



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE TRATAMIENTOS EMPLEADOS
PARA ELIMINAR LA DUREZA DEL AGUA**

**TRABAJO MONOGRÁFICO
PARA OBTENER EL GRADO DE**

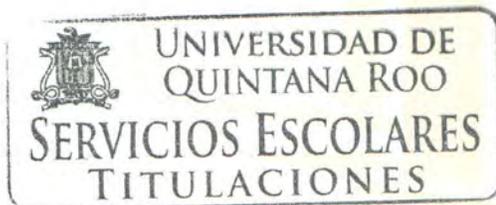
INGENIERA AMBIENTAL

PRESENTA

ZILPA HERNÁNDEZ SANTIAGO

ASESORES

M.I.A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES
M.C. JOSÉ MARTÍN RIVERO RODRÍGUEZ
DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UUH



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, FEBRERO DE 2015



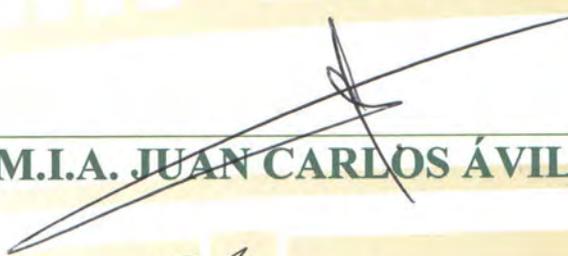
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO MONOGRÁFICO BAJO LA SUPERVISIÓN DEL
COMITÉ DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA AMBIENTAL

COMITÉ DE TRABAJO MONOGRÁFICO

ASESOR:


M.I.A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES

ASESOR:


M.C. JOSÉ MARTÍN RIVERO RODRÍGUEZ

ASESOR:


DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UÑ



DEDICATORIA

A MIS PADRES: FRANCISCO HERNÁNDEZ PABLO Y OLGA SANTIAGO LÓPEZ, POR SER MI EJEMPLO DE INTEGRIDAD Y PERSEVERANCIA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres su apoyo y enseñanza, ya que el respeto y admiración que tengo hacia la naturaleza proviene del hogar.

A la familia Hernández Miguel, quienes me apoyaron durante la estancia en la universidad, “Gracias”.

A mis hermanos que me apoyaron e impulsaron. A Mis compañeros y amigos de generación, por su alegría y amistad.

Agradezco a los maestros por compartir sus conocimientos y experiencias, que enriqueció mi formación.

Un especial agradecimiento al M.C. Juan Carlos Ávila Reveles, por su dirección para realizar este trabajo. Al M.C José Martin Rivero Rodríguez y al Dr. José Alfonzo Canché Uuh por sus correcciones y acertadas observaciones.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	8
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Antecedentes.....	9
1.3 Justificación.....	11
1.4 Objetivo General.....	13
1.4.1 Objetivos Específicos.....	13
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Ciclo del agua.....	14
2.2 Distribución del agua.....	15
2.3 Calidad del agua potable.....	17
2.3.1 Dureza.....	17
2.3.2 Definición de dureza.....	17
2.3.3 Afectación de la dureza del agua.....	18
2.4 Plantas ablandadoras en México.....	20
2.5 Costo de ablandar el agua.....	21
CAPÍTULO III PROCESOS Y TRATAMIENTOS EMPLEADOS PARA ELIMINAR LA DUREZA DEL AGUA.....	22
3.1 Ósmosis inversa.....	22

3.1.1 La membrana.....	24
3.1.2 Contaminantes retenidos	27
3.1.3 Programas informáticos que permiten predecir el funcionamiento de las membranas	29
3.2 Intercambio iónico	30
3.2.1 Intercambiador iónico	30
3.2.2 Intercambio iónico para eliminar la dureza del agua	34
3.2.3 Capacidad del intercambiador	35
3.3 Ablandamiento químico.....	40
3.3.1 Ablandamiento con exceso de cal	41
3.3.2 Ablandamiento con carbonato de sodio-cal	43
3.3.3 Ablandamiento con sosa cáustica.....	49
3.4 Tratamiento Magnético del agua	50
3.4.1 Prueba piloto sobre el equipo Water King utilizado para disminuir las incrustaciones en las tuberías de Chetumal.....	51
CAPÍTULO IV EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EMPLEADOS PARA ELIMINAR LA DUREZA DEL AGUA.....	53
4.1 Ósmosis inversa	53
4.1.1 Ventajas.....	53
4.1.2 Limitantes.....	54
4.2 Intercambio iónico	54
4.2.1 Ventajas.....	54
4.2.2 Limitantes.....	54
4.3 Ablandamiento químico.....	55
4.3.1 Ventajas.....	55
4.3.2 Limitantes.....	55

4.4 Tratamiento magnético	56
4.4.1 Ventajas.....	56
4.4.2 Limitantes.....	56
CAPÍTULO V CONCLUSIÓN.....	57
5.1 CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS	59
ANEXOS	64
Anexo 1. Límites de características químicos del agua potable, NOM-127-SSA1-1994, "salud ambiental, agua para uso y consumo humano”.....	64
Anexo 2. Informe del tratamiento magnético del agua, ficha técnica equipo Water King	67

ÍDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Diagrama del ciclo del agua.....	15
Figura No. 2 Distribución global del agua.....	16
Figura No. 3 Relación de la dureza con enfermedades cardiacas y cálculos en las vías urinarias.....	20
Figura No. 4 Diagrama de Ósmosis inversa.....	22
Figura No. 5 Equipo de Ósmosis inversa.....	29
Figura No.6 Típica resina de intercambio iónico.....	31
Figura No. 7 Diagrama del proceso de intercambio iónico en la resina.....	33
Figura No. 8 Diagrama de la resina de intercambio iónico en ciclo sodio.....	35
Figura No.9 Planta de intercambio iónico.....	38

Figura No.10 Planta de intercambio iónico con dos lechos y dos salmueras.....	39
Figura No. 11 Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento con carbonato de calcio en una etapa.....	41
Figura No. 12 Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento en dos etapas.....	44
Figura No. 13 Equipo Water King, Suavizador Electrónico para Agua Dura.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.1 Cationes que causan dureza y sus aniones asociados.....	10
Tabla No. 2 Clasificación del agua dependiendo del grado de dureza.....	10
Tabla No. 3 Histórico de la dureza total promedio anual de Chetumal, Quintana Roo, México.....	12
Tabla No. 4 Clasificación de membranas.....	25
Tabla No. 5 Características de las membranas de Poliamida y Acetato de celulosa.....	26
Tabla No. 6 Porcentaje de retención de los contaminantes en la membrana.....	28
Tabla No. 7 Tipo y grupo funcional de los intercambiadores de cationes y aniones.....	32
Tabla No. 8 Selectividad decreciente de los iones en resinas de intercambio iónico.....	33
Tabla No. 9 Características de una resina catiónica típica.....	37

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CAPA	Comisión del Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo
CDC	Center for Disease Control y Prevention
CONAGUA anteriormente CNA	Comisión Nacional del Agua
DT	Dureza Total
FAO	Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación
IAM	Infarto Agudo al Miocardio
NOM	Norma Oficial Mexicana
OI	Ósmosis Inversa
pH	Potencial de Hidrogeno
SSA	Secretaria de Salud

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El agua es un actor crucial para el desarrollo del ser humano: En ella se realizan diferentes actividades productivas, alberga especies que son parte de la dieta, tiene fines recreativos, es objeto de investigación y el más importante “el agua para consumo”. Dicha agua debe cumplir estándares de calidad para ser considerada apta para beber. La calidad del agua se ve influenciada por las actividades antropogénicas y la característica del suelo.

En materia de servicios de agua, el gobierno mexicano tiene la responsabilidad de abastecer a la población con agua de calidad. Los criterios se determinan en la Norma Oficial Mexicana, NOM-127-ssa1-1994; Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (ir a anexo 1). Las características que se evalúan son; bacteriológicas, organolépticas, fisicoquímicas y radiactivas.

El parámetro fisicoquímico que se analizará es la dureza del agua. Varios autores coinciden que el único beneficio al eliminar la dureza, es mejorar el sabor. Aun así es un tratamiento común. En una región como la península de Yucatán, donde el suelo calcáreo favorece la dureza, los reportes de calidad del agua en el parámetro de dureza los valores rebasan el límite máximo permitido en la norma.

1.2 Antecedentes

Anteriormente las personas empezaron a detectar que en algunos tipos de agua era necesario emplear más jabón para poder lavar su ropa, a esa agua la llamaron “agua dura”.

La dureza en el agua es causada por los iones metálicos divalentes capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados, también contiene aniones que forman incrustaciones en las tuberías. Los principales cationes que causan la dureza en el agua y los principales aniones asociados con ellos son los siguientes.

Tabla. No.1

Cationes que causan dureza y sus aniones asociados

Cationes que causan dureza	Aniones asociados
Ca²⁺	HCO ₃ ⁻
Mg²⁺	SO ₄ ²⁻
Sr²⁺	Cl ⁻
Fe²⁺	NO ₃ ⁻
Mn²⁺	SiO ₃ ²⁻

Fuente: Sawyer y McCarty, 2001

La dureza del agua se deriva en gran medida de su contacto con el suelo y las formaciones rocosas. El agua lluvia al caer sobre la tierra no es suficiente para disolver las excesivas cantidades de sólidos que existen en muchas aguas naturales. La capacidad disolvente se obtiene del suelo, donde la acción bacteriana libera dióxido de carbono. El agua del suelo queda muy cargada de dióxido de carbono, el cual, desde luego, está en equilibrio con el ácido carbónico.(Sawyer, McCarty, & F, 2001)

La tabla No. 2 muestra la clasificación del agua dependiendo del grado de dureza.

Tabla No. 2

Clasificación del agua dependiendo del grado de dureza

mg/l	Grado de dureza
0 – 75	Blanda
75– 150	Moderadamente dura
150 – 300	Dura
300 y más	Extremadamente dura

Fuente: Comisión Nacional del Agua ,(CONAGUA anteriormente CNA) 2007

La dureza adquiere valores de cero a cientos de mg/l en función de la fuente de abastecimiento o el procesamiento que se haya dado al agua. Un agua con menos de 75 mg/l de CaCO₃ se considera blanda, entre 75 y 150 mg/l es moderadamente dura, de 150 a 300 mg/l es dura y más de 300 mg/l es extremadamente dura.(CNA, 2007)

La norma dictamina los parámetros y límites de los contaminantes. Propone que el límite máximo permitido de dureza, para el agua de consumo humano es 500 mg/l expresado como, carbonato de calcio, CaCO₃.

Algunos autores coinciden que la dureza del agua no causa daños a la salud y su eliminación es con el objetivo que el sabor sea agradable y aceptable para realizar actividades productivas. *“El umbral del sabor de ión calcio es del orden de 100 a 300 mg/l, y el de magnesio es probablemente inferior al de calcio.”*(Mora, 1999).

Otros autores defienden que la presencia de la dureza en altas concentraciones causan daños a la salud, por tal motivo se indagarán sus investigaciones y se expondrán sus argumentos.

1.3 Justificación

Este trabajo tiene como objetivo investigar los diferentes tratamientos empleados para eliminar la dureza del agua.

La presencia de iones responsables de la dureza es común en el agua que se extrae de un acuífero. Varios expertos coinciden que el agua extraída es más fácil de tratar porque tiene menor cantidad de sustancias contaminantes. *En México, para el abastecimiento público, que agrupa al uso público urbano y al doméstico, el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62.2% del volumen.*(Comisión Nacional del Agua, 2011)

La composición del suelo del estado de Quintana Roo es principalmente roca caliza que al disolverse en el agua, produce iones responsables de la dureza. La ciudad de Chetumal, capital del estado de Quintana Roo, es abastecida con el agua que se extrae en las comunidades vecinas, Gonzales Ortega, Ucum y Huay-Pix, condición que se manifiesta en la incrustación de sarro en las tuberías. Este es un problema común del agua de abastecimiento público de Chetumal.

Según el programa de monitoreo de la calidad del agua para la ciudad de Chetumal, el promedio anual de la dureza total en el periodo comprendido de 2007 a 2013 es:

Tabla No. 3

Histórico del promedio anual de la dureza total de Chetumal, Quintana Roo, México

Año	Dureza total promedio (mg/l)
2007	960
2008	716
2009	886
2010	947
2011	991
2012	1084
2013	1112

Fuente: Comisión del Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo, (CAPA) 2013

En este trabajo se investigarán a fondo los tratamientos empleados para eliminar la dureza del agua, con base en esta información los tomadores de decisiones podrán elegir el mejor tratamiento para el agua cuando las variables sean: eficiencia y operación.

1.4 Objetivo General

Documentar los posibles tratamientos para eliminar la dureza del agua del Sistema Chetumal que pertenece al organismo operador de Othón P. Blanco de la CAPA

1.4.1 Objetivos Específicos

- ❖ Identificar los beneficios cuando se elimina la dureza del agua

- ❖ Comparar la situación de dureza del agua de Chetumal, Quintana Roo, usando los reportes de La Secretaria de Salud, SSA, para la calidad del agua en el periodo 2007-2013 y la NOM-127-SSA1 1994

- ❖ Comparar eficiencia y operación de los diferentes tratamientos empleados para eliminar la dureza del agua

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Ciclo del agua

Al movimiento general del agua se le conoce como ciclo Hidrológico, no tiene un inicio específico, el agua está en todas partes y se manifiesta en sus 3 estados; sólido, líquido y gaseoso. Cambiando su posición en el ciclo por 4 procesos físicos: evaporación, condensación, precipitación y escorrentía.

Como ejemplo se asume que el ciclo inicia en la evaporación, las plantas (evapotranspiración), ríos, lagos y océanos con el calor del sol se calientan hasta evaporarse. Las diminutas moléculas de vapor de agua son levantadas por las corrientes de aire, hasta que las bajas temperaturas y partículas de polvo, sales y humo se agrupan formando gotas de lluvia, que al chocar con otras gotas incrementan su volumen, originando las nubes (condensación). Cuando las gotas de agua son suficientemente pesadas y las corrientes de aire no pueden soportarlas, caen en forma de lluvia, aguanieve, nieve o granizo (precipitación).

Los océanos juegan un papel primordial:

Se estima que, de los 1.386.000.000 kilómetros cúbicos que hay de agua en la Tierra, alrededor de 1.338.000.000 kilómetros son almacenados en los océanos. Esto es, alrededor de un 96.5%. También se estima, que los océanos proveen de un 90% del agua que se evapora hacia la atmósfera.(U.S. Geological Survey, science for a changing world, 2013)

Cuando el agua cae en forma de nieve se acumula en capas de hielo en los glaciares (puede almacenarse por millones de años) y en los climas más cálidos al llegar la primavera el hielo se derrite.

La mayor porción de la precipitación cae en los océanos o sobre la tierra, donde, debido a la gravedad, corre sobre la superficie como escorrentía superficial, hasta llegar a un río que desemboca en el océano. No toda el agua sufre este destino, una gran parte se

infiltra para recargar el acuífero y después se manifiesta en forma de ríos y manantiales que también descargan en el océano.



Figura No. 1 Diagrama del ciclo del agua

Fuente: (U.S. Geological Survey, science for a changing world, 2013)

2.2 Distribución del agua

La distribución del agua en el planeta se da en la siguiente proporción. El agua salada (océanos) representa el 97 % y el agua dulce el 3%. De este 3% de agua dulce, el agua subterránea corresponde al 30.1 %, las capas de hielo y glaciares son 68.7% y 0.9% otros (aquí está el agua dulce superficial). El agua dulce superficial es el 0.3 % del total de agua dulce y se divide: ríos 2%, pantanos 11% y lagos 87 %.

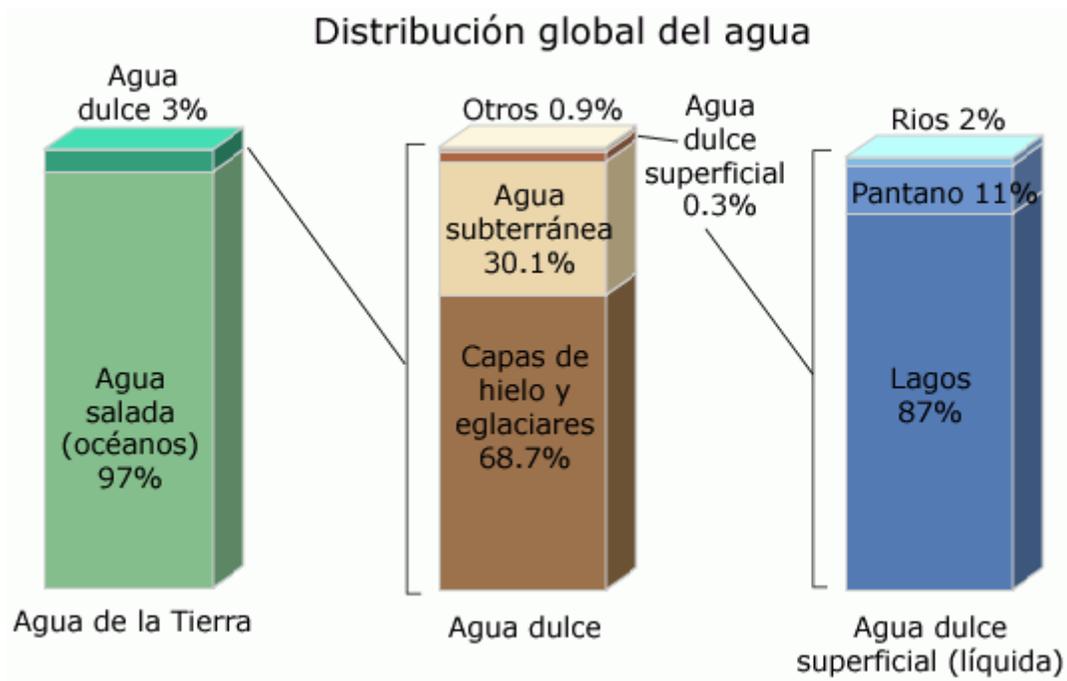


Figura No. 2 Distribución global del agua

Fuente: (U.S. Geological Survey, science for a changing world, 2013)

Se estima que el total global de agua dulce que se consume al año es de 4,000 km³, del cual un 99% se extrae tanto de aguas subterráneas como de aguas superficiales renovables; menos del 1% de agua extraída es de acuíferos no renovables. UNESCO citado por (consejo consultivo del agua, A.C, s/a)

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, (FAO), en materia de agua para uso humano dice: “a nivel mundial, las proporciones de extracción son aproximadamente 70 por ciento agropecuaria, 11 por ciento municipal y 19 por ciento industriales.” (FAO, 2013)

2.3 Calidad del agua potable

La potabilización del agua para consumo humano es fundamental; previene y evita la transmisión de enfermedades gastrointestinales entre otras. Cuando se potabiliza el agua se consideran diferentes características; bacteriológicas, fisicoquímicas, organolépticas y radiactivas. Dentro de las características fisicoquímicas esta la dureza del agua, importante en esta monografía. (Ir a anexo No.1 para ver los parámetros fisicoquímicos)

2.3.1 Dureza

La dureza se determina por la concentración de los cationes metálicos multivalentes que la causan como: Ca, Mg y en menor grado Al, Fe, Mn, Sr y Zn. Se clasifica en: dureza total, dureza carbonatada y dureza no carbonatada.

La dureza total es producida por calcio y magnesio. La dureza carbonatada es conocida como la dureza temporal o no permanente, es originada por los bicarbonatos y equivalente a la alcalinidad, puede precipitarse mediante ebullición prolongada.

La dureza no carbonatada incluye principalmente sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y magnesio. La evaporación de agua que contiene estos iones causa la cristalización de compuestos, que forma una incrustación dura y frágil en las paredes y tubos de calentadores.

2.3.2 Definición de dureza

Romero y Kermmer definen la dureza

La tradición define la dureza como la capacidad de consumo de jabón por el agua. Con fines prácticos, es el contenido de calcio y magnesio del agua, aunque los metales pesados como el hierro y el manganeso también consumen jabón. (Kemmer, 1990)

En la práctica, se considera que la dureza es causada por iones metálicos divalentes capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones. (Romero R. J., 1999)

Instituciones gubernamentales definen la dureza de la siguiente forma:

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. (NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001)

La dureza se clasifica en carbonatada (temporal) y no carbonatada (permanente). La primera es sensible al calor, precipita a altas temperaturas y equivale a la alcalinidad. Cuando el agua es "dura" significa que contiene sales incrustantes, dificulta la cocción de legumbres e impide la formación de espuma con el jabón. (CNA, 2007)

2.3.3 Afectación de la dureza del agua

Al hacer referencia a la calidad de las aguas de consumo, la dureza no es de los componentes de mayor importancia sanitaria. No obstante, por sus implicaciones económicas y las molestias y el rechazo que ocasiona en la población, el ablandamiento del agua es una de las operaciones que se realiza con bastante frecuencia. (Espigares & Pérez, 2012)

Romero hace un listado de los beneficios que se obtienen con el ablandamiento del agua:

- 1. Economía de jabón y detergentes*
- 2. Mejor lavado de ropa y utensilios domésticos.*
- 3. Disminución de incrustaciones en artefactos domésticos*
- 4. Mejor cocción y preparación de alimentos*
- 5. Si se opera en forma correcta, prevención de la corrosión*
- 6. Incremento de la eficacia de la filtración.*

Lo anterior indica que el ablandamiento se hace por razones económicas y no por potabilidad del agua. (Romero R. J., 1999)

La organización mundial de la salud dice:- Varios estudios epidemiológicos ecológicos y analíticos han demostrado la existencia de una relación inversa estadísticamente significativa entre la dureza del agua de consumo y las enfermedades cardiovasculares. Existen algunos indicios de que las aguas muy blandas pueden producir un efecto adverso en el equilibrio mineral, pero no se disponía de estudios detallados para su evaluación. (OMS, 2003)

Varios autores defienden que la presencia de la dureza en altas concentraciones causa daños a la salud.

En la población de Arica, Chile se hizo un estudio sobre los parámetros de calidad del agua que abastece a la población, el autor concluyó:

Las enfermedades que aparecen con más frecuencia y que se relaciona con el agua de Arica son los cálculos urinarios. El análisis de agua implica que Arica tiene las condiciones precursoras que causan esta enfermedad. El agua de Arica tiene 680 mg/l que es más que el doble que el estándar del CDC en que se clasifica al agua con más dureza total, más de 300 mg/l en la categoría extremadamente dura. (LUBELL, 2009)

En Costa Rica se realizó una investigación relacionada con el agua para consumo humano, se examinó; la dureza total, Ca^{++} y Mg^{++} , y la relación de estos parámetros con enfermedades cardíacas y cálculos en las vías urinarias. El resultado que arrojó el análisis estadístico es: A mayor concentración de calcio, menor infarto agudo al miocardio (IAM) y más cálculos en las vías urinarias. A mayor concentración de magnesio menor IAM. A mayor dureza total menor IAM.

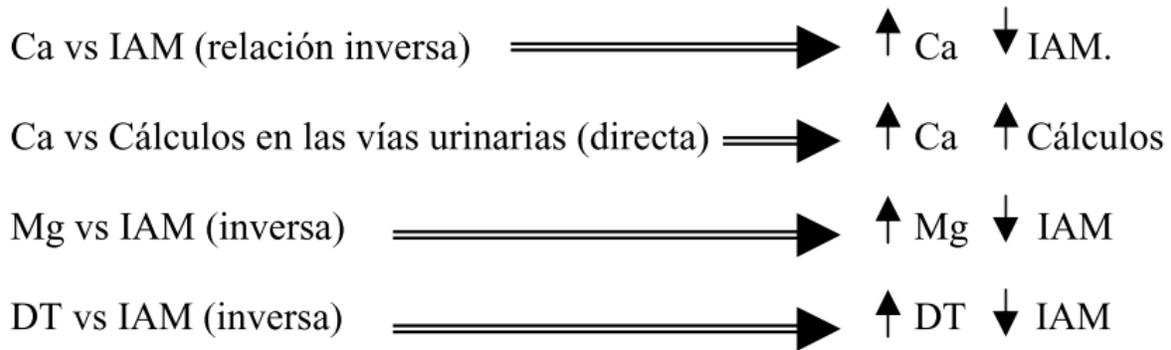


Figura No. 3 Relación de la dureza con enfermedades cardiacas y cálculos en las vías urinarias, IAM= infarto agudo al miocardio

Fuente: (Mora A. D., 1998)

Medina y col. Hicieron un estudio en el Estado de Yucatán, México, donde determinaron la prevalencia de urolitiasis y la asociación de esta con antecedentes familiares y la dureza del agua. Llegaron a la conclusión: “*La prevalencia de urolitiasis en el estado de Yucatán es elevada y se incrementa en forma notable con la edad. El antecedente familiar y la dureza extrema (<400 ppm) del agua empleada para consumo humano son factores predisponentes para el desarrollo de la enfermedad*”. (Medina y col, 2002)

2.4 Plantas ablandadoras en México

En el país hay 19 plantas potabilizadoras cuyo principal proceso consiste en eliminar la dureza. Los estados que tienen plantas ablandadoras son: Colima (1), Chihuahua (1), Guanajuato (8), Puebla (1), San Luis Potosí (1), Tabasco (5), Veracruz (2). El Estado de Quintana Roo carece de plantas potabilizadoras. (CONAGUA, 2013)

2.5 Costo de ablandar el agua

La empresa Lenntech que se encarga de desarrollar, diseñar, fabricar e instalar sistemas de purificación de aire y de agua no dañina con el ambiente dice: *Los costes de un ablandador de agua pueden variar generalmente entre 0.20 y 0.40 euros por día por persona. (\$ 3.37 MXN a \$ 6.74 MXN)*(Universidad Técnica de Delft, 1998)

El costo de ablandar el agua está afectado por la tecnología que se emplea para ese fin, la dureza y las características fisicoquímicas del agua a tratar, también influye la fuente de energía.

CAPÍTULO III PROCESOS Y TRATAMIENTOS EMPLEADOS PARA ELIMINAR LA DUREZA DEL AGUA

Para eliminar la dureza se emplean diferentes tratamientos. A continuación se recopila información sobre los más utilizados: ósmosis inversa, intercambio iónico, ablandamiento químico y tratamiento magnético del agua.

3.1 Ósmosis inversa

La ósmosis es un proceso físico químico, se relaciona con el movimiento de un solvente a través de una membrana semipermeable. Ocurre una transferencia de masa por medio de difusión simple. La transferencia de masa es de mayor concentración a menor concentración.

La ósmosis inversa (OI) es el proceso en el cual se logra revertir la ósmosis aplicando una presión en el área donde se encuentra la mayor concentración de soluto. El agua pasa al otro lado de la membrana semipermeable que retiene los iones, material orgánico e inorgánico disuelto, partículas, pirógenos y microorganismos.

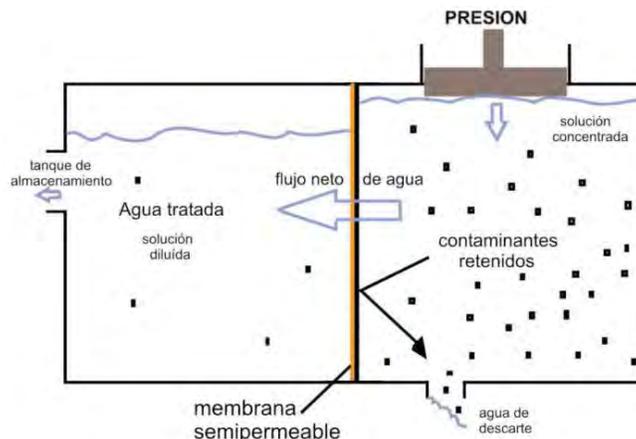


Figura No. 4 Diagrama de Ósmosis inversa

Fuente: (Prowater Argentina, 2007)

“A partir de la técnica de Ósmosis Inversa es posible aprovechar agua dura, salobre o de mar y obtener agua pura para el consumo humano y otros diversos usos” (Herrera, 2012).

Mulder, 1998 y Porter, 1990, ejemplificaron la OI para purificar agua salobre.

La OI es una operación de membrana en la que, por medio de una presión, el solvente de una solución se transfiere a través de una densa membrana fabricada expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Si una solución salina concentrada está separada del agua pura por este tipo de membrana, la diferencia de potencial químico tiende a promover la difusión del agua desde el compartimento diluido al compartimento concentrado para igualar las concentraciones. En el equilibrio, la diferencia de niveles entre los dos compartimentos corresponde a la presión osmótica de la solución salina. Para producir agua pura de una solución salina, debe aplicarse una presión que sea mayor a la presión osmótica de la solución. Del mismo modo, para obtener flujos o caudales económicamente viables, al menos debe ejercerse el doble de la presión osmótica; por ejemplo, para agua marina se usan presiones de 5 a 8Mpa citado por (Mora J. y col, 2003)

La empresa Hidrotec (Hidrotec, s/a) dedicada a la fabricación, mantenimiento y diseño de instalaciones para el tratamiento del agua. Desalinización por OI, aguas residuales urbanas, etc. enlistó las características a considerar antes de proyectar un equipo de tratamiento de OI.

Para proyectar un equipo de OI es fundamental contar con:

- Caracterización del agua de alimentación. Noel Herrera Ortiz en su tesis sobre “el diseño y metodología de evaluación para el sistema de...” Cita a Mel (1997) *“Entre los parámetros del agua de abasto que deben considerarse se encuentran: la presión a que se suministra, el pH, el contenido de cloro residual, la temperatura y el índice de ensuciamiento”*(Herrera, 2012)
- Caudal a tratar
- Uso del agua de producto.

Estos datos determinan la presión de trabajo y la configuración de las membranas para el equipo de OI y el pre-tratamiento adecuado para evitar problemas de incrustación o ensuciamiento.

Los equipos de Ósmosis inversa están constituidos básicamente por:

- *Fuente de presión.*
- *Pre-tratamiento y acondicionamiento.*
- *Contenedor y membranas de Ósmosis Inversa.*
- *Medidores de flujo de permeado, concentrado y reciclado.*
- *Control mediante microprocesador.*
- *Panel de protección, mando y control.*
- *Sistema de post-tratamiento(Hidrotec, s/a)*

De los elementos enlistados, la membrana de ósmosis inversa, es determinante, por lo cual hablaremos de ella con mayor detalle a continuación.

3.1.1 La membrana

Las primeras membranas de ósmosis inversa fueron vejigas de cerdos, surgieron en los años sesentas. *“Estas membranas fueron muy ineficientes, caras, y no muy confiables para las aplicaciones prácticas fuera del laboratorio”.*(López, 2005)

Durante años se investigó y se perfeccionaron las membranas hasta llegar a las actuales.

Los materiales sintéticos han resuelto generalmente este problema, permitiendo a las membranas llegar a ser altamente eficientes, rechazando contaminantes, y haciéndolas muy resistentes a presiones muy altas, necesarias para una operación eficiente.(López, 2005)

García (2002), Quintana (2010), Jiménez (2011) y Herrera (2012) clasificaron las membranas considerando su forma, estructura, naturaleza, composición química, carga superficial, morfología de la superficie, técnica de fabricación y presión de trabajo.

García (2002) hace referencia a la clasificación de membrana de Fariñas (1999), los tipos de membranas dependen de los parámetros: estructura, naturaleza, forma, composición química, carga superficial y morfología de la superficie, presión de trabajo y técnica de fabricación.

Tabla No. 4

Clasificación de membranas

Parámetros	Tipos
Naturaleza	Integrales y compuestas de capa fina.
Forma	Planas, Tubulares y de Fibra hueca
Composición química	Biológicas y Sintéticas
Carga superficial	Neutras, Catiónicas y Aniónicas
Morfología de la superficie	Lisa y Rugosa
Presión de trabajo	Muy baja, Baja, Media y Alta
Técnica de fabricación	De maquina: inversión de fase, policondensación entre fase y polimerización de plasma. Dinámicas

Fuente: Adaptado de Fariñas M. “Ósmosis Inversa. Fundamentos Tecnología y Aplicaciones”. EVE e IBERDROLA, 1999.(Garcia, 2002)

Jiménez (2011) describe las características de las membranas de OI con base en los materiales; Poliamida y Acetato de celulosa.

Tabla No. 5

Características de las membranas de Poliamida y Acetato de celulosa

	Poliamida	Acetato de celulosa
pH	Estable dentro de una gama de pH de 3 a 11, pudiendo resistir durante cortos periodos, máximo 30 minutos, un pH comprendido entre 1 y 12.	Al ser un éster orgánico está sometido a hidrolisis con pH ácido y alcalino, por lo cual la gama de trabajo óptima se encuentra con pH entre 4 y 7.
Oxidantes	Es atacada por los oxidantes, por lo que el cloro libre superior a 0.1 ppm destruye la membrana.	Resiste la acción de oxidantes pudiendo soportar cantidades de cloro libre del orden de 2 ppm
Temperatura máxima de trabajo	45°C	30°C

Fuente: Fundamentos de ósmosis inversa por RG System 2002 (Jimenez, 2011)

En cuanto al tipo de material se ha comprobado que el rendimiento de las membranas de poliamidas aromáticas es mayor que las de acetato de celulosa, obteniéndose mayores caudales de agua producto a menor presión. [Guerrero Gallego et al., 2003] Citado por (Quintana, 2010)

Herrera (2012) aborda el tema de la ósmosis inversa.

Los materiales que componen la estructura selectiva de las membranas utilizadas en procesos de separación en fase líquida, incluyen polímeros altamente ordenados. Estos polímeros pueden formar puentes de hidrógenos con el agua, o con otros disolventes polares, como el amoníaco y el etanol. Las moléculas de agua pueden formar dichos enlaces con los grupos carbonilos de los polímeros, y moverse de un núcleo de puentes de

hidrógeno a otro, atravesando así los mismos, siempre que exista una fuerza impulsora que facilite el transporte, en cambio los iones y las moléculas que no intervienen en este tipo de enlaces, no pueden atravesar la matriz orgánica.

En la actualidad se emplean tres configuraciones:

- *Elementos con membranas enrolladas en espiral.*
- *Elementos de fibra hueca*
- *Membrana compactada en haces cruzados, enrollados y compactados*

Las más empleadas son de espiral y de haces cruzados debido a su alta relación superficie/volumen, además son de fácil sustitución en caso de fallas y tienen bajas caídas de presión. Se puede usar con todo tipo de agua. Los materiales más empleados en la fabricación de las membranas son: Acetato de celulosa y Poliamida. (Byrne.Wes, (2001) citado por(Herrera, 2012)

3.1.2 Contaminantes retenidos

Baldeón y Mora exponen sobre los tipos de contaminantes que pueden ser retenidos por las membranas de ósmosis inversa.

La ósmosis inversa retiene especies tan pequeñas como de 0.0001 μm , que están en el intervalo de tamaños iónicos o moleculares. Aunque las especies orgánicas de bajo peso molecular, tales como, alcoholes, azúcares, ácidos y a veces tintes, son también usadas para catalogar membranas de ósmosis inversa, éstas son evaluadas normalmente contra soluciones de cloruro de sodio y sulfato de magnesio. (Baldeón, 2012)

La OI es capaz de rechazar contaminantes o partículas con diámetros tan pequeños como 0,0001 μm ,.....Consecuentemente, estos procesos pueden llevar a la remoción de sales, durezas, patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores, compuestos orgánicos sintéticos, pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy. La mayoría de los gases disueltos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de carbono (CO_2), y algunos pesticidas pasan a través

de las membranas de OI. Sin embargo, la tecnología de las membranas puede utilizarse para tratar un mayor número de contaminantes del agua potable y del agua residual, más que ninguna otra tecnología de tratamiento (Mallevalle, 1998, Marki, 2001). Citado por (Mora J. y col, 2003)

Jiménez cita a RG System, empresa que elaboró la siguiente tabla que clasifica los contaminantes retenidos por la membrana y el porcentaje de retención.

Tabla No. 6

Porcentaje de retención de los contaminantes en la membrana

Cationes			Aniones		
Nombre	Símbolo	% de rechazo	Nombre	Símbolo	% de rechazo
Sodio	Na	94-99	Cloruro	Cl	94-95
Calcio	Ca ⁺⁺	96-98	Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	95-96
Magnesio	Mg ⁺⁺	94-98	Sulfato	SO ₄ ⁻	99
Potasio	K ⁺	94-96	Nitrato	NO ₃ ⁻	95-96
Hierro	Fe ⁺	98-99	Fluoruro	F ⁻	94-96
Manganeso	Mn ⁺⁺	98-99	Silicato	SiO ₂ ⁻	95-97
Aluminio	Al ⁺⁺⁺	99	Fosfato	PO ₄ ⁻	99
Amonio	NH ₄ ⁺	88-99	Bromuro	Br ⁻	94-96
Cobre	Cu ⁺⁺	96-99	Borato	B ₄ O ₇	35-70**
Níquel	Ni ⁺⁺	97-99	Cromato	CrO ₄ ⁻	90-98
Estroncio	Sr ⁺⁺	96-99	Cianuro	CN ⁻	90-95**
Cadmio	Cd ⁺⁺	95-98	Sulfito	SO ₃ ⁻	98-99
Plata	Ag ⁺	94-96	Tiosulfato	S ₂ O ₃ ⁻	99
arsénico	As ⁺⁺⁺	90-95	Ferrecianuro	Fe(CN) ₆ ⁻	99
** depende del pH					

Fuente: fundamentos de ósmosis inversa por RG System 2002 citado por (Jimenez, 2011)

3.1.3 Programas informáticos que predicen el funcionamiento de las membranas

Varios fabricantes de membranas de ósmosis inversa han desarrollado programas informáticos que permiten predecir el funcionamiento de las membranas, atendiendo a criterios de producción y de calidad de aguas. Algunos de los fabricantes son:

- *The Dow Chemical Company (FilmTec™)*
- *Hydranautics*
- *Toray Industries Inc.*
- *Du Pont de Nemours (Permasep™ Products)*
- *Koch Membrane Systems Inc. (Quintana, 2010)*



Figura No. 5 Equipo de Ósmosis inversa

Fuente: <http://www.embotelladoras.org/sistema-de-tratamiento-de-agua/equipos-de-ósmosis-inversa/>

3.2 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso químico que utiliza un intercambiador (puede ser aniónico, catiónico o mixto). Este intercambiador atrapa las partículas indeseables. Cuando se satura es posible aplicar algunas operaciones y procesos sencillos que lo hacen otra vez útil.

Aquí la definición de intercambio iónico por la CONAGUA.

El intercambio iónico es un proceso químico que consiste en la remoción de los iones indeseables de un agua cruda transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador iónico, que los acepta y cede un número equivalente de iones de una especie deseable, que se encuentran almacenados en el esqueleto del intercambiador de iones. (CNA, 2007)

3.2.1 Intercambiador iónico

Nalco (1989) describe cómo actúa el intercambiador de iones para retener el contaminante.

El intercambio iónico remueve de un agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, el cual los acepta cediendo un número de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones. El intercambiador de iones tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su esqueleto, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegara finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se le lava con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material de intercambio en condición útil. Esta operación es un proceso químico cíclico y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio. (Nalco Chemical Company, 1989)



Figura No.6 Típica resina de intercambio iónico

Fuente: <http://www.desmineralizadores.com/tipos.html>

Los intercambiadores iónicos que se emplean en el acondicionamiento del agua son estructuras en forma de esqueleto que poseen muchos sitios para intercambio iónico. El esqueleto de plástico insoluble es un ion de enorme tamaño cargado eléctricamente para retener iones de carga opuesta. Los intercambiadores con sitios cargados negativamente son intercambiadores de cationes puesto que retienen iones cargados positivamente. Los intercambiadores de aniones tienen sitios positivamente cargados y, en consecuencia, toman iones negativos (Nalco, 1988).

3.2.1.1 Tipos de resinas intercambiadoras

Las primeras resinas intercambiadoras eran aluminosilicatos de sodio inorgánicos, provenían de un mineral llamado zeolita (arenisca verde procesada). *Una zeolita es un aluminosilicato cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento [ambos] que permiten el intercambio iónico y la deshidratación reversible.* (Bosch, 1988)

Los primeros productos empleados en la industria como intercambiadores iónicos fueron las zeolitas inorgánicas de origen natural, como los silicatos de aluminio, que tenían muy baja capacidad de intercambio por metro cúbico del material. La siguiente mejora consistió en la introducción de intercambiadores iónicos orgánicos, hechos a partir de productos naturales sulfonados como el carbón, la lignita y la turba, sin embargo, la

mayoría de las resinas intercambiadoras de iones de alta capacidad se basan en el poliestireno – divinilbenceno (SDVB). (Programa de posgrado "ingeniería ambiental", s/a)

Las resinas de intercambio iónico se clasifican en resinas catiónicas (+) y aniónicas (-). Depende del ion que retiene, positivo o negativo. **Catiónicas**: Intercambia iones positivos (cationes) Estructura con grupos funcionales ácidos (resina ácido fuerte/ácido débil) Ej. Fuerte: Ac. Sulfónica **Aniónicas**: Intercambia iones negativos (aniones).

Estructura con grupos funcionales básicos (resina base fuerte/base débil).

(a) Resina ácida fuerte: ácido benceno sulfónico

(b) Resina base fuerte: estructuras de amonio cuaternario

(c) Resina ácida débil: ácido poliacrílico entrecruzado con divb

(d) Resina base débil: Amina terciaria sobre poliestireno (web del profesor , s/a)

En la tabla No.7 se muestran los intercambiadores de cationes y aniones; tipos y grupos funcionales.

Tabla No. 7

Tipo y grupo funcional de los intercambiadores de cationes y aniones

Cationes de intercambio		Aniones de intercambio	
Tipo	Grupo funcional	Tipo	Grupo funcional
Ácido sulfónico	-SO ₃ ·H ⁺	Amina cuaternaria	-N(CH ₃) ₃ ⁺ OH ⁻
Ácido carboxílico	-COO·H ⁺	Amina cuaternaria	-
Ácido fosfónico	PO ₃ ·H ⁺	Amina terciaria	N(CH ₃) ₂ (EtOH) ⁺
Ácido fosfinico	HPO ₂ ·H ⁺	Amina secundaria	-NH ₂ (CH ₃) ₂ ⁺ OH ⁻
Fenólico	-O·H ⁺	Amina primaria	-NH ₃ ⁺ OH ⁻
Arsénico	-HAsO ₃ ·H ⁺		
Selenónico	-SeO ₃ ·H ⁺		

Fuente: (web del profesor , s/a)

El siguiente diagrama muestra el intercambio iónico en una resina. El ejemplo A corresponde a un intercambiador catiónico y el B a un intercambiador aniónico; A) la resina catiónica intercambia el Cation Ca^{2+} por 2H^+ . B). El intercambiador aniónico acepta el cianuro (CN^-) y libera al anión hidróxido (OH^-).

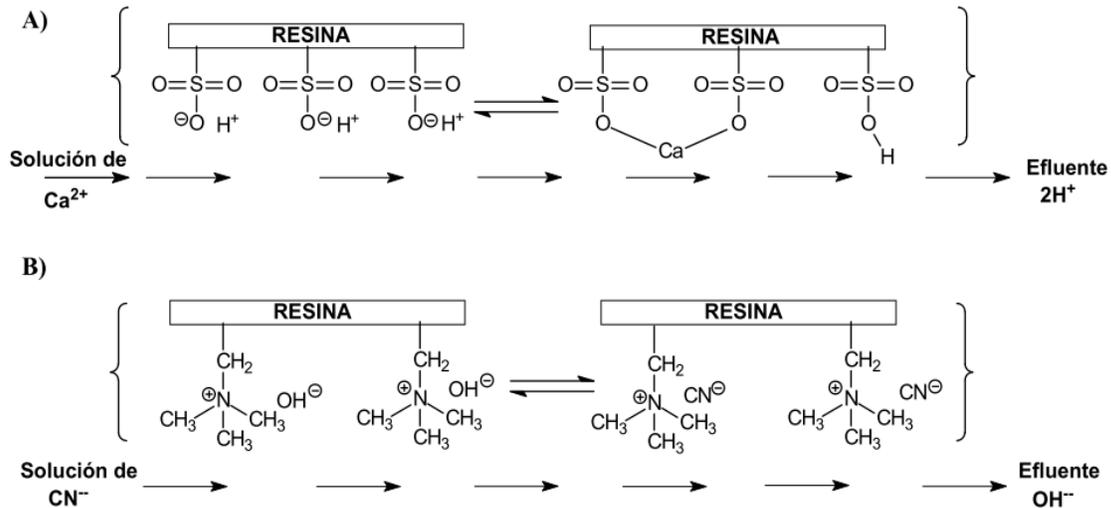


Figura No. 7 Diagrama del proceso de intercambio iónico en la resina

Fuente: (Oyola, 2013)

Los iones que se adhieren a la membrana tienen un orden de selectividad. En la práctica los iones que se adhieren a los sitios activos de la resina son de muy diferente tipo y pueden ser removidos total o parcialmente durante el proceso de regeneración. Si la naturaleza o la concentración de los iones en solución son similares, el orden de preferencia o la selectividad de la resina para los diferentes iones es la que se presenta en la tabla No. 8

Tabla No. 8

Selectividad decreciente de los iones en resinas de intercambio iónico

Catión	Anión
Fierro Fe^{+3}	Cromato CrO_4^-
Aluminio Al^{+3}	Sulfato SO_4^-
Plomo Pb^{+2}	Sulfito SO_3^-
Bario Ba^{+2}	Fosfato PO_4^-

Estroncio Sr ⁺²	Tiocianato CNS ⁻
Cadmio Cd ⁺²	Nitrato NO ₃ ⁻
Níquel Ni ⁺²	Nitrito NO ₂ ⁻
Zinc Zn ⁺²	Yoduro I ⁻
Cobre Cu ⁺²	Bromuro Br ⁻
Fierro Fe ⁺²	Cloruro Cl ⁻
Manganeso Mn ⁺²	Cianuro CN ⁻
Calcio Ca ⁺²	Bicarbonato HCO ₃ ⁻
Magnesio Mg ⁺²	Silicato SiO ₂ ⁻
Potasio K ⁺	Hidróxido OH ⁻
Amonio NH ₄ ⁺	Fluoruro F ⁻
Sodio Na ⁺	
Hidrógeno H ⁺	
Litio Li ⁺	

Fuente:(Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas , s/a)

3.2.2 Intercambio iónico para eliminar la dureza del agua

El proceso de intercambio con catión sodio es el que se emplea en forma más amplia para el ablandamiento del agua. Durante el proceso de ablandamiento, los iones de calcio y magnesio son eliminados del agua dura por intercambio catiónico con los iones de sodio. Cuando la resina intercambiadora ha quitado los iones de calcio y magnesio prácticamente al límite de su capacidad, se regenera a su forma de sodio con una solución de sal.(Programa de posgrado "ingeniería ambiental", s/a)

A continuación se muestra la reacción de intercambio en una resina catiónica. R es la fase estacionaria o soporte (el copolímero de divinilbenceno) y Na⁺ y Ca⁺² son las especies que reaccionan.



La figura No. 8 muestra la resina de intercambio iónico en ciclo sodio; el paso del agua con Ca en la columna de resina Na, el intercambio Na- Ca, y la regeneración de la resina.

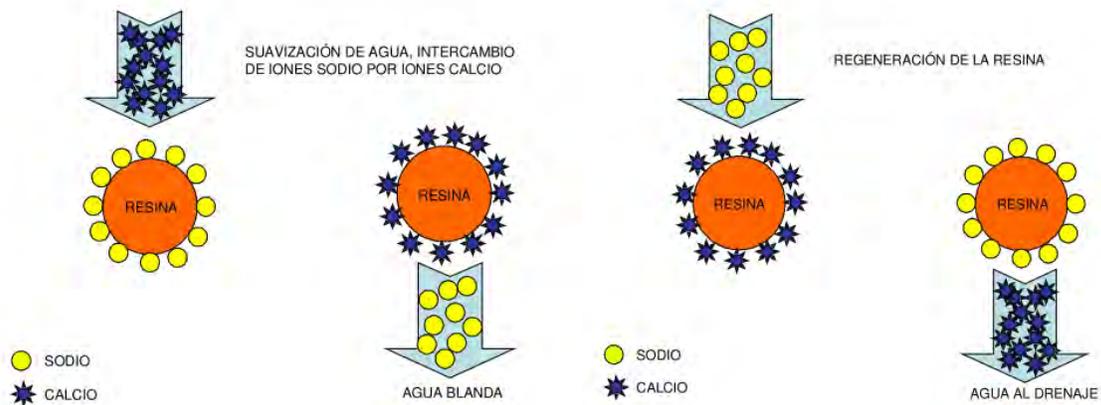


Figura No. 8 Diagrama de la resina de intercambio iónico en ciclo sodio

Fuente:(Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas , s/a)

3.2.3 Capacidad del intercambiador

Se define como capacidad de la resina, el valor de la concentración de iones que pueden ser retenidos por una unidad de peso de resina. Suele expresarse como meq de soluto retenidos g resina seca. La capacidad de la resina es un parámetro fundamental para la selección del intercambiador ya que generalmente se requieren capacidades altas para la separación o purificación a realizar.(Universidad Autonoma de Madrid , 2006)

La capacidad de intercambio de las resinas de poliestireno es de 650 Kg/m cuando se regeneran con 250 g sal por kilogramo de dureza eliminada. Los intercambiadores catiónicos del ciclo del sodio o del hidrogeno para el ablandamiento del agua son, por lo general del tipo de resina sintética de estireno – divinilbenceno sulfonado. Este tipo es excepcionalmente estable a temperaturas elevadas (hasta de 150°C) y en todo el amplio intervalo de pH, desde 0 hasta 14. Además, es un tipo muy resistente a las condiciones de oxidación. La capacidad total de intercambiador con un ciclo de hidrogeno es de hasta 925 Kg de CaCO₃ por metro cubico en un intercambiador con un ciclo de hidrogeno y

arriba de 810 kg de CaCO_3 por metro cubico en un intercambiador con un ciclo de sodio. La capacidad en la práctica de operación común no es tan elevada.(Programa de posgrado "ingeniería ambiental", s/a)

La cantidad de sal para regenerar el material cambiador de iones, excede gradualmente al requisito teórico de 75,82 gramos por 1 Kg de dureza removida, calculada como carbonato de calcio. Este proceso es necesario a causa de la mayor afinidad de la zeolita por el calcio y magnesio que por el sodio, lo que al regenerar la zeolita requiere “acción de masa” para sobreponer este factor. (Programa de posgrado "ingeniería ambiental", s/a)

Los factores que influyen en el consumo de sal durante la regeneración dependen de:

1. El tipo de material de intercambio.
2. El grado de dureza: las aguas más duras requieren para su regeneración, un consumo mayor de sal.
3. La efectividad de la distribución de la sal en el lecho.
4. Procedimiento para economizar sal, aplicables a algunos tipos de materiales de zeolita.
5. Ablandamiento y regeneración incompletas, sistemas conocido como “restricción de Sal”(Programa de posgrado "ingeniería ambiental", s/a)

La eliminación de la dureza del agua por intercambio iónico es un ciclo que tiene 4 etapas; tratamiento o intercambio iónico, lavado contracorriente (es opcional), regeneración y lavado para eliminar el exceso del regenerante. Hay quien sugiere que en el laboratorio se determina el comportamiento de un intercambiador; capacidad de intercambio, cantidad de regenerante y el consumo del agua de lavado.(web del profesor , s/a)

Se sugieren valores típicos de parámetros de diseño para un lecho fijo. (Asegura un mínimo de pérdida y un buen contacto líquido resina)

Longitud mínima de lecho: 61-76 cm

Flujo de solución a tratar: $0.27-0.67 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^3)$

Flujo de regenerante: $0.13-0.27 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^3)$

Lavado: $4-13.4 \text{ m}^3$ (aplicado flujo $0.13-0.20 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^3)$) (web del profesor , s/a)

Tabla No. 9
Características de una resina catiónica típica

Forma Química	Sodio Na ⁺	Hidrógeno H ⁺
Capacidad total de intercambio	2.0 eq/L	1.8 eq/L
Capacidad total de intercambio	100 gr. CaCO ₃ / L	90 gr. CaCO ₃ /L
Capacidad de retención de agua	44-48 %	50-56 %
Densidad	0.85 gr /L	0.80 gr/ L
Regenerante	NaCl	HCl o H ₂ SO ₄
Cantidad	80-240 gr NaCl/L de resina	130-200 gr HCl/L de resina
Concentración del regenerante	10-25 % NaCl	2-8% HCl 4-10% H ₂ SO ₄
Tiempo de contacto	30 minutos mínimo	30 minutos mínimo
Agua de lavado requerida	3-6 L de agua/L de resina	6-15 L de agua/ L de resina

Fuente: (Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas , s/a)



Figura No.9 Planta de intercambio iónico

Fuente: <http://www.canromex.com/sitio/index.php/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/desmineralizador>



Figura No.10 Planta de intercambio iónico de dos lechos y dos salmueras

Fuente: <http://www.agroaguas.com/index.php/productos/plantas-para-potabilizacion-de-agua>

3.3 Ablandamiento químico

Consiste en adicionar sustancias que reaccionan con los iones calcio y magnesio presentes en el agua. Convirtiéndolos en compuestos insolubles que son separados del agua por decantación y filtración.

Procedimientos para eliminar la dureza del agua con agentes químicos.

- ❖ Ablandamiento con exceso de cal
- ❖ Ablandamiento con carbonato de sodio-cal
- ❖ Ablandamiento con sosa cáustica

Al parecer los primeros experimentos dirigidos a lograr el ablandamiento del agua fueron llevados a cabo en 1756 por el Dr. Francis Home, en la ciudad de Edimburgo, Escocia. Fue él quien primero reconoció la capacidad de la cal para ablandar el agua.

La primera planta municipal para ablandamiento de agua potable fue construida en Plumstead, Inglaterra en el año 1854. El proceso utilizado era el de Tomas Clark, profesor de química en la universidad de Aberdeen, Escocia. Clark patentó su proceso el 8 de Marzo de 1841; éste consistía en un tratamiento con cal, seguido por sedimentación y filtración. La planta de Plumstead, al igual que otras plantas construidas en 1861, 1868, 1870, trataba agua de pozo. Ninguna usó filtros ni removi6 la dureza no carbonatada. Alrededor de 1859, el Dr. Porter en Londres, sugiri6 el uso de soda para la remoci6n de la dureza no carbonatada. El 28 de Noviembre de 1878, A. Ashby obtuvo una patente para la remoci6n de la dureza no carbonatada con soda (Na_2CO_3) o carbonato de potasio (K_2CO_3). En 1900, Inglaterra contaba con m6s de 50 plantas de ablandamiento. (Cliff J. Kirchmer, s/a)

3.3.1 Ablandamiento con exceso de cal

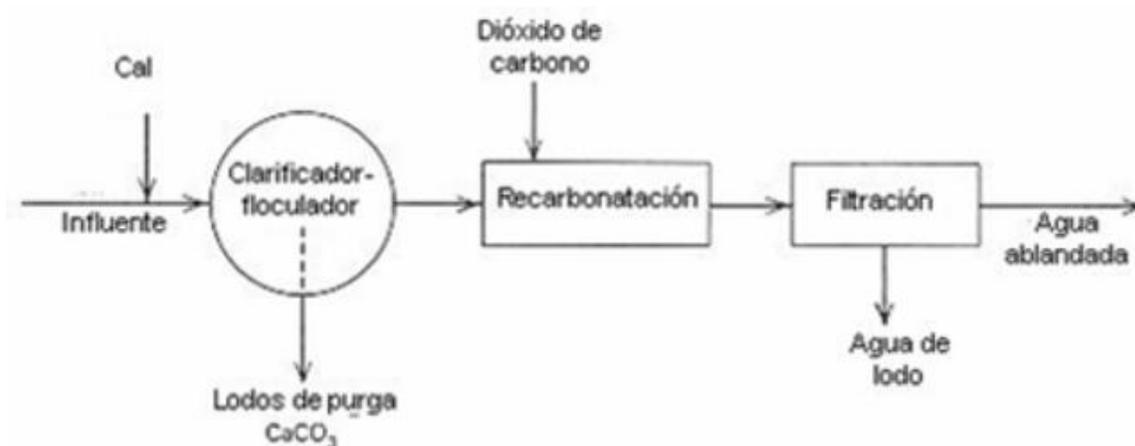


Figura No. 11 Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento con carbonato de calcio en una etapa

Fuente: Hammer, 1986, citado por (CNA, 2007)

Este proceso emplea el producto de solubilidad de un compuesto que contiene un ion o radical que es considerado perjudicial y que, en consecuencia debe ser eliminado. El ablandamiento con cal es el proceso de precipitación usado con mayor frecuencia, consiste en la reducción de la dureza del calcio por la adición de cal hidratada al agua para precipitar CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o ambos. Puesto que la alcalinidad de casi toda las aguas está en forma de bicarbonato, y puesto que de ordinario se encuentra presente el CO_2 , la precipitación del carbonato de calcio requiere la conversión CO_2 y bicarbonato en carbonato (Americarum Universitas, s/a)(Nalco Chemical Company, 1989)

Se emplea para remover Ca y Mg más allá de los límites prácticos de 40 mg/l. Para ello se estima la cantidad requerida de cal y carbonato, y se añade un exceso. (CNA, 2007)

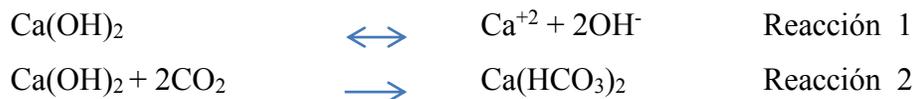
Posteriormente, el agua debe ser floculada para remover CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y sigue entonces una recarbonatación en dos etapas. En la primera, se añade dióxido de carbono para bajar el pH a 10.3 y convertir el exceso de cal a CaCO_3 que es removido por floculación y sedimentación.(CNA, 2007)

El carbonato de sodio, se emplea sólo si es preciso remover dureza no carbonatada de calcio. En la segunda etapa, el pH es bajado a valores entre 8.5 y 9.5 para convertir el

carbonato remanente a bicarbonato, y estabilizar el agua para evitar la formación de depósitos.(CNA, 2007)

3.3.1.1 Reacciones químicas del ablandamiento con exceso de cal

El radical hidroxilo es el componente reactivo de la cal que convierte CO_2 y HCO_3^- en CO_3^{2-} , precipitándose CaCO_3 , como se muestra en las siguientes reacciones:



O, en forma iónica:



En forma iónica:



Reacciones con cal-carbonato

Fuente: (Nalco Chemical Company, 1989)

También pueden usarse otros hidróxidos (NaOH, KOH), pero de ordinario no compiten con el bajo costo de la cal salvo en la situación especial en que se disponga de ellos como subproductos.

Las mayores partes de las reacciones de ablandamiento se llevan a cabo a un pH alrededor de 10. Para este valor de pH, el CaCO_3 porta de ordinario una carga negativa, y el Mg(OH)_2 una carga positiva. Si no se neutralizan estas cargas, la dureza del coloide puede resistir a la floculación y pasarse al efluente. Será necesario el empleo de coagulantes catiónicos cuando el grueso del precipitado es CaCO_3 cargado

negativamente, como es el caso en el ablandamiento parcial con cal. Con frecuencia se emplea aluminato de sodio como coagulante aniónico cuando se necesitan residuos con poco magnesio -Mg(OH)₂ con carga positiva- en el ablandamiento con cal completo. Puede complementarse el coagulante con un floculante aniónico o no iónico.(Nalco Chemical Company, 1989)

El químico especialista en agua distingue entre el ablandamiento con cal en frío, que se efectúa dentro del intervalo de 40 a 90°F, del que se efectúa en caliente, entre 215 y 230°F. A menudo son de interés los resultados obtenidos a temperaturas intermedias. La obtención de datos en la región intermedia puede requerir pruebas a nivel prepiloto, ya que muy pocas plantas han operado en esta región. (Nalco Chemical Company, 1989)

Alrededor de los 120° F aumenta la eliminación de sílice, cosa que es despreciable en un proceso de ablandamiento en frío. De los 140 a los 160°F el ablandamiento con cal de aguas negras, que en frío es bastante incompleto, comienza a aproximarse a los resultados del proceso en caliente. Estos fenómenos ilustran la importancia de las pruebas en el laboratorio bajo las condiciones reales de operación para obtener datos confiables antes de diseñar y construir una planta. (Nalco Chemical Company, 1989)

3.3.2 Ablandamiento con carbonato de sodio-cal

Este proceso consiste en aplicar cal y carbonato de sodio al agua cruda. La cal reacciona con los bicarbonatos solubles de calcio y de magnesio, que son los que causan la dureza por carbonatos y forman carbonato de calcio e hidróxido de magnesio que son insolubles.

El carbonato reacciona con los compuestos solubles no carbonatados de calcio y de magnesio que causan la dureza por no carbonatos, precipitando compuestos insolubles de calcio y de magnesio y dejando en solución compuestos de sodio que no consumen jabón. (Americarum Universitas, s/a)

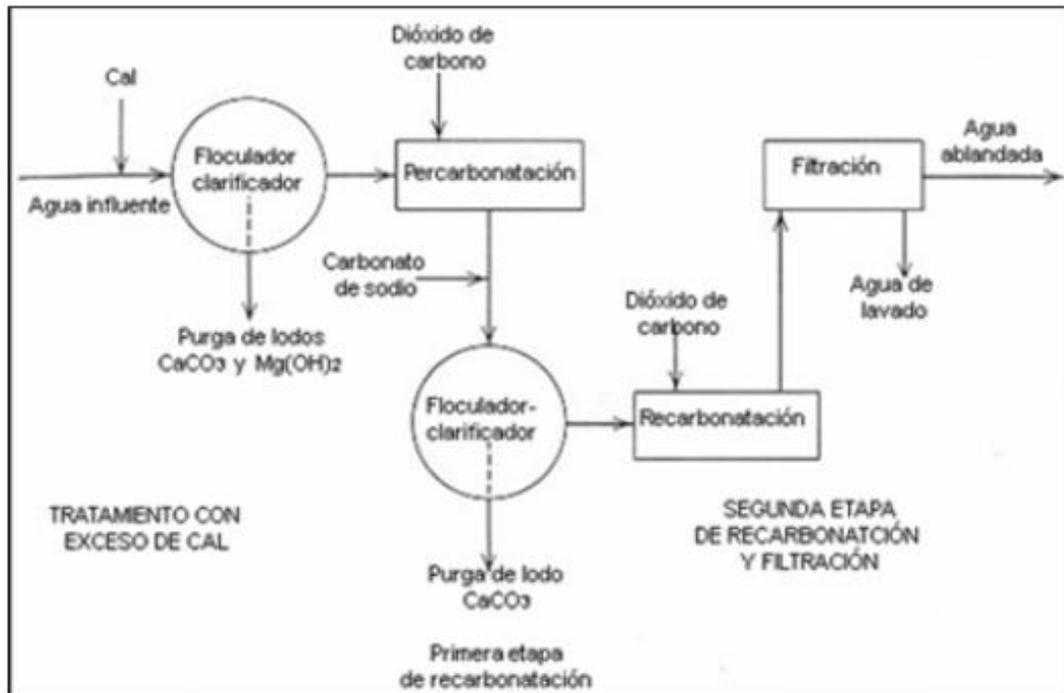


Figura No. 12 Diagrama de flujo de una planta de ablandamiento en dos etapas

Fuente: Hammer, 1986 citado por (CNA, 2007)

El proceso con cal y soda ash puede efectuarse en dos etapas: en la primera haciendo el tratamiento con cal y la segunda con la soda ash. También puede hacerse en una sola etapa conjunta. (Romero R. J., 1999)

La cal adicionada al agua reacciona en primer lugar con cualquier dióxido de carbono libre para formar un precipitado de carbonato de calcio después, reacciona con los bicarbonatos de calcio. En ambos casos un equivalente se combina con otro de CO_2 o de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Puesto que el magnesio precipita como $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (el MgCO_3 es soluble), dos equivalentes de cal se requieren para remover el bicarbonato de magnesio. Un equivalente de carbonato de sodio remueve otro de sulfato de calcio. Sin embargo, para su formación se requiere cal y carbonato. (CNA, 2007)

Se agrega cal (hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y soda ash (carbonato de sodio Na_2CO_3) al agua para causar la precipitación del carbonato de calcio CaCO_3 y del hidróxido de magnesio $\text{Mg}(\text{OH})_2$. En sistemas municipales se agrega el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al agua y el sólido precipitado se remueve por medio de la sedimentación. Algunas pequeñas

partículas permanecen por lo que se burbujea dióxido de carbono para convertir estas pequeñas partículas en bicarbonatos solubles. Debido a que alguna de esta dureza se conserva este proceso es conocido como ablandamiento parcial. (Baldeón, 2012)

3.3.2.1 Reacciones químicas del ablandamiento con carbonato de sodio y cal

La cal reduce la dureza carbonatada del agua pero no la dureza no carbonatada. Para remover esta última es necesario agregar soda, Na_2CO_3 . Esto se demuestra en las siguientes reacciones que explican los pasos en el ablandamiento con cal-soda.

1. *Reacción de*



2. *Reacción de la dureza cálcica carbonatada con cal.*



3. *Reacción de la dureza del magnesio carbonatado. Esta reacción puede ser descrita en dos etapas para enfatizar la estequiometría.*

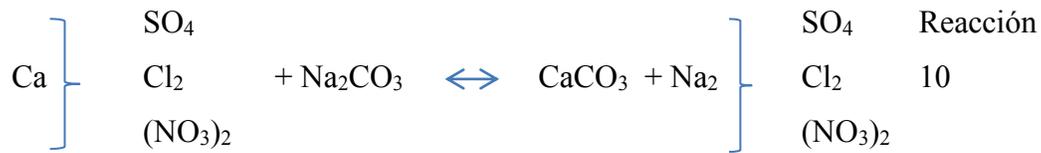


O puede combinarse

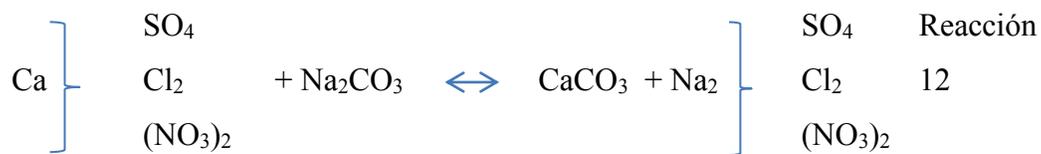
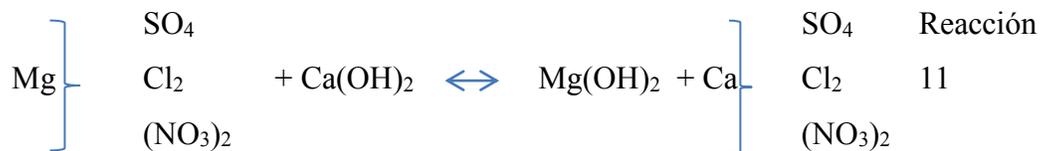


Las ecuaciones demuestran claramente que se requieren dos moles de cal para remover un átomo-gramo de magnesio, o sea dos veces más de lo que se necesita para remover el calcio. (CNA, 2007) y (Cliff J. Kirchmer, s/a)

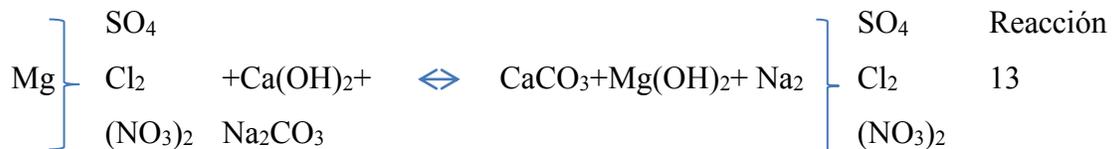
4. *Reacción de la dureza cálcica no carbonatada con soda. Es necesario agregar soda para proveer la CO_3^{2-} , asumiendo que la CO_3^{2-} disponible se agotaría completamente en las reacciones representadas por (7) y (8)*



5. *Reacción entre la dureza de magnesio no carbonatada con cal y soda. Esta reacción ocurre en dos pasos, por que la reacción (11) produce una sal de calcio soluble que posteriormente tiene que ser reactivada con CO_3^{2-} para poder precipitar el calcio.*



Combinadas, la reacción es;



Hacemos notar que las reacciones (10) y (12) son las mismas, pero representan dos fuentes diferentes de CaSO_4 , CaCl_2 y $\text{Ca(NO}_3)_2$.

La cal entonces puede servir no solamente para remover CO_2 , dureza cálcica carbonatada, y dureza de magnesio carbonatada sino que también sirve para convertir la dureza no carbonatada de magnesio en dureza no carbonatada de calcio, reacción (11).

La soda actúa posteriormente para remover la dureza no carbonatada, según las reacciones (10) y (11). (Cliff J. Kirchmer, s/a)

3.3.2.2 Determinación de la cal y soda

El ión calcio puede ser efectivamente eliminado mediante la adición de cal en una ecuación que conduce a elevar el pH a 10.3. Pero la precipitación del ión magnesio requiere un pH mayor y por ello se debe añadir un exceso de cal de 35 mg/l (1.25 meq/l). Las limitaciones prácticas del ablandamiento por precipitación son 30 a 40 mg/l de CaCO_3 y 10 mg/l de Mg(OH)_2 como CaCO_3 , aun cuando la solubilidad de estos compuestos es menor (de un quinto) desde el punto de vista teórico.(CNA, 2007)

3.3.2.2.1 Cálculo de la dosis de cal

La cantidad de cal necesaria para la primera etapa puede determinarse, según las reacciones anteriores, expresando la dureza carbonatada y el contenido de magnesio en mg/l como CaCO_3 , de la manera siguiente:

De la reacción 6

1.68 mg/l de Ca(OH)_2 son necesarios para reaccionar con 1 mg/l de CO_2 , expresado como CO_2 .

De la reacción 11

0.74 mg/l de Ca(OH)_2 son necesarios para reaccionar 1 mg/l de Mg^{++} , expresado como CaCO_3

De la reacción(7) y (8)

0.74 mg/l de Ca(OH)_2 son necesarios para reaccionar 1 mg/l de dureza carbonatada, expresada como CaCO_3

Además, en la práctica, es necesario agregar un exceso de Ca(OH)_2 para obtener un pH mayor de 10.8 y asegurar una precipitación efectiva del Mg(OH)_2 ; dicho exceso es aproximadamente de 50 mg/l- Ca(OH)_2 .(Romero R. J., 1999)

3.3.2.2.2 Cálculo de la dosis de carbonato de sodio

Si se desea remover la dureza no carbonatada por calcio originalmente presente, o la formada en la remoción de la dureza no carbonatada por magnesio, es necesario dosificar Na_2CO_3 , carbonato de sodio o soda ash. Según la reacción (12), la dosis de carbonato de sodio puede calcularse así:

1.06 mg/l de Na_2CO_3 son necesarios para precipitar 1 mg/l de dureza no carbonatada. (Romero R. J., 1999)

3.3.2.2.3 Recarbonatación

La recarbonatación se emplea para estabilizar el agua tratada con cal y evitar la formación de depósitos. EL CO_2 neutraliza el exceso de cal y lo precipita en forma de carbonato de calcio.

La recarbonatación puede hacerse en dos etapas con objetivos diferentes en cada caso. La primera recarbonatación tiene por objetivo convertir el exceso de cal agregado al agua en carbonato de calcio para permitir así su precipitación y remoción. Asimismo, el hidróxido de magnesio que no se precipitó será convertido en carbonato de magnesio. Durante la primera recarbonatación debe controlarse el pH con el fin de no bajarlo de 9.5 e impedir que el $\text{CO}_3^{=}$ sea convertido en HCO_3^- , con lo cual el exceso de Ca^{++} no se precipitaría como CaCO_3 .



La cantidad de CO_2 requerida en esta primera recarbonatación puede calcularse, según las ecuaciones (14) y (15), así: 0.6 mg/l de CO_2 son necesarios para precipitar 1mg/l de exceso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ agregado. 0.75 mg/l de CO_2 son necesarios para convertir 1 mg/l de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ residual, no precipitado previamente, en carbonato de magnesio.

En la práctica, para los cálculos puede suponerse que el residual de hidróxido de magnesio es de 20 mg/l. Aunque la solubilidad teórica del hidróxido de magnesio es tan solo de 9 mg/l, éste no es precipitado completamente en el tratamiento previo. (Romero R. J., 1999)

La segunda recarbonatación tiene como fin eliminar la tendencia del agua, ablandada con cal y soda ash, a depositar carbonato de calcio sobre la arena de los filtros. Lo anterior disminuirá la eficiencia de los filtros y, eventualmente, cementaría el medio filtrante obligando a su remplazo con los consecuentes perjuicios. La adición en este punto del CO₂ pretende por lo tanto convertir el carbonato de calcio en bicarbonato de calcio, haciéndolo así soluble y evitando su precipitación ulterior en el filtro. El efecto se logra añadiendo CO₂ hasta tener un pH cercano a 8.6.



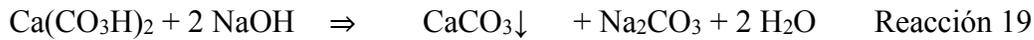
(Romero R. J., 1999)

3.3.3 Ablandamiento con sosa cáustica

El proceso de ablandamiento mediante cristalización con sosa caustica utiliza diferente tipo de reactores de lecho fluidizado de gránulos, sobre los cuales se presenta la cristalización del CaCO₃. Los gránulos se mueven libremente en el flujo ascensional del agua de tal manera que impide su cementación; para ello se aplica un caudal mínimo de ascensional. (Romero R. J., 1999)

El diseño y la operación adecuados de un reactor de gránulos para ablandamiento tiene como requisitos básicos los siguientes: distribución apropiada del agua y de la soda cáustica en la entrada del reactor, mezcla intensa del agua y del agente químico para optimizar la cristalización, presencia de un número adecuado de gránulos y turbulencia suficiente en el contenido del tanque. (Romero R. J., 1999)

Se puede considerar como una variante del proceso de ablandamiento con carbonato sódico y cal. La reacción básica del proceso es la siguiente:



Se produce la precipitación del carbonato cálcico y la formación de carbonato sódico, que reaccionará con la dureza permanente, de acuerdo con las reacciones formuladas anteriormente.(Espigares & Pérez, 2012)

3.4 Tratamiento Magnético del agua

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 aL (del orden de 500 Gauss) con un caudal medio del orden de algunos litros por minuto, luego de lo cual el agua adquiere una propiedad singular: no produce incrustaciones.(Neira, 2006)

El agua pasa por un campo magnético o eléctrico que causa un incremento localizado de pH (vía una reacción electroquímica que involucra un electrón donde una molécula de oxígeno O_2 forma un ion hidróxido OH^-). El incremento de pH permite que el cristal de carbonato de calcio CaCO_3 se forme en el agua. Estos minúsculos cristales se pegan para formar coloides. Como estos coloides son arrastrados por el agua no se incrustan en la superficie de la tubería y las siguientes precipitaciones de carbonato de calcio CaCO_3 se depositarán sobre los coloides y no sobre la tubería. Por lo tanto el carbonato de calcio CaCO_3 se mantiene en suspensión como partículas finas y si ocurre alguna sedimentación será en forma de un sarro removible.(ITACA, s/a)

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.(Neira, 2006)

La efectividad del tratamiento magnético se encuentra en la prevención de las incrustaciones, no en la remoción de dureza, ya que prácticamente no remueve dureza. Esta prevención se origina por el efecto del campo magnético sobre el agua y viene dada por la generación de microcristales de la estructura de aragonita, la cual se diferencia de la estructura cristalina predominante en las incrustaciones convencionales, que, en el caso del carbonato de calcio, se forma de manera natural la estructura de calcita.(Neira, 2006)

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.(Neira, 2006)

3.4.1 Prueba piloto sobre el equipo Water King utilizado para disminuir las incrustaciones en las tuberías de Chetumal

A continuación se describe el equipo Water King que en la actualidad se está probando como alternativa para disminuir las incrustaciones de las tuberías de la ciudad de Chetumal, Q. Roo.



Figura No. 13 Equipo Water King, Suavizador Electrónico para Agua Dura

Fuente: <http://www.waterking.com.mx/?modulo=contenido&id=44>

Es un sistema de suavización de agua que utiliza el principio del acondicionamiento electrónico, consta de dos elementos una unidad electrónica de proceso que genera señales electromagnéticas de alta frecuencia (1.2 Ghz) que pasan a la red de agua a través de las antenas y los cables o antenas de emisión de señal con los que se forma una bobina alrededor de la tubería. (CAPA, Informe de water king, 2013)

Las señales electromagnéticas de alta frecuencia de los equipos bombardean las moléculas del agua dura modificando la estructura molecular del carbonato de calcio (Calcita), lo separa de la molécula de agua, lo deja en suspensión y le elimina su poder de adherencia. A la nueva estructura molecular del carbonato de calcio se le conoce como Aragonita. (CAPA, Informe de water king, 2013)

El carbonato de calcio, ahora en forma de Aragonita, al estar en suspensión y no poder adherirse a las superficies por las que pasa, fluye libremente al exterior por las tuberías, sin formar sarro. Así mismo, la formación de Aragonita hace que queden moléculas de agua vacías, sin carbonato de calcio (Calcita). Estas moléculas vacías, al necesitar incorporar nuevamente Calcita a su estructura, la toman del sarro existente en las tuberías, calderas, tanques de agua e instalaciones, disolviéndolo y desincrustándolo de manera paulatina. (CAPA, Informe de water king, 2013)

CAPÍTULO IV EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EMPLEADOS PARA ELIMINAR LA DUREZA DEL AGUA

4.1 Ósmosis inversa

El tratamiento de ósmosis inversa tiene ventajas y limitaciones que se expondrán en este apartado.

4.1.1 Ventajas

Las aplicaciones de los procesos con membranas han tenido un incremento debido a diversas ventajas, cuando son comparados con procesos alternativos.

- *Las membranas pueden utilizarse para tratar un mayor número de contaminantes del agua potable y del agua residual, más que ninguna otra tecnología de tratamiento (Mallevialle, 1998, Marki , 2001). citado por (Mora J. y col, 2003)*
- *Bajos requerimientos de energía, puesto que no involucran un cambio de fase en función de la temperatura. (Coca, J, Luque, S, 1999). Citado por (García-Olmos Carlos F y col, s/a)*
- *Proceso en continuo, lo cual permite un control automático y una operación estable. (Coca, J, Luque, S, 1999). Citado por (García-Olmos Carlos F y col, s/a) y.(Baldeón, 2012)*
- *Bajos costes de mantenimiento, puesto que el sistema tiene un mínimo de partes móviles y es fácil de operar y mantener. Son más rápidos y económicos que las técnicas que tradicionalmente se habían venido aplicando. (Coca, J, Luque, S, 1999). Citado por (García-Olmos Carlos F y col, s/a)*
- *Es fácil realizar el cambio de escala, y no es necesario agregar nuevos componentes para llevar a cabo la separación, hechos que la hacen una tecnología atractiva, que tiene un crecimiento grande en su empleo, (Courtney, 1986, Mulder, 1991).Citado por(García-Olmos Carlos F y col, s/a)*

4.1.2 Limitantes

- *En esta técnica las membranas deben ser capaz de tolerar la alta presión y evitar que las moléculas de soluto pasen a través de ella.*(López, 2005)
- *Este tratamiento exige que el agua a tratar tenga una calidad química y microbiológica de lo contrario la membrana se deteriorará.*(López, 2005)

4.2 Intercambio iónico

Algunos autores sugieren, que en el laboratorio se determine el comportamiento de un intercambiador; capacidad de intercambio, cantidad de regenerante y el consumo del agua de lavado.

4.2.1 Ventajas

- *El proceso de intercambio con catión sodio es el que se emplea en forma más amplia para el ablandamiento del agua.* (Dardel, 2012)
- *Las concentraciones altas, representan una ventaja y desventaja simultáneamente; el ciclo llega a ser muy corto y la cantidad de regenerante aumenta hasta valores intolerables.* (Dardel, 2012)

4.2.2 Limitantes

- El grado de dureza del agua de Chetumal, duplica el límite máximo establecido por la Norma Oficial Mexicana, y muestra una tendencia de incremento. Esto representa una desventaja ya que las aguas más duras requieren para su regeneración, un consumo mayor de sal.
- La presencia de calcio, sodio y magnesio disminuye el rendimiento debido a que pueden saturar la resina.
- Baja tolerancia al cambio de pH

- La materia orgánica favorece el crecimiento de microorganismos en la resina.

4.3 Ablandamiento químico

4.3.1 Ventajas

- *El proceso tiene la ventaja adicional de ser bactericida, remover Fe y ayudar a la clarificación de aguas superficiales, remover algunos metales pesados (Pb, Mg y Cr) y compuestos orgánicos. (CNA, 2007)*
- *La principal ventaja del ablandamiento por precipitación es que la cal añadida es eliminada junto con la dureza de la solución. Así el contenido total de los sólidos disueltos del agua es también reducido. Cuando se añade carbonato de sodio, los iones de sodio permanecen en el agua tratada como sulfatos o cloruros. Afortunadamente, la dureza no carbonatada que es la que requiere la adición de carbonato de sodio generalmente está presente en menor proporción que la dureza total. (CNA, 2007)*

4.3.2 Limitantes

- *El costo del adsorbente y su regeneración son muy altos*
- *La capacidad de adsorción es altamente dependiente del pH*
- *Se requiere operadores entrenados*
- *El proceso de ablandamiento del agua mediante la adición de cal produce grandes cantidades de lodos, el volumen de éstos es aproximadamente 2.5 veces mayor a la cantidad de cal empleada inicialmente, debido a la combinación de cal con el calcio y magnesio contenidos en el agua y aunado a los formación de lodos en la etapa de coagulación posterior al ablandamiento. (Americarum Universitas, s/a)*

4.4 Tratamiento magnético

4.4.1 Ventajas

- Las revisiones y monitoreos son esporádicos
- *La efectividad del tratamiento magnético se encuentra en la prevención de las incrustaciones,*(Neira, 2006)

4.4.2 Limitantes

- *Sólo es aplicable a caudales pequeños y se utilizaría para el uso doméstico.* (Neira, 2006)

CAPÍTULO V CONCLUSIÓN

5.1 CONCLUSIONES

La información consultada revela que la eliminación de dureza se hace por cuestiones económicas, debido que se reduce el consumo del jabón, detergente, mejora el lavado de ropa y utensilios, disminuye la incrustación de sarro en las tuberías, mejora la cocción de alimentos y bebidas. También mejora el olor y sabor del agua. En cuestiones de salud se encontró correlación de la dureza con problemas de; cálculos urinarios y cardiovasculares.

La NOM-127-SSA1 1994 indica el límite máximo permitido para la dureza del agua, 500 mg/l expresado como CaCO_3 . El reporte de dureza del agua de Chetumal, Quintana Roo, muestra un incremento anual, se han reportado cantidades superiores a 1000 mg/l, situación que agrava la incrustación de sarro en las redes de distribución y hace vital el ablandamiento del agua.

La osmosis inversa es el tratamiento que elimina el mayor número de contaminantes (incluido el Ca y Mg), es compacto, automatizado, fácil de cambiar la escala, la temperatura del agua no afecta el proceso, bajo costo de mantenimiento. Requiere que; el suministro de energía sea constante, el agua a tratar tenga una calidad química y microbiológica para cuidar la membrana.

El ablandamiento por intercambio iónico es afectado por la concentración de la dureza (altas concentraciones disminuyen el tiempo de contacto y aumentan la cantidad del regenerante). La presencia de otros cationes en el agua satura rápidamente la membrana y la materia orgánica favorece el crecimiento de comunidades microscópicas en la resina. Los intercambiadores (comúnmente resina sintética de estireno) no son afectados por el pH y temperatura (menores a 150°C).

El ablandamiento químico es eficaz para eliminar la dureza del agua, se logran concentraciones menores de 40 mg/l. Por otra parte las instalaciones son voluminosas, durante el proceso se varía y monitorea la temperatura y el pH, el costo del absorbente y regenerante es alto, el entrenamiento del personal y la producción de lodos es 2.5 veces mayor a la cantidad de cal adicionada al inicio del proceso.

El Tratamiento magnético del agua es nuevo, se emplea a caudales pequeños, como el suministro de agua a una casa, en comparación con los otros tratamientos este no elimina la dureza, el tratamiento consiste en evitar la incrustación del sarro en las tuberías.

Antes de construir una planta es necesario realizar pruebas en laboratorio con las condiciones reales de operación, para determinar el tamaño y condiciones de operación de la planta.

REFERENCIAS

- APHA, A. W. (1992). *metodos normalizados para el analisis de aguas potables y residuales*. españa: dias de santos .
- Auge, m. (s/d de s/m de 2007). *agua fuente de vida*. recuperado el 23 de agosto de 2013, de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/aguafuentevida.pdf>
- Americanarum Universitas. (s/d de s/m de s/a). *ablandamiento quimico*. recuperado el 27 de marzo de 2014, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf
- Baldeón, m. a. (s/d de s/a de 2012). “diseño de una planta de tratamiento de agua potable para la empresa procesadora agroindustrial de mis frutales . *tesis de grado*. riobamba, chimborazo, Ecuador : la superior politécnica de chimborazo.
- Bosch, p. . (1988). *La zeolita una piedra que hierve*. méxico: fondo de cultura económica.
- Comisión del agua potable y alcantarillado del estado de Quintana Roo. CAPA. (2010, 2011). *Monitoreo del control de calidad del agua de chetumal*. chetumal: sesa.
- Cliff J. Kirchmer, P. D. (s/d de s/m de s/a). *bvsde.paho.org*. recuperado el 26 de marzo de 2014, ablandamiento: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/03490/03490-02.pdf>
- CNA, C. N. (2007). *Manual del agua potable alcantarillado y saneamiento*. México, d.f.: secretaria de medio ambiente y recursos naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México, df: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Consejo Consultivo del Agua, a.c. (s/d de s/m de s/a). *Usos del agua*. recuperado el 24 de septiembre de 2013, de <http://www.aguas.org.mx/sitio/02a2.html>

- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. (s/d de s/m de s/a). *Evaluación de membranas espiral industriales de ósmosis inversa*. recuperado el 9 de diciembre de 2013, de Universidad de las Palmas de Gran Canaria: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/403/09articulojun.pdf>
- Espigares, G. M., & Pérez, L. J. (6 de Septiembre de 2012). *Precipitación Química Ablandamiento del Agua*. recuperado el 6 de Septiembre de 2012, de https://www.precipitacion_quimica_ablandamiento.com
- FAO. (s/d de s/a de 2013). *Usos del agua*. recuperado el 24 de septiembre de 2013, de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/indexesp.stm
- Foster, S., & col. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea*. Washington D.C: ediciones mundi-prensa libros.
- García, O. C. (s/d de noviembre de 2002). recuperado el 04 de marzo de 2014, de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11146/uov0013tcfgo.pdf?sequence=1>
- García-Olmos Carlos F y col, j. r. (s/d de s/m de s/a). *Aplicación de las técnicas con membranas en el acondicionamiento de aguas para uso industrial*. recuperado el 25 de Enero de 2014, de <http://cidc.udistrital.edu.co/investigaciones/documentos/revistacientifica/rev5/vol2/aplicacion.pdf>
- G. Webb, A. J. (1977). *Energía, caos y cambio químico*. Zaragoza (España): Acrebia.
- Guillén, J. S. (s/d de s/m de s/a). *Fisiología celular*. recuperado el 23 de Agosto de 2013, de el origen de los seres vivos : <http://www.iespando.com/web/departamentos/biogeo/web/departamento/2bch/pdfs/06teoria.pdf>
- Herrera, O. N. (s/d de s/m de 2012). *Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría*. recuperado el 2 de Marzo de 2014, de <http://revistas.mes.edu.cu/greenstone/collect/repo/import/repo/20120830/71208047010.pdf>

Hidrotec. (s/a de s/m de s/a). *Ósmosis Inversa*. recuperado el 26 de Febrero de 2014, de <http://www.hidrotec.cl/pdf/ficha4.pdf>,

Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas . (s/d de s/m de s/a). *Intercambio Iónico*. recuperado el 22 de Marzo de 2014, de <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/resinasintercambio7.pdf>

ITACA. (s/d de s/m de s/a). *itacanet.org*. recuperado el 2 de Abril de 2014, de una Introducción a la dureza del agua: <http://www.itacanet.org/esp/agua/seccion%206%20tratamiento%20de%20agua/durezaagua/durezaagua.html>

Jimenez, L. J. (2011). *Propuesta de optimizacion de la planta de tratamiento de agua de la isla de Toas, Municipio de Almirante Padilla, Estado Zulia*. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta.

Kemmer, N. J. (1990). *Manual del agua su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Edo. de México: McGraw-Hill.

Lechuga, J. A., Rodríguez, M., & Lloveras M, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnologica. *ingenieria* , 10.

López, S. E. (s/d de Junio de 2005). Efectos físicos y químicos de celdas alotrópicas en soluciones líquidas. *efectos físicos y químicos de celdas alotrópicas en soluciones líquidas*. México, D.F, México: Instituto Politecnico Nacional.

Lubell, E. (Abril de 2009). *La calidad del agua potable en Arica, con respecto a la salud*. recuperado el 30 de Enero de 2013, de salud pública y bienestar de la comunidad: http://digitalcollections.sit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1623&context=isp_collection&seiredir=1&referer=http%3a%2f%2fwww.bing.com%2fsearch%3fq%3dla%2bcalidad%2bde%2bagua%2bpotable%2ben%2barica%252c%2bcon%2brespecto%2ba%2bla%2bsalud%26src%3die-searc

- Medina y col, M. (2002). Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. *Salud pública de México*, 5.
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (s/d de s/m de s/a). *La hidrosfera terrestre*. recuperado el 23 de Agosto de 2013, de <http://recursostic.educacion.es/ciencias/biosfera/web/alumno/1eso/hidrosfe/seres.htm>
- Mora J. y col, M. P.-M. (2003). Filtración de glicerina de una solución y modelo por osmosis inversa y nanofiltración. *Tecnología en marcha*. vol. 16 n° 4., 7-11.
- Mora, A. D. (Diciembre de 1999). *Revista costarricense de salud pública*. recuperado el 4 de noviembre de 2012, de https://www.revista-costarricense-de-salud-pública-caracterización-y-distribución-por-cantones-de-la-dureza-del-agua-en-las-fuentes-utilizadas-para-consumo-humano-en-costa-rica_php.mht
- Mora, A. D. (1998). *Agua para consumo humano: aporte de calcio y magnesio a la dieta del costarricense y su efecto sobre la salud*. recuperado el 30 de Enero de 2013, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/ponencia26.pdf>
- Nalco Chemical Company. (1989). *Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
- Neira, G. M. (s/d de Noviembre de 2006). *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil*. recuperado el 01 de Abril de 2014, de dureza en aguas de consumo humano y uso industrial,; http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/neira_m/sources/neira_m.pdf
- NMX-AA-072-SCFI-2001. (2001). Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México, D.F, Estados Unidos mexicanos.
- Oyola, M. R. (s/d de s/m de 2013). *Determinación de dureza de agua mediante intercambio iónico*. recuperado el 21 de marzo de 2014, de http://www.uprh.edu/~royola/3026/titulacion_intercambio_ionico.pdf

- Programa de posgrado “ingeniería ambiental”. (s/d de s/m de s/a). *scribd*. recuperado el 20 de marzo de 2014, de <http://es.scribd.com/doc/48714746/practica2>
- Quintana, F.A. (2010). *Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO₅ y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Romero, R. J. (1999). *Calidad del agua*. México, D.F: Alfaomega.
- Scribd. (s/d de s/m de s/a). recuperado el 27 de Agosto de 2013, de el agua como disolvente universal: <http://es.scribd.com/doc/117192759/el-agua-como-disolvente-universal>
- Sawyer, C. N., McCarty, P.L., & F, P. G. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Sheppard, P. T. (1987). *Manual de aguas para usos industriales*. México D.F: Limusa.
- U.S. Geological Survey, Science for a Changing World. (23 de Mayo de 2013). *el ciclo del agua* . recuperado el 12 de Septiembre de 2013, de <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Universidad Autonoma de Madrid . (s/d de s/m de 2006). *Área de ingeniería química*. recuperado el 25 de marzo de 2014, de intercambio ionico: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacioniqii/intercambio_ionico2006.pdf
- Web del Profesor . (s/d de s/m de s/a). *web del profesor*. recuperado el 21 de marzo de 2014, de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/opiv/intercambio_ionico.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Límites de características químicas del agua potable, NOM-127-SSA1-1994, "salud ambiental, agua para uso y consumo humano"

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50

Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00

Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Anexo 2. Informe del tratamiento magnético del agua, ficha técnica equipo Water King

Programa: Acondicionamiento electrónico de agua potable para evitar la formación de sarro con el Equipo Water King.

Acciones:

- Instalación de un equipo de acondicionamiento electrónico marca Water King en el cárcamo de abastecimiento de agua potable de la colonia Pacto Obrero en régimen de operación continua.
- Instalación de tubería y medidores testigo para medición de eficiencia.
- Verificación trimestral de resultados.

Objetivo: Probar la eficiencia del equipo de acondicionamiento electrónico Water King en la reducción del proceso de formación de sarro en las líneas de conducción, sistemas de medición y casas habitación del sistema de agua potable de la colonia Pacto Obrero de la Ciudad de Chetumal.

Antecedentes: Las características propias del suelo de la península de Yucatán, hacen que el agua que es extraída de los mantos freáticos para uso humano contenga en solución grandes cantidades de dureza de calcio y magnesio, derivado del proceso natural del ciclo de agua.

El movimiento del agua en las líneas de distribución hace que los carbonatos de calcio vayan incrustándose en las tuberías, líneas y accesorios, lo que conocemos más comúnmente como sarro. Es este sarro el que trae gran cantidad de problemas, en las líneas de distribución reduce los diámetros de tubería lo cual va ocasionando reducciones en el caudal de agua y muchas veces afecta la presión, a los usuarios se le van dañando las instalaciones hidráulicas internas produciendo obstrucciones, taponamientos, daño a válvulas tanto a empaques como a sellos cerámicos, etc.

Descripción del equipo Water King

Es un sistema de suavización de agua que utiliza el principio del acondicionamiento electrónico, consta de dos elementos una *Unidad electrónica de proceso* que genera señales electromagnéticas de alta frecuencia (1.2 Ghz) que pasan a la red de agua a través

de las antenas y los *Cables o antenas de emisión de señal* con los que se forma una bobina alrededor de la tubería.

Las señales electromagnéticas de alta frecuencia de los equipos bombardean las moléculas del agua dura modificando la estructura molecular del carbonato de calcio (Calcita), lo separa de la molécula de agua, lo deja en suspensión y le elimina su poder de adherencia. A la nueva estructura molecular del carbonato de calcio se le conoce como Aragonita.

El carbonato de calcio, ahora en forma de Aragonita, al estar en suspensión y no poder adherirse a las superficies por las que pasa, fluye libremente al exterior por las tuberías, sin formar sarro. Así mismo, la formación de Aragonita hace que queden moléculas de agua vacías, sin carbonato de calcio (Calcita). Estas moléculas vacías, al necesitar incorporar nuevamente Calcita a su estructura, la toman del sarro existente en las tuberías, calderas, tanques de agua e instalaciones, disolviéndolo y desincrustándolo de manera paulatina.

Es importante señalar que el equipo instalado no elimina el carbonato de calcio del agua, solamente lo deja fluir libremente sin permitir que se adhiera y forme sarro.

Beneficios: Evitar la formación de sarro por la adhesión de carbonato de calcio a las tuberías de agua potable, micro medidores y las instalaciones hidráulicas-sanitarias de los usuarios.

A continuación se detallan algunos beneficios obtenidos:

El día Jueves 29 de Noviembre del 2012, se llevó a cabo la instalación y puesta en marcha del equipo desincrustador de sarro Water King en las instalaciones del cárcamo de bombeo Pacto Obrero y el día 14 de Marzo del presente se llevó a cabo el recorrido de inspección y seguimiento de la efectividad del equipo Water King en medidores, regaderas, depósitos de retretes y tinacos, así como en el tramo de tubo instalado como testigo en el cual, se observó que a tres meses de instalado el equipo, presentaba una delgada capa de sarro y que era fácilmente removible. En el tramo de tubería vieja no se logró apreciar un cambio significativo en el grosor de la capa de sarro, por lo que es probable que la reducción haya sido milimétrica

Durante la inspección se desarmaron regaderas para observar la condición interna de las piezas y se pudo observar que se encontraban limpias y la ligera capa de sarro existente era fácilmente removible. Al inspeccionar los depósitos de agua de los retretes se logró observar que el sarro se encontraba depositado en el fondo y en las paredes de la caja no se apreciaba sarro acumulado. En los tinacos, se pudo apreciar que el sarro se encontraba adherido en menor cantidad en las paredes y se acumulaba en el fondo. Así mismo, durante la inspección se abrieron medidores para corroborar el estado en el cual se encontraban después de 3 meses de operación del equipo WaterKing, encontrándose que los medidores revisados no presentaban sarro endurecido.

En entrevista con la encargada de una lavandería de la colonia, se le pregunto si había notado algún cambio en el agua, en las tuberías, en las tinas de lavado, etc. Y refiere que ha notado que los filtros de las lavadoras no se obstruyen con la misma frecuencia que en meses pasados, ya que anteriormente los filtros tenían que cambiarlos cada 15 días por la acumulación del sarro que presentaban y que no permitían el paso del agua y actualmente con solo lavarlos quedan limpios, al igual que observo que las tinas de lavado ya no quedan con apariencia blancuzca

Metas: Replicar la instalación de equipos de acondicionamiento electrónico en los sectores con alta incidencia de obstrucción de líneas, taponamientos y fallas en micro-medidores de la CAPA.

Inversión: Para la realización de este programa se llevó a cabo una inversión de aproximadamente \$200,000.00 y se pretende llevar a cabo una próxima inversión de alrededor de \$1'000,000.00 para replicar este programa.

Inicio y Conclusión del programa: La instalación del equipo de acondicionamiento electrónico inició el 29 de Noviembre de 2012 y la primera verificación de resultados se llevó a cabo el día 14 de Marzo del presente.