



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS**



**INCORPORACIÓN DEL CAUDAL PRODUCIDO POR EL POZO H6 A LA  
PRODUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA “EL  
CAMBRAY”, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE  
OXIDACIÓN CON PERMANGANATO DE POTASIO**

ESTUDIO ESPECIAL

Presentado por la Ingeniera

**EVELYN JEANNETH OLIVA PÉREZ**

Como requisito previo para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN INGENIERÍA SANITARIA  
(MAGÍSTER SCIENTIFICAE)**

Guatemala, julio del 2005

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
GLOSARIO	X
RESUMEN	XII
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	XIV
INTRODUCCIÓN	XVI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XX
JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	XXII
<b>1. ANTECEDENTES</b>	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	4
2.1 Agua Subterránea	4
2.2 Importancia del agua subterránea	5
2.3 Calidad del agua para consumo humano	5
2.4 Dureza del agua	7
2.4.1 Problemas provocados por la dureza del agua	10
2.5 Ablandamiento del agua	11
2.6 Métodos de ablandamiento	12
2.6.1 Ablandamiento con cal – soda Ash	12
2.6.2 Ablandamiento con resinas de intercambio catiónico	14
2.6.3 Ablandamiento cristalización con soda cáustica	15
<b>3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b>	16
3.1 Determinación de Parámetros Químicos del Agua.	16
3.1.1 Determinación de dureza total , calcio y magnesio	16
3.1.2 Dosificación de químicos.	17

3.2. Procesamiento de Datos e Interpretación de Resultados	17
3.3. Comunicación y Solución.	17
<b>4. PRUEBAS EN LABORATORIO Y RESULTADOS</b>	<b>20</b>
4.1 Dosificación de cal y soda Ash en pruebas de Jarras agua dulce	20
4.1.1 Dosificación por medio de estequiometría	20
4.1.2 Dosificación de cal y soda Ash	22
4.2 Dosificación de cal y soda Ash en pruebas de Jarras agua salada	23
4.2.1 Dosificación por medio de estequiometría	24
4.2.2 Dosificación de cal y soda Ash	25
4.2.3 Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación	26
4.2.4 Pruebas para determinar remoción y tiempo de sedimentación	27
<b>5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>32</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>34</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>36</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Cobertura agua potable en Guatemala zona rural	XX
2	Cobertura agua potable en El Salvador zona rural	XXI
3	Método de Titilación con EDTA	21
4	Equipo utilizado para prueba de Jarras	21
5	Remoción de dureza (estequiometría)	22
9	Prueba de jarras con agua salada	23
10	Remoción de dureza (estequiometría)	24

### APÉNDICE

6	Remoción de dureza (cal y soda ash)	40
7	Remoción de dureza (cal y soda ash)	42
8	Remoción de dureza (cal y soda ash)	44
11	Remoción de dureza (verificación)	52
12	Porcentaje de remoción de dureza (verificación)	52
13	Remoción de dureza (verificación)	62
14	Porcentaje de remoción de dureza (verificación)	62
15	Remoción de dureza (prueba)	66
16	Porcentaje de remoción de dureza (prueba)	66
17	Remoción de dureza (prueba)	68
18	Porcentaje de remoción de dureza (prueba)	68
19	Remoción de dureza (resumen)	72
20	Porcentaje de remoción de dureza (resumen)	72

## TABLAS

I	Características químicas del agua	7
II	Interpretación de la dureza del agua	10
III	Características de muestras de agua recolectadas	17
IV	Resultados pruebas de laboratorio dosificando por medio de estequiometría	21
VIII	Resultados pruebas de laboratorio utilizando agua salada por medio de estequiometría	24
XII	Resultados pruebas de laboratorio utilizando agua salada por medio de estequiometría	26
XX	Intervalos de dureza, dosificación y porcentaje de remoción	31
APÉNDICE		
V	Resultados pruebas de laboratorio dosificando por medio de estequiometría aumentando la cantidad de químicos	40
VI	Resultados pruebas de laboratorio dosificando por medio de estequiometría aumentando la cantidad de químicos	42
VII	Resultados pruebas de laboratorio dosificando por medio de estequiometría aumentando la cantidad de químicos	44
IX	Resultados pruebas de laboratorio utilizando agua salada dosificando por medio de estequiometría	46
X	Resultados pruebas de laboratorio (cal y soda ash)	48
XI	Resultados pruebas de laboratorio (cal y soda ash)	48
XIII	Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación (primera parte)	50
XIV	Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación (segunda parte)	54
XV	Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación (tercera parte)	56
XVI	Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación (tercera parte)	58
XVII	Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación (tercera parte)	60
XVIII	Resultados pruebas de laboratorio utilizando altas concentraciones de dureza	64
XIX	Resumen pruebas de laboratorio	70

## GLOSARIO

- Dureza** Es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio
- EDTA** Ácido etilendiaminotetracético
- Estequiometría** Cálculos matemáticos que se realizan tomando en cuenta la reacción química.
- Soda Ash** Químicamente es el Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y se conoce comercialmente como Soda cáustica

## RESUMEN

El estudio “*Remoción de carbonatos de calcio de aguas subterráneas por medio de tratamiento químico con cal y soda Ash*” dentro de sus objetivos presenta la obtención de la dosis óptima de cal y soda Ash que debe ser aplicada en los procesos de tratamiento en aguas con concentraciones superiores a los 400 mg/L de dureza total, calcio y magnesio.

Asimismo el estudio muestra una alternativa económica de remoción de Carbonatos de Calcio presentes en el agua haciendo uso de elementos como Cal y Soda Ash. Para ello fue necesario recolectar muestras de diferentes zonas geográficas de Guatemala, Cobán, Petén, Guastatoya; en El Salvador de El Sauce, Metapán, en Honduras de Copán, Santa Rosa de Copán, cuyos valores oscilaban entre 200 a 1,200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . También se hicieron pruebas para determinación de dureza utilizando agua salada de Puerto Quetzal, Guatemala y de Puerto La Libertad en El Salvador puesto que en zonas costeras las aguas subterráneas se ven afectadas por la intrusión marina y los valores de dureza se encuentran superiores a los 2,000 mg/L  $\text{CaCO}_3$ .

La metodología utilizada para llevar a cabo la remoción de Carbonatos de Calcio a base de Cal y Soda Ash fue una adaptación de la Prueba de Jarras, utilizada para el diseño del proceso de Coagulación, Floculación y Sedimentación, como elemento de agitación, mezcla y sedimentación de lo producido en las reacciones químicas (Romero, 1,999) que se llevan a cabo en la remoción de iones de Calcio y Magnesio que son los que originan la dureza en el agua.

Los parámetros que se tomaron en cuenta en las pruebas de Jarras fueron los tiempos de contacto: tiempo de mezcla rápida y mezcla lenta así como el tiempo de sedimentación; con lo que se logró obtener una remoción mayor al 75% de la dureza total presente en las aguas estudiadas.



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- ✘ Reducir a 150 mg/L el valor de la dureza total de las aguas subterráneas objeto del presente estudio

### **Objetivos Específicos**

- ✘ Obtener la dosis óptima de Cal y Soda Ash que permita la mayor remoción de Carbonatos de Calcio presentes en las aguas subterráneas.
- ✘ Caracterizar el agua subterránea en varias zonas de Guatemala y El Salvador
- ✘ Determinar el período de contacto óptimo de los químicos con las muestras de agua
- ✘ Determinar el óptimo período de sedimentación requerido por los precipitados formados en las pruebas

## **HIPÓTESIS**

Existe la posibilidad de remover Carbonatos de Calcio presentes en el agua subterránea por medio del proceso químico de Cal – Soda Ash, para obtener la reducción de la dureza total con un porcentaje mínimo del 75% y lograr valores dentro de los límites máximos de dureza total, calcio y magnesio según la Norma COGUANOR NGO 29-001

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio hace alusión a la necesidad de utilizar otras fuentes de abastecimiento de agua, como lo representan las aguas subterráneas, para solventar las deficiencias que existen en el abastecimiento de este vital líquido en zonas urbanas y rurales de países como Guatemala, El Salvador y Honduras.

Las características que presentan las aguas subterráneas son ideales para el consumo humano pues en algunos casos se mantienen libres de impurezas que las aguas superficiales contienen. A pesar de esto las mismas condiciones en que se encuentran las aguas subterráneas las provee de minerales en exceso el cual en ocasiones es perjudicial a la salud humana así como también en su vida cotidiana; dentro de estos minerales están el calcio y el magnesio que en cantidades adecuadas son útiles para el organismo.

La presencia de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) es conocida como Dureza Total y su exceso provoca problemas en la Industria entre otros ámbitos con la formación de incrustaciones en los sistemas de calentamiento, de igual manera afectan la salud con la formación de cálculos renales y obstrucciones de las vías circulatorias; por ello es necesario eliminar o disminuir su concentración lo que se conoce como ablandamiento.

Se conocen varias alternativas de remoción, entre estas están: ablandamiento con cal y soda Ash, ablandamiento con resinas de intercambio catiónico y ablandamiento mediante cristalización con soda cáustica; siendo la más económica la primera alternativa por el costo de los materiales que se utiliza.

En el laboratorio se realizaron pruebas para diferentes concentraciones de dureza tomando muestras de las diferentes zonas urbanas y rurales de los países antes mencionados; las pruebas consistieron en la determinación de la dureza total y concentración de calcio y magnesio por medio de titulación con EDTA, para luego hacer uso de la metodología de remoción a través de ablandamiento con cal y soda Ash.

La dosificación de cal y soda Ash se determinó por medio de estequiometría y la mezcla de estos compuestos se dio utilizando el procedimiento de la prueba de jarras hasta lograr las dosis óptimas que permitieron remover más del 75% de carbonatos de calcio, logrando valores de dureza total que no sobrepasen los límites máximos permisibles (LMP) estipulados en las Normas de Calidad de Agua de Guatemala (COGUANOR 29-001) cuyo valor no debe ser mayor a los 500 mg/L y en El Salvador (CONACYT) que no debe exceder a 400 mg/L, siendo de esta forma aceptable para el consumo humano.

Se presentan tablas, en donde se muestran los resultados que arrojan las pruebas que se realizaron, contribuyendo estas para verificar si la hipótesis de que si “Existe la posibilidad de remover Carbonatos de Calcio presentes en el agua subterránea por medio del proceso químico de cal y soda Ash, se obtiene la reducción de la dureza total con un porcentaje mínimo del 75% logrando valores dentro de los límites máximos permisibles de dureza total, calcio y magnesio según la Norma COGUANOR NGO 29-001” se cumple o no, obteniendo resultados favorables de las distintas muestras.

Con este trabajo de investigación, se pretende aportar una alternativa viable para el tratamiento de aguas subterráneas que sean utilizadas como fuentes de abastecimiento, que presenten el problema de alta concentración de dureza .

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el crecimiento de las poblaciones lleva consigo la necesidad de suministrar un servicio tan vital e importante como lo es el agua potable; por ello es preciso utilizar fuentes de abastecimiento de agua potable, tales como ríos, lagos, manantiales, entre otros.

Debido a la industrialización de las grandes ciudades las fuentes superficiales de abastecimiento están siendo contaminadas con las descargas de los diferentes procesos químicos que se llevan a cabo en ellas, haciéndolas inadecuadas para el consumo humano sin previo tratamiento; esta es una razón por la cual es necesario la utilización de fuentes de abastecimiento como las aguas subterráneas.

En los países del área centroamericana muestran deficiencia en lo que respecta a la cobertura de agua potable, esto se observa en las figuras 1 y 2 en las que se muestra el porcentaje de cobertura de agua potable en las zonas rurales de Guatemala y El Salvador (CEPIS,2000).

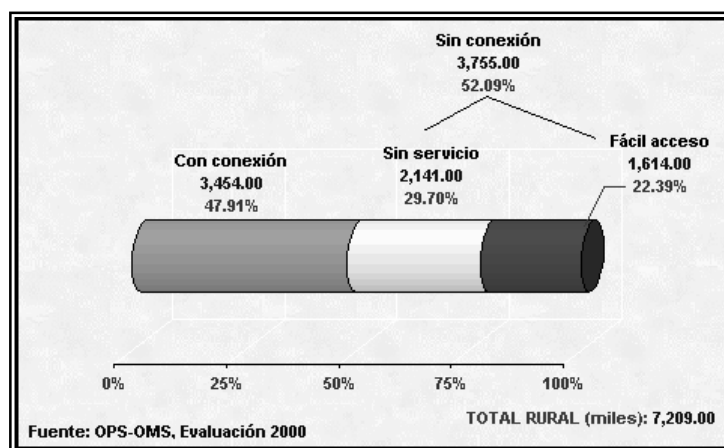


Figura 1. Cobertura agua potable Guatemala (Población Rural)

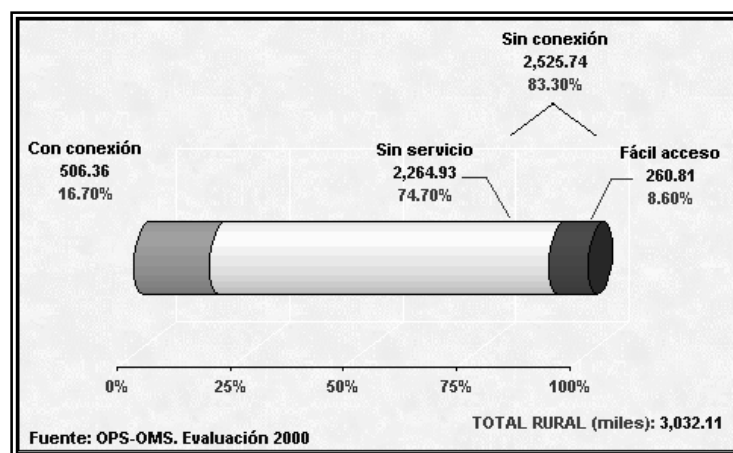


Figura 2. Cobertura agua potable El Salvador (Población Rural)

En vista de la problemática existente en cuanto a la cobertura de agua potable en las zonas rurales de estos países, es evidente que el mayor porcentaje se encuentra sin conexión teniendo que recurrir a la extracción de aguas subterráneas mediante la construcción de pozos, teniendo esta como ventaja sobre el agua superficial que el costo de desarrollo es normalmente mucho menor y que la cantidad de agua es generalmente adecuada para consumo humano sin mucho tratamiento.

Las aguas subterráneas poseen una serie de características físicas y químicas que dependiendo su concentración pueden ser dañinos para los humanos así como también provocar efectos negativos en los procesos industriales.

Una de estas características es la dureza, la cual es dada por la presencia excesiva de forma natural de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  en forma de Carbonatos de Calcio  $\text{CaCO}_3$ , la utilización del agua con presencia de estos elementos representa una serie de problemas en los equipos tales como calderas, tuberías, artefactos sanitarios.

Los problemas que provoca la dureza sobre las tuberías son incrustaciones reduciendo el diámetro y con ello la presión necesaria para el servicio, también implica la reducción en lo que se refiere a las horas de suministro provocando molestias en los usuarios pues no están dispuestos a pagar por un servicio deficiente.

## JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

En vista de los problemas relacionados con la utilización de aguas con dureza alta es preciso investigar a cerca de los diferentes métodos de ablandamiento que sea económico tal que permita el mejoramiento en la calidad del agua subterránea, que se extrae de pozos como una alternativa de fuente de abastecimiento, en zonas donde el suelo es rico en material cálcico como sucede en Petén (GUA), Cobán (GUA), Flores (GUA), Santa Elena (GUA), Metapán (ES), El Sauce (ES).

Elaborando una serie de análisis y pruebas del agua subterránea de las zonas antes mencionadas que determinarán la dureza total, una dosificación óptima de cal y soda Ash, que son materiales fáciles de adquirir y de bajo costo, que permiten la remoción de carbonatos de calcio; pues en nuestro medio se utilizan más intercambiadores catiónicos ya sean: naturales o sintéticos en procesos industriales. Los primeros son una variedad de areniscas verdes (zeolita natural) que no se encuentran con tanta facilidad como la cal y los segundos tienen que ser importados resultando más caros en comparación a la cal y la soda Ash.

La importancia de este estudio es el aporte que representa un sistema de ablandamiento que sea de bajo costo para aquellas áreas que no cuentan con el presupuesto necesario para el tratamiento de agua subterránea que utilizan como fuente de abastecimiento.

## 1. ANTECEDENTES

El arte de ablandar el agua data de 1841 cuando el profesor escocés Thomas Clark, profesor de Química en la Universidad de Aberdeen, se le concedió la patente sobre “Un nuevo método de volver ciertas aguas menos impuras y menos duras para el suministro y uso de fábricas, villas, pueblos y ciudades” (Nordel, 1,976).

En cuanto a la remoción de Carbonatos de Calcio o dureza del agua sólo se presenta en los procesos industriales con la utilización de resinas de intercambio catiónico la cual por su alto costo no es utilizados en procesos de tratamiento de agua para abastecimiento, puesto que el costo de la resina que se utiliza tiene un valor de aproximadamente \$200/kg. resultando demasiado costoso.

El uso de Cal y Soda Ash como método de remoción de dureza fue utilizado más que todo en los Estados Unidos pero aplicado a las aguas superficiales que utilizaban como fuentes de abastecimiento pero no se encuentran datos de su uso en aguas subterráneas. En nuestra región no hay conocimiento de este tipo de prácticas en cuanto a la remoción pero que en comparación a la utilización de resinas resulta más económico puesto que tanto la cal como la soda Ash son de bajo costo cuyo valor es actualmente de \$0.90/kg. y \$1.35/kg. respectivamente; como se comprobó al comprar en la ferretería estos productos para llevar a cabo las pruebas de laboratorio.





## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 AGUA SUBTERRÁNEA

Las aguas subterráneas son producto del ciclo hidrológico, pues cuando caen las lluvias al suelo, una parte de ellas se infiltra en la tierra; mientras que una parte de estas aguas será absorbida por las raíces de las plantas, algo se infiltrará más profundamente, por gravedad. En ocasiones, ésta se acumulará encima de una capa impermeable saturando los poros del suelo y formando un reservorio subterráneo (CEPIS, 1,987).

El reservorio subterráneo del cual se puede extraer cantidades significativas de agua se llama *acuífero*. Existen dos tipos de acuíferos: confinados y no confinados. Los no confinados o libres es donde existe una napa freática y los confinados contienen agua a una presión superior a la atmosférica (Orozco, 2,004).

El suelo sobre el acuífero, a través del cual el exceso del agua de lluvia pasa verticalmente, se conoce como la *zona no saturada* y que se caracteriza por tener poros conteniendo aire y agua. El límite entre la zona no saturada y el acuífero define el *nivel freático* (CEPIS, 1,987).

Las aguas subterráneas constituyen cerca del 95% del agua dulce de nuestro planeta, sin tomar en cuenta aquella que se encuentra en las capas de hielo polar. A diferencia, el agua de los ríos y lagos representa menos del 5%. Es por ello la importancia fundamental al agua subterránea con respecto a la vida y a la actividad económica.

## **2.2 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

Los datos que se tienen a cerca de la proporción de los abastecimientos de agua ya sea para uso municipal como domésticos proveniente del recurso hídrico subterráneo no son del todo completos así como tampoco existe una información a cerca de la cantidad de fuentes de abastecimiento de agua que se deriven del agua subterránea.

En nuestra región, ciudades como Guatemala (GUA), San José (CR), San Salvador (ES), Managua (NIC), la extracción de agua como fuente de abastecimiento en zonas rurales representa una considerable proporción cerca del 90% en todos estos países, como complemento a la que es tratada de fuentes superficiales para solventar las necesidades de las distintas poblaciones que son abastecidas con este vital líquido; representando un alto porcentaje también en el abastecimiento de las áreas rurales (CEPIS, 1,991).

El bajo costo y la calidad natural excelente del agua subterránea ha justificado su utilización de una manera amplia para el abastecimiento público como privado. Como ejemplo de ello se puede mencionar que en Costa Rica se ha explotado el recurso hídrico subterráneo para abastecimiento público desde la década de los sesenta. Otras regiones que también hacen uso de los recursos hídricos subterráneos son las Islas del Caribe por ejemplo Barbados depende totalmente de las aguas subterráneas para el abastecimiento de la población (CEPIS, 1,991).

## **2.3 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

El agua pura no existe en la naturaleza, por lo que su definición teóricamente como la combinación química de oxígeno e hidrógeno no puede extenderse al estado en que se encuentra habitualmente. Como es conocido, el agua es el solvente más abundante y es capaz de incorporar una gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrones por los que circula (Johnson Division, 1,975).

Las aguas subterráneas tienen una mayor oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación y mayor presión y temperatura a la que están sometidas y facilidad de disolver CO<sub>2</sub> del suelo no

saturado. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales. Estas mismas condiciones físicas a que se hallan sometidas las aguas subterráneas suponen asimismo una reducción de las materias en suspensión y de la materia orgánica, debido ésta última a la acción de los propios microorganismos del terreno.

La calidad de una agua queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, lo permite establecer las posibilidades de su utilización de acuerdo con límites estudiados, los usos para los que sea destinada.

Teniendo en cuenta los criterios tomados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en las “Normas Internacionales para Agua Potable” las características a tener en cuenta y que afectan la potabilidad del agua.

Estas son:

- ***Características Físicas y Químicas***

Para el análisis de la calidad del agua, en cuanto a las características físicas y químicas, los países de la región centroamericana poseen normas de calidad, tomando en cuenta como guía las estipuladas por la OMS.

En la tabla I se relacionan las concentraciones según las normas de diferentes países, que de sobrepasarse conllevaría a la impotabilidad del agua en lo que se refiere a la dureza del agua:

**TABLA I. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA**

PARÁMETROS QUÍMICOS	NORMAS											
	MÉXICO		GUATEMALA		EL SALVADOR		HONDURAS		NICARAGUA		COSTA RICA	
	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP
DUREZA TOTAL mg/L	*	500	100	500	100	400	400	*	400	*	400	*
CALCIO mg/L	*	*	75	750	*	75	100	*	100	*	100	*
MAGNESIO mg/L	*	*	50	100	*	50	30	50	30	50	30	50
Ph	*	6.5 - 8.5	7 - 7.5	6.5 - 8.5	6 - 8.5	*	6.5 - 8.5	*	6.5 - 8.5	*	6.5 - 8.5	*

Fuente: Norma de cada país.

LMA: Límite Máximo Aceptable. LMP: Límite Máximo Permisible

## 2.4 DUREZA DEL AGUA

El agua, con la excepción del agua destilada, contiene disueltas sales de carbonato de calcio y magnésico. La concentración de estas sales determina la dureza del agua, la cual puede ser expresada en carbonato cálcico o en carbonato magnésico. La suma de estos dos representa el nivel de dureza total.

La presencia de sales disueltas es debido a que el agua procede a menudo de fuentes subterráneas, las cuales se forman de lluvias filtradas en las profundas capas de la tierra. Finalmente alcanzan una zona impermeable y forman un tanque natural también denominado agua de almacenamiento de estrato. Al atravesar varias capas de sólidos y rocas, el agua de lluvia disuelve algunas sustancias minerales. La dureza es una consecuencia de los tipos de capas de roca a través de las cuales pasa el agua y su permanencia en el estrato de almacenamiento de agua.

Dureza se entiende, como una medida de la capacidad para precipitar el jabón, preferentemente por los iones calcio y magnesio. Otros cationes polivalentes también pueden hacerlo, pero estos suelen estar presentes en formas complejas, frecuentemente con componentes orgánicos, y su influencia en la dureza del agua puede ser mínima y difícil de determinar. De acuerdo con los criterios actuales, la dureza total se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, ambos expresados como carbonato de calcio, en miligramos por litro (mg/L).

El calcio, junto con el magnesio, es el componente que produce la dureza del agua. El efecto que produce el agua dura en la salud ha sido desde tiempos remotos objeto de discusiones. La cantidad de calcio en las aguas más duras es mucho menor que la necesaria para satisfacer la demanda nutricional diaria, ya que el cuerpo humano requiere aproximadamente de 0.7 a 1.0 g de calcio al día, cantidad que en su mayor parte se aprovecha al consumir los alimentos.

El magnesio es uno de los dos minerales que producen la dureza del agua. Aunque no se sabe que cause efectos tóxicos, el magnesio ha sido restringido a una concentración máxima permisible de 125 mg/L, según las normas para el control del agua potable; esta limitación se basa en el hecho de que en altas concentraciones, las sales de magnesio tienen efecto laxante. En realidad, se sabe que el cuerpo humano desarrolla una tolerancia que anula este efecto y permite el aprovechamiento de estas aguas para el servicio público (Mora y otros, 2,000).

Algunos estudios epidemiológicos parecen indicar que puede existir un porcentaje de mortalidad por infecciones cardiovasculares más elevado en las regiones en que se distribuyen aguas dulces que en las que consumen aguas duras; se ha propuesto que la dureza podría enmascarar la ausencia de ciertos elementos indispensables en estado de trazas como cobre, cromo, litio, magnesio, zinc y vanadio, o que las aguas duras pueden limitar la transferencia intestinal de los iones metálicos tóxicos al mismo tiempo que evitan su disolución en el medio y en los sistemas de distribución, pero los epidemiólogos no han llegado a conclusiones formales concernientes a la dureza del agua en cuanto de las afecciones cardiovasculares (Mora y otros, 2,000).

Con relación a la influencia de la dureza del agua sobre la mortalidad infantil, no parece que dadas las diferentes causas se pueda deducir que cuanto menor es la cantidad de calcio que contiene un agua, mayor es la mortalidad infantil.

Además la dureza le da un sabor indeseable al agua potable. Grandes cantidades de dureza son indeseables por razones antes expuestas y debe ser removida antes de que el agua tenga uso apropiado para las industrias de bebidas, lavanderías, acabados

metálicos, teñido y textiles. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/L de dureza. Niveles superiores a 500 mg/L son indeseables para uso doméstico.

La dureza es caracterizada comúnmente por el contenido de calcio y magnesio y expresada como carbonato de calcio equivalente  $\text{CaCO}_3$ .

Existen dos tipos de DUREZA:

**Dureza Temporal:** Esta determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como "Dureza de Carbonatos".

**Dureza Permanente:** está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como "Dureza de no carbonatos".

En el agua potable el límite máximo permisible es de 500 mg/L de carbonatos de calcio según las normas COGUANOR (Guatemala) y CONACYT (El Salvador); en cambio que para usos industriales como por ejemplo en calderas es de 0 mg/L de carbonatos de calcio (Nordel, 1,976).

Para poder interpretar la dureza se presenta en la tabla II el tipo de dureza del agua según su concentración.

**TABLA II. INTERPRETACIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA**

<b>Concentración de Dureza Total mg/L</b>	<b>Interpretación</b>
0 - 90	Blanda
91 – 180	Medianamente Dura
181 –270	Agua Dura
>270	Agua Muy Dura

FUENTE: Mora, y otros (2,000)

#### **2.4.1 Problemas provocados por la dureza del agua**

El agua dura causa un alto riesgo de depósitos de cal en los sistemas de agua de los usuarios. Debido a la deposición de la cal, las tuberías se bloquean y la eficiencia de las calderas y los tanques se reduce. Esto incrementa los costos de calentar el agua para uso doméstico sobre un 15 a un 20%.

Otro efecto negativo de la precipitación de la cal es que tiene un efecto dañino en las maquinarias domésticas, como son las lavadoras. El ablandamiento del agua significa aumentar la vida media de las maquinarias domésticas, como son las lavadoras, y aumentar la vida de las tuberías, incluso contribuye a incrementar el trabajo, y una expansión en la vida de los sistemas de calefacción solar, aires acondicionados y muchas otras aplicaciones.

En cuanto a los efectos que las aguas duras provocan a la salud se conoce de estudios realizados sobre las consecuencias que éstas tiene sobre las actividades coronarias causando la acumulación de sedimentos en la pared de los vasos sanguíneos, y por “una reacción inflamatoria que altera la biología de la pared de la arteria que puede provocar que la placa sufra una ruptura”; dicho proceso es semejante al de corrosión e incrustación de las tuberías de los acueductos (Mora y otros, 2,000).

De este mismo estudio se desprenden datos a cerca de la relación entre el consumo de agua con niveles de  $\text{CaCO}_3$  superiores a 120mg/L, y la prevalencia de cálculos de vías urinarias, que demuestran que el consumo de oligoelementos como el  $\text{CaCO}_3$  por medio de Aguas de Consumo Humano debe realizarse en forma equilibrada; de lo contrario su exceso puede causar cálculos renales y su escasez podría no aportar el suficiente  $\text{CaCO}_3$  para proteger contra las cardiopatías isquémicas; desprendiéndose la hipótesis de que el consumo óptimo de esta sal se da en aguas con concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  entre 61 a 120mg/L (Mora y otros, 2,000).

## **2.5 ABLANDAMIENTO DEL AGUA**

El ablandamiento del agua es una técnica que sirve para eliminar los iones que hacen a un agua ser dura, en la mayoría de los casos iones de calcio y magnesio. En algunos casos iones de hierro también causan dureza del agua. Iones de hierro pueden también ser eliminados durante el proceso de ablandamiento. El mejor camino para ablandar un agua es usar una unidad de ablandamiento de aguas y conectarla directamente con el suministro de agua.

El ablandamiento del agua es un proceso importante porque la dureza del agua en las casas y en las compañías es disminuida durante este proceso. Cuando el agua es dura, puede atascar las tuberías y el jabón se disolverá menos fácilmente. El ablandamiento del agua puede prevenir estos efectos negativos.

## **2.6 MÉTODOS DE ABLANDAMIENTO**

La remoción del Carbonato de Calcio presente en las aguas duras es el proceso mediante el cual se reducen o eliminan los iones de calcio y magnesio presentes en dicho tipo de aguas conformando lo que se conoce como dureza total.

En la actualidad existen varios métodos utilizados para la remoción de los carbonatos de calcio entre los que menciona Jairo Romero en su libro “Calidad del agua” están:

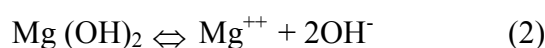
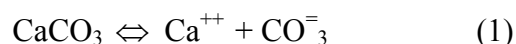
- Ablandamiento con Cal – Sosa (Soda Ash)
- Ablandamiento con Resinas de Intercambio Catiónico
- Ablandamiento mediante Cristalización con Soda Cáustica

### **2.6.1 Ablandamiento con Cal – Sosa (Soda Ash)**

Lo que se logra con este método es el precipitar el calcio como carbonato de calcio aumentando la concentración de carbonato en el agua; logrando también precipitar el magnesio cuando se aumenta la concentración de iones hidróxido. Todo esto es gracias a que el  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  poseen baja solubilidad.

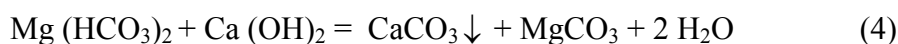
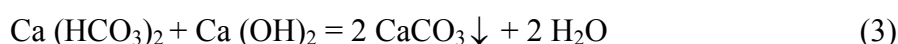


Los compuestos insolubles del proceso forman flóculos sedimentables y son removidos como lodo en dispositivos de sedimentación.

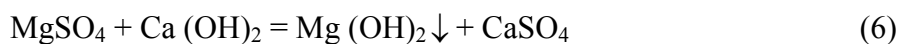
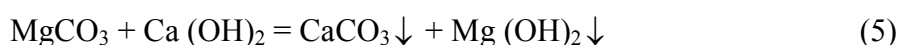


El proceso de cal y soda ash puede efectuarse en dos etapas: en la primera haciendo el tratamiento con cal y en la segunda con soda ash. También puede hacerse en una sola etapa conjunta. Las reacciones básicas del proceso son:

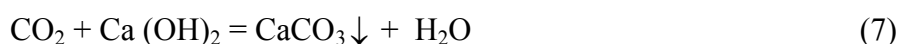
*Dureza Carbonatada*



*Dureza por Magnesio*



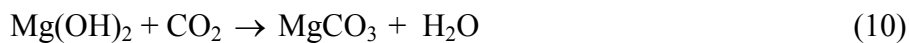
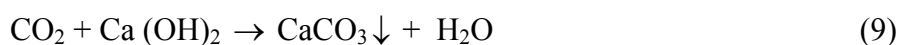
*Dióxido de Carbono*



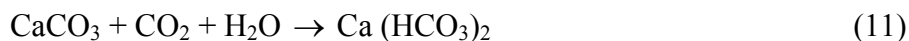
*Dureza no Carbonatada*



*Recarbonatación (pH>9.5)*



pH< 8.6



La cal requerida en el proceso está relacionada, como lo indican las reacciones 3 a 7, con el contenido de dióxido de carbono, la dureza carbonatada y la dureza por magnesio del agua. La precipitación del CO<sub>2</sub> es necesaria para satisfacer las otras reacciones; por lo tanto, la remoción previa de CO<sub>2</sub> disminuye la dosis necesaria de cal.

### **Equipo requerido para el proceso cal y soda Ash**

El equipo que se emplea en las plantas de ablandamiento de agua es parecido al que se usa en las plantas de tratamiento de agua y comprende: equipos para mezclar los productos químicos de ablandamiento con el agua; tanques sedimentadores en los cuales se realizan las reacciones de ablandamiento y el asentamiento de los precipitados; filtros rápidos de arena para la clarificación final del agua; y en plantas más modernas, existen equipos generadores de dióxido de carbono gaseoso para la recarbonatación del agua ablandada con el fin de evitar la incrustación excesiva (Nordel, 1,976).

Sin embargo requieren mayores medios para manejar los productos químicos en una planta de ablandamiento de agua que en una planta común de tratamiento, porque se manejan cantidades más grandes.

Estas grandes cantidades de materiales pueden manejarse de manera más económica descargándolos de los carros de ferrocarril con palas mecánicas o transportadores neumáticos. Su almacenamiento en tolvas elevadas permite la introducción de los productos químicos en el agua por gravedad.

La invención de máquinas de alimentación en seco, equipadas con aparatos de apagamiento continuo, para la introducción de cal hidratada, de cal viva triturada, de soda comercial, alumbre u otros productos químicos ha permitido la eliminación de tanques para soluciones químicas con todas las dificultades que los acompañan.

En la actualidad se fabrican máquinas equipadas con aparatos de apagamiento y básculas que pesan automáticamente los productos químicos y los introducen en el agua en proporción directa al gasto del agua en la planta.

### **2.6.2 Ablandamiento con Resinas de Intercambio Catiónico**

Este otro proceso de ablandamiento con resinas de intercambio Catiónico, el calcio y el magnesio en solución en el agua son desplazados por un ion del material sólido insoluble que constituye la resina. Cuando la capacidad de intercambio de iones de la resina se agota, se bombea una solución regenerante con alta concentración de los iones agotados a través del lecho y de esta manera se recupera la capacidad ablandadora del intercambiador.

En la práctica, el proceso de ablandamiento usa una resina catiónica operando en el ciclo del sodio; calcio y magnesio son reemplazados por el sodio de la zeolita y viceversa. Este proceso es ampliamente usado para ablandar el agua de alimentación de las calderas, especialmente en las que trabajan a baja presión.

Su principal ventaja es la eliminación completa de la dureza y la extrema simplicidad en su operación, ya sea manualmente o de tipo automático. Su desventaja principal es que no reduce ni la alcalinidad ni los sólidos totales. Debido a que este proceso de tratamiento es ampliamente usado por gran número de industrias, la costumbre es establecer una central de tratamiento de este tipo y usar el efluente de agua blanda para todas las fases del proceso de fabricación o de uso.

El tipo de intercambiador usado puede ser tipo silícico, tal como la glaucomita (arenisca verde) procesada y estabilizada, o una zeolita sintética del tipo de silicato aluminico sódico; intercambiador carbonáceo o una resina sintética. El tipo carbonáceo y las resinas sintéticas tienen la ventaja de su naturaleza no silícica evitándose cualquier posibilidad de contaminación por sílice, por lo que se refiere al contenido original de sílice en el agua, ésta pasa por el lecho de resina sin sufrir ningún cambio, pero algunas resinas tienen el poder de intercambiar la sílice.

Si se requiere cambiar la sílice, esto se puede llevar a cabo mediante un tratamiento en dos pasos de cal en frío e intercambio Catiónico en ciclo sódico, o el tratamiento, en dos pasos de cal sodada en caliente e intercambio Catiónico en ciclo sódico.

### **2.6.3 Ablandamiento mediante Cristalización con Soda Cáustica**

El proceso de ablandamiento mediante cristalización con soda cáustica utiliza diferentes tipos de reactores de lecho fluidizado de gránulos, sobre los cuales se presenta la cristalización del  $\text{CaCO}_3$ . Los gránulos se mueven libremente en el flujo ascensional del agua de tal manera que se impide su cimentación; para ello se aplica un caudal mínimo ascensional.

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.

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Determinación de Parámetros Químicos del Agua.

##### 3.1.1 Determinación de dureza total , calcio y magnesio.

Se recolectaron 10 muestras de agua subterránea con alta concentración de dureza de diferentes zonas de Guatemala, Honduras y El Salvador, como se observa en la tabla III, para realizarles el análisis físico-químico y utilizar el método de remoción de dureza mediante la utilización de cal y soda Ash.

**Tabla III. Características de muestras de agua recolectadas**

Lugar	País	Concentración de Dureza mg/L	Tipo de agua
Guatemala	Guatemala	400	Dulce
Cobán	Guatemala	450	Dulce
Petén	Guatemala	1,200	Dulce
Guastatoya	Guatemala	350	Dulce
Puerto Quetzal	Guatemala	2,500	Salada
El Sauce	El Salvador	200	Dulce
Metapán	El Salvador	300	Dulce
Puerto La Libertad	El Salvador	3,500	Salada
Copán	Honduras	250	Dulce
Santa Rosa Copán	Honduras	200	Dulce

Dentro de las pruebas que realizaron a las muestras en el laboratorio unificado de Química y Microbiología de la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC) están la determinación de Potencial de Hidrógeno mediante la utilización de un potenciómetro, la determinación de Dureza Total, Calcio y Magnesio que se realizó haciendo titulación con EDTA (etilendiaminotetracético) como se encuentra estipulado por el Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, también se determinaron Cloruros y Sulfatos por medio del método del Turbidímetro y Sulfaver 4.

### **3.1.2 Dosificación de químicos**

Para determinar la cantidad de químicos, cal y soda Ash, que se necesitó dosificar se utilizó la pruebas de jarras, en la cual la mezcla rápida fue de 100 rpm durante 1 minuto y la mezcla lenta entre 80 – 90 rpm durante 20 minutos para luego dejar sedimentar por un periodo comprendido entre 15 a 90 minutos

### **3.2 Procesamiento de Datos e Interpretación de Resultados**

Con los resultados obtenidos del análisis realizado en el laboratorio se elaboraron tablas y gráficos en donde se muestran el comportamiento o evolución del proceso de determinación de la dosis adecuada de cal y soda Ash así como también la respectiva remoción de dureza lograda en cada prueba.

Como parte de la interpretación se procedió a compararlos con los parámetros estipulados en las normas de calidad del agua para el uso humano:

- NORMAS COGUANOR 29-001 (GUA)
- CONACYT (ES)

### **3.3. Comunicación y Solución.**

Presentación de los resultados obtenidos a través de la investigación para el tratamiento de aguas con alto contenido de carbonatos de calcio (aguas duras).

Una vez recopilada la información de campo se procedió a la tabulación de los datos obtenidos y al análisis de los mismos para la obtención de las conclusiones del estudio realizado.

Para facilitar la interpretación de los resultados se realizaron gráficas con los datos obtenidos y que se muestran en la sección de resultados como:

- Gráfica Dureza Total ( $\text{CaCO}_3$ ) vrs. Dosis cal – soda Ash.
- Gráfica porcentaje de remoción de dureza total ( $\text{CaCO}_3$ ) vrs. Dureza

De los datos obtenidos se realizaron las interpretaciones que permitieron:

1. Elaborar conclusiones a cerca del proceso de investigación realizado.
2. Establecer recomendaciones que permitan mejorar el proceso de remoción investigado y su posible aplicación en los tratamientos de agua potable en zonas rurales de la región.





## 4. PRUEBAS DE LABORATORIO Y RESULTADOS

### 4.1 Dosificación de cal y soda Ash en pruebas de Jarras agua dulce

El método de remoción de carbonatos de calcio con cal y soda Ash básicamente consiste en la aplicación de la dosis óptima de cal y soda Ash, con lo que se logra la precipitación del calcio como carbonato de calcio debido al incremento en la concentración de carbonatos en el agua; de igual manera el magnesio precipita cuando se incrementa la concentración de iones hidróxido.

La versatilidad de este proceso radica en que se puede hacer en dos etapas:

- Primero tratando con cal y luego la soda Ash
- Haciéndolo en forma simultánea.

Como parte del análisis preliminar se realizaron las pruebas en cuatro etapas para observar el comportamiento de las muestras bajo diferentes dosificaciones y determinar luego las que sean más adecuadas para lograr una mayor remoción de carbonatos de calcio.

#### 4.1.1 Dosificación por medio de estequiometría

En la primera etapa se determinó la dureza total, dureza de calcio y magnesio del agua recolectada del pozo de distribución de la USAC por medio de Titulación con EDTA (etilendiaminotetracético) (figura. 3) como se encuentra estipulado por Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. Esta basada en la cuantificación de los iones calcio y magnesio por titulación con el EDTA y su posterior conversión a dureza total expresada como  $\text{CaCO}_3$ .

Ya obtenidos estos resultados se procede a determinar la dosis de cal por medio de estequiometría según las ecuaciones de las reacciones que se llevan a cabo

(Romero, 1,999), dando como resultado 220 mg/L que fue tomada como base para establecer un rango de dosificaciones y realizar las pruebas. Haciendo uso del sistema de agitación utilizado para la prueba de jarras (fig.4), se procedió al mezclado de las dosis de cal con las 6 muestras de agua (2 Litros) durante un minuto para mezcla rápida (100 rpm) y durante 15 minutos a mezcla moderada (60 rpm). Es importante mencionar que se dejó sedimentar durante 20 minutos. Los resultados se muestran en la tabla IV y figura 5.



Figura 3. Método de Titulación con EDTA

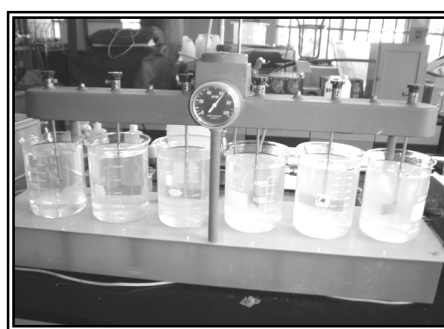


Figura 4. Equipo utilizado para prueba de jarras

**TABLA IV. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DOSIFICANDO POR MEDIO DE ESTEQUIOMETRÍA**

MUESTRA	ESTEQUIMETRÍA							
	6.3	126	3.3	26.45	99.55	%REMOCIÓN DT	%REMOCIÓN (DCa)	%REMOCIÓN (DMg)
No. DE JARRA	TIT	DUREZA TOTAL (mg/L) (DT)	TIT	DUREZA CALCIO (DCa)(mg/L)	DUREZA MAGNESIO (DMg)(mg/L)			
1 (100 mg/l de Cal)	6.1	122	4.4	35.27	86.73	3.17	-33.33	12.88
2 (100 mg/l de Cal)	7.7	154	4.9	39.28	114.72	-22.22	-48.48	-15.24
3 (100 mg/l de Cal)	6.1	122	4.3	34.47	87.53	3.17	-30.30	12.07
4 (100 mg/l de Cal)	5.4	108	3	24.05	83.95	14.29	9.09	15.67
5 (100 mg/l de Cal)	5	100	2.4	19.24	80.76	20.63	27.27	18.87
6 (100 mg/l de Cal)	5.7	114	3.3	26.45	87.55	9.52	0.00	12.05

TIT: TITULACIÓN EDTA

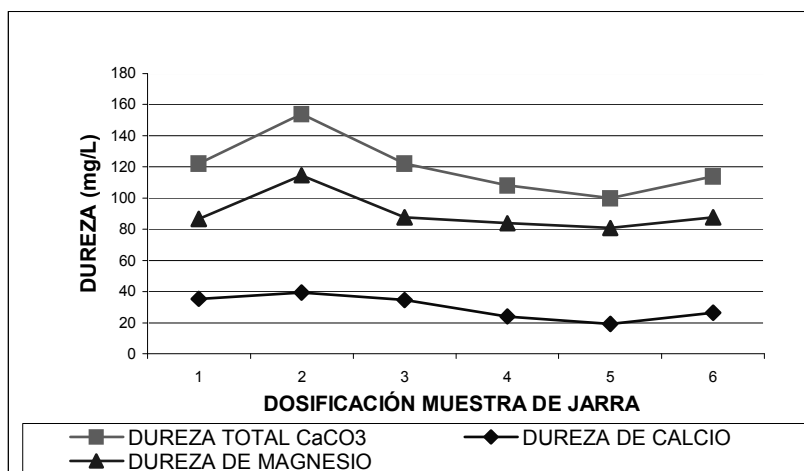


Figura 5. Remoción de dureza (Estequiometría)

#### 4.1.2 Dosificación de Cal y Soda Ash

- a. Se realizó el procedimiento del numeral anterior y se agregó una dosis igual a 50 mg/L de soda Ash a cada una de las muestras dentro del rango de 150 – 400 mg/L de cal. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios pues no existió remoción sino aumento de dureza. Esto se puede observar en la tabla V y figura 6 (ver apéndice).
  
- b. Se repitió el procedimiento de los numerales anteriores variando las dosis de Cal entre 250mg/L - 300 mg/L y 25 mg/L de soda Ash para tres muestras de agua y la misma dosis de cal pero con 500 mg/L de soda Ash para las tres muestras restantes. Acá se varió el tiempo de agitación a 20 minutos con 80 rpm y el de sedimentación a 40 minutos. Luego se determinó la dosis óptima de cal y soda Ash necesaria para lograr resultados satisfactorios, quedando pendiente la revisión de dichas dosis. Los datos obtenidos se presentan en la tabla VI y figura 7 (ver apéndice).
  
- c. Luego se trabajó con una dosis de cal de 250 mg/L y se varió la dosis de soda Ash en base a los resultados obtenidos anteriormente, se mantuvieron las condiciones de agitación y se varió el tiempo de sedimentación a 60 minutos. Con esta etapa se obtuvo el resultado que aparece en la tabla VII y figura 8 (ver apéndice).

La manera de determinar el porcentaje de Remoción de Dureza Total se expresa a continuación:

$$\% \text{ REMOCIÓN DUREZA} = \frac{DTM - DTP}{DTM} * 100 \quad (12)$$

Donde:

DTM = Dureza Total de la Muestra

DTP = Dureza Total de la Prueba

#### 4.2 Dosificación de cal y soda Ash en Pruebas de Jarras agua salada.

Como parte del estudio de investigación se procedió a realizar pruebas haciendo uso de agua con alto contenido de sal, lo cual le proporciona un valor alto de dureza y permite llevar a cabo pruebas para determinar la remoción de dureza utilizando el método de cal y soda Ash.

Debido a que el alto contenido de sal provoca en el agua a su vez un mayor valor de dureza, fue preciso realizar diluciones de este tipo de agua con la finalidad de obtener diferentes valores de dureza para los cuales se determinaron las dosis adecuada de cal y soda Ash y los respectivos porcentajes de remoción que se pueden alcanzar. En la figura 9 se observan las diferentes diluciones hechas al agua salada.



Figura 9. Prueba de jarras con agua salada

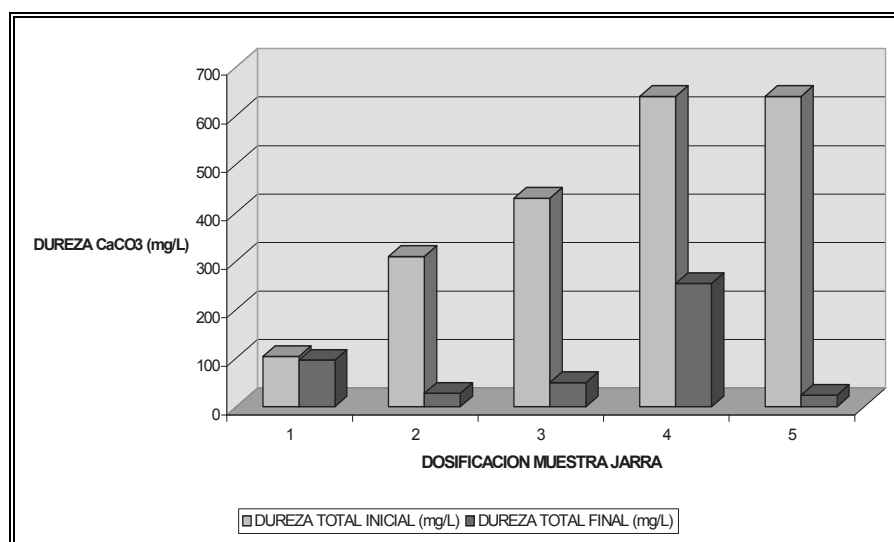
#### 4.2.1 Dosificación por medio de estequiometría.

En la tabla VIII se observan las pruebas realizadas con diluciones de agua salada y con agua del pozo de la USAC, los resultados obtenidos se muestran en la figura 10; en la tabla IX (ver apéndice) además se toman en cuenta parámetros como el Potencial de Hidrógeno (pH), Cloruros y Sulfatos para verificar si existe alguna remoción adicional a la de calcio y magnesio utilizando el método químico de cal y soda Ash.

**TABLA VIII. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO UTILIZANDO AGUA SALADA POR MEDIO DE ESTEQUIOMETRÍA**

ESTEQUIOMETRÍA						
MUESTRA EN JARRA						
DILUCION	DOSIFICACION	TIT	DUREZA		%REMOCION	
			TOTAL (mg/L) (DT)	TIT	TOTAL (mg/L) (DT)	DT
POZO USAC	250 mg/L cal y 350 mg/L Ash	5.2	104	4.8	96.0	7.7
25 ml/L	250 mg/L cal y 350 mg/L Ash	15.5	310	1.4	28.0	91.0
50 ml/L	250 mg/L cal y 350 mg/L Ash	21.5	430	2.5	50.0	88.4
100 ml/L	400 mg/L cal y 500 mg/L Ash	32	640	1.2	24.0	96.3

TIT: TITULACIÓN EDTA



**Figura 10. Remoción de dureza (estequiometría)**

#### **4.2.2 Dosificación de cal y soda Ash**

Esta etapa se procedió a realizar diluciones de agua salada obteniendo cinco (5) muestras a las cuales se les determino: pH, Dureza Total, Dureza de Calcio y Dureza de Magnesio. Una vez obtenida la Dureza Total se procedió a determinar la dosificación para cada una de las muestras siendo los valores que se muestran en la tabla X (ver apéndice) el procedimiento se realizó en tres partes como sigue:

##### **Primera parte**

- Se mezcló durante un minuto la muestra con la cal y la soda Ash a 100 rpm
- Continué la mezcla por un período de 15 minutos a un intervalo de 80 – 90 rpm
- Se dejó sedimentar 15 minutos y se procedió a determinar la dureza total de las muestras 1 y 5 obteniendo 52% y 41% de remoción respectivamente
- Se agregó soda Ash a la muestra 5 aproximadamente 75 mg/L para verificar alguna mejora en el resultado de remoción
- Se mezcló las muestras reutilizando los sedimentos producidos durante 10 minutos con las misma revoluciones y se dejó sedimentar durante 2 horas los resultados se muestran en la tabla X.

##### **Segunda parte**

Observando los porcentajes logrados, estos son elevados aún por lo que se procedió a agregar soda Ash en 150 mg a cada muestra.

- Se mezcló durante un minuto cada muestra con soda Ash a 100 rpm
- Continué la mezcla por un período de 25 minutos a un intervalo de 80 – 90 rpm
- Se dejó sedimentar 1 hora y treinta minutos antes de medir la Dureza Total, los porcentajes obtenidos se muestran en la tabla XI (ver apéndice).

### Tercera parte

En este punto se tomo en cuenta el valor elevado del pH al finalizar el proceso de remoción por lo que fue precioso determinar la manera de nivelar el valor hasta lo establecido como normal en las normas consultadas, dicho valor debe estar entre 6.5 y 8.5.

Para ello se agregó Ácido Sulfúrico a una concentración de 22%, la cantidad que se colocó a la muestra de 100 ml fue de 3 gotas logrando un pH de 7.30 y manteniendo el porcentaje de dureza tal como se muestra en la tabla XII.

**TABLA XII. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO UTILIZANDO AGUA SALADA, DOSIFICANDO POR MEDIO DE ESTEQUIOMETRÍA AUMENTANDO LA CANTIDAD DE QUÍMICOS**

DOSIFICACION CAL Y SODA ASH						
MUESTRA EN JARRA		05:45				
DILUCION	DOSIFICACION	DUREZA TOTAL (mg/L) (DT)	TIT	DUREZA TOTAL (mg/L) (DT)	TIT	%REMOCION DUREZA TOTAL (mg/L)
25 ml/L	500 mg/L cal y 600 mg/l Ash	700	3.5	32	1.6	95
	pH inicial	6.67				
	pH intermedio	11.47				
	pH final	7.30				

TIT: TITULACION EDTA

#### 4.2.3 Verificación de tiempos de mezcla y sedimentación

En esta etapa se verificaron los factores que permiten un porcentaje aceptable de remoción de  $\text{CaCO}_3$ , dichos factores son el tiempo de mezcla, tiempo de sedimentación y la reutilización de sedimentos.

Para la realización de esta etapa se mantuvieron las condiciones de mezcla rápida de 1 minuto a 100 rpm y posteriormente un período de agitación de 20 minutos a 90 rpm. El procedimiento se llevó a cabo en 3 partes tal como se describe a continuación:

#### Primera parte

Con las condiciones establecidas de mezcla se efectuaron las pruebas de remoción, luego de la agitación establecida se dejo sedimentar durante un período de 30 minutos determinando para cada muestra la concentración de dureza total, dureza de calcio y

magnesio, siendo los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de remoción los que se observan en la tabla XIII y en figuras 11 y 12. Ver apéndice A-7.

### **Segunda parte**

Para analizar la importancia del período de sedimentación en el proceso de remoción, las muestras se dejaron sedimentar durante aproximadamente 12 horas siendo un período largo en comparación a los tiempos utilizados en las etapas anteriores. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla XIV (ver apéndice).

### **Tercera parte**

Una vez analizados los datos obtenidos en la parte anterior se procedió a agregar a cada muestra soda Ash, para verificar si se obtiene una mejor remoción de  $\text{CaCO}_3$ , mezclando durante 15 minutos a 90 rpm y dejando sedimentar por período de 1 hora. Después de transcurrido el tiempo de sedimentación se verificó el porcentaje de remoción con los resultados expuestos en la tabla XV (ver apéndice); posteriormente se repitieron las pruebas de dureza en intervalos de 1 hora con los resultados que se observan en las tablas XVI (ver apéndice) y XVII, derivándose de esta última las figuras 13 y 14 (ver apéndice).

#### **4.2.4 Pruebas para determinar remoción y tiempo de sedimentación**

En esta etapa se realizaron los mismos procedimientos de las anteriores, solo que se utilizaron durezas altas para determinar la remoción y observar la influencia del tiempo de sedimentación en proceso de remoción. Además se realizaron pruebas con los sedimentos de pruebas anteriores y observar así la posibilidad de su reutilización.

El proceso de mezcla se mantuvo en 1 minuto para mezcla rápida a 100 rpm y un período de agitación de 20 minutos a 90 rpm para posteriormente dejar sedimentar durante 30 minutos, la primera parte. Los datos obtenidos se muestran en la tabla XVIII y se representan en las figuras 15 y 16 (ver apéndice).



Una vez observados los valores obtenidos se dejó sedimentar más tiempo las muestras durante 1 hora y 30 minutos; a la muestra que contenía los sedimentos se le agregaron 25 mg/L de cal y 25 mg/L de soda Ash para verificar algún incremento en la remoción obtenida. Los datos se observan en la tabla XVIII y se representan en las figuras 17 y 18 (ver apéndice).

Con la finalización de todas las pruebas realizadas en el laboratorio se tomaron los resultados que fueron más representativos durante la aplicación del método de remoción utilizando cal y soda Ash, esto se puede observar en la tabla resumen de pruebas de laboratorio, tabla XIX y en las figuras 19 y 20 (ver apéndice).



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos y lo observado en el numeral 4.1.1 del procedimiento se puede decir que a la dosificación de cal y con tiempos de sedimentación entre los 20 y 30 minutos el máximo porcentaje remoción fue del 20% y en algunos casos se verificó un aumento de dureza como se observa en la tabla IV.

Los valores negativos que se obtuvieron en las distintas etapas de la prueba indican que existe un aumento en la cantidad de dureza por lo que se descarta dicha combinación para el proceso.

En el numeral 4.1.2 en los incisos b y c se obtuvo un mejor porcentaje de remoción de dureza en relación a los del numeral 4.1.1 con lo que se estima un rango dentro del cual se puede determinar como dosis óptima los valores de 250 mg/L de cal y 350 mg/L de soda Ash para la concentración de dureza de 126 mg/L debiendo tomar en cuenta aspectos como el pH, temperatura del agua, los sedimentos que se producen durante el proceso.

En el numeral 4.2.1 se utilizó agua salada; debido a su alto contenido de sal fue necesario hacer diluciones logrando obtener valores de dureza altos, como se muestran en las tablas VIII, IX, que permitieron corroborar la aplicabilidad del método de remoción de dureza mediante la dosificación por estequiometría de cal y soda Ash; obteniéndose un porcentaje de remoción máximo de 96% y mínimo de 49.9%

Tal como sucedió en las etapas anteriores del procedimiento anterior también se presentaron valores negativos en cuanto al porcentaje remoción de la dureza de calcio o magnesio y eso es debido a que la cantidad de cal o soda Ash aplicada a la

muestra provoca un efecto contrario, es decir aumenta ya sea la cantidad de calcio o magnesio presente en el agua.

En los casos de los numerales 4.2.3 y 4.2.4 se verificaron los tiempos de agitación y sedimentación proporcionando valores de agitación entre 15 y 25 minutos y entre 30 y 90 minutos de sedimentación dando porcentajes de remoción mayores al 75% de dureza total.

También experimentó, como iniciativa propia, la reutilización de los sedimento; esto se realizó agitando las muestras después del período de reposo de 30 minutos y obteniendo una remoción de 8% de dureza total. Otra forma de reutilización de los lodos fue dosificándolos en una muestra de agua; luego se agregó cal y soda Ash mejorando así el porcentaje de remoción alcanzado pues se incremento a 37% aproximadamente.

Dentro de las pruebas que se realizaron en estas etapas cabe señalar la posibilidad que tiene el método para remover inclusive sulfatos presentes en el agua, pues los porcentajes de remoción que se obtuvieron fueron altos casi en un 97%.

A través de las pruebas realizadas se lograron determinar dosificaciones de cal y soda Ash para diferentes intervalos de dureza y sus respectivos porcentajes máximos y mínimos de remoción, que se muestran en la tabla XX:

**TABLA XX. INTERVALOS DE DUREZA, DOSIFICACIÓN  
Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN**

<b>Dureza Total (mg/L)</b>	<b>Dosificación</b>	<b>Porcentaje de Remoción (%)</b>
120 – 400	250 mg/L cal y 350 mg/L Ash	75 – 95
400 – 600	400 mg/L cal y 500 mg/L Ash	70 – 80
600 – 1,200	500 mg/L cal y 700 mg/L Ash	75 – 90
1,200 – 1,800	700 mg/L cal y 1,500 mg/L Ash	70 – 85
1,800 – 2,300	1,100mg/L cal y 2,100 mg/L Ash	75 – 85

## CONCLUSIONES

1. Se comprueba la hipótesis planteada en vista que se obtuvieron concentraciones mayores de 75% de remoción de carbonatos de calcio en muestras de agua en donde las concentraciones oscilaron entre 300 a 2,300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  utilizando cal y soda Ash.
2. Las dosificaciones óptimas para remover el 75% de  $\text{CaCO}_3$  oscila en el rango de 250 y 1,100mg/L de cal y 350 y 2,100 de soda Ash con tiempos de mezcla lenta entre 15 y 25 minutos y rápida de 1 minuto y además con períodos de sedimentación entre 30 y 90 minutos.
3. Con las dosis aplicadas para la remoción de  $\text{CaCO}_3$  se lograron concentraciones de calcio y magnesio; entre 8 – 175 mg/L para el calcio y 0 – 45 mg/L para el magnesio, cumpliendo en la mayoría de los casos con la norma COGUANOR cuyos valores máximos permisibles son 150 mg/L y 100 mg/L respectivamente.
4. Los tiempos menores de 30 minutos de sedimentación no ayudaron a una adecuada remoción de  $\text{CaCO}_3$  ya que se logró solamente el 27% de remoción, mientras que con tiempos mayores a 30 minutos se logró una remoción del 75% y con un exceso entre 40 a 60% de dosificación de químicos aproximadamente.

5. A mayor tiempo de sedimentación de las muestras se obtuvo un mejor resultado en el método de ablandamiento mediante el uso de cal y soda Ash, aunque dependerá de la adecuada dosificación de cal y soda Ash; los tiempos de sedimentación se analizaron dentro del intervalo de 15 minutos a 36 horas, siendo los tiempos convenientes entre 30 y 90 minutos.

6. Los porcentajes de remoción logrados con la reutilización de lodos o sedimentos que se generaron durante el proceso es mínimo comparado con el logrado con la dosificación de cal y soda Ash pues únicamente alcanzó aproximadamente el 8%

## RECOMENDACIONES

1. Para concentraciones de dureza menores a 200 mg/L utilizar dosificación de 250 mg/L de cal y 350 mg/L de soda Ash y lograr así una remoción mayor al 75% y mantener las concentraciones mínimas de carbonatos de calcio y magnesio que son aptas para consumo humano, las cuales no deben mantenerse entre 61 a 120mg/L.
2. Se debe verificar el Potencial de Hidrógeno (pH) del agua luego del proceso de ablandamiento, puesto que durante éste el valor aumenta cerca de las 10 unidades tornado el agua demasiado básica por lo que será necesario acidificarla utilizando ácido sulfúrico hasta lograr valores de pH entre 6.5 – 8.5.
3. Realizar estudios a los sedimentos que se producen durante el proceso, pues podrían ser utilizados como una forma de dosificación en húmedo o como complemento a la dosificación en seco que se realiza con la cal y la soda Ash.
4. Implementar una unidad piloto para la remoción de carbonatos de calcio utilizando cal y soda Ash con los datos obtenidos en las pruebas experimentales de laboratorio y que sirva como aporte a las municipalidades o las entidades encargadas del abastecimiento de agua.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Análisis de dureza total por titulación con EDTA. (En línea). Disponible en: <http://members.tripod.com/Arturobola/dureza.htm>. Consultado el 18 de enero del 2,005
2. Comisión Guatemalteca de Normas, Normas COGUANOR NGO-29001, agua potable, 1,999
3. Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. 1,991. CEPIS.
4. Evaluación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento 2,000 en las Américas. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/>. Consultado el 14 de febrero del 2,005
5. Fair G., J.Geyer y D. Okun. 1,979. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. T. II, LIMUSA.
6. Las agua subterráneas: un valioso recurso que requiere protección. 1,987. CEPIS.
7. Mora Alvarado D., y otros. 2,000. “Relación entre la dureza del agua y las cardiopatías isquémicas en Costa Rica”.
8. Nordel E. 1,976. Tratamiento de agua para la industria y otros usos. 5ª. Impresión. C.E.C.S.A.
9. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano – Límites Permisibles de Calidad y Tratamiento a que debe someterse el Agua para su potabilización”
10. Norma para la Calidad de Agua Potable de Costa Rica.
11. Norma para la Calidad de Agua Potable de Nicaragua.
12. Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad del Agua Potable, 1,999.

13. Norma Técnica Nacional para la calidad del Agua Potable en Honduras, 1,995.
14. Romero Rojas, J.A. 1,999. Calidad del Agua. Segunda Edición. Editorial Escuelas Colombiana de Ingeniería. México
15. Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater. 19a. Edición , Washintong USA: American public Health Association, American Water Works Association, Water Enviroment Federation 1,995.
16. Unda Opazo, F. 1,969. Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y Salud Pública”. UTEHA. México.
17. Universidad Central de Venezuela. Facultad Ingeniería. 1,967. “Desarrollo Agua Subterránea”; Curso para Graduados. Caracas.
18. “El agua subterránea y pozos”. San Paul Minnesota. Johnson Division. 1,975.