

08 T(36)c

Nº: 441

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA

"Consideraciones sobre la Dureza del Agua"

T E S I S :

Presentada a la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería

de la

Universidad de San Carlos de Guatemala

por:

MAGDIEL ESCOBAR ARCHILA

Al conferírsele el Título de:

INGENIERO CIVIL

••O••

GUATEMALA NOVIEMBRE DE 1967

JUNTA DIRECTIVA
DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano: Ing. Amando Vides T.
Vocal Primero: Ing. Otto Ernesto Becker M.
Vocal Segundo: Ing. Francisco Ubieto B.
Vocal Tercero: Ing. Leonel Pinot L.
Vocal Cuarto: Ing. Inf. Jaime R. Russelin
Vocal Quinto: Br. Fco. Javier Godoy A.
Secretario: Ing. José Alberto Massanet P.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Amando Vides T.
Vocal Primero: Ing. Otto Ernesto Becker M.
Examinador: Ing. Víctor Luna
Examinador: Ing. Bernardo Morales
Secretario: Ing. José Alberto Massanet P.

TESIS DE REFERENCIA

NO

SE PUEDE SACAR DE LA BIBLIOTECA
BIBLIOTECA CENTRAL - USAC.

DEDICO ESTE ACTO:

A mis Padres:

Rosendo Escobar Meoño
Consuelo Archila de Escobar

A mi Esposa:

Mirna Estela Mejía de Escobar

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR:

Cumpliendo con lo establecido por la ley universitaria presento a vuestra consideración, previo a optar el Título de Ingeniero Civil mi trabajo de tesis titulado:

"CONSIDERACIONES SOBRE LA DUREZA DEL AGUA"

Tema que me fue asignado por la Honorable Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería.

INDICE

INTRODUCCION	1
--------------	---

CAPITULO I

DUREZA DEL AGUA

1.1 Dureza.	3
1.1.2 Tipos de Dureza.	5
1.2 Formación de la Dureza.	5

CAPITULO II

EFFECTOS QUE PRODUCE LA DUREZA DEL AGUA

2.1 Industrias textiles.	9
2.2 Industrias papeleras.	10
2.3 Agua para alimentación de calderas.	11
2.4 Agua para centrales térmicas.	12
2.5 Sistemas de Refrigeración.	12
2.6 Problemas ocasionados por agua blanda.	13

CAPITULO III

CARACTERISTICAS DE LA DUREZA EN LA REPUBLICA DE GUATEMALA

3.1 Valores promedio de dureza por Departamento.	15
3.2 Valores promedio de dureza en la ciudad de Guatemala.	16

CAPITULO IV

PROCESOS PARA REBAJAR LA DUREZA

4.1 Ablandamiento en frío mediante productos químicos.	19
--	----

4.1.1	Reducción de la dureza carbonatada mediante la cal.	19
4.1.2	Reducción de dureza de Magnesio con cal.	20
4.1.3	Reducción de dureza no carbonatada con carbonato de sodio.	21
4.1.4	Solubilidad del carbonato de calcio.	22
4.1.5	Solubilidad del hidróxido de magnesio.	24
4.1.6	Comentarios sobre el proceso de suavización en frío.	24
4.1.7	Equipo para la suavización por el proceso en frío.	25
4.2	Dosificación.	26
4.2.1	Factores de conversión para obtener p.p.m. de CaCO_3 a partir de p.p.m. de iones y compuestos químicos.	27
4.2.2	Datos analíticos necesarios para cálculos de suavización.	28
4.2.3	Productos químicos requeridos.	29
4.2.4	Factores para el cálculo de la dosificación de productos químicos necesarios para el ablandamiento con cal-soda, a partir del análisis de agua cruda y tratada.	30
4.3	Ablandamiento en caliente mediante productos químicos.	32
4.4	Suavización por medio de materiales de intercambio iónico o zeolitas.	33
4.4.1	Comparación de cantidades de reactivos a usar en el tratamiento cal-carbonato de sodio y zeolitas.	37
4.4.2	Consideraciones Generales.	38
4.5	Ablandamiento con cal y zeolitas.	38
4.6	Otros métodos.	39

CAPITULO V

METODOS DE LABORATORIO

5.1 Dureza

CAPITULO VI

LIMITES ADMISIBLES DE LA DUREZA DEL AGUA EN LAS INDUSTRIAS

6.1	Tolerancias de dureza en usos industriales.	43
6.2	Tolerancia de dureza del agua para operación de calderas.	44
6.3	Clasificación de la dureza.	44

CAPITULO VII

ESTUDIO DE LA DUREZA REQUERIDA EN LAS AGUAS UTILIZADAS POR LA INDUSTRIA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

7.1	Distribución de empresas estudiadas por zona.	47
7.2	Distribución de clases de industrias analizadas.	48
7.3	Porcentaje de las industrias que utilizan agua en el proceso industrial.	49
7.4	Cantidad de agua utilizada en los procesos industriales.	49
7.5	Análisis de laboratorio.	50
7.6	Tablas que indican el límite requerido y el tratamiento usado por las industrias en la ciudad de Guatemala.	50
7.7	Costo de tratamiento.	52
7.8	Ventajas obtenidas con el uso de tratamiento de agua en la industria.	52

7.8.1 Desventajas obtenidas con el uso de tratamiento de agua en la industria.	53
7.9 Evaluación de resultados.	53
7.9.1 Ficha típica de la encuesta.	56

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES	59
--------------	----

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	61
-------------------------	----

INTRODUCCION

En estos últimos tiempos el crecimiento industrial de las ciudades se ha venido desarrollando a un ritmo acelerado, y uno de los problemas que ha sido necesario resolver para obtener mayor eficiencia en los procesos industriales es el del suministro adecuado de agua.

Las instituciones municipales o empresas particulares al proporcionar agua, tienen como objetivo fundamental, suministrarla en una calidad suficiente para no dañar la salud de los consumidores, y llenar otros requisitos que si bien no la afectan son indispensables para satisfacer el gusto de la población humana, tales como sabores y olores nulos y aspecto límpido. Sin embargo esta calidad del agua así suministrada puede ser completamente inadecuada para procesos específicos en la industria tales como: lavado, fabricación de papel, de cerveza, de hielo, en textiles, etc., en los que una de las características más importantes que debe tener el agua es, estar exenta de dureza o tenerla en pocas cantidades.

Los avances logrados para resolver este problema de la dureza han ido prosperando desde muchos años atrás. El proceso de la cal para remover la dureza carbonatada fue patentado en 1,841 por el Dr. Clarke de Inglaterra, siendo éste el primer método usado extensamente en aquellos países en donde existen grandes depósitos calcáreos. Al mismo proceso le introdujo mejoras el Dr. Porter en 1,876, conociéndose durante mucho tiempo como el Proceso Porter Clarke, éste está limitado únicamente a la remoción de carbonatos.

En 1,856 se patentó un proceso similar basado en la remoción, tanto de la dureza de carbonatos como de la dureza de no carbonatos, usando sales de sodio y cal.

Otros estudios y nuevos procesos sobre la dureza del agua, han sido publicados en los últimos años, los cuales serán expuestos en este trabajo de tesis con el fin primordial de determinar: la dureza del agua y su distribución en la república de Guatemala, su eliminación o ablandamiento y un análisis de la situación de las industrias existentes en la ciudad de Guatemala con relación al consumo de agua y a los métodos y tratamientos para corregir sus deficiencias.

I- DUREZA DEL AGUA

1.1 Dureza

Es conocida como agua dura aquella que requiere una cantidad excesiva de jabón para formar una solución espumosa. También se le da el nombre de agua dura, a la que produce incrustaciones en las calderas al utilizarse en generación de vapor.

La dureza en el agua se debe principalmente a la presencia de sales de calcio, y magnesio disueltas en ella, tales como: carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos. También causan dureza en el agua el hierro, aluminio y manganeso, pero estas sustancias no se encuentran presentes ordinariamente en cantidades apreciables. Los carbonatos normales se encuentran solo ocasionalmente en aguas sumamente alcalinas.

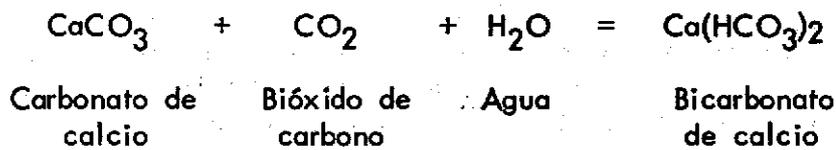
Los cuatro componente siguientes acompañan a la dureza en prácticamente todas las aguas:

Bicarbonato de calcio	$\text{Ca} (\text{HCO}_3)_2$
Bicarbonato de magnesio	$\text{Mg} (\text{HCO}_3)_2$
Sulfato de Calcio	$\text{Ca} (\text{SO}_4)$
Sulfato de magnesio	$\text{Mg} (\text{SO}_4)$

En el pasado la costumbre era clasificar la dureza del agua en temporal y permanente. Las aguas con dureza temporal son las que sufren ablandamiento parcial al hervirlas, en cambio las de dureza permanente no se alteran con esta acción.

La denominación actual de la dureza es: dureza carbonatada y no carbonatada, la primera se debe a carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio, y la segunda a sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y magnesio; este cambio en la denominación se debe a que la ebullición no elimina toda la dureza carbonatada y probablemente remueve parte de la dureza no carbonatada.

La razón de este comportamiento es obvia al considerar la composición química de los dos tipos de dureza. Aún cuando el carbonato de calcio es solo ligeramente soluble, se disuelve en ácido carbónico para formar bicarbonato de calcio:



Los requerimientos de productos químicos y los resultados de la suavización difieren respecto a las durezas de carbonatos y de no-carbonatos, así como también en cuanto a las durezas de calcio y magnesio.

Ambas bases de la clasificación, deben, por tanto, ser usadas para interpretar el análisis de agua y calcular los resultados del tratamiento. Estas se muestran en la siguiente tabla.

1.1.2 TIPOS DE DUREZA

Clasificación	Dureza de Carbonatos	Dureza de no-carbonatos*
Dureza de calcio	Bicarbonato cálcico Carbonato cálcico	Sulfato cálcico Cloruro cálcico
Dureza de magnesio	Bicarbonato de magnesio Carbonato de magnesio	Sulfato de magnesio Cloruro de magnesio

* La dureza de no-carbonatos incluye los nitratos, pero éstos usualmente son menores en cantidad y se omiten para simplificar la exposición.

La dureza se expresa en términos de carbonato de calcio, por conveniencia en los cálculos, como se verá en el capítulo de tratamiento. La suma de los valores de dureza carbonatada y dureza no-carbonatada nos da el valor conocido como dureza total, expresada en carbonato de calcio y medida en partes por millón.

1.2 Formación de la Dureza

El agua de lluvia atraviesa los estratos geológicos por su porosidad y por acción de la gravedad, provocando la oportunidad para su polución y filtración, así como también para una acción de solvente. La materia orgánica en la parte superior de la tierra es sometida continuamente al pro

ceso de oxidación, con la consiguiente producción de bióxido de carbono, por lo que en el agua percolada se encuentra este gas en solución; el contacto de este gas con el agua nos produce ácido carbónico que ayuda a disolver la cal, magnesio y hierro presentes en el suelo.

Al atravesar el agua estratos de rocas calizas o formaciones ígneas, disuelve pequeñas cantidades de minerales y la solución total depende del recorrido del agua a través de estas formaciones.

La solución de estos minerales en el agua es por supuesto una desventaja para su uso industrial, sin embargo el agua obtiene cierta purificación debido a la filtración en donde las partículas mayores de materia suspendida son removidas, y una parte adicional es eliminada por adsorción y otra de material flotante por percolación, llevándose a cabo una acción biológica que suprime gran parte de microorganismos.

En resumen podemos decir que el agua obtenida de galerías y pozos es muy diferente del agua superficial, ya que las anteriores nos indican la naturaleza constante del área geológica que las contiene, en cambio el agua proveniente de corrientes superficiales nos da idea de un índice promedio de la geología de una gran cuenca, conteniendo generalmente una proporción escasa de minerales disueltos, pero con variaciones grandes, con los cambios de estación, de impurezas, turbidez y características químicas.

El agua contenida bajo la superficie de la tierra tiene una composición química más constante, aunque contiene gases y relativamente una alta concentración de minerales.

Debido a estas características, el agua de pozos y galerías no es tan deseable para usos industriales, pero si es satisfactoria para usos sanitarios cuando las alternativas económicas con fuentes superficiales así lo demuestren.

II- EFFECTOS QUE PRODUCE LA DUREZA DEL AGUA:

La dureza del agua no produce efectos nocivos desde un punto de vista fisiológico, aún en cantidades que se consideran muy grandes para usos domésticos, tal como 300 p.p.m.; sin embargo la dureza incide en proporción directa a la economía doméstica ya que a mayor dureza mayor gasto de jabón. Este problema se origina porque las sales de calcio y magnesio que son los principales constituyentes minerales del agua dura, consumen el jabón y lo precipitan en forma de compuestos insolubles o grumos de jabón, y mientras no se haya precipitado todo el calcio y magnesio, no se obtendrá espuma y por consiguiente acción lavadora; esta acción de limpieza del jabón se debe a su poder de emulsionar las grasas y disminuir la tensión superficial del agua, que facilita la adsorción de partículas de suciedad.

Se ha estimado por investigadores norteamericanos que el costo del jabón, debido a la dureza del agua es al rededor de un dólar por persona y por año por cada 100 p.p.m. de dureza.

Entre la cantidad innumerable de industrias a las cuales afecta la dureza están: lavanderías, plantas procesadoras de leche, fábricas de hielo, fábricas textiles, fábricas de bebidas carbonatadas, empacadoras de alimentos, productos farmacéuticos, fábricas de vinos, y en general todas aquellas industrias que hacen uso de calderas para generación de vapor y agua para servicios de enfriamiento.

2.1 Industrias Textiles

En esta industria una de las etapas finales del proceso lo constituye el lavado de las telas producidas, lo que

con el uso de agua dura produce un efecto nocivo en esta industria, ya que la acción química que se produce entre las sales de calcio y magnesio y los ingredientes del jabón, da como resultado que se destruya el valor equivalente del jabón para usos de detergente, por lo que se requieren cantidades excesivas de jabón para el lavado. También es necesario considerar, que aguas que contienen grandes cantidades de calcio, al utilizarse en el proceso de teñido y blanqueado da resultados dañinos en la aplicación de colores de añilinas.

Otro de los aspectos nocivos en esta industria, cuando el agua contiene grandes cantidades de calcio y magnesio es la formación de precipitados, que se adhieren a las fibras produciendo manchas y causando problemas cuando éstas se enrollan en carretes, porque los precipitados impiden la flexibilidad del hilo y se rompen.

Los requisitos de calidad son altos en todos los casos, pero varían con las operaciones específicas, ya sea: en el lavado de la lana, de la seda, algodón, rayón y en el proceso de teñido y blanqueado.

2.2 Industria Papelera

En la fabricación del papel la dureza es perjudicial porque, al precipitarse las sales de calcio y magnesio, se producen manchas en el papel que ocasionan una pérdida de calidad en el producto.

Un agua dura, es especialmente objetable en la producción del papel fino, el cual necesita una alta calidad del agua y en cantidades tales que para producir 1,000 kilogramos de papel fino se emplean de 40,000 a 150,000 litros de agua.

2.3 Agua para Alimentación de Calderas

Seguramente uno de los aspectos que se deben estudiar detenidamente es el agua de alimentación para calderas, ya que la mayoría de las grandes industrias utilizan calderas para generación de vapor. Por lo que a continuación describimos algunos de los problemas que se presentan, cuando el agua no está acondicionada para estos fines.

Las características que deben exigirse al agua, dependen de la presión de funcionamiento de la caldera y de su intensidad de vaporización.

El agua al evaporarse, deja residuos debido a los minerales de calcio y magnesio disueltos en ella, esta precipitación se produce a veces antes de que la evaporación sea completa, debido a que la solución resulta saturada en uno o más de sus componentes cuando se efectúa la evaporación. El resultado de estos residuos es: sedimentos en las calderas o incrustaciones en las planchas o tubos de las mismas.

Las incrustaciones producen los efectos más críticos - ya que una capa de incrustación actúa como un aislante y reduce la facilidad de transmitir el calor exterior al agua interior, por lo que hay una pérdida grave de eficiencia, lo que trae como consecuencia desperdicio de combustible y un calentamiento excesivo de las paredes de la caldera al perder su conductividad.

Los depósitos de las calderas se componen esencialmente de compuestos de calcio y magnesio, sulfatos, carbonatos cálcicos, y algunas veces silicatos, siendo los más comunes los sulfatos y carbonatos cálcicos. Las incrustaciones provenientes de sulfatos forman capas duras y firmes

parecidas al pedernal, las más blandas y de fácil limpieza suelen ser composiciones de carbonato cálcico y en ocasiones de hidróxido magnésico.

2.4 Agua para Centrales Térmicas

En centrales térmicas, en las cuales las turbinas son accionadas por vapor de agua, las incrustaciones en las paletas de las turbinas que causan las sales de calcio y magnesio que arrastra el vapor de agua, son un serio problema, habiendo casos en que el rendimiento de las turbinas baja un 20%, después de una semana de trabajo.

Cuando esto sucede hay que parar y enfriar las turbinas para la eliminación de las incrustaciones, estas pérdidas graduales de rendimiento y períodos de inactividad, producen una fuerte baja en la eficiencia y es problema muy grave en instalaciones grandes.

2.5 Sistemas de Refrigeración

Las incrustaciones en los sistemas de refrigeración se deben, a una simple descomposición térmica de los bicarbonatos de calcio y de magnesio en carbonatos, bajo el calor del vapor condensado u otra causa, y como los carbonatos tienen una solubilidad más baja quedan depositados.

Estos inconvenientes de las incrustaciones, son aún mayores en aquellos casos en que el agua de refrigeración es recirculada a través de una torre refrigerante, ya que la concentración de sales aumenta, debido a la continua evaporación y alimentación de agua de aportación o de compensación del sistema. Las incrustaciones se producen sobre todo cuando la dureza de carbonatos del agua de refrigeración es alta.

2.6 Problemas ocasionados por el Agua Blanda

Las aguas blandas pueden variar bastante de un momento a otro, y esta variación suele ser mayor con las aguas blandas naturales. Tales aguas pueden ser ligeramente ácidas, ligeramente alcalinas o talvez neutras.

Como alimentadoras, las aguas blandas pueden resultar peligrosas y no precisamente por ser blandas, sino porque las pequeñas cantidades de sólidos disueltos que contienen pueden ser ácidos, o pueden ocasionar la acidez cuando se usa agua en una caldera de vapor.

Tampoco conviene olvidar que las aguas naturalmente blandas suelen contener gases en disolución, tales como O_2 y CO_2 y éstos son agentes corrosivos activos. Es un hecho que el aire se disuelve más rápidamente en el agua blanda, y que en las aguas naturalmente blandas el oxígeno disuelto puede aumentar la corrosión causada por las sales formadoras de ácidos.

III- CARACTERISTICAS DE LA DUREZA EN LA REPUBLICA DE GUATEMALA*

En general puede decirse que en la República de Guatemala, la dureza no alcanza valores realmente altos y a que como se muestra en el cuadro y mapa de distribución de dureza en la República, el valor promedio más alto está en el departamento del Petén y es de 237, valor que no sobrepasa el límite máximo admisible de dureza para usar el agua como bebida, aunque sin embargo necesitaría de tratamiento para ciertos usos industriales.

En la investigación que se hizo para obtener estos promedios se encontraron valores tan altos como: 509 en Ipala, Jutiapa; 308 en un pozo del Hospital de San Benito Petén y otros. Sin embargo en valores promedios la dureza no es excesiva.

Los datos necesarios para obtener estos promedios fueron recopilados del Archivo del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Dirección General de Obras Públicas, que en colaboración con la Municipalidad de Guatemala funciona en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Para obtener los promedios, se utilizaron los análisis químicos sanitarios, que se han hecho para las diferentes fuentes de abastecimiento de agua potable de la República, agrupándolos por Departamento.

* Valores expresados en partes por millón

3.1 Valores Promedio de Dureza por Departamento:

Alta Verapaz	32	p.p.m.
Baja Verapaz	65	"
Chimaltenango	76	"

El Progreso	147	p.p.m.
Chiquimula	170	"
El Quiché	53	"
El Petén	237	"
Escuintla	95	"
Guatemala	105	"
Huehuetenango	199	"
Izabal	179	"
Jalapa	51	"
Jutiapa	113	"
Quezaltenango	77	"
Retalhuleu	56	"
Santa Rosa	93	"
Sacatepéquez	77	"
Sololá	88	"
San Marcos	71	"
Suchitepéquez	66	"
Totonicapán	41	"
Zacapa	92	"

3.2 Valores Promedio de Dureza en la Ciudad de Guatemala

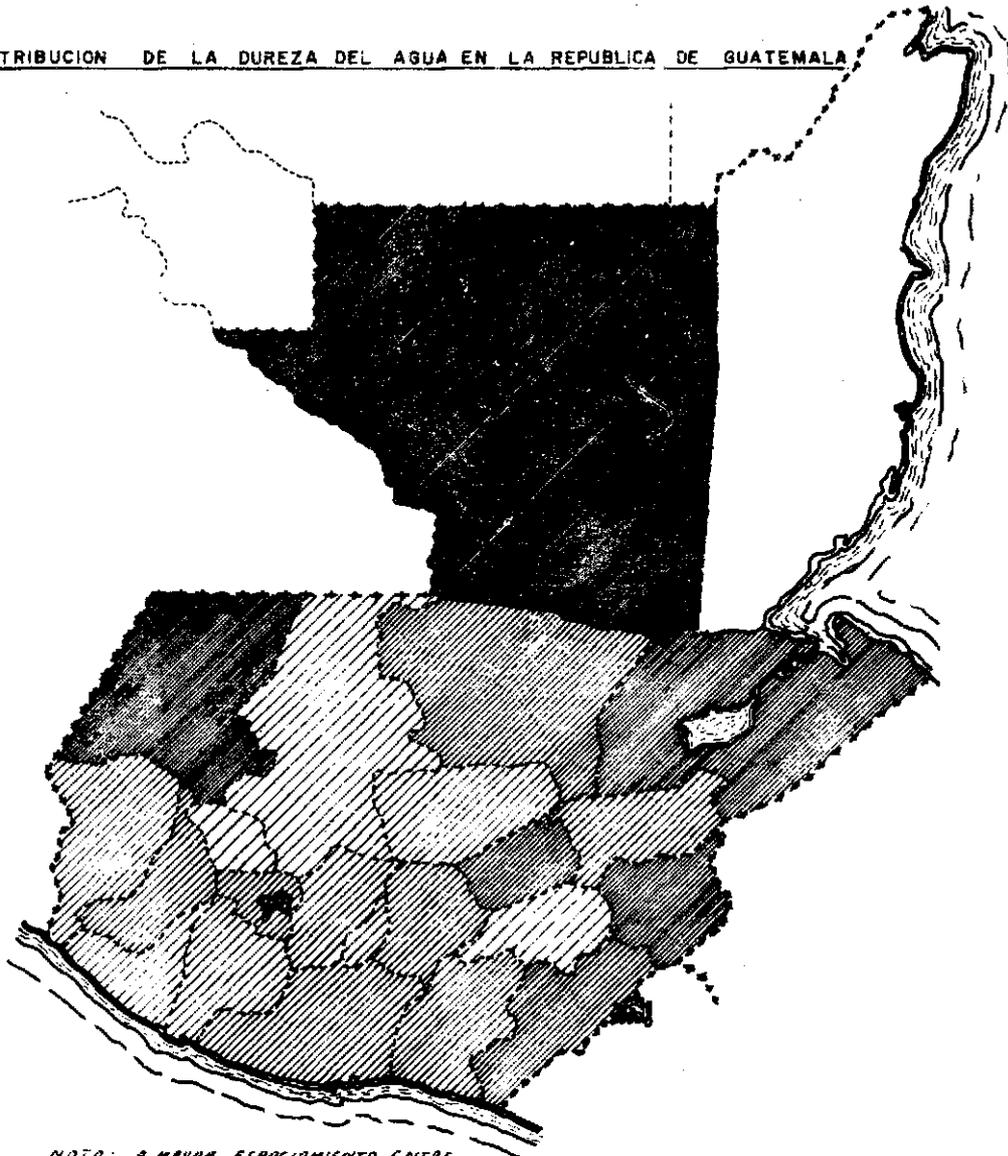
En la tabla a continuación se presentan datos promedios de dureza total en las diferentes plantas de tratamiento de la ciudad de Guatemala.

Planta	Agua cruda Dureza total	Agua tratada Dureza total
Santa Luisa	39	32
El Cambray	38	38
La Brigada	55	50
Ojo de Agua	70	63

La dureza promedio del agua de distribución municipal es de 45 p.p.m. como carbonato de calcio.

La dureza promedio en la ciudad de Guatemala, para el Agua obtenida de pozos es de 142 p.p.m. como carbonato de calcio.

DISTRIBUCION DE LA DUREZA DEL AGUA EN LA REPUBLICA DE GUATEMALA



NOTA: A MAYOR ESPACIAMIENTO ENTRE LINEAS CORRESPONDE MENOR DUREZA

IV- PROCESOS PARA REBAJAR LA DUREZA

Entre los procesos de suavizamiento de agua, que son de uso común tenemos:

- 1o) El proceso de ablandamiento por medio de productos químicos.
- 2o) El proceso de suavización por medio de materiales de intercambio iónico.
- 3o) Combinación de los métodos anteriores.
- 4o) Otros métodos.

Los compuestos que forman la dureza se encuentran en el agua disociados en iones en forma de solución diluida, como iones de calcio, de magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Los ingredientes químicos agregados se disuelven y disocian formando iones de: hidróxido, sodio y carbonato; en esta forma se encuentran presentes iones que se combinan para formar sales débilmente solubles, cuyo exceso sobre el punto de saturación precipita produciendo en esta forma el ablandamiento.

4.1 Ablandamiento en frío mediante Productos Químicos

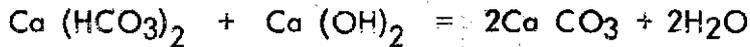
4.1.1 Reducción de la dureza carbonatada mediante la cal

Para remover los carbonatos, la cal es usada como precipitante, el calcio y magnesio se mantienen en solución principalmente por el ácido carbónico disuelto en el agua y están presentes como bicarbonatos, por lo cual antes de iniciarse el ablandamiento, la cal es consumida por el bióxido de carbono libre presente en el agua de acuerdo con la siguiente reacción química:



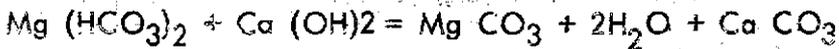
Bióxido de carbono. Hidróxido de calcio (cal hidratada) Bicarbonato de calcio.

Este bicarbonato resultante aumenta la dureza inicial; al transformarse en carbonato normal, consume más cal de acuerdo con la siguiente reacción:



Este carbonato de calcio resultante es relativamente insoluble y precipita parcialmente, se acostumbra este proceso para abastecimiento público de agua, porque en este caso no se exige una suavización completa.

Para otros suministros, en especial para alimentación de calderas, todos los bicarbonatos incluyendo los de magnesio y sodio deben ser convertidos a carbonatos normales por efecto de la cal. En el caso de encontrarse presente el bicarbonato de magnesio una reacción similar se produce:

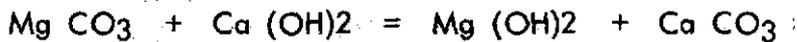


Bicarbonato de Magnesio Hidróxido de Calcio Carbonato de Magnesio Agua Carbonato de Calcio

4.1.2 Reducción de Dureza de Magnesio con Cal

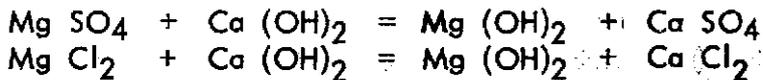
El carbonato de magnesio formado por la reacción anterior, es soluble y no precipita, por lo que se necesita

más cal para completar el proceso, en la siguiente forma:



Carbonato de Magnesio	Hidróxido de Calcio	=	Hidróxido de Magnesio	+ Carbonato de Calcio
--------------------------	------------------------	---	--------------------------	--------------------------

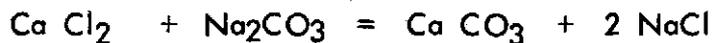
Es de mencionar que cuando el sulfato o cloruro de magnesio que producen dureza no-carbonatada, se precipitan con cal se producen las siguientes reacciones:



En estas reacciones se ve que cuando el sulfato y cloruro de magnesio, reaccionan con la cal nos produce la sal correspondiente de calcio, que incrementa la dureza no-carbonatada de calcio en el agua; por lo cual en esta etapa se hace necesario otra sustancia química que nos elimine o haga precipitar la dureza no-carbonatada, una de estas sustancias químicas es el carbonato de sodio, conocido comercialmente como Soda Ash.

4.1.3 Reducción de Dureza no-carbonatada con Carbonato de Sodio

La adición de carbonato de Sodio a la dureza no-carbonatada presenta las siguientes reacciones:



El carbonato de calcio así formado precipita, y el sul

fato de sodio que no constituye dureza es muy soluble.

Si existe en el agua que se trata sulfato de magnesio, la reacción con cal y Soda Ash* es como sigue:



El carbonato de sodio agregado al agua, no solo reduce la dureza no-carbonatada de calcio, sino que también es necesario para remover la dureza no-carbonatada de Magnesio. En otras palabras la dosis de Soda Ash debe estar basada en la cantidad total de dureza no-carbonatada.

La dureza final del agua, dependerá de la solubilidad del carbonato de calcio y de la solubilidad del hidróxido de magnesio, bajo las condiciones existentes de temperatura y presencia de otras substancias.

* Soda Ash: nombre comercial del carbonato de sodio.

4.1.4 Solubilidad del Carbonato de Calcio

La solubilidad del carbonato de calcio, es una función de la temperatura, iones carbonato, iones de calcio, valor del potencial hidrógeno y el efecto de inhibidores.

Temperatura:

A mayor temperatura la eficiencia es más alta, es decir que a mayor temperatura el precipitado es mayor. Esto se nota perfectamente si el proceso de suavizamiento se lleva a cabo en caliente, que es una modificación del proceso de suavizamiento en frío, descrito anteriormente cuyo rango de temperatura es de 1.11°C a 32.2°C.

Iones de Carbonato:

La dureza de carbonato de calcio se puede reducir hasta 45 p.p.m. aproximadamente a una temperatura de 15° a 21° C, pero cuando el agua contiene bicarbonato de Magnesio, se produce carbonato de magnesio soluble en el tratamiento con cal, y entonces la solubilidad del carbonato de calcio se reduce por debajo de 35 p.p.m.

Iones de Calcio:

Un exceso de calcio soluble se puede emplear para disminuir la alcalinidad de carbonatos, de la misma manera que el carbonato de sodio disminuye la dureza.

pH.:

La solubilidad del carbonato de calcio es mínima a un pH. aproximado de 9.4, si el pH. es mayor la solubilidad del carbonato de calcio sube por la formación de hidróxido de calcio que es más soluble.

Inhibidores:

Existen sustancias en el agua que retardan la precipitación, distorsionan la formación de cristales, o impiden la coagulación. Estas sustancias pueden ser: taninos, residuos orgánicos, aguas negras y otros contaminantes que se deben de tomar en cuenta para dosificar los químicos requeridos en el suavizamiento, es necesario efectuar pruebas de laboratorio e interpretar los resultados para hacer los ajustes necesarios. La oxidación de los compuestos orgánicos puede lograrse con cloración.

4.1.5 Solubilidad del Hidróxido de Magnesio

Los mismos factores que afectan la solubilidad del carbonato de calcio, también lo hacen con el hidróxido de magnesio. Un valor de pH. alto es el factor más importante en la disminución de la solubilidad del hidróxido de magnesio; también la presencia de inhibidores modifica la solubilidad del hidróxido de magnesio.

4.1.6 Comentarios sobre el proceso de Suavización en Frío

La cal es agregada ya sea en solución o como una mezcla espesa, en la primera forma la proporción es constante pero requiere grandes volúmenes y no es ordinariamente usado en grandes plantas.

No toda la dureza puede ser removida con el proceso cal-carbonato de sodio, ya que como hemos visto el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio son ligeramente solubles, aún sin la presencia de bióxido de carbono; los límites prácticos para rebajar la dureza son de 50 p.p.m. y generalmente una reducción de dureza total de 80 a 100 p.p.m. es satisfactoria para distribución municipal. El mínimo teórico para rebajar la dureza por el proceso cal-carbonato de sodio en frío es de 20 a 27 p.p.m.

En el proceso de suavizamiento, después de la aplicación de cal o cal-carbonato de sodio, sucede que pequeñas cantidades de carbonato de calcio y considerables cantidades de material coloidal no asientan. Si el agua en estas condiciones se pasa directamente a través de filtros, el resultado es la precipitación de una considerable cantidad de carbonatos sobre los granos de arena que forman la cama del filtro, o en el sistema de distribución. En los

Iones de Carbonato:

La dureza de carbonato de calcio se puede reducir hasta 45 p.p.m. aproximadamente a una temperatura de 15° a 21° C, pero cuando el agua contiene bicarbonato de Magnesio, se produce carbonato de magnesio soluble en el tratamiento con cal, y entonces la solubilidad del carbonato de calcio se reduce por debajo de 35 p.p.m.

Iones de Calcio:

Un exceso de calcio soluble se puede emplear para disminuir la alcalinidad de carbonatos, de la misma manera que el carbonato de sodio disminuye la dureza.

pH.:

La solubilidad del carbonato de calcio es mínima a un pH. aproximado de 9.4, si el pH. es mayor la solubilidad del carbonato de calcio sube por la formación de hidróxido de calcio que es más soluble.

Inhibidores:

Existen sustancias en el agua que retardan la precipitación, distorsionan la formación de cristales, o impiden la coagulación. Estas sustancias pueden ser: taninos, residuos orgánicos, aguas negras y otros contaminantes que se deben de tomar en cuenta para dosificar los químicos requeridos en el suavizamiento, es necesario efectuar pruebas de laboratorio e interpretar los resultados para hacer los ajustes necesarios. La oxidación de los compuestos orgánicos puede lograrse con cloración.

4.1.5 Solubilidad del Hidróxido de Magnesio

Los mismos factores que afectan la solubilidad del carbonato de calcio, también lo hacen con el hidróxido de magnesio. Un valor de pH. alto es el factor más importante en la disminución de la solubilidad del hidróxido de magnesio; también la presencia de inhibidores modifica la solubilidad del hidróxido de magnesio.

4.1.6 Comentarios sobre el proceso de Suavización en Frío

La cal es agregada ya sea en solución o como una mezcla espesa, en la primera forma la proporción es constante pero requiere grandes volúmenes y no es ordinariamente usado en grandes plantas.

No toda la dureza puede ser removida con el proceso cal-carbonato de sodio, ya que como hemos visto el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio son ligeramente solubles, aún sin la presencia de bióxido de carbono; los límites prácticos para rebajar la dureza son de 50 p.p.m. y generalmente una reducción de dureza total de 80 a 100 p.p.m. es satisfactoria para distribución municipal. El mínimo teórico para rebajar la dureza por el proceso cal-carbonato de sodio en frío es de 20 a 27 p.p.m.

En el proceso de suavizamiento, después de la aplicación de cal o cal-carbonato de sodio, sucede que pequeñas cantidades de carbonato de calcio y considerables cantidades de material coloidal no asientan. Si el agua en estas condiciones se pasa directamente a través de filtros, el resultado es la precipitación de una considerable cantidad de carbonatos sobre los granos de arena que forman la cama del filtro, o en el sistema de distribución. En los

filtros el tamaño del grano de arena crece, los granos de arena se cementan y se forman bolas de lodo. Para prevenir las dificultades causadas por una precipitación posterior de carbonato de calcio, se puede utilizar el bióxido de carbono gaseoso, obtenido de estufas de carbón o dispositivos similares, este gas es agregado al agua para disolver las partículas coloidales de carbonato de calcio, formando una solución de bicarbonato que incrementa la dureza pero en pequeña escala.

4.1.7 Equipo para suavización por el proceso en Frío

- a) Aparato para preparar e introducir el material químico.
- b) Dispositivo para producir un contacto íntimo del químico con el agua.
- c) Floculadores para que se produzca la aglomeración de los principales componentes precipitados, en partículas que se asientan rápidamente.
- d) Dispositivos para remover la mayor parte del precipitado.
- e) Carbonatación para causar disolución de los vestigios de precipitado, que en forma coloidal obstruyen los filtros.
- f) Filtración para remover las partículas que no asientan ni se disuelven.

Después de que los químicos son introducidos, la mezcla debe permanecer agitada por medio de canales con cortinas horizontales o verticales o por medio de aire comprimido o dispositivos mecánicos.



4.2 Dosificación

Los cálculos, se simplifican grandemente por el procedimiento estandar de expresar todos los tipos de dureza como carbonato de calcio, que tiene un peso molecular de 100, similarmente las alcalinidades de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos se expresan como carbonato de calcio, así como también los sulfatos, cloruros y todos los iones anteriormente mencionados.

La siguiente tabla muestra los factores convenientes para expresar en p.p.m. de carbonato de calcio, los iones y sales encontradas en el agua y los químicos usados en el tratamiento.

4.2.1 FACTORES DE CONVERSION PARA OBTENER p.p.m. DE CaCO₃
A PARTIR DE p.p.m. DE IONES Y COMPUESTOS QUIMICOS***

			Dividir entre	Multiplicar por
<u>Cationes:</u>				
Calcio	Ca		40.1	2.495
Magnesio	Mg		24.3	4.112
Sodio	Na		46.0	2.174
Potasio	K		78.2	1.278
<u>Aniones:</u>				
Cloruro	Cl		70.9	1.414
Sulfato	SO ₄		96	1.041
Nitrato	NO ₃		124	0.806
Fosfato	PO ₄		63.33	1.579
Bicarbonato	H (CO ₃)		122	0.819
Carbonato	CO ₃		60	1.666
Hidróxido	(OH)		34	2.939
<u>Compuestos:</u>				
Cal hidratada	Ca(OH) ₂	92.5%	80	1.250
Cal viva	Ca O	90 %	62	1.613
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	99 %	108	0.926
Acido sulfúrico	H ₂ SO ₄	66°Bé	105	0.926
Acido Clorhídrico	HCl	20°Bé	232	0.431
Cloruro de Sodio	NaCl		117	0.855

* Multiplique el coeficiente por 100.

** Estos valores representan el peso de productos químicos de pureza comercial equivalente a 100 p.p.m. de CaCO₃.

*** Tabla tomada del libro Acondicionamiento de aguas para la industria.

En las plantas en las cuales se utiliza sulfato de aluminio u otro coagulante, debe de hacerse correcciones, porque la alcalinidad disminuye y la dureza de no-carbonatos aumenta con su empleo, por lo cual cambian las dosis de los productos químicos requeridos. Una p.p.m. de alumbre neutralizará 0.45 p.p.m. de bicarbonatos, y aumentará los sulfatos en una cantidad igual expresada como carbonato de calcio. Si se aplica precloración es preciso aumentar los cloruros y disminuir los bicarbonatos.

4.2.2 Datos Análfticos necesarios para Cálculos de Suavización*

La tabla siguiente da una lista de los datos del agua cruda y suavizada, que se emplea para el cálculo de los requerimientos del tratamiento y sus resultados; y muestra como se obtienen mediante procedimientos sencillos de pruebas.

- | | | |
|-----|--------------------------|--|
| 1.- | Bióxido de carbono libre | p.p.m. $\text{CO}_2 \times 2.27$ |
| 2.- | Bicarbonatos | Alcalinidad M (al anaranjado de metilo) |
| 3.- | Bicarbonato cálcico | Los bicarbonatos se encuentran combinados con calcio, magnesio y sodio en el orden dado. |
| 4.- | Bicarbonato de magnesio | Cualquier cantidad necesaria para igualar un exceso de bicarbonatos sobre el calcio. |
| 5.- | Bicarbonato de sodio | Cualquier cantidad necesaria para igualar un exceso de bi- |

carbonatos sobre el calcio y mag
nesio.

- 6.- Exceso de Bicarbonatos sobre el calcio Esto es, obviamente, los incisos 4, 5 o su suma. Después del tratamiento con cal, es convertido a carbonatos solubles los que afectan la dureza final.
- 7.- Dureza de no-carbonatos El excedente de dureza total sobre la alcalinidad M, en caso de encontrarse presente.
- 8.- Dureza de no-carbonatos de calcio El calcio excede al bicarbonato de calcio. Al adicionar cal, ésta es aumentada por cualquier dureza de no-carbonato de mag
nesio.

* Datos tomados del libro Acondicionamiento de Aguas para la Industria.

4.2.3 Productos Químicos Requeridos

Las ecuaciones anteriormente dadas para las cuatro reacciones básicas del ablandamiento, muestran que se requiere un peso equivalente de bióxido de carbono, alcalinidad y magnesio convertidos, y un equivalente de carbonato de sodio por cada equivalente de dureza de no-carbonatos removida. Obviamente, estos términos coinciden, requiriendo la alcalinidad de magnesio dos equivalentes de cal, y necesitando la dureza no-carbonatada de magnesio tanto cal como carbonato de sodio. Las reglas convencionales para calcular las dosis químicas reconocen estos dobles requerimientos. Sin embargo, se evitarán confusiones si se consideran separadamente cada una de las sustancias

hasta el grado en que se van a remover: bióxido de carbono, alcalinidad de bicarbonatos, magnesio y dureza de no-carbonatos.

Para calcular la dosis química requerida, se necesita sólo conocer los pesos de un equivalente de cal y de carbonato de sodio, que se combinarán con 100 partes de cualquiera de las sustancias anteriormente enumeradas, expresadas como carbonato de calcio. Los pesos equivalentes de la cal química, cal hidratada y carbonato de sodio (Soda Ash) son 56, 74 y 106 respectivamente.

Los productos comerciales varían su pureza. Para corregir esto se usan las siguientes dosis para cada 100 p.p.m. de bióxido de carbono, alcalinidad, magnesio o dureza no-carbonatos:

	p.p.m.
Cal química, CaO	62
Cal hidratada, Ca (OH) ₂	80
Soda Ash (carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃))	108

4.2.4 FACTORES PARA EL CALCULO DE LA DOSIFICACION DE PRODUCTOS QUIMICOS NECESARIOS PARA ABLANDAMIENTO CON CAL-SODA, A PARTIR DEL ANALISIS DE LAS AGUAS CRUDA Y TRÁIDA (1)

Para encontrar la dosificación de cal necesaria para ablandar:

SUMAR lo siguiente:
(todo expresado como
p.p.m. de CaCO_3)

MULTIPLICAR la suma por:

- 1.- CO_2^* libre Para cal hidratada de 93%
- 2.- Bicarbonatos para 0.8 p.p.m. ó 0.00299 kgs. por
convertir a carbo- 3785 lts.
natos**
- 3.- Dureza del magnesio Para cal química de 90%
por remover (CaO)
- 4.- Exceso requerido de 0.62 p.p.m. ó 0.00234 kgs. por
hidróxidos 3785 lts.

Para encontrar la dosificación de Carbonato de Sodio
necesaria para ablandar:

SUMAR lo siguiente:
(todo expresado como
p.p.m. de CaCO_3)

MULTIPLICAR la suma por:

- 1.- La dureza no-carbo- Para carbonato de sodio: 98%
natos por remover
- 2.- El exceso de cal em- 1.08 p.p.m. ó 0.0041 kgs. por
pleado anteriormente 3785 lts.
- 3.- El exceso de carbo-
nato de sodio reque-
rido en caso de nece-
sitarse

* Omitir el bióxido de carbono de los cálculos para ablan-
damiento por el proceso en caliente.

** Debe incluir el carbonato de calcio que queda en solu-

ción, además del carbonato de calcio removido.

- (1) Datos tomados del libro Acondicionamiento de Aguas para la Industria.

Las concentraciones en los análisis químicos se expresan en partes por millón, y las dosis pueden ser calculadas en las mismas unidades, así como en libras de productos químicos por 1,000 gals, o kilos por 1,000 lts. de agua tratada. Estas últimas unidades son generalmente empleadas para estimar los costos de tratamiento.

La tabla siguiente muestra los factores para calcular las dosis químicas en ambas unidades.

4.3 Ablandamiento en Caliente mediante Producto Químicos

Debido a la solubilidad del carbonato cálcico e hidróxido de magnesio, la reducción de la dureza por el procedimiento de suavizamiento en frío se encuentra limitada a una dureza residual de 20 a 40 p.p.m., la cual es inadecuada para ciertos usos de la industria, en las que se necesitan llegar a una dureza residual de 20 p.p.m. la que se obtiene por medio del proceso convencional en caliente, el cual aprovecha la influencia que la temperatura ejerce sobre la solubilidad del carbonato cálcico e hidróxido de magnesio. Las razones más importantes para utilizar el proceso del ablandamiento en caliente son:

- a) La solubilidad del carbonato cálcico e hidróxido de magnesio decrecen según aumenta la temperatura, y el proceso de reacciones químicas se intensifica rápidamente.
- b) La viscosidad del agua disminuye, por lo que la sedimentación de las partículas, efecto de la pre

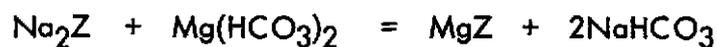
cipitación, se facilita grandemente.

Este sistema tiene también otras ventajas, tales como economía en productos químicos, ya que las altas temperaturas a que se trabaja, hacen que no se requiera cal para remover el bióxido de carbono libre y que se utiliza menor cantidad de carbonato de sodio.

4.4 Suavización por medio de Materiales de Intercambio Iónico o Zeolitas

Las zeolitas son silicatos de aluminio y sodio, que son capaces de intercambiar iones de sodio monovalentes por iones divalentes de calcio, magnesio, manganeso y hierro. El término zeolita ha sido aplicado indistintamente a todos los intercambiadores de iones. La estructura química de la zeolita de sodio es dada por la fórmula $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ y H_2O . De todos estos elementos el único que interviene en la reacción química es el sodio, por lo que la fórmula puede expresarse para usos prácticos con Na_2Z .

Las reacciones comunes del intercambio pueden ser descritas como sigue:



En la suavización de agua por medio de zeolitas los siguientes tipos de zeolitas son de uso común:

- a) Arena verde o glauconita (zeolita natural).
- b) Zeolita sintética.

La zeolita sintética se prepara de la solución de silicato de sodio y aluminio o aluminato de sodio.

La gravedad específica de todas las zeolitas en estado seco es 2.1 a 2.4, valores que no están muy alejados de la gravedad específica de la arena de cuarzo que tiene 2.65.

La zeolita natural sin embargo retiene alrededor del 10% de agua, y la sintética alrededor del 50% lo que reduce su gravedad específica aparente. La zeolita natural pesa 100 libras por pie³ y la sintética de 55 a 77 libras por pie³.

La capacidad de intercambio de estas zeolitas, el químico utilizado para regenerarla y la cantidad necesaria para regenerarla se ven en la siguiente tabla.

Por un ciclo de Intercambio	Capacidad de intercambio kilogramo de dureza como carbonato de calcio Por pie cúbico de zeolita	Regenerador	Regenerador utilizado en libras por ki- logranos de dureza como carbonato de calcio
Intercambiador de cationes:			
Zeolita Natural de Sodio	3 - 6	NaCl	0.5 - 1
Zeolita Sintética de Sodio	6 - 16	NaCl	0.4 - 0.5
Zeolita de Hidrógeno	5 - 40	H ₂ SO ₄	0.3 - 0.6

Nota: Datos tomados del libro Elements of Water Supply and Waste-Water Disposal de Fair Geyer.

El lecho de zeolitas usualmente tiene un espesor de $2\frac{1}{2}$ a 6 pies y la relación de flujo es de 4 a 8 galones por minuto por pie², dependiendo del tipo de zeolita.

El período de servicio depende de la profundidad de la zeolita, clase de material, dureza del agua y relación de flujo. Estos factores son independientes y el diseño debe tener como objetivo buscar el resultado más económico. La solución de sal es usualmente hecha al 10% o más fuerte. El tiempo de regeneración es alrededor de 5 minutos y se requiere alrededor de 30 minutos para lavar el lecho de sal. La cantidad de agua necesaria para el reacondicionamiento es alrededor de 7% a 20% de la cantidad tratada.

Zeolitas de Hidrógeno: operan bajo la misma base que las zeolitas de sodio, excepto que el calcio, magnesio y sodio presentes en el agua son removidos por una cantidad equivalente de hidrógeno. Para la regeneración se utiliza ácido sulfúrico o ácido clorhídrico.

Las zeolitas naturales son durables y químicamente estables, su uso es preferido para aguas relativamente bajas en dureza (nunca mayor de 850 a 1000 p.p.m. como carbonato de calcio) relativamente altas en Hierro; (pero menor de 1.5 a 2 p.p.m.) relativamente bajas en silicio y cualesquiera alto o bajo valor de pH.

Las zeolitas sintéticas son menos durables y estables químicamente, se desintegran en la presencia de 15 p.p.m. ó más de CO₂. Su uso es preferido para aguas relativamente bajas en hierro y valores normales de pH.

El proceso de zeolita para suavizamiento de agua ha sido usado ampliamente para servicios industriales, y también para servicios municipales donde las condiciones son económicamente favorables. El material granular que forma

la zeolita, se coloca en los filtros formando un lecho de arena, en los cuales el flujo del agua puede ser por gravedad o a presión. El sodio involucrado en el proceso, pasa a formar parte de una solución como bicarbonato o sulfato. Cuando la zeolita pierde todo el sodio contenido es necesario regenerarla, haciéndole pasar una solución de sal común. La acción química es reversible, y todos los bicarbonatos y sulfatos atrapados por la zeolita pasan a la solución y el sodio se queda con la arena verde.

La dureza puede ser totalmente removida mientras el material permanece activo. El agua de dureza cero es corrosiva, por lo que un pequeño grado de dureza de 30 a 40 p.p.m. es deseable en el producto final, y esto es obtenido ya sea por mezcla con una porción de agua sin tratar, o siguiendo el proceso aún cuando el lecho filtrante ya no sea efectivo y mezclar el producto con el agua tratada. Pequeñas unidades suavizadoras son operadas de manera similar a los filtros a presión con los arreglos convenientes para aplicar la solución de sal, desagüe de agua, etc. Grandes unidades pueden ser construidas con cajas de concreto similares a filtros rápidos de gravedad. Las zeolitas no pueden ser usadas para aguas con turbidez porque el filtro de zeolita no está adaptado para remover sedimentos. La consideración principal en su selección es el costo de operación, y esto depende grandemente del carácter de la dureza y el precio de reactivos.

4.4.1 Comparación de cantidades de Reactivos a usar en el Tratamiento Cal-Carbonato de Sodio y Zeolitas

Las cantidades de reactivos requeridos para la dureza de carbonatos y sulfatos es aproximadamente como sigue: 0.088 kg. de cal por cada 1,000 p.p.m. de dureza removida como CaCO_3 ; 0.095 kg. de carbonato de sodio por cada 1,000 p.p.m. de dureza removida como CaCO_3 .

En el proceso de zeolitas los reactivos son 0.29 kg. de cloruro de sodio por cada 1,000 p.p.m. de dureza como CaCO_3 .

El costo de la sal por tonelada es aproximadamente igual al costo de la cal, y el carbonato de sodio 3 ó 4 veces el de la cal. Es aparente que el proceso de la cal es más barato que el de zeolitas, pero para la dureza de sulfatos el proceso de zeolitas parece ser más barato.

4.4.2 Consideraciones Generales

En algunas plantas la turbidez y dureza de carbonatos son primero removidos por cal y filtración, después el agua clara se pasa a través de zeolitas, para remover la dureza provocada por sulfatos. El proceso de zeolitas ha sido adoptado para un número considerable de servicios municipales en donde es muy seria la presencia de sulfatos.

4.5 Ablandamiento con Cal y Zeolitas

Este proceso aplicado en frío o en caliente ha sido extensamente usado en años recientes, para acondicionar aguas para alimentación de calderas. El proceso consiste en la reducción de la dureza de carbonatos, por la adición de cal hidratada y usualmente un coagulante para acelerar la sedimentación del carbonato de calcio formado, que es insoluble. El efluente se hace pasar a continuación por suavizadores de zeolita, en los que se lleva a cabo el ablandamiento completo. Se acostumbra filtrar el agua pretratada antes de alimentar las unidades de zeolita, aunque en algunos casos se omiten los filtros. Esta omisión de los filtros es práctica, si el flóculo residual de carbonato de calcio arrastrado por el agua se disuelve por recarbonatación mediante el agregado de gas carbónico, o por la adición de ácido sulfúrico o clorhídrico. El bióxido de azu-

fre generado por la combustión de azufre puede también emplearse para este propósito, cuando se utiliza este gas es preferible disolverlo en agua formando ácido sulfuroso.

4.6 Otros Métodos

Algunos compuestos químicos tienen la propiedad de formar complejos con las sales de calcio y magnesio contenidas en el agua. Estos complejos son muy solubles y tienen todas las características de las sales sódicas, de forma que se eliminan los inconvenientes debidos a los iones de Ca y Mg. El agua tratada con estos reactivos se comporta de manera idéntica a un agua exenta de dureza, incluso desde el punto de vista del análisis químico.

Los principales productos capaces de producir este efecto en la dureza del agua son:

- a) Nitrilo triacetato sódico: (Trilón A).
- b) Sal disódica del ácido etilendiaminotetracético: (Trilón B, Complexon).

Se utilizan estos productos en dosis de 70 g. por grado de dureza del agua y por metro cúbico.

- c) Hexametáfosfato sódico: (calgon, Giltex).

Se emplea una dosis de 60 g. por grado hidrotimétrico* y por metro cúbico, siendo la temperatura del agua de 40 a 50° C. Si el tratamiento se efectúa en frío, de 15 a 20° C., debe duplicarse la dosis.

Pueden utilizarse todos estos productos para la eliminación de incrustaciones. El tratamiento es lento y su duración es por lo menos de varios meses.

* Grado hidrotimétrico es una unidad de concentración de sales de calcio y de magnesio equivalente a 10 p.p.m. - de carbonato de calcio.

El hexametáfosfato no es estable en caliente, y se descompone por encima de 80° C., formando ortofosfato.

V- MÉTODOS DE LABORATORIO

5.1 Dureza

Existen tres métodos fundamentales para la determinación de la dureza.

Método A, dureza por cálculo: este es el método más preciso y es el que sirve de patrón de comparación. Se verifica por medio de un análisis mineral completo.

Para encontrar la dureza se parte de los resultados de la determinación del calcio y magnesio; si existen otros cationes productores de dureza se incluirán en el cálculo. Para obtener las concentraciones equivalente de carbonato de calcio, se multiplican la concentración de cada uno de los cationes productores de dureza por los factores indicados en la tabla 4.2; sumando a continuación los resultados.

Método B, este método es por medio de titulación con jabón, es aplicable a todas las aguas, sin embargo aquellas aguas muy duras, deben diluirse. Es una de las titulaciones más antiguas y mejor conocidas, para medir directamente la capacidad de consumo de jabón. La precisión de este método es baja, aunque se recomienda para trabajos de rutina y control.

En la 10a. edición del libro Métodos Normales para los Exámenes de Aguas, se describe este método con detalle; en la última edición del mismo libro, no aparece este método por considerarse muy poco preciso, y porque los otros métodos como el del EDTA que se ha modificado, simplificándolo para facilidad de operación y que se utiliza en la actualidad con mayor frecuencia; sin embargo el método por medio de titulación con jabón se sigue utilizando para pruebas que no requieren gran precisión.

Método C, titulación compleximétrica o EDTA.

Descrito detalladamente en el libro Métodos Normales para los Exámenes de Aguas, 12a. edición.

VI- LIMITES ADMISIBLES DE LA DUREZA DEL AGUA EN LAS INDUSTRIAS

Las tolerancias de dureza en el agua para uso industrial, varían con el proceso de manufactura y con la calidad de los artículos a producirse. En el caso de industrias que utilizan calderas, la dureza del agua de alimentación de las mismas, varía además con la presión de trabajo a que están sometidas.

En las tablas a continuación, se presentan las tolerancias de dureza requeridas para varios usos industriales y para la operación de calderas. Según el reporte del comité sobre tolerancias de agua para usos industriales S. New Eng. Water Works Assoc.

6.1 TOLERANCIAS DE DUREZA EN USOS INDUSTRIALES*

INDUSTRIA	DUREZA EN p.p.m. COMO CARBONATO DE CALCIO
Fábricas de conservas	25-75
Bebidas carbonatadas	250
Lavanderías	50
Papel y pulpa de papel	180
Madera	180
Soda y sulfatos	100
Papel, fino	50
Producción de pulpa de rayón	8
Fabricación de rayón	55
Tenerías	50-135

* Valores obtenidos del libro Elements of Water Supply and Waste-Water Disposal de Fair-Geyer.

6.2 TOLERANCIAS DE DUREZA DEL AGUA PARA OPERACION DE CALDERAS

Presión de operación en lbs/pulg ²	0-150	150-250	250-400	más de 400
Dureza en p.p.m. como CaCO ₃	80	40	10	2

6.3 CLASIFICACION DE LA DUREZA

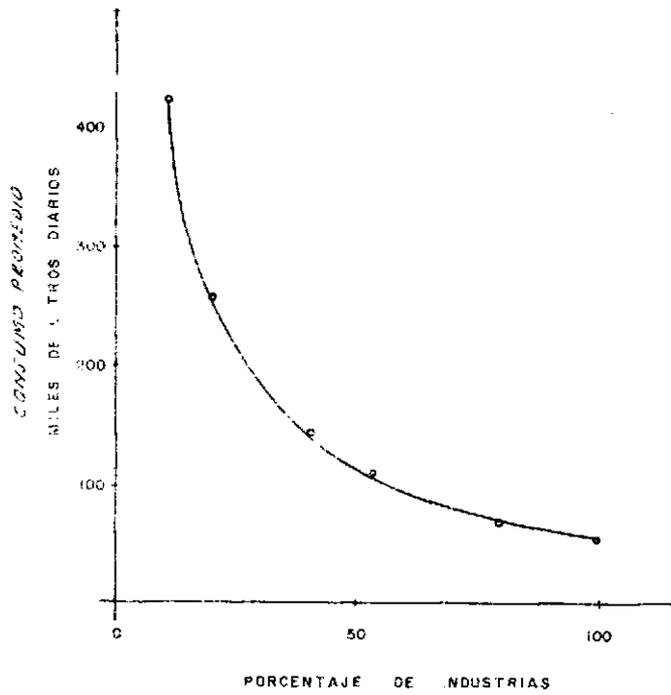
Otra forma de limitar la dureza en el agua para uso industrial, según Lashley G. Harvey es por medio de clasificar el grado de dureza en la forma siguiente:

PARTES POR MILLON (p.p.m.)	CLASIFICACION
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
Más de 180	Muy dura

Con las siguientes observaciones, el agua que tenga una dureza menor de 60 p.p.m. se considera blanda y no requiere tratamiento alguno. La moderadamente dura conviene para la mayoría de los fines, pero ocasiona dificultades en las calderas de vapor de alta presión y en algunos procedimientos industriales. Si la dureza oscila entre 121 y 180 p.p.m. el jabón no producirá suficiente espuma para

lavar la ropa. Las lavanderías comerciales consideran necesario tratarla antes de usarla. Toda agua cuya dureza pase de 180 p.p.m. necesita ser ablandada para la mayor parte de sus aplicaciones. La clasificación de dureza debe ser considerada sólo como guía. El agua ligeramente dura sirve para muchas cosas. Las fábricas de rayón, de fibras de acetato y de papel de pulpa de madera pueden utilizar agua cuya dureza sea algo menor de 60 p.p.m., pero las bebidas carbonatadas pueden ser hechas con agua de cerca de 275 p.p.m. Las mayores objeciones al agua dura la presentan las personas cuya profesión es lavar ropa; pues aquella exige más jabón, acorta la duración de las telas y las vuelve ásperas, así como también las manos. Deja incrustaciones en calderas, tubos y marmitas. En cambio es favorable para el suelo, y se la prefiere para el riego. El agua blanda no se presta para este fin, porque forma charcos y no penetra hasta la raíz. Esta dificultad es difícil de vencer porque la mayor parte del agua de riego proviene de depósitos, ríos o lagos. La de estos últimos cuya salinidad sea de 25.000 p.p.m. no servirá para riego ni para lavado.

CURVA DE CONSUMO DE AGUA INDUSTRIAL
EN LA CIUDAD DE GUATEMALA



VII- ESTUDIO DE LA DUREZA REQUERIDA EN LAS AGUAS UTILIZADAS POR LA INDUSTRIA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Se estudió el mayor número posible de industrias en la ciudad de Guatemala, para ello se efectuó una encuesta por intermedio de la Dirección de Aguas Municipales. Dicha encuesta comprendió una serie de datos que son los que entraremos a analizar.

Debido a que no todas las industrias contestaron esta encuesta, el número de empresas estudiadas no fue mayor, pero sin embargo sí alcanzó un porcentaje sobre el total de empresas industriales de 22.5%. Los resultados obtenidos en esta encuesta se enumeran a continuación.

7.1 Distribución de Empresas Estudiadas por Zona

<u>Zona</u>	<u>%</u>
1	24.25
2	4.43
3	2.98
4	12.50
5	4.43
6	1.47
7	2.93
8	4.40
9	3.66
10	5.13
11	5.13
12	16.92
13	2.92
14	1.45
15	0.00
16	0.00

<u>Zona</u>	<u>%</u>
17	0.00
18	6.65
19	0.75

7.2 Distribución de Clases de Industrias Analizadas

<u>TIPO DE INDUSTRIA ANALIZADA</u>	<u>%</u>
Fábrica de Productos Alimenticios	12.62
Aceites Esenciales	1.48
Embotelladoras de Bebidas Gaseosas y Jugos Naturales	3.72
Fábricas de Productos de Belleza	2.22
Textiles	24.45
Fábricas de Cartón	0.74
Jabones y Cosméticos	5.85
Procesamiento de Madera	1.74
Industria Molinera	1.48
Plásticos en General	6.66
Fundición de Vidrio	0.74
Fábricas de Fósforos	0.74
Farmacéuticas	8.20
Lavanderías	11.12
Tenerías	2.96
Fábricas de Dulces	3.70
Fábricas de Pilas Secas	0.74
Fábricas de Vinos	0.74
Productos de Hule	2.22
Fábricas de Medias Nylon	1.48
Productos de Tabaco	0.74
Hielo y Helados	3.70
Productos Lácteos	1.46
Fábricas de Calzado	0.74
Listones y Rayón	0.74

7.3 Porcentaje de las Industrias que utilizan Agua en el Proceso Industrial

Si utilizan 90.5
 No utilizan 9.5

7.4 CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Consumo de agua en miles de litros diarios	1-5	5.1-10	10.1-15	15.1-25	25.1-50	50.1-100	Superior a 100
Porcentaje de Industrias	32	19	8	7	12	11	7

El servicio Municipal lo utilizan el 77% de las industrias.

El servicio Mariscal lo utilizan el 23% de las industrias.

El servicio de pozos lo utilizan el 22% de las industrias.

Es necesario considerar que muchas industrias utilizan una, dos o las tres fuentes de abastecimiento.

Las industrias que utilizan pozos tienen un promedio de consumo de 101,000 litros diarios y el promedio general de consumo industrial es de 60,000 litros diarios.

7.5 Análisis de Laboratorio

Utilizan análisis de laboratorio el 21% de las industrias que emplean tratamiento para el agua.

7.6 Tablas que indican el límite requerido y el tratamiento usado por las industrias en la ciudad de Guatemala.

En lo que respecta a los límites de dureza en el agua requeridos por las industrias de la ciudad de Guatemala, no fue posible obtener valores numéricos, sino simples observaciones dadas por las industrias en la forma que se detalla en la tabla siguiente:

INDUSTRIA	LIMITE REQUERIDO
Textiles	Agua libre de calcio y magnesio
Productos Alimenticios	Que el agua sea suave 70-150 p.p.m.
Fábricas de helados y hielo	Contenido bajo de dureza
Fábrica de bebidas gaseosas y jarabes	Baja alcalinidad
Fábrica de jabones, Perfumería	Dureza baja
Industria de plásticos	Dureza baja
Productos Farmacéuticos	Dureza baja
Lavanderías	Dureza baja
Pasteurización de leche	Dureza baja
Productos de tabaco	Dureza baja 40 p.p.m.
Fábricas de vidrio	Dureza baja 3 p.p.m.

7.7 Costo del Tratamiento

El costo del tratamiento varía dependiendo de la clase de instalaciones y del volumen de agua tratada.

Se encontró por ejemplo una planta de tratamiento cal-zeolita en caliente, cuyo costo inicial es de 40.000.00 y que procesa agua obtenida de pozos con un caudal de 1.9 M.L.D. y en la cual se emplean Q. 200.00 mensuales como gasto de operación. Otra de las plantas tiene instalaciones con un valor de Q. 19,000.00 con una producción de 0.15 M.L.D. de agua con una dureza residual de 50 p.p.m. a un costo mensual de Q. 150.00. Entre las inversiones menores se encontró una de Q. 2,500.00 utilizando un filtro Permutit, con un gasto de 0.02 M.L.D. y con un costo de operación de Q. 40.00 mensuales.

Otras industrias han hecho inversiones aún menores que las anteriores.

El promedio general de la inversión inicial para suavizamiento de agua es de Q. 4,400.00.

7.8 Ventajas obtenidas con el uso de Tratamiento de Agua en la Industria.

Los industriales informan que las ventajas obtenidas con el suavizamiento del agua son en general:

- 1.- Calidad del producto.
- 2.- Mayor eficiencia en las calderas y eliminación de incrustaciones.
- 3.- Mejora en el proceso de lavado, blanqueado y teñido.
- 4.- Conservación de la tubería.
- 5.- Eliminación de bacterias.

- 6.- Eliminación de la Dureza.
- 7.- Cumplir con normas de calidad.
- 8.- Es indispensable en la industria farmacéutica.

7.8.1 Desventajas obtenidas con el uso de Tratamiento de Agua en la Industria

Según los industriales las desventajas obtenidas con el suavizamiento son:

- 1.- Costo del tratamiento.
- 2.- Corrosión en las calderas.

7.9 Evaluación de Resultados

De la investigación realizada en las industrias de la ciudad de Guatemala, se puede deducir que la dureza del agua no constituye aún un problema crítico. La dureza existente en las aguas de la República para fines sanitarios puede aceptarse sin que constituye ningún riesgo para la salud.

Debemos notar que el porcentaje de industrias que utilizan tratamiento para acondicionar el agua es alto (91%), pero en cambio es muy bajo el porcentaje (21%) que emplea algún tipo de control en este tratamiento, por medio de análisis que indiquen los resultados obtenidos. Según los informes que se obtuvieron un 63% utilizan el sistema de zeolitas, por medio de filtros a presión para suavizar el agua, sin establecer por medio del control de la dureza del efluente el tiempo en que la zeolita debe regenerarse. El resto de industrias que emplea tratamiento utiliza una adición de químicos para quitarle los efectos nocivos a la dureza.

En la ciudad de Guatemala el agua de distribución municipal puede ser utilizada en una gran cantidad de industrias sin necesidad de ningún tratamiento adicional; y solo se le debe aplicar suavización en aquellos casos en que se requiera agua de una dureza muy baja como: algunos procesos de fabricación de textiles, y en agua para alimentación de calderas que funcionan a una presión elevada.

De este estudio se deriva también que las plantas de tratamiento de agua para distribución pública en la ciudad de Guatemala no utilizan ningún tipo de suavizamiento y es obvio que no necesitan emplearlo puesto que los límites de dureza están bajo los requisitos sanitarios más estrictos, y cualquier intento de suavización para producir agua con una dureza aún más baja que la actual, sería poco práctico puesto que los límites económicos para rebajar la dureza están entre los 40 y los 50 p.p.m.

Con el fin de determinar la eficiencia de los procesos de suavizamiento en ciertas industrias, se tomaron muestras del agua de alimentación y del agua tratada en las industrias que así lo permitieron.

Los resultados obtenidos sobre ellas por medio del análisis químico de dureza son los siguientes:

INDUSTRIA	AGUA ANTES DE PASAR POR EL FILTRO	AGUA SUAVIZADA	OBS.
Textiles	70 p.p.m.	60 p.p.m.	Agua Municipal
Lavandería	48 "	10 "	" "
Lavandería	40 "	5 "	" "
Caldera	45 "	5 "	" "
Alimentos enlatados	175 "	155 "	Agua de pozos

De estos resultados se deduce lo siguiente:

- 1.- En la fábrica de textiles la reducción de dureza no es completa ya que es necesario tener una dureza de 50 p.p.m. para mejorar el proceso.
- 2.- En los tres siguientes usos, el filtro de zeolitas funciona bien, la regeneración se hace sin tomar en cuenta ningún análisis, únicamente empleando una estimación a criterio del operador; sin embargo estas lavanderías funcionarían bien sin necesidad de suavizamiento, puesto que la dureza del agua de distribución municipal es baja, incluso podrán tener problemas de corrosión debido a la dureza tan baja que están utilizando.
- 3.- En el caso de la fábrica de productos enlatados, la dureza del agua utilizada es aún alta, ya que según la tolerancia indicada por el Comité J. New Eng. Water Works Assoc. la dureza está limitada por 25 a 75 p.p.m. como carbonato de calcio.

Nota: las muestras anteriores no tienden a dar resultados representativos de la forma en que operan todas las industrias, sino más bien una idea de la deficiencia del proceso de suavizamiento en ciertas industrias.

7.9.1 Ficha típica de la Encuesta

MUNICIPALIDAD DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

DIRECCION DE AGUAS Y DRENAJES

Señores Industriales: Al hacer la presente encuesta, el único fin perseguido es obtener una información de la situación existente, en cuanto a usos industriales del agua en la Ciudad de Guatemala, sea ésta de distribución Municipal, Mariscal o de pozos particulares.

Se les ruega prestar su colaboración.

1.- Nombre de la Empresa _____ Zona _____

2.- Tipo de Industria _____

3.- a) Utiliza agua para el proceso industrial: Si ___ No ___

b) Cantidad utilizada en el proceso _____

c) El servicio utilizado es: Municipal _____

Mariscal _____ Pozos _____

4.- Qué condiciones requiere el agua para que el proceso sea eficiente _____

5.- Qué análisis le hacen al agua antes y después de su utilización y valores obtenidos _____

6.- Utiliza tratamiento: Sí _____ No _____

7.- Qué tratamiento _____

8.- Descripción breve del tratamiento usado _____

9.- a) Qué costo representa para usted la inversión inicial para tratamiento de agua: _____

b) Costo de operación del tratamiento _____

10.- Ventajas obtenidas con el uso de tratamiento de agua _____

11.- Desventajas obtenidas con el uso del tratamiento de agua _____

VIII- CONCLUSIONES

- 1.- Del análisis hecho sobre las características de la dureza en las aguas de la República de Guatemala puede decirse en general que la dureza del agua en cualquier fuente de la República no es objetable para la salud.
- 2.- En la ciudad de Guatemala, la dureza promedio de las aguas de fuentes municipales es de 45 p.p.m. como carbonato de calcio, por lo que para la mayoría de los usos industriales no se requiere de suavización abajo de esos límites.
- 3.- El agua proveniente de pozos es de una dureza más alta, que sí requiere suavización para: fábricas de productos alimenticios enlatados, lavanderías, fabricación de papel, fabricación de tales de rayón, tenerías y agua para alimentación de calderas.
- 4.- El proceso indicado para rebajar la dureza en las industrias mencionadas anteriormente es el de zeolitas de sodio, por medio de filtros a presión, ya que éste permite reducir la dureza a límites más bajos de 45 p.p.m.
- 5.- Es indispensable mantener un control periódico de laboratorio cuando se somete el agua a un proceso de suavización, para lograr que los límites especificados de dureza por cada industria, se mantengan dentro del rango apropiado y lograr así la mayor eficiencia en los procesos industriales.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 1) Matthews, F. J., Tratamiento de Aguas, (Traducción de B. González Costas), Madrid, 1958.
- 2) Société Degrémont-France, Manual Técnico del Agua. 2a. edición, Bilbao, España, Imprenta Elexpuru Hnos., S. A. 1963.
- 3) Babbitt, Doland, Cleasby, Water Supply Engineering, New York, 1963.
- 4) Departamento de Salubridad del Estado de New York, Manual de Tratamiento de Aguas, (versión española del Ing. Raúl Guerrero), 1a. edición, México, D. F. Editorial Limusa Wiley, S.A., 1964.
- 5) Associate Professor of Chemical Engineering, Yale University Rogers' Industrial Chemistry, 6a. edición, New York, D. Van Nostrand Company, Inc. 1942.
- 6) Fair, Gordon Maskew y Geyer, John Charles, Elements of Water Supply and Waste-Water Disposal, New York, John Wiley & Sons. Inc., 1965.
- 7) Hardenberg, W. A. y Rodie, Edward B. Ingeniería Sanitaria, (Traducido por el Ing. Sergio Vargas) 1a. edición, México D.F. Compa a Editorial Continental, S.A., 1966.
- 8) Turneaure, F. E. y Russell, H.L. Public Water Supplies, 5a. edición, New York, John Wiley & Sons, Inc. 1950.

- 9) Harvey, Lashley G. El Agua, Métodos Modernos: su Uso y Conservación, Stamford, Connecticut, U. S. A. Intercontinental Publications, Inc., 1966.
- 10) Powel, T. Sheppard, Acondicionamiento de Aguas para Industrias, (Versión española de Salvador Ayanegui), México, Editorial Limusa, Wiley, S. A., - 1966.
- 11) APHA, AWWA, FSIWA, Métodos Normales para Exámenes de Aguas (Traducción de P. J. Caballero), 10a. edición, México, 1955.

(f) Magdiel Escobar Archila

Vo. Bo.

Ing. Juan Antonio Vega
Asesor

Ing. Octavio Córdón
por Escuela de Ingeniería
Sanitaria

IMPRIMASE:

Ing. Amando Vides T.
Decano