación de consumo unitario de energía y costo por m<sup>3</sup> para Aguas del Altiplano**

Planta de tratamiento	Potencia (KW)	Energía (KWH/año)	Caudal (l/s)	KWH/m <sup>3</sup>	\$/m <sup>3</sup>
Lluta	610	5.130.100	170	0,957	49,8
Pago de Gómez-Abatidora	453	3.809.730	156	0,774	40,3
El Carmelo	126	1.061.474	27,3	1,233	64,1
<b>Promedio</b>					<b>51,4</b>
Precio energía (AT3):	45-59		\$/KWH		

Fuente: Proceso tarifario SISS. Aguas del Altiplano

En la tabla N° 56 se presenta una estimación del gasto unitario de productos químicos, también basada en datos reales de consumo anual, llevados a diciembre de 2014, y una estimación del volumen producido de acuerdo al caudal de diseño de las plantas, para Aguas del Altiplano.

**Tabla N° 56. Gasto Productos Químicos por localidad**

Localidad	Costo anual consumo productos químicos (\$)	m <sup>3</sup> /año	\$/m <sup>3</sup>
Arica	277.177.098	6.685.632	41,5
La Tirana	3.850.122	53.611	71,8
Huara	2.807.797	50.458	55,6
		<b>Promedio</b>	<b>56,3</b>

Fuente: Proceso tarifario SISS. Aguas del Altiplano

Los gastos en reactivos químicos y en energía eléctrica no son los únicos gastos operacionales asociados a la producción de agua por osmosis inversa, faltando incluir los costos directos de los operadores, otros consumos de energía, etc. Para éstos se ha supuesto que constituyen un valor del 50% adicional a los gastos de energía y reactivos, valores que se presentan resumidamente en la tabla N° 57.

Tabla N° 57. Resumen de costos de osmosis inversa

Item	\$/m <sup>3</sup>
Inversión	514,2
Operación	
Energía	51,4
Productos químicos	56,3
Otros gastos	53,8
Sub-total	161,5
Costo total	<b>675,7</b>

## 8.2.- Ablandamiento a nivel domiciliario

El ablandamiento a nivel domiciliario se hace normalmente mediante la tecnología de intercambio iónico mediante el empleo de resinas sintéticas, igual como se hace normalmente a nivel industrial, debido a que este sistema presenta un diseño simple y facilidades operacionales que hacen que pueda ser operado sin tener mayores conocimientos técnicos.

Debido a la pequeña escala de la producción del tratamiento a nivel domiciliario resultan costos unitarios muy elevados, aunque el gasto mensual no resulta excesivamente alto.

Los principales costos asociados al ablandamiento a nivel domiciliario son la inversión inicial en los equipos y los costos operacionales asociados al cambio de resinas, consumo de energía, consumo de sal y de agua de regeneración.

### Costo de inversión

Existen diversos modelos de ablandadores con precios que van desde los \$ 600.000 hasta más un millón de pesos. Al costo del equipo se debe sumar el de su instalación, cuyo costo se ha estimado en \$200.000. Sin embargo, la instalación tiene una vida útil muy superior a la del equipo de ablandamiento, por lo que su incidencia en el costo unitario es muy inferior. Se ha considerado una vida útil de la instalación de 10 años, para tomar en cuenta eventuales reparaciones.

El costo unitario asociado a la inversión es dependiente de la cantidad de agua ablandada, ya mientras mayor es ésta resulta un costo unitario menor. Como contrapartida, es esperable que un equipo que se utiliza mucho tendrá una vida útil inferior. En la tabla N° 58 se presenta una estimación del consumo mensual por cliente para las empresas de las regiones I a la Metropolitana, cuyo valor promedio es de 16,74 m<sup>3</sup>/mes, valor que será usado en las estimaciones.

En la tabla N° 59 se presenta una estimación del costo unitario asociado a la inversión de un sistema de ablandamiento a nivel domiciliario y su instalación, bajo las hipótesis enunciadas, resultando un valor de 785 \$/m<sup>3</sup>.

**Tabla 58. Consumo por cliente por empresa s/último proceso tarifario**

Empresa	m <sup>3</sup> /cliente por mes	Nº de clientes
Aguas del Altiplano	17,35	142.555
Aguas Antofagasta	17,84	142.679
Aguas Chañar	15,89	86.251
Aguas del Valle	14,08	198.385
EsvaI	14,70	518.467
Aguas Andinas	20,60	1.654.652
Promedio	16,74	
Promedio ponderado	18,55	

Fuente: SISS. Procesos tarifarios

**Tabla Nº 59. Estimación del costo de inversión del ablandamiento domiciliario**

Ítem	Valor	Unidad
Costo equipo	600.000	\$
Vida útil	5	años
Valor anual	146.334	\$/año
Instalación	200.000	\$
Vida útil	10	años
Valor anual	28.476	\$/año
Consumo medio/cliente	18,55	m <sup>3</sup> /(cliente·año)
Producción anual	223	m <sup>3</sup> /año
<b>Costo inversión</b>	<b>785</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>

### Costos operacionales

Los principales costos operacionales del ablandamiento a nivel domiciliario son el costo del recambio de resina de intercambio iónico, el costo del agua utilizada en su regeneración, el costo de la energía y el costo del cloruro de sodio utilizado también para regenerar la resina. En la tabla Nº 60 se presenta una estimación de los costos operacionales del ablandamiento del agua a nivel domiciliario.

El costo del recambio de la resina se estima en unos \$ 60.000 una vez al año. El agua utilizada para la regeneración se estima entre 15 y 20% del agua producida, tomándose el primer valor para que la estimación se conservadora. Para el costo de energía se asumió un consumo permanente de de 100 watts y para el el costo de sal usada en la regeneración se asumió una concentración de 100 gr/litro en el agua de regeneración (salmuera con 1/3 de la concentración de saturación). Resulta un costo de operación unitario de 424 \$/m<sup>3</sup>.

**Tabla N° 60. Estimación de los costos operacionales del ablandamiento del agua a nivel domiciliario**

Ítem	Valor	Unidad
<b>Resina:</b>		
Carga de	60.000	\$/año
Producción anual	22,6	m <sup>3</sup> /año
	270	\$/m <sup>3</sup>
<b>Agua de regeneración:</b>		
15% de la producción	2,78	m <sup>3</sup> /mes
Costo agua	769	\$/m <sup>3</sup> consumido
	2.139	\$/mes
	115	\$/m <sup>3</sup>
<b>Energía:</b>		
	88	KWH/año
Valor KWH	90	\$/KWH
	7.919	\$/año
	36	\$/m <sup>3</sup>
<b>Cloruro de sodio:</b>		
Concentración sal muera	100	gr/l
Consumo de sal	0,28	kilos sal/mes
Precio sal	220	\$/kg
Costo de sal	3,3	\$/m <sup>3</sup>
<b>Total</b>	<b>424</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>

### Resumen

En la tabla N° 61 se presenta un resumen de la evaluación de costos del ablandamiento a nivel domiciliario, resultando un costo de \$ 1.209/m<sup>3</sup>.

**Tabla N° 61. Resumen del costo de ablandamiento a nivel domiciliario**

Item	\$/m <sup>3</sup>
Costo inversión	785
Costo operación	424
<b>Costo total</b>	<b>1.209</b>

### 8.3.- Resumen de costos

En la tabla N° 62 se presenta un resumen final de los costos evaluados. Se observa que la precipitación con cal es lejos el sistema más económico, lo que justifica que sea el más utilizado a nivel central en el mundo cuando el único objetivo del tratamiento es el ablandamiento. El costo unitario del tratamiento por osmosis inversa es aproximadamente 3,6 veces más caro que la precipitación con cal, pero se justifica cuando el ablandamiento es un efecto complementario a la remoción de sales o determinados elementos que están en exceso en el agua y requieren remoción; sin embargo, la aplicación de osmosis inversa con el único propósito de remover la dureza del agua no se justifica. Finalmente, el ablandamiento a nivel domiciliario resulta ser el sistema más caro de todos, con un costo unitario de aproximadamente 6,4 veces el de la precipitación con cal.

En la misma tabla se incluyó una columna con el costo anual promedio por cliente calculado sobre la base de un consumo de 18,55 m<sup>3</sup>/(cliente·mes). Este costo anual promedio representa el beneficio mínimo que debería percibir un cliente por efecto del ablandamiento centralizado para que éste se pudiera justificar.

**Tabla N° 62. Resumen de costos unitarios de tratamiento (\$/m<sup>3</sup>)**

Tipo de tratamiento	Inversión	Operación	Total	Costo anual promedio por cliente (\$)
Precipitación con cal	31	158	189	41.980
Osmosis inversa	514	162	676	150.431
Doméstico	785	424	1.209	269.137

Los beneficios del ablandamiento centralizado corresponden básicamente a evitar la formación de sarro o incrustaciones en el sistema de distribución domiciliario de agua, principalmente en calentadores de agua y grifería. Los beneficios en salud son prácticamente inexistentes, o al menos son sujetos de controversia, existiendo más argumentos que propician el consumo de agua dura que lo contrario.

Antiguamente el empleo de agua blanda era importante para reducir el uso de jabón, especialmente en el lavado de ropa. Pero actualmente, con el uso de detergentes sintéticos, este efecto se reduce principalmente al jabón utilizado en el aseo personal.

El consumo de agua blanda tiene beneficios relacionados con la disminución de incrustaciones pero puede tener el efecto contrario, como por ejemplo, un incremento de la capacidad de corrosión del agua suministrada, con lo cual se puede presentar un deterioro irreparable de los equipos domésticos, o bien, se puede incrementar la disolución de elementos metálicos en el agua. Aún así, en algunos sectores hay personas en Chile que optan por ablandar el agua a nivel domiciliario debido a que prefieren el consumo de agua más blanda.

Una dificultad para evaluar el beneficio asociado al ablandamiento centralizado radica en que, al parecer, las percepciones de la población con relación a la dureza del agua pueden ser muy diferentes entre unas y otras personas, así como la disposición que éstas tienen a afrontar y solucionar el problema, cuando es considerado como tal. Por ejemplo, llama la atención que la mayor cantidad de reclamos por la dureza del agua o la formación de sarro ocurren en las regiones VI y VIII, que no son las que tienen los principales problemas de dureza. Es posible que esto se explique por la existencia de localidades que concentran altas concentraciones de dureza. En la primera región, si bien existen abastecimientos en que el agua cruda tiene más de 1.000 mg/l de dureza, no se registran reclamos por este fenómeno, lo que se puede explicar porque el actual tratamiento mediante osmosis inversa minimiza o elimina los problemas a nivel domiciliario.

De las regiones ubicadas al norte de la Metropolitana, la IV Región es la que aparece con mayor cantidad de reclamos relativa a la población, con sólo 72 reclamos por millón de habitantes, entre enero de 2011 y septiembre de 2013, a pesar de que cuenta con 3 localidades con dureza superior a 600 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  y 2 localidades con dureza superior a 400 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . Si se considera que sólo 72 clientes a nivel regional quisieran contar con agua más blanda, no hay forma de poder justificar el tratamiento centralizado, a menos que estos 72 clientes representen el sentir de una comunidad mucho mayor.

En algunos lugares, especialmente de elevado nivel socioeconómico ubicados al nororiente de Santiago, es posible conseguir un servicio de limpieza de incrustaciones en las cañerías de agua caliente, cuyo costo es del orden de \$250.000 y que se debe repetir cada 2 o 3 años, dependiendo de la dureza del agua<sup>37</sup>. Adicionalmente, se ofrece la instalación de un dispositivo electromagnético con un bajo consumo de energía eléctrica, del orden de 0,35 W, y con un costo de \$180.000, que dura entre 5 y 8 años. En las tablas N° 63 y 64 se estima el costo anual asociado al servicio de limpieza de cañerías y en la tabla N° 64 el costo asociado al dispositivo electromagnético, para las mismas condiciones utilizadas para calcular los costos anuales del tratamiento.

**Tabla N° 63. Estimación de costos limpieza de cañerías**

Ítem	Valor	Unidades
Tasa de interés	7	%
Costo del servicio	250.000	\$
duración	2	años
Costo anual equivalente	138.273	\$/año

**Tabla N° 64. Estimación de costos equipo electromagnético**

Ítem	Valor	Unidades
Valor del equipo	180.000	\$
Vida útil	5	años
Costo anual equivalente	43.900	\$/año
<b>Consumo energía</b>		
Potencia	0,35	W
Consumo anual	3,07	KWH/año
Costo KWH	90	\$/KWH
Costo energía	275,9	\$/año
Costo total	44.176	\$/año

Para el consumo de 18,55 m<sup>3</sup>/cliente·mes, el costo de la limpieza de cañerías de agua caliente resulta superior al costo del ablandamiento por precipitación con cal, igualándose ambos para un consumo medio mensual de 61 m<sup>3</sup>. El costo del uso de dispositivo electromagnético resulta levemente superior al de la remoción central de dureza por precipitación con cal, igualándose para 19,48 m<sup>3</sup>/cliente·mes. La forma más eficiente de mantener el sistema es hacer una limpieza de la red de agua caliente aproximadamente cada 10 años y utilizar en forma permanente el dispositivo electromagnético, con lo que resulta un costo anual de 80.000 \$/año. Este costo se iguala al costo de la precipitación con cal para un consumo de agua de 422 m<sup>3</sup>/cliente·año, o bien, 37 m<sup>3</sup>/cliente·mes.

<sup>37</sup> <http://WIMIV.dongasfiter.cl/sarro.php>

Nótese que los sistemas electromagnéticos no reducen la dureza del agua, sino evitan o reducen su precipitación en forma de sarro, pero no eviten que se produzcan los otros efectos indeseables como la precipitación de jabones, efectos en el sabor, lavado de ropa, etc.

En términos medios, el ablandamiento centralizado con cal presenta ventajas tanto económicas como desde el punto de vista de la facilidad de aplicación en relación a las alternativas domiciliarias. Sin embargo, al parecer los efectos indeseables de la dureza no son percibidos igualmente por toda la población, existiendo una componente de subjetividad importante. El ablandamiento centralizado del agua potable se justificaría sólo en localidades que tienen un nivel de dureza que objetivamente causa inconvenientes a los usuarios, posiblemente a niveles superiores a 300 mg/l, y que éstos los perciben como tal y están dispuestos a pagar por su costo. Una posible forma de aportar antecedentes que ayuden a la toma de decisión consiste en entregar un cuestionario a los clientes de un servicio, explicando claramente las ventajas de disponer de agua blanda y el costo que ello significaría.

El ablandamiento mediante osmosis inversa o nanofiltración, por su alto costo, se justifica sólo si además de ablandar el agua cumple un segundo rol necesario, como por ejemplo reducir el contenido salino del agua o reducir la concentración de algún elemento o ión específico.

El ablandamiento a nivel domiciliario es lejos el sistema más costoso de ablandamiento del agua, además de que, por usar la tecnología de intercambio iónico, sustituye cada mol de calcio eliminado por un mol de sodio. Si bien el aporte sodio del agua de bebida a la dieta de las personas es muy pequeño, normalmente en Chile el consumo de sodio ya excede el valor recomendado por la OMS (2 gramos de sodio/día)<sup>38</sup>, por lo que cualquier aporte adicional es poco recomendable. En algunos documentos se recomienda el ablandamiento domiciliario del agua argumentando que el ablandamiento centralizado mediante precipitación con cal normalmente es conveniente para reducir la dureza hasta unos 80 a 100 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, por lo que la función del ablandamiento domiciliario es reducir aún más este valor, cuando ello corresponde a las preferencias de cada usuario en particular.<sup>39</sup> También se argumenta que a nivel domiciliario se puede ablandar sólo las aguas cuya dureza ocasiona problemas, como por ejemplo el agua caliente o el agua de piscina, no sondeo necesario someter a este tratamiento otras aguas, como el agua de riego o las aguas utilizadas para desaguar el excusado.

<sup>38</sup> WHO/NMH/NHO/13.2. **Directrices: Ingesta de sodio en adultos y niños.** 2013

<sup>39</sup> Larson, T. E. **Municipal and Home Water Softening.** Journal American Water Works Association. Vol. 45, No. 6, June 1953

## 9.- Conclusiones y recomendaciones

En términos generales, las fuentes de agua potable del país presentan las mayores valores de dureza entre las regiones I y Metropolitana, siendo el calcio el componente principal de ésta en la mayoría de los casos. Determinaciones realizadas recientemente, en el período 2012-2014 indican que los mayores valores de dureza a nivel de servicios se encuentran en las aguas crudas que alimentan las plantas de osmosis inversa de Lluta y Pago de Gómez, en la primera región, con valores superiores a 1.000 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . En esa misma región las localidades de La Tirana, Pozo Almonte y Huara presentan durezas en el agua cruda en torno a los 500 mg/l. En la segunda región los mayores valores de dureza se presentan en el río Loa en Puente Negro, con valores del orden de 700 mg/l, siguiéndole el río Loa en Quinchamale y Embalse Conchi, con valores entre 400 y 500 mg/l, y luego Cerro Topáter, río Loa en Lequena, río San Pedro y río Toconce, con durezas en torno a los 300 mg/l. En la tercera región Caldera y Chañaral tienen valores del orden de 250 mg/l y el resto de las localidades valores inferiores a 200 mg/l. En la cuarta región las localidades con mayores durezas son Guanaqueros, Andacollo y Tongoy, con valores del orden de los 600 mg/l, siguiéndole Coquimbo y Canela Baja, con durezas levemente superiores a 400 mg/l, y luego varias localidades con aguas cuya dureza está entre 150 y 400 mg/l. En la quinta región las mayores durezas se presentan en las localidades del litoral central, entre Las Brisas y Mirasol, con valores entre 450 y 500 mg/l y el resto de las localidades presenta durezas entre 200 y 400 mg/l. En la región Metropolitana las mayores durezas se presentan en la Rinconada de Maipú, con valores sobre los 500 mg/l, siguiéndole el Pozo Lo Cañas y las aguas provenientes del río Maipo (La Florida, Canal Las Perdices y plantas de tratamiento Vizcachas y Vizcachitas), con durezas del orden de los 450 mg/l. El resto de las localidades presenta durezas entre 50 y 300 mg/l.

Los problemas más fácilmente perceptibles que produce la dureza están asociados a la formación de incrustaciones o sarro, especialmente en los equipos calentadores de agua. Las estadísticas de reclamos por calidad de servicio de que se dispone en la Superintendencia de Servicios Sanitarios, específicamente por “sarro y dureza” no presentan una buena correlación con la distribución de la dureza, observándose las mayores tasas de reclamo (reclamos/habitantes) en las regiones VI, VIII, IV, VII, V y III. Una posible explicación de al menos parte de este resultado es que en las regiones I y II, principalmente, se cuenta con plantas de tratamiento por osmosis inversa que remueven la dureza y evitan que la población tenga una percepción muy mala de la calidad del agua potable.

Existe mucha información bibliográfica que relaciona dureza del agua de bebida con la salud de la población pero resulta difícil encontrar resultados concluyentes, entre otras razones, debido a que el agua representa sólo entre 5 y 20% de la ingesta de calcio y magnesio de los seres humanos, siendo mucho más importante el aporte dietético. Las enfermedades más estudiadas son las cardiovasculares, las litiasis, es decir, la formación de cálculos, principalmente renales, y una serie de otras enfermedades que incluyen desde cáncer hasta enfermedades de la piel (eccemas). La evidencia indica que la dureza del agua, principalmente la asociada al magnesio, tiene más bien un efecto benéfico en relación a las enfermedades cardiovasculares. No hay evidencia conclusiva que permita asociar la formación de cálculos con la dureza del agua, especialmente cuando en los estudios se considera todas las fuentes de calcio y magnesio, ni menos con el resto de las enfermedades, en que se presentan resultados contradictorios.

Además de los posibles efectos en la salud, la dureza afecta el consumo humano principalmente por la formación de sarro e incrustaciones, especialmente en los circuitos de agua caliente, por su efecto subjetivo en el sabor del agua, por la formación de jabones insolubles y depósitos en los lavatorios y tinas de baño.

La tecnología de remoción de la dureza más usada en Chile es el intercambio iónico, que se aplica principalmente a nivel industrial y que por su simpleza también se utiliza en los sistemas de

ablandamiento a nivel domiciliario. El intercambio iónico tiene el inconveniente de sustituir el calcio y el magnesio por iones sodio, por lo que no es recomendable para aplicar al agua de bebida.

La literatura técnica indica que, a nivel centralizado, la tecnología más económica de remoción de dureza es la precipitación con cal, similar al tratamiento físico químico convencional pero que incluye los procesos de dosificación de cal, al inicio del tratamiento, el manejo de grandes cantidades de lechada de carbonato de calcio y la recarbonatación del agua para restituir el pH y eliminar el hidróxido de calcio remanente. La precipitación con cal permite remover la turbiedad del agua y es eficiente para remover la dureza hasta niveles del orden de 80 a 100 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . La osmosis inversa y la nanofiltración son tecnologías similares que también permiten remover la dureza del agua prácticamente en su totalidad pero, por su alto costo, sólo se justifican cuando se aplican adicionalmente para remover otros contaminantes disueltos en el agua potable.

El análisis de beneficio costo del ablandamiento centralizado muestra que, efectivamente, la precipitación con cal es lejos el sistema de tratamiento más económico para remover la dureza. Sin embargo, debido a las dificultades tecnológicas de su implementación, sólo se justifica en instalaciones de escala grande o mediana. La osmosis inversa o el tratamiento por nanofiltración tienen un costo que es casi cuatro veces el de la precipitación con cal y sólo se justifican cuando son requeridos para remover otros contaminantes, como la salinidad o iones específicos. El ablandamiento a nivel domiciliario resulta ser el sistema más caro en términos de costo por metro cúbico, principalmente debido a los bajos niveles de producción. El ablandamiento a nivel central sólo se justifica cuando la población mayoritariamente percibe los inconvenientes asociados al agua dura y está dispuesta pagar por el costo adicional que significa su remoción, ya sea a nivel domiciliario o centralizado, condición que difícilmente puede ser evaluada sin un procedimiento de consulta ciudadana.

Debido a que el efecto de la dureza del agua de bebida en la salud humana es sujeto de fuertes controversias y que, al parecer, habría muchos más efectos benéficos que perjudiciales en este aspecto, es poco recomendable su inclusión en una normativa de agua potable. Algo similar ocurre con otros parámetros cuya limitación en el agua potable puede ser beneficiosa pero no imprescindible y para los cuales resulta más apropiada la figura de la confección de guías que contienen las características deseables del agua potable, pero sin que éstas constituyan obligatoriedad. Numerosos países limitan la dureza a 500 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  equivalente, ya sea porque la mayoría de las fuentes de agua no presenta valores altos de dureza o porque el control del cumplimiento de la normativa no es muy estricto. Resulta más conveniente recomendar una dureza máxima de 300 a 500 mg/l de dureza, que entramparse en una normativa cuyo cumplimiento presentará dificultades de carácter tanto tecnológico como económico.

**Bibliografía**

- 1.- WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011
- 2.- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 10th Edition. 1995.
- 3.- [http://en.wikipedia.org/wiki/Hard\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Hard_water)
- 4.- Marco A. Neira Gutiérrez. **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, Universidad de Chile, Escuela de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2006
- 5.- WHO, Nutrients in Drinking Water, Capítulo 11. Drinking Water Hardness and Cardiovascular Diseases: A Review of the Epidemiological Studies, 1979-2004 (*Silvano Monarca, Francesco Donato, Maria Zerbini*)
- 6.- Juan D'Etigny J. 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, Escuela Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1983.
- 7.- Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water.** International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.
- 8.- Bellizzi V, De Nicola L, Minutolo R, Russo D, Cianciaruso B, Andreucci M, et al. **Effects of water hardness on urinary risk factors for kidney stones in patients with idiopathic nephrolithiasis.** *Nephron.* 1999;81:66–70.
- 9.- Willevaldo Melitón León Hancco, **Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú.** [wleonehancco@hotmail.com](mailto:wleonehancco@hotmail.com)
- 10.- Penrose, L. S. **Genetics of anencephaly.** J. Ment. Defic. Res. 1957; 1:4–15.
- 11.- Fedrick, J. **Anencephalus and the local water supply.** Nature. 1970;227:176–7.
- 12.- Stocks P. **Incidence of congenital malformations in the regions of England and Wales.** Br J Prev Soc Med. 1970;24:67–7.
- 13.- Jan Hofman, Onno Kramer, Jan Peter van der Hoek, Maarten Nederlof, Martijn Groenendijk. **Twenty years of experience with central softening in The Netherlands:Water quality – Environmental benefits – Costs.** Water Treatment, Feb. 2007.
- 14.- Cotruvo, Joseph. **Aspectos de Salud Relacionados con la Presencia de Calcio y Magnesio en el Agua Potable.** Aqualatinoamérica. Vol. 6, número 3. 2006.
- 15.- Omar Pérez F. **Métodos de enfriamiento y Control de dureza en Aguas Industriales. Aplicación a un caso práctico.** Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Escuela de Ingeniería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1979.
- 16.- Superintendencia de Servicios Sanitarios. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile. **Análisis de Presencia de Contaminantes no Controlados en Agua Potable.** 2001.
- 17.- Lorch, Walter (Ed.). **Handbook of Water Purification.** McGraw –Hill Book Co. (UK) Limited. 1981.
- 18.- Cuartas Uribe, Beatriz E. **Estudio del Proceso de Nanofiltración para la Desmineralización de Lactosuero Dulce. Tesis doctoral.** Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Valencia, 2005.
- 19.- Herrera, Leandro; José Hernández y Jorge Castillo. **Optimización Preliminar de Caldera Piro-tubular Utilizando Dispositivos Magnéticos.** Dpto. Ing. Química. Fac. Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- 20.- Consejo de la Comunidad Europea. **Directiva 98/83/CE del Consejo relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano de 3 de noviembre de 1998.** L 330/32 ES Diario Oficial de las Comunidades Europeas 5.12.98
- 21.- United States Environmental Protection Agency. **National Primary Drinking Water Standards.** EPA816-F-01-007. Marzo de 2001
- 22.- United States Environmental Protection Agency. **National Primary Drinking Water Regulations.**
- 23.- United States Environmental Protection Agency. **National Secondary Drinking Water Regulations.**

- 24.- Health Canada. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality Summary Table**. Prepared by the Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water of the Federal-Provincial-Territorial Committee on Health and the Environment August 2012.
- 25.- WHO. **Guidelines for Drinking-water Quality**. Fourth Edition, 2011.
- 26.- Organización Mundial de la Salud. **Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la Tercera Edición. Volumen 1. Recomendaciones**. 2006
- 27.- Instituto Nacional de Normalización. **Norma Chilena Oficial NCh4091.Of2005. Agua Potable-parte 1-Requisitos**.
- 28.- CEPIS/OPS-OMS. **Comparación de las normas de calidad de agua potable entre la OMS y los países**. 2005.
- 29.- Mella, Sergio. **Estudio Comparativo de Normas de Calidad de Agua Potable en Distintos Países de América**. Trabajo Final de Carrera optar al título de Licenciado en Ciencias Químicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Belgrano.
- 30.- Truque, Paola Andrea. **Armonización de los Estándares de Agua Potable en las Américas**.
- 31.- Chong, Guillermo; Juan J. Pueyo y Cecilia Demergasso. **Los yacimientos de boratos de Chile**. Rev. Geol. Chile v.27 n.1 Santiago jul. 2000
- 32.- OMS, 2003: **Boron in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable**. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud. (WHO/SDE/WSH/03.04/54).
- 33.- WHO. **Aluminium in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality**. WHO/SDE/WSH/03.04/53. English only. 2003
- 34.- <http://WIMIV.dongasfiter.cl/sarro.php>
- 35.- WHO/NMH/NHO/13.2. **Directrices: Ingesta de sodio en adultos y niños**. 2013
- 36.- Larson, T. E. **Municipal and Home Water Softening**. Journal American Water Works Association. Vol. 45, No. 6, June 1953

**SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS****ANÁLISIS DE PARÁMETROS NO INCLUIDOS EN LAS  
NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE****Anexo: Efectos de la dureza en la salud****Santiago, diciembre de 2014**

**Anexo 2. Efectos de la dureza en la salud****Tabla de contenido**

Introducción.....	1
II.1.- Calcio.....	1
II.1.1.- Ingesta inadecuada.....	1
II.1.2.- Ingesta en exceso.....	2
II.2.- Magnesio.....	3
II.2.1.- Ingesta inadecuada.....	3
II.2.2.- Ingesta en exceso.....	3
II.3.- Estudios epidemiológicos.....	4
II.4.- Enfermedades cardiovasculares.....	4
II.4.1.- Dureza total, concentración de calcio y enfermedades cardiovasculares.....	5
II.4.2.- Concentración de Magnesio y enfermedades cardiovasculares.....	6
II.4.3.- Interpretación de la evidencia epidemiológica.....	7
II.4.4.- Conclusiones.....	9
II.5.- Litiasis.....	9
II.6.- Otras enfermedades.....	10
II.6.1.- Cáncer.....	11
II.6.2.- Mortalidad cerebrovascular.....	11
II.6.3.- Malformaciones del sistema nervioso central.....	12
II.6.4.- Diabetes.....	13
II.6.5.- Eczema.....	14
II.6.6.- Densidad mineral de los huesos.....	14
II.6.7.- Salud reproductiva.....	14
II.6.8.- Salud digestiva y estreñimiento.....	14
II.7.- Conclusiones.....	15

## Introducción

Existen antecedentes de estudios desde la década de 1950 (Kobayashi, 1957 en Japón y Schroeder, 1960, en Estados Unidos) que han intentado relacionar la presencia de dureza en el agua de bebida con la prevalencia – morbilidad por diversas enfermedades. Entre éstas, las más estudiadas son las enfermedades cardiovasculares, principalmente las asociadas con el estrechamiento y acumulación de materias grasas en las arterias, diversas formas de litiasis, es decir, formación de cálculos principalmente renales, y un tercer grupo de enfermedades de variada naturaleza y para las cuales se ha generado menos información, en forma más dispersa y menos conclusiva (enfermedades a la piel, cáncer, etc.).

El típico aporte dietético de calcio y magnesio es sobre el 80% de la ingesta diaria total. De esto, se absorbe aproximadamente el 30% de calcio y el 35% de magnesio. La biodisponibilidad de calcio y magnesio de la leche y el agua son del orden del 50% (Ong, Grandjean & Heaney, 2009). Para el calcio y el magnesio, el aporte típico del agua esta en el rango 5 – 20% (OMS, 1973; Consejo Nacional de investigaciones, 1977; Neri & Johansen, 1978).<sup>1</sup> Este último dato es muy importante porque al ponderar el potencial impacto de la dureza contenida en el agua de acuerdo con su relación con respecto a la ingesta total su efecto en la salud no puede ser muy determinante. Descontados los mecanismos de autorregulación de la ingesta de nutrientes del cuerpo humano, la dureza del agua sería realmente importante sólo cuando las otras fuentes de calcio y magnesio satisfacen totalmente las necesidades fisiológicas y el aporte con el agua de bebida adicional y en exceso sobre la dosis requerida. Otra condición bajo la cual el aporte del agua dura podría contribuir en forma importante en la dosis de calcio o magnesio ocurre si la asimilación de ésta es significativamente superior a la del aporte proveniente de otras fuentes.

El calcio y el magnesio son minerales esenciales y beneficiosos para la salud humana en varios aspectos. La ingesta inadecuada de cualquier nutriente puede ocasionar consecuencias adversas para la salud y las ingestas diarias recomendadas de cada elemento se han establecido a nivel nacional e internacional. No obstante, los individuos varían considerablemente en sus necesidades y el consumo de estos elementos.

### II.1.- Calcio

#### II.1.1.- Ingesta inadecuada

La ingesta inadecuada de calcio se ha asociado con mayores riesgos de osteoporosis, nefrolitiasis (cálculos renales), cáncer colorrectal, hipertensión y accidente cerebrovascular, enfermedad coronaria, resistencia a la insulina y la obesidad. La mayoría de estos trastornos tienen tratamientos, pero no son curables. Debido a la falta de evidencia acerca del rol del calcio como elemento contributivo en lo referente a estas enfermedades, se han hecho estimaciones del requisito de calcio sobre la base de los resultados de salud ósea, con el objetivo de optimizar la densidad mineral ósea.

El calcio es único entre los nutrientes cuya reserva del cuerpo también es funcional; el aumento de la masa de hueso está relacionado linealmente con la reducción en el riesgo de fractura. El almacenamiento total en el cuerpo es del orden de 1.200 g, con un 99% en huesos y dientes. Existe una gran cantidad de evidencia primaria de ensayos controlados aleatorios que muestran que una mayor ingesta de calcio, especialmente en aquellos individuos que han tenido habitualmente una ingesta baja en calcio, aumenta

---

<sup>1</sup> Organización Mundial de la Salud. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

la masa ósea durante el crecimiento y reduce el riesgo de fractura y pérdida de hueso posterior a lo largo de la vida.

La osteoporosis es una de las enfermedades más frecuentes relacionadas con la edad y el calcio y la vitamina D son beneficiosos en conjunto para aumentar la masa ósea.

La evidencia epidemiológica indica que el calcio disponible en la dieta reduce la incidencia de cálculos renales. En contraste, los resultados de un ensayo aleatorio amplio sugieren un mayor riesgo de cálculos renales asociados con suplementos de calcio, posiblemente porque el calcio es en este caso ingerido como un bolo y no con alimentos, o bien, porque los suplementos fueron tomados por personas que superaron el nivel de consumo recomendado de de 2.500 mg/día.

Aunque la hipertensión es de origen multifactorial, la ingesta adecuada de calcio se ha asociado con un menor riesgo de hipertensión arterial en algunos estudios, aunque no en todos ellos. No ha sido identificado claramente el mecanismo que explica la participación d calcio, aunque los electrolitos probablemente desempeñan un papel importante. Se ha asociado el consumo de productos lácteos, más que el calcio *per se*, con una baja presión arterial y con un menor riesgo de accidente cerebrovascular en estudios prospectivos.

Aquellos individuos que evitan los productos lácteos o carecen de acceso a ellos a lo largo de la vida pueden estar en mayor riesgo de deficiencia de calcio. Los bebés alimentados con fórmula normalmente no estarán en riesgo por ingerir cantidades deficientes o excesivas de calcio, ya que incluso concentraciones extremadamente bajas o altas de calcio en el agua no conducirían a la absorción de cantidades no-fisiológicas de calcio de la fórmula infantil reconstituida con el agua. Sin embargo, si se utilizan otras fuentes de alimentos que no son capaces de proporcionar el contenido de calcio que contiene la fórmula, en ese caso el agua sí puede representar una importante fuente de minerales para los niños.

### **II.1.2.- Ingesta en exceso**

En gran medida, los individuos están protegidos de la ingesta excesiva de calcio por un mecanismo estrechamente regulado de absorción y eliminación intestinal a través de la acción de 1, 25-Dihidroxitamina D, la forma hormonalmente activa de la vitamina D. Cuando el calcio es absorbido por sobre lo requerido en personas sanas que no tienen una deficiencia renal, el exceso se excreta por el riñón. La preocupación por la ingesta excesiva de calcio está dirigida principalmente a individuos que son propensos al síndrome de leche alcalina (la presencia simultánea de hipercalcemia, alcalosis metabólica e insuficiencia renal) y la hipercalcemia.

Aunque el calcio puede interactuar con el hierro, zinc, magnesio y fósforo en el intestino, reduciendo así la absorción de estos minerales, los datos disponibles no sugieren que estos minerales se agotan cuando los humanos consumen dietas que contienen calcio por encima de los niveles recomendados. Por ejemplo, aunque la alta ingesta de calcio puede ejercer efectos agudos en la absorción de hierro, no hay ninguna evidencia de reducción del estatus de hierro o sus reservas con el empleo a largo plazo de suplementos de calcio.

## **II.2.- Magnesio**

### **II.2.1.- Ingesta inadecuada**

El magnesio es el cuarto catión más abundante en el cuerpo y el segundo en el líquido intracelular. Es un cofactor de unas 350 enzimas celulares, muchas de las cuales participan en el metabolismo energético. También participa en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos y es necesario para el tono vascular normal y sensibilidad a la insulina. Las reservas totales del cuerpo son del orden de 25 g, con un 60% en los huesos. La carga corporal total es difícil de cuantificar, porque solamente una pequeña porción se encuentra en la sangre u otros líquidos, y puede ser variable. Los niveles bajos de magnesio se asocian con la disfunción endotelial, aumento de las reacciones vasculares, niveles elevados de proteína C reactiva (un marcador proinflamatorio que es un factor de riesgo de cardiopatía coronaria) circulante y disminución de sensibilidad a la insulina. Se ha relacionado bajos niveles de magnesio con la hipertensión arterial, enfermedad coronaria, diabetes mellitus tipo 2 y síndrome metabólico.

La deficiencia de magnesio se ha relacionado con la patogénesis de la hipertensión arterial, con algunos estudios epidemiológicos y experimentales que demuestran una correlación negativa entre la presión arterial y los niveles séricos de magnesio. Sin embargo, los datos de estudios clínicos han sido menos convincentes. Se ha reportado arritmias cardíacas de origen ventricular y auricular en pacientes con hipomagnesemia (carencia de magnesio) y en mujeres posmenopáusicas en estudios de dieta controlada. De hecho, una arritmia cardíaca grave, denominada Torsade de Pointes, se trata con terapia del magnesio intravenoso.

La preclampsia (definida como hipertensión después de 20 semanas de gestación) con proteinuria se ha tratado con sales de magnesio por muchas décadas. Un ensayo reciente (Altman et al., 2002) usando el sulfato de magnesio mostraron un 50% de disminución del riesgo de preclampsia.

Se ha documentado estudios en animales que muestran una relación inversa (protección) entre la ingesta de magnesio y la tasa de incidencia de la aterosclerosis. En los seres humanos hay evidencia de una relación inversa (es decir, una protección) entre el magnesio y la mortalidad de la enfermedad cardíaca coronaria. Tres estudios transversales han documentado una relación inversa entre la concentración de proteína C reactiva y la ingesta de magnesio, sugiriendo que el magnesio puede tener un efecto antiinflamatorio.

Varios estudios han documentado la importancia del magnesio en la diabetes mellitus tipo 2. Dos estudios recientes han documentado una relación inversa (protección) entre la ingesta de magnesio y riesgo de desarrollar diabetes mellitus tipo 2. La administración de suplementos de magnesio oral mejora la sensibilidad a la insulina y el control metabólico en la diabetes mellitus tipo 2.

El alcoholismo y la mala absorción intestinal son condiciones asociadas con la deficiencia de magnesio. Algunos medicamentos, como ciertos diuréticos, algunos antibióticos y algunos tratamientos de quimioterapia, aumentan la pérdida de magnesio a través del riñón; por lo tanto, aquellos pacientes deben tener suplementos de magnesio como parte de su terapia.

### **II.2.2.- Ingesta en exceso**

La causa principal de hipermagnesemia (exceso de magnesio) es la insuficiencia renal asociada con una significativa disminución de la capacidad de excretar el magnesio. El aumento de la ingesta de sales de magnesio puede causar un cambio temporal adaptable en los hábitos intestinales (diarrea), pero rara vez causa hipermagnesemia en personas con función renal normal. El agua potable en que tanto el magnesio como el sulfato están presentes en concentraciones elevadas (por encima de aproximadamente 250 mg/l

cada uno) puede tener un efecto laxante, aunque los datos sugieren que los consumidores se adaptan a estos niveles mientras continúan las exposiciones. Los efectos laxantes también se han asociado con el consumo excesivo de magnesio tomado en forma de suplementos, pero no con magnesio en la dieta.

### **II.3.- Estudios epidemiológicos**

Un gran número de estudios ha investigado los posibles efectos beneficiosos para la salud de la dureza del agua potable. La mayoría de ellas han sido estudios epidemiológicos ecológicos (es decir, en relación a las variables ambientales) y han reportado una relación inversa entre la dureza del agua y la mortalidad cardiovascular. Las debilidades inherentes al diseño de estudios epidemiológicos ecológicos limitan las conclusiones que se pueden extraer de estos estudios.

Varios estudios identificados de tipo caso-control y de cohorte muestran una asociación negativa (es decir, con efecto protector) entre la mortalidad cardiovascular y magnesio del agua potable. Aunque esta asociación no demuestra necesariamente causalidad, es consistente con los efectos conocidos del magnesio en la función cardiovascular. No ha habido evidencia de una asociación entre dureza total o calcio e infarto agudo de miocardio o las muertes por enfermedades cardiovasculares (infarto agudo de miocardio, accidente cerebrovascular e hipertensión). Tampoco pareciera existir una asociación entre el magnesio del agua potable y el infarto agudo de miocardio. En un estudio reciente de gran magnitud en Holanda (Leurs et al., 2010) no se descubrió ninguna asociación entre el calcio, magnesio o dureza total y mortalidad por cardiopatía isquémica o accidente cerebrovascular. Sin embargo, se encontró una asociación (beneficiosa) inversa significativa con el magnesio del agua para los hombres en el grupo de exposición más alto y el efecto opuesto en mujeres. Por ello, se requiere mayores estudios para confirmar o descartar estos resultados.

Los estudios de caso-control y de cohorte son más útiles que los estudios epidemiológicos ecológicos para investigar las relaciones de causa y efecto. Se identificaron siete estudios de caso control y dos estudios de cohorte de calidad aceptable, investigando la relación entre el calcio o magnesio y las enfermedades cardiovasculares o la mortalidad en la literatura. De los estudios de caso – control, uno estaba dirigido a la asociación entre el calcio y el infarto agudo de miocardio y tres a la asociación entre el calcio y la muerte por enfermedad cardiovascular. Ninguno encontró una correlación positiva o inversa entre el calcio y la morbilidad o la mortalidad. Dos examinan la relación entre el magnesio y el infarto agudo de miocardio, pero sin encontrar ninguna asociación. Cinco examinaron la relación entre el magnesio y la mortalidad cardiovascular; mientras algunos no lograron resultados estadísticamente significativos, colectivamente mostraron tendencias similares de reducción de la mortalidad cardiovascular a medida que aumentan las concentraciones de magnesio en el agua. Generalmente se observó beneficios estadísticamente significativos a concentraciones de magnesio mayores o iguales a aproximadamente 10 mg/l. Los estudios de cohorte examinaron la relación entre la dureza del agua (en lugar del contenido de calcio o magnesio) y las enfermedades cardiovasculares o la mortalidad pero no encontraron una correlación.

### **II.4.- Enfermedades cardiovasculares**

Numerosos estudios indican la existencia de una relación inversa entre el contenido de dureza en el agua de bebida y la prevalencia de enfermedades cardiovasculares (ECV), aunque existen algunos pocos estudios que muestran lo contrario.

En un estudio publicado por la Organización Mundial de la Salud en 2005<sup>2</sup>, se presenta una revisión bibliográfica de estudios epidemiológicos que correlacionan la dureza del agua de bebida con enfermedades cardiovasculares. Los estudios revisados incluyen 19 correlaciones geográficas que consideran variables tales como estatus socio económico, nivel de ingreso y clima más otros factores de riesgo de enfermedades cardiovasculares, 7 estudios de caso-control que relacionan directamente el nivel de dureza del agua con la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, y 2 estudios de cohorte.

En 10 de los 19 estudios de correlación geográfica revisados se encontró una relación inversa significativa entre la dureza del agua y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares. A modo de ejemplo, Lacey and Shaper informaron de una reducción de mortalidad por enfermedades cardiovasculares en varones de 7,5% por cada incremento de 100 mg/l de dureza en el agua de bebida. Por su parte, Yang *et al* informaron de un incremento de 10% en el riesgo de enfermedad cardíaca isquémica (ICE) en personas que consumían agua con dureza inferior a 75 mg/l en comparación con personas que consumían agua con dureza superior a 150 mg/l, ambas expresadas como CaCO<sub>3</sub>. Kousa *et al* informaron una reducción de 1% del riesgo de infarto agudo al miocardio por cada incremento de la dureza de una unidad Alemana de dureza (1 grado alemán (°D) = 17,85 mg CaCO<sub>3</sub> /l).

En los 7 estudios de caso-control, que se realizaron in Suecia, Taiwán y Finlandia, se encontró una asociación inversa entre los niveles de magnesio en el agua de bebida y el riesgo de mortalidad por infarto agudo al miocardio, accidente vascular cerebral o hipertensión y en sólo 1 estudio se encontró una asociación inversa con el calcio.

Uno de los estudios de cohorte, conducido en dos áreas rurales en Finlandia, se encontró que la población residente en el área con niveles más bajos de magnesio en el agua potable (3,1 mg/l vs. 13,1 mg/l) tuvieron proporcionalmente mayor mortalidad por enfermedades cardiovasculares (14,7% vs. 8,7%). En el otro estudio, realizado en el condado de Washington, en Maryland, no se encontró asociación entre la dureza del agua y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, ninguno de los estudios consideró mediciones de los factores de riesgo comunes a dichas enfermedades.

Dado que el Ca y Mg actúan en forma diferente en las células humanas, también pueden jugar un rol diferente en la evolución y desarrollo de las enfermedades cardiovasculares.

#### **II.4.1.- Dureza total, concentración de calcio y enfermedades cardiovasculares**

El Ca es el principal elemento responsable por la dureza total del agua, por lo que los resultados de los estudios que consideran la dureza total como variable pueden ser interpretados también como considerando el Calcio como la variable. La mayoría de los estudios epidemiológicos con dureza y ECV han generado resultados de algún modo controversiales. Una explicación alternativa al rol del calcio o la dureza en la reducción de las ECV podría estar relacionada con el hecho que la dureza protege contra el efecto tóxico del plomo. El agua blanda es mucho más agresiva y, por lo tanto, más rica en plomo, el que puede estar presente en los materiales sanitarios cuando se usa tuberías, griferías o soldaduras que contienen plomo.

También existe la duda respecto al posible efecto del calcio en el control de la presión sanguínea. Algunos datos generados en animales y observaciones en humanos sostienen la hipótesis de que la administración de suplementos de Calcio puede reducir la presión arterial, aunque la evidencia no permite asegurar que este suplemento pueda prevenir o tratar la hipertensión.

<sup>2</sup> WHO, Nutrients in Drinking Water, Capítulo 11. Drinking Water Hardness and Cardiovascular Diseases: A Review of the Epidemiological Studies, 1979-2004 (Silvano Monarca, Francesco Donato, Maria Zerbini)

#### **II.4.2.- Concentración de Magnesio y enfermedades cardiovasculares**

El Mg participa en muchas funciones biológicas que van desde un rol estructural por medio de la formación de complejos con grupos de carga negativa, como los fosfatos en los ácidos nucleicos, roles catalíticos en la activación o inhibición de enzimas y roles de regulación por modulación de la proliferación de células, hasta la progresión y diferenciación del ciclo de las células. El déficit de Mg acelera el desarrollo de aterosclerosis y la inducción de agrupación de trombocitos, por lo que es descrito como uno de los factores de riesgo para el infarto agudo al miocardio (IAM) y para enfermedades cerebro-vasculares. Se sabe que el Mg es un agente que previene la calcificación de tejidos blandos (particularmente para los miocitos), y su rol en el IAM se encuentra bien documentado.

Los resultados de los estudios epidemiológicos muestran una posible relación entre el contenido del Mg en el agua potable y las ECV, aunque se ha encontrado algunos resultados discrepantes. Muchos, aunque no todos, de los estudios muestran que una alta concentración de Mg en el agua protege contra la mortalidad por ECV e infarto cerebral. Algunos estudios muestran una relación exposición-respuesta. Sin embargo, en el único estudio en que se investiga tanto la incidencia como la mortalidad de ECV se encontró que un alta concentración de Mg en el agua potable reduce el riesgo de mortalidad pero no de desarrollo de ECV cuando se toma en cuenta los principales factores de riesgo de enfermedades cardiacas coronarias (ECC).

Estos hallazgos sugieren que el Mg puede ser efectivo en reducir la mortalidad por ECC entre aquellos que la desarrollan (prevención secundaria) más que prevenir su desarrollo (prevención primaria). Consecuentemente, un estudio de cohorte mostró que la concentración de Mg en el suero estaba inversamente asociada con la mortalidad por enfermedades de las coronarias, pero no con su incidencia y la información clínica muestra que el Mg es útil para tratar pacientes que han tenido un infarto al miocardio y otras enfermedades cardiovasculares agudas. Además, se ha demostrado que la terapia con Mg por vía oral en pacientes de enfermedades coronarias muestra resultados beneficiosos. El rol que juegan los minerales tales como el Na, Ca y Mg en el desarrollo de la hipertensión se ha investigado ampliamente desde los primeros estudios geográficos que muestran la baja incidencia de la enfermedad en poblaciones con baja ingesta de Na pero rica en Ca y Mg. Estudios fisiológicos y patofisiológicos muestran el rol del Mg en el desarrollo de la hipertensión arterial. El rol del Mg en la reducción de la incidencia de la hipertensión se ha publicado en muchos estudios observacionales. En un estudio de cohorte realizado recientemente se encontró un menor riesgo de hipertensión en sujetos con una concentración alta de Mg en el suero para una línea de base de sujetos carentes inicialmente de la enfermedad.

Curiosamente, los ensayos controlados aleatorios bien diseñados han demostrado que una dieta rica en verduras, frutas y granos enteros, por lo tanto, más ricos en magnesio que las dietas occidentales comunes, fue capaz de reducir significativamente la presión arterial. Sin embargo, tomar suplementos de Ca o Mg no redujo la presión arterial en sujetos normotensos o hipertensos. De hecho, las recomendaciones actuales del Joint Nacional Committee de Estados Unidos sobre prevención, detección, evaluación y tratamiento de la hipertensión arterial están a favor de una ingesta regular de Ca y Mg, pero en contra de la ingesta de estos elementos por sobre la dosis recomendada de suplemento de estos minerales. Evidencia indirecta de los efectos protectores de Mg contra las ECV proviene de varios ensayos dietarios preventivos que muestran que una dieta rica en verduras, frutas y granos enteros (dieta "oriental") reduce significativamente la incidencia de enfermedades cardiovasculares en comparación con la dieta habitual de Estados Unidos (dieta "americana"). La dieta oriental es más rica en Ca y Mg en comparación con las dietas occidentales. Sin embargo, también es rica en muchos otros supuestos factores de protección contra enfermedades cardiovasculares, tales como vitaminas, cofactores, antioxidantes, grasas polinsaturadas y selenio. A pesar de sugerir una asociación, estos ensayos no ofrecen ninguna evidencia concluyente de que la ingesta de Ca o Mg reduce el riesgo de ECV.

Varios estudios experimentales realizados en animales apoyan la hipótesis de una relación de causa-efecto entre el contenido de magnesio en el agua potable y la cardiopatía isquémica. La deficiencia de magnesio inducida experimentalmente cambia la composición de lípido de la sangre en una dirección más aterogénica. Recientemente se ha observado que el agua enriquecida con magnesio redujo la aterogénesis en ratones deficientes en receptores lipoproteína de baja densidad (LDL) con respecto a los que recibieron agua destilada, con y sin una dieta alta en colesterol. Asimismo, los suplementos de magnesio en el agua potable inhibieron la aterogénesis en ratones con déficit de apolipoproteína-E que no recibieron una dieta alta en grasas; la administración de suplementos de magnesio en el agua de bebida inhibieron significativamente la aterogénesis en las hembras pero no en ratones machos. Otro tema de interés es la relación entre mediciones biológicas de la concentración de Ca y Mg en los compartimientos intracelulares y extracelulares del cuerpo y el desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Algunos estudios recientes de tipo transversal, casos-control y estudios de cohortes mostraron que los sujetos con bajos niveles de Mg en el suero tienen un mayor riesgo de enfermedad coronaria en comparación con personas con altos niveles, al considerar también todos los principales factores de riesgo para la enfermedad como posibles factores de confusión. Un punto controvertido es la relevancia de la ingesta de Mg por el agua en comparación con la dieta. Aunque el alimento es generalmente la principal fuente de magnesio, las dietas occidentales modernas contienen a menudo muy poco de este mineral. Marx y Neutra señalaron la aparente paradoja que el Mg transmitido por el agua, que contribuye menos que el Mg dietético a la ingesta total, puede tener un efecto tan grande (riesgos relativos de 1,5-2,0) sobre la mortalidad por ECV como el observado en algunos estudios de otros factores de riesgo.

Marx y Neutra criticaron los métodos de estudios previos y señalaron que los estudios no son apoyados por datos farmacocinéticos. También destacaron que la preocupación más seria asociada con el Mg es la confusión inducida por otros factores relativos a la dieta o al contenido del agua y argumentaron que se necesitarían estudios posteriores, más válidos, que usen datos de carácter personal, para aclarar el tema de una vez por todas. Sin embargo, se ha demostrado que la ingesta diaria de magnesio en muchas personas en los países industrializados no alcanza la cantidad diaria recomendada actualmente y, por lo tanto, es común que existan deficiencias marginales de Mg. Una encuesta sobre una extensa muestra nacional entre adultos estadounidenses mostró que aproximadamente el 23% tiene concentraciones séricas de magnesio  $< 0,80$  mmol/L, un nivel considerado como hipomagnesemia. La ingesta de magnesio a través del agua potable puede ser importante en estas poblaciones debido a la mayor biodisponibilidad del mineral en ella que en los alimentos. Se ha señalado que 2 litros de agua rica en Mg (40 mg/L) proporciona 80 mg de magnesio, que es aproximadamente el 25% del requerimiento total un adulto.

#### **II.4.3.- Interpretación de la evidencia epidemiológica**

Las fortalezas y limitaciones de la epidemiología para investigar las causas de las enfermedades humanas son bien conocidas. Es difícil interpretar asociaciones débiles, especialmente aquellas relacionadas con factores ambientales, y requieren un número grande de investigaciones bien diseñadas, con medidas precisas, tanto del factor bajo estudio como de los posibles factores de confusión, y modificadores del efecto a nivel individual. Todavía no hay evidencia concluyente de la relación entre la dureza del agua potable y las enfermedades cardiovasculares, principalmente porque los numerosos estudios epidemiológicos realizados hasta el momento no satisfacen los criterios para el establecimiento de causalidad. Los principales inconvenientes de estos estudios son la falta de datos de exposición a nivel individual, con el riesgo de clasificación de la exposición y la falta de control de factores de confusión, incluyendo los factores de riesgo reconocidos para ECV. Aunque los resultados del estudio epidemiológico pueden ser confundidos, debe recordarse que un factor de riesgo para una enfermedad es una confusión si se asocia con la exposición bajo investigación.

Los factores de riesgo de ECV más importantes como el colesterol sérico, hipertensión, diabetes mellitus, tabaquismo, obesidad y ejercicio físico pueden confundir la relación entre la dureza del agua y la mortalidad de ECV sólo si se asocian con agua potable blanda. Sin embargo, no hay ninguna razón para creer que mayores factores de riesgo de enfermedades cardiovasculares se asocian generalmente a la baja concentración de Ca o Mg en el agua potable. Por lo tanto, parece poco probable que la confusión por sí sola pueda explicar las asociaciones encontradas en varios estudios geográficos y de casos y controles realizados en diferentes poblaciones y en diferentes momentos. El papel del azar en la búsqueda de una asociación también debe ser excluido, ya que numerosos estudios reportaron una asociación, mientras que en sólo el 5% se esperaba encontrar una asociación significativa sólo por casualidad.

Un estudio realizado en dos áreas con niveles de dureza en el agua potable substancialmente diferentes proporciona un buen ejemplo de cómo un estudio de correlación geográfica puede producir resultados no válidos. El estudio investigó a dos comunidades, una en el oeste y el otro en el este de Suecia, con diferencias sustanciales en las tasas de mortalidad por ECV y en la concentración de dureza en el agua potable: la población con el menor dureza en el agua potable (oeste) tenía aproximadamente doble de la tasa de mortalidad de la otra población (este). Sin embargo, los autores también recopilieron los datos individuales de 207 individuos y tomaron muestras al azar de las dos poblaciones (aproximadamente 100 de cada una), incluyendo las siguientes: medición de Ca y Mg en una muestra de agua del hogar del sujeto; ingesta dietética total de Ca y Mg, determinado mediante un cuestionario; concentración de Ca en suero y orina y concentración Mg en suero, orina y músculo; niveles séricos de colesterol LDL y HDL, triglicéridos y otros factores de riesgo para enfermedades cardiovasculares

Se encontró que las ingestas de Ca y Mg totales fueron mayores en la población que bebía agua más blanda debido a una mayor ingesta de alimentos ricos en estos minerales. Sin embargo, no hubo diferencias entre las dos poblaciones en los niveles medios de Ca y Mg en el suero u orina. No se encontró ninguna correlación entre los niveles de Ca y Mg en el agua potable y los valores en suero u orina. De los factores de riesgo para enfermedades cardiovasculares investigados, la proporción de colesterol LDL:HDL fue mayor en la población del oeste que en la del este, posiblemente explicando las mayores tasas de mortalidad por enfermedades cardiovasculares en el anterior.

La investigación de Nerbrand *et al*/ no muestra una correlación directa entre Ca y Mg en el agua potable y mortalidad a nivel individual por ECV y cardiopatía isquémica (enfermedad cardíaca isquémica), a pesar de una aparente correlación geográfica. Estos hallazgos son consistentes con los de otro estudio que demuestra que una gran parte de la variación geográfica observada en la incidencia de enfermedad coronaria en ciudades británicas se redujo después del ajuste para los factores de riesgo principales. Por lo menos el 80% de los principales eventos de cardiopatía coronaria en hombres de mediana edad puede atribuirse a los tres factores de riesgo más altos, es decir, el colesterol total sérico, fumar cigarrillos y la presión arterial, como se ha estimado recientemente. De aquí se desprende que la contribución de otros factores de riesgo, incluidos los ambientales, en la incidencia de enfermedad coronaria o la mortalidad es necesariamente modesta.

De ser cierta la asociación entre la concentración de Ca o Mg en el agua potable y enfermedades cardiovasculares, ¿por qué algunos estudios no han encontrado una asociación?. Las posibles razones incluyen las siguientes:

- Las relativamente pequeñas diferencias entre las áreas en comparación. Por ejemplo, sólo uno de los cinco estudios basados en tasas consideradas en la revisión por Marx y Neutra compararon poblaciones con diferencias sustanciales en la concentración de Mg en el agua potable;
- La dilución del efecto debido a la heterogeneidad de la exposición entre individuos de la misma población, debidos a diferencias sustanciales en el consumo de agua y alimentos;

- La relativamente debilidad de la asociación.

#### II.4.4.- Conclusiones

Hay poca evidencia que apoye una asociación entre la dureza del agua o la concentración de Ca en el agua de bebida y enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, la información disponible de estudios experimentales, clínicos y epidemiológicos apoya la hipótesis de que un menor de ingesta de magnesio en relación a la recomendada es una condición que aumenta el riesgo de morir y posiblemente desarrollar ECV, accidente cerebrovascular o hipertensión. Se han alcanzado conclusiones similares acerca de los beneficios del magnesio en el agua por otros estudios. Aunque algunos científicos pueden argumentar que se necesita información adicional para establecer la causalidad, la siguiente información apoya fuertemente las conclusiones alcanzadas:

- Los estudios in vitro muestran que la exposición de las células endoteliales a bajos niveles Mg causan algunos de los eventos implicados en la patogénesis de la aterosclerosis;
- Los estudios en animales muestran que una dieta baja en Mg causa la inflamación y elevados niveles de colesterol séricos, particularmente el colesterol LDL, favoreciendo así el desarrollo de la aterosclerosis y, a la inversa, que la alta ingesta de Mg protege contra los efectos ateroscleróticos del estrés oxidativo y dietas inducen hipercolesterolemia;
- En pacientes con enfermedad coronaria, el Mg en dosis farmacológicas ha demostrado reducir las lesiones endoteliales y es un útil agente anti-isquémico y antiarrítmico;
- La mayoría de los estudios de correlación muestran una alta mortalidad por enfermedades cardiovasculares y por accidentes cerebrovasculares en poblaciones con baja concentración de Mg en el agua potable y viceversa;
- Algunos estudios transversales y de cohorte muestran que las personas con niveles séricos bajos de magnesio corren un mayor riesgo de hipertensión arterial, enfermedad coronaria y accidente cerebrovascular;
- Ensayos de dietéticos muestran una dieta rica en verduras y frutas, es decir, ricos en magnesio, reduce el riesgo de ECV.

#### II.5.- Litiasis

La dureza del agua se debe a la presencia de carbonato y sulfato de sales de calcio y magnesio. Más de 3/4 de los cálculos renales están generalmente compuestas de sal de calcio y ocurren generalmente como oxalato cálcico y menos comúnmente como fosfato de calcio. El 20% restante de las piedras se componen de ácido úrico, estruvita y cistina. Los cálculos se forman en la orina que está sobresaturada y esta saturación es dependiente de la actividad química de los iones libres, que hace que la orina esté bajo la saturación. En esta situación, la piedra no crecerá e, incluso, se puede disolver. El aumento de excreción de iones en la orina y la reducción del volumen de orina causan un aumento de actividad de los iones libres, lo que favorece el crecimiento y la formación de cálculos. La formación de cálculos renales (nefrolitiasis) se basa en factores genéticos, metabólicos, nutricionales y ambientales. Los factores metabólicos implicados en la formación de cálculos incluyen la hipercalciuria, hipocitraturia (debido a una enfermedad renal), hiperuricosuria, hyperoxalaturia, cistinuria e infecciones. Factores ambientales y nutricionales incluyen deshidratación, alta ingesta de sal, una dieta rica en proteínas animales y calcio cuando la ingesta de oxalato es restringida. El impacto de la dureza del agua en la formación de cálculos urinarios sigue siendo confusa, a pesar de una débil correlación entre la dureza del agua y la excreción de calcio urinario, magnesio y citrato. Varios estudios han demostrado que no existe ninguna relación entre la dureza del agua y la incidencia de la formación de cálculos urinarios. Se ha observado una correlación entre la dureza del agua y los niveles de calcio, citrato y magnesio urinarios, aunque se desconoce el significado de esto. Algunos estudios sugieren que en el enfoque preventivo de la

Nefrolitiasis de calcio, la ingesta de agua blanda ha sido preferible al agua dura, ya que se asocia con un menor riesgo de recurrencia de los cálculos de calcio<sup>3</sup>.

En uno de esos estudios<sup>4</sup> se evalúa si la dureza del agua potable consumida fuera de las comidas modifica el riesgo de cálculos de calcio. En 18 pacientes con nefrolitiasis idiopática se midió los niveles urinarios de calcio, oxalato y citrato, es decir, los principales factores de riesgo urinarios para cálculos de calcio, manteniendo fija la ingesta de calcio (800 mg/día), después de beber entre comidas durante 1 semana 2 litros por día, primero de agua de la llave y, luego de una semana, la misma cantidad de agua embotellada dura ( $\text{Ca}^{2+}$  255 mg/l) o blanda ( $\text{Ca}^{2+}$  22 mg/l) de agua, asignada a los pacientes mediante un sistema doblemente aleatorio. En comparación con el agua de la llave y el agua blanda, el agua dura se asoció con un aumento de 50% de la concentración de calcio en la orina en la ausencia de cambios de la excreción de oxalato; el índice de citrato de calcio reveló un significativo aumento al triple durante la ingestión de agua dura en comparación con respecto al agua blanda, haciendo esta última preferible incluso cuando se compara con agua de la llave. Este estudio sugiere que, en el enfoque preventivo de la Nefrolitiasis por calcio, la ingesta de agua blanda entre comidas es preferible al agua dura, ya que está asociada con un menor riesgo de recurrencia de los cálculos de calcio.

En otro estudio realizado en la parte baja del río Chili, en Arequipa, Perú,<sup>5</sup> se concluye que la morbilidad por litiasis de riñón y uréter son mayores en lugares donde la dureza de agua de consumo es mayor. En el estudio se considera las cuatro zonas de riego denominadas La Joya-El Ramal, La Joya, San Camilo y San Isidro, con dureza totales de 220; 222; 220 y 217 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  respectivamente, aguas tipificadas como “duras”, mientras que las dos zonas La Cano y el Valle de Vitor se abastecen para consumo humano de aguas “muy duras”, con durezas de 984 mg/l y 382 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , respectivamente. En el estudio se indica que el consumo prolongado de aguas que presentan concentraciones  $>120$  mg/l de  $\text{CaCO}_3$  presentan un factor de riesgo para el padecimiento de esta enfermedad, según un estudio anterior realizado por de Mora *et al.* 2002 y se afirma que ello está en concordancia con este estudio, en que concentraciones  $\geq 300$  mg/l de  $\text{CaCO}_3$  estuvieron asociadas a una alta prevalencia de litiasis. De 90 personas encuestadas en el Valle de Vitor y en La Cano, 23 dijeron haber sufrido la enfermedad; y de un total de 170 personas encuestados en La Joya-El Ramal, La Joya, San Camilo y San Isidro, sólo 26 sufrieron la enfermedad. La morbilidad por litiasis de cálculo al riñón y de uréter, es de 9%, 28% y 13% que corresponden a las irrigaciones de La Joya-La Cano, San Isidro-San Camilo y El Valle de Vitor respectivamente, siendo más alto en el segundo grupo, debido que no cuentan con ningún tipo de tratamiento de agua de consumo humano. En este estudio no se tomó en consideración la ingesta de calcio y magnesio por fuentes diferentes al agua.

## II.6.- Otras enfermedades

Los resultados de varios estudios han sugerido que una variedad de otras enfermedades están también inversamente correlacionadas con la dureza del agua, incluyendo la anencefalia y varios tipos de cáncer. Sin embargo, la significancia de estos resultados es incierta y se ha sugerido que las correlaciones pueden reflejar patrones de enfermedad que pueden ser explicados más por factores sociales, climáticos y ambientales, que la dureza del agua.

<sup>3</sup> Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water**. International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.

<sup>4</sup> Bellizzi V, De Nicola L, Minutolo R, Russo D, Cianciaruso B, Andreucci M, et al. **Effects of water hardness on urinary risk factors for kidney stones in patients with idiopathic nephrolithiasis**. *Nephron*. 1999;81:66–70.

<sup>5</sup> Willevaldo Melitón León Hanco, **Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú**. [wleonhanco@hotmail.com](mailto:wleonhanco@hotmail.com)

En un trabajo realizado en India por Pallav Sengupta<sup>6</sup> se presentan antecedentes de varias enfermedades que podrían estar asociadas a la dureza del agua potable y que se resume a continuación.

### **II.6.1.- Cáncer**

Reporta estudios realizados recientemente por científicos taiwanesas, en la mayoría de los cuales los autores indican una asociación estadística negativa de diversos tipos de morbilidad/mortalidad por cáncer con la dureza del agua y calcio, destacando los resultados relativos a la posible asociación entre el riesgo de cáncer gástrico y los niveles de calcio y magnesio. Algunos estudios sugieren que hubo un efecto protector significativo por la ingesta de calcio del agua potable en el riesgo de cáncer gástrico. El magnesio también ejerce un efecto protector contra el cáncer gástrico, pero sólo para el grupo con los niveles más altos de exposición de magnesio. En otro estudio de casos y controles emparejado, los autores encontraron una posible asociación entre el riesgo de los niveles de cáncer al colon y la dureza del agua potable de fuentes municipales en Japón (el análisis de tendencia obtenido muestra una probabilidad creciente para el cáncer a medida que disminuye la dureza en el agua potable). Tendencias epidemiológicas similares se obtuvieron por las relaciones entre los niveles de dureza en el agua potable y el riesgo de cáncer rectal y mortalidad de cáncer de páncreas; sin embargo, los investigadores no encontraron ninguna asociación con los niveles de magnesio (las probabilidades ajustadas no fueron estadísticamente significativas para la relación entre las concentraciones de magnesio en el agua potable y el cáncer rectal). Una de los más fuertes evidencias epidemiológicas del efecto protector de la ingesta de magnesio del agua potable fue la que dio para el riesgo de cáncer de esófago y cáncer de ovario. Desafortunadamente, estos autores no encontraron ningún resultado relativo a la tendencia similar entre el magnesio del agua potable y cáncer de hígado. La primera evidencia fuerte acerca de la posible relación ecológica entre la exposición al agua de magnesio y cáncer hepático fue divulgada en Europa Oriental.

### **II.6.2.- Mortalidad cerebrovascular**

Algunos informes indican que hay un efecto protector significativo de la ingesta de magnesio del agua potable en el riesgo de enfermedades cerebrovasculares. A pesar de sus limitaciones inherentes, se han utilizado ampliamente estudios sobre la correlación ecológica entre mortalidad y exposiciones ambientales para generar o desacreditar hipótesis epidemiológicas. El calcio ingerido a través de la dieta es la principal fuente de ingesta de calcio. Los estudios epidemiológicos han demostrado que los impactos potenciales en la salud por causa del calcio ingerido desde agua dura están asociados inversamente con la presión arterial. Con gran parte de la literatura epidemiológica sugiriendo la existencia de una relación entre el calcio dietético y la presión arterial, parece razonable esperar que la ingesta de calcio en la dieta podría reducir el riesgo de eventos cardiovasculares, como un accidente cerebrovascular, que son comúnmente asociados con la hipertensión. Sin embargo, el control de los niveles de magnesio elimina el efecto percibido de los niveles de calcio en la mortalidad cerebrovascular. En la población general, la mayor proporción de la ingesta de magnesio es a través de alimentos y una proporción menor es a través del agua potable. Para los individuos con una deficiencia de magnesio en el límite de lo recomendado, el magnesio contenido en el agua de bebida puede hacer una contribución importante a su consumo total. Además, la pérdida de magnesio de los alimentos es menor cuando los alimentos se cocinan en agua rica en magnesio. El magnesio en el agua también puede desempeñar un papel crítico debido a su alta biodisponibilidad, ya que se encuentra como iones hidratados, que son más

---

<sup>6</sup> Pallav Sengupta. **Potential Health Impacts of Hard Water**. International Journal of Preventive Medicine.; 4(8): 866–875. PMID. Aug 2013.

fácilmente absorbidos que el magnesio de los alimentos. El aporte de magnesio del agua entre las personas que beben agua con niveles altos de magnesio podría ser crucial en la prevención de la deficiencia de magnesio. La asociación significativa entre la mortalidad de la enfermedad cerebrovascular y los niveles de magnesio en el agua potable es apoyada por el conocimiento de las funciones del magnesio. El magnesio es un activador de enzimas y regula el metabolismo energético celular, tono vascular y el transporte iónico de la membrana celular. La falta de magnesio puede conducir a una disminución en la concentración de potasio intracelular y un aumento en los niveles de calcio. La deficiencia de magnesio puede incrementar la contractibilidad de los vasos sanguíneos. El magnesio causa vasodilatación por estimulación de la liberación de prostaciclina endotelial y evita que la vasoconstricción de los vasos intracraneales después de una hemorragia subaracnoidea experimental. En conclusión, los resultados de este estudio demuestran que existe un efecto protector significativo de la ingesta de magnesio del agua potable en el riesgo de enfermedad cerebrovascular. Este es un descubrimiento importante para la industria del agua de Taiwán y para la evaluación de riesgo de la salud humana.

### II.6.3.- Malformaciones del sistema nervioso central

Existe buena evidencia de que las influencias ambientales deben desempeñar una parte, posiblemente la mayor, en la etiología de las malformaciones del tubo neural en el embrión humano. Casi toda la evidencia, sin embargo, se refiere a marcadores inespecíficos e inciertos de teratógenos aún no identificados específicamente. Por ejemplo, la frecuencia de malformaciones del sistema nervioso central varía enormemente de un país a otro. También varían de un área a otra dentro de un mismo país: en Estados Unidos, durante el período 1950-59, la mortalidad por espina bífida (mielomeningocele) fue 2 a 3 veces mayor en la costa atlántica que en la costa del pacífica; en Gales del Sur la frecuencia de malformaciones del sistema nervioso central en los valles de la minería del carbón es casi dos veces más alta que en la planicie costera; en Inglaterra y Gales en conjunto la frecuencia es mayor en el norte, noroeste y de Gales y menor en el este, sudeste y sur. Es mayor en los primogénitos que en los bebés nacidos posteriormente y en los bebés nacidos de madres jóvenes y mayores que de madres en la vida reproductiva media. Es mayor entre los niños nacidos en los más pobres que en los estratos pudientes de la sociedad. Tiende a ser mayor en invierno que entre nacimientos de verano. En Birmingham, Escocia, Dublín y Boston se han reportado oscilaciones inexplicadas en la frecuencia. Penrose<sup>7</sup> parece haber sido el primero en especular que "las variaciones geográficas observadas en la incidencia (de anencefalia) podrían sugerir la existencia de un agente causal, como la presencia o ausencia de elementos traza en el suministro de agua". Esta sugerencia ha sido retomada por Fredrick<sup>8</sup> quien correlacionó datos sobre anencefalia para 10 áreas diferentes en el Reino Unido (de 10 estudios diferentes y relativos a 10 diferentes períodos de tiempo) para obtener más información sobre los suministros de agua de esas zonas obtenidos de diversas fuentes. A pesar de tales datos, manifiestamente insatisfactorios, encontró que la frecuencia de anencefalia estaba significativamente relacionada con las mediciones de la dureza total, contenido de calcio y pH de los suministros de agua locales. Stocks<sup>9</sup> examinó las tasas medias de mortalidad anual (mortalidad más mortalidad infantil) para las malformaciones congénitas en las 15 regiones de hospital de Inglaterra y Gales. Las tasas de mortalidad fueron más altas en el norte y el oeste y más bajas en el sureste. Habiendo observado que la mortalidad por enfermedades cardiovasculares seguía aproximadamente el mismo patrón regional, procedió a correlacionar las tasas de mortalidad por malformaciones congénitas en las 15 regiones con tasas de mortalidad de mujeres de 25 a 54 años de las causas determinadas en las regiones correspondientes. Encontró que la mortalidad de las malformaciones del tubo neural correlacionaba muy estrechamente con la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, mientras que otras malformaciones produjeron correlaciones negativas insignificantes. Concluyó que dado que se ha demostrado que la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en las

<sup>7</sup> Penrose, L. S. **Genetics of anencephaly**. J. Ment. Defic. Res. 1957; 1:4-15.

<sup>8</sup> Fredrick, J. **Anencephalus and the local water supply**. Nature. 1970;227:176-7.

<sup>9</sup> Stocks P. **Incidence of congenital malformations in the regions of England and Wales**. Br J Prev Soc Med. 1970;24:67-7.

ciudades de Inglaterra y Gales están fuertemente asociadas con suministros de agua blanda, [61] un factor relacionado con el agua podría ser responsable de las variaciones regionales de la mortalidad de las malformaciones del sistema nervioso central. En este documento y en este contexto, se relaciona diferencias por área en la mortalidad causada por malformaciones del sistema nervioso central en Gales del sur a estimaciones de la dureza de los suministros de agua en estas áreas. También se presentan nuevos datos sobre la mortalidad perinatal de anencefalia en las ciudades de Inglaterra y Gales y se relacionan con las estimaciones de la dureza de sus suministros de agua.

#### II.6.4.- Diabetes

El agua dura puede ser indicativa de la presencia de altos niveles de magnesio. En ciertas áreas, el agua potable contiene en realidad 100% o más de la cantidad diaria recomendada de magnesio, que es alrededor de 300-400 mg con niveles diferentes según el sexo y edad. Dado que todas las quinasas y otras enzimas relacionadas con el ATP y canales que regulan la acción de la insulina son dependientes del magnesio, no resulta sorprendente que se haya encontrado las concentraciones séricas de magnesio disminuidas en sujetos no diabéticos con síndrome metabólico y que la hipomagnesemia es una característica común en sujetos con diabetes tipo 2. No está claro si el contenido bajo de magnesio intracelular es consecuencia de o si precede a resistencia a la insulina; sin embargo, la evidencia reciente sugiere que la deficiencia de magnesio subclínica puede precipitar un estado diabético. Se necesitan estudios adicionales para determinar el papel del magnesio subclínico en el riesgo de diabetes. Esto debe incluir medidas de hemoglobina glucosilada, un indicador de control de la glicemia que se ha encontrado responde a la suplementación oral de magnesio y se correlaciona negativamente con el magnesio ionizado en el suero o magnesio total el suero en diabéticos tipo 2.

#### II.6.5.- Eczema

Se ha sugerido que la exposición a agua dura es un factor de riesgo que podría exacerbar el eczema. El ambiente desempeña un papel importante en la etiología del eczema atópico, pero se desconocen las causas específicas. La dermatitis atópica (o eczema) es un desorden inflamatorio de la piel, crónicamente recurrente, no contagioso y prurítico. El ambiente desempeña un papel importante en la etiología del eczema atópico, pero se desconocen las causas específicas. Numerosos factores han sido asociados con brotes de eczema, incluyendo polvo, nilón, champú, sudor, natación y lana (Langan, 2009). Se cree que la exposición a agua dura es un factor de riesgo para el eczema. Una explicación sugerida en relación con el agua dura es que el aumento del uso de jabón genera residuos de sales insolubles de metal o jabón que se adhieren en la piel o en la ropa de donde no son fácilmente enjuagados y que pueden producir irritación por contacto (Thomas & Sach, 2000). Hay informes que muestran una relación entre la dureza agua y eczema atópica, desde 1 año hasta toda la vida, entre los niños de la enseñanza básica. Las tendencias de prevalencia de la eczema en la población de la enseñanza secundaria no fueron significativas (McNally et al., 1998). Actualmente existen estudios adicionales que están en marcha.<sup>10</sup>

La prevalencia de los síntomas de eczema atópico entre los niños de Japón, Nottinghamshire y España es el caso más conocido.<sup>11</sup> Se desconocen las razones de una alta prevalencia. En un estudio realizado

<sup>10</sup> Organización Mundial de la Salud. **Hardness in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** 2011

<sup>11</sup> Pallav Sengupta. Department of Physiology, Vidyasagar College for Women, University of Calcutta, Kolkata, West Bengal, India. International Journal of Preventive Medicine. **Potential Health Impacts of Hard Water.** Aug 2013; 4(8): 866-875. PMID: PMC3775162

en la India se utilizó datos sobre la dureza del agua y el contenido de cloro del abastecimiento de agua, la prevalencia de la dermatitis atópica diagnosticada por los médicos y los episodios de ahogos registrados por los padres, factores de confusión potencial por situación socioeconómica y el estado de salud por municipio. La prevalencia de eczema atópico resultó significativamente superior en la categoría de dureza de agua más alta que en el más bajo respectivamente. Se observó una relación significativa entre el contenido de cloro del abastecimiento de agua y la prevalencia de la dermatitis atópica después de un ajuste por los factores de confusión. La dureza del agua puede incrementar el riesgo de dermatitis atópica entre los niños de enseñanza básica en Japón, así como en el Reino Unido.[84].

#### **II.6.6.- Densidad mineral de los huesos**

La correlación entre el calcio y magnesio en el agua potable y su impacto en la salud ósea están sin identificar, aunque hay algunas pruebas de que el agua alta en calcio es beneficiosa para los huesos. Se ha reportado en un estudio que la densidad mineral de la espina dorsal fue significativamente mayor en mujeres de 30-70 años que vivían en Sangemini, una región de Italia central, donde bebieron el agua local de alto contenido de calcio (318 mg/l), en comparación con las mujeres en la misma región que bebieron agua baja en calcio (< 60 mg/l). La diferencia estimada en la ingesta de calcio de una evaluación de dieta y agua era 258 mg/día en promedio. En una evaluación de calcio ingerido del agua y la densidad mineral ósea de cadera en las mujeres francesas de 75 años de edad o mayor, se encontró que el aumento de calcio de 100 mg/día de agua potable estaba asociado con un aumento de 0,5% de la densidad ósea femoral.

#### **II.6.7.- Salud reproductiva**

Hay pocos informes sobre el efecto de la dureza del agua sobre la salud reproductiva de los hombres y la mayoría de ellos puso énfasis en el efecto de sus constituyentes calcio y magnesio, mientras que otros menos en algunos otros constituyentes, como el fluoruro. Sin embargo, algunos informes muestran la ocurrencia de fallas reproductivas y muerte fetal en la India en regiones de aguas duras. Algunos de los estudios muestran el efecto del exceso de calcio en el sistema reproductivo y su influencia negativa en la fertilidad. Estos informes demostraron que el estrés oxidativo inducía infertilidad en los hombres por el efecto del calcio, pero mostraron efectos beneficiosos del magnesio. Hay también algunos informes sobre los efectos del fluoruro en el agua en el crecimiento, reproducción y supervivencia, que mostró que la exposición prolongada a estas sales causa una disminución progresiva en la reproducción. Por el contrario, en mujeres, el sulfato de magnesio presente en el agua dura pareciera prevenir la eclampsia en pacientes con pre-eclampsia. El sulfato de magnesio disminuye el riesgo de desarrollar preeclampsia alrededor del 50% y también disminuye la mortalidad materna. La Organización Mundial de la Salud considera que el sulfato de magnesio es la droga de elección para la prevención de la eclampsia en pacientes que sufren de pre-eclampsia. También se ha demostrado que el sulfato de magnesio puede prevenir el parto prematuro.

#### **II.6.8.- Salud digestiva y estreñimiento**

Se ha reportado que incluso la salud gastrointestinal se beneficia del agua dura, ya que proporciona efectos que potencialmente alivian la aparición del estreñimiento en el 85% de los casos. Un agua rica en calcio y magnesio, en una combinación adecuada, ayuda a combatir el estreñimiento. El calcio en el agua dura se hace cargo del exceso de bilis y de sus grasas residentes para eliminar el jabón como sustancias insolubles, las que se emite desde el cuerpo durante la defecación. De hecho, muchos científicos de renombre han considerado el agua dura como una bendición que tiene algunos fantásticos beneficios para la salud que parecen fomentar la mayor esperanza de vida y mejorar la salud. La sal de magnesio tiene un efecto laxante. Esto proporciona una rápida evacuación del intestino. También se utilizan citrato de magnesio, fosfato de magnesio e hidróxido de magnesio. La Asociación Americana de Gastroenterología recomienda leche de magnesia para el tratamiento de la constipación como una de las

opciones terapéuticas; sin embargo, Fundación de Enfermería para la Rehabilitación de Estados Unidos desalienta el uso rutinario de laxantes salinos de magnesio debido a los posibles efectos secundarios tales como calambres abdominales, heces acuosas, potencial para la deshidratación e hipermagnesemia. Sólo indican el uso de estos laxantes en pacientes de la fase final, cuando otras opciones han fallado y junto con una adecuada evaluación prospectiva de los niveles de magnesio.

## **II.7.- Conclusiones**

La dureza es importante para el agua potable desde el punto de vista de aceptabilidad estética y consideraciones operacionales. Aunque existe cierta evidencia de estudios epidemiológicos del efecto protector del magnesio o la dureza sobre la mortalidad cardiovascular, la evidencia está siendo debatida y no demuestra causalidad. Se están realizando estudios adicionales. A pesar de ello, el agua potable puede ser una fuente de calcio y magnesio en la dieta y puede ser importante para aquellas personas cuya ingesta de calcio y magnesio es marginal. Cuando las fuentes de agua potable se suplementan o reemplazan por agua desmineralizada que requiere acondicionamiento, se debería considerar la adición de sales de calcio y magnesio para alcanzar concentraciones similares a las que la población recibió de la fuente original. Cuando la composición mineral del agua ha sido alterada, el abastecimiento público o por los fabricantes de dispositivos de tratamiento deberían informar a los consumidores de ésta, así como de los medios para complementarla si así se desea. El aporte de minerales del agua potable para nutrición mineral debería considerarse cuando se proponen cambios en el abastecimiento o cuando se explotan nuevas fuentes para el agua potable, tales como agua de mar o agua salobre. Actualmente no hay datos suficientes para sugerir concentraciones de minerales mínimas o máximas, y por ello no se propone valores guías.