



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“TREN DE TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO PARA LA
REMOCIÓN DE COMPUESTOS INCRUSTANTES CONTENIDOS EN
AGUA CONGÉNITA”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

ULISES MARTÍNEZ FRÍAS



CIUDAD DE MÉXICO.

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: José Fernando Barragán Aroche

VOCAL: Profesor: Carlos Álvarez Maciel

SECRETARIO: Profesor: Sergio Adrián García González

1er. SUPLENTE: Profesora: Alejandra Mendoza Campos

2° SUPLENTE: Profesora: María Rafaela Gutiérrez Lara

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 109 EDIFICIO F-2, FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA:

DR. JOSÉ FERNANDO BARRAGÁN AROCHE

SUPERVISORA TÉCNICA:

M. EN I. MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

SUSTENTANTE:

ULISES MARTÍNEZ FRÍAS

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto PAPIIT IN 116717 "Evaluación de un tren de tratamiento, como una alternativa para el reúso o aprovechamiento de agua residual tipo congénita proveniente de pozos por recuperación mejorada de crudo" por el apoyo otorgado para la realización del presente proyecto y beca otorgada.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción	1
Justificación	2
Objetivos	2
General:	2
Marco Teórico	3
Tratamiento de Agua.....	3
Agua Congénita	3
Situación actual de PEMEX-Exploración y Producción en la recuperación de agua congénita	5
Procesos para el tratamiento de agua congénita	6
Dureza	13
Dureza permanente	13
Dureza Temporal	14
Proceso de Coagulación-Floculación	14
Proceso de Ablandamiento Químico	15
Hidróxido de Calcio	16
Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio. (Proceso Cal-Soda)	17
Hidróxido de Sodio.....	18
Precipitados	18
Ecuación de flujo y neutralización	19
Ecuación de flujo	19
Neutralización	19
Estabilización	20
Marco normativo aplicable	21
NOM-AA-143-SEMARNAT-2003.....	21
NOM-AA-001-SEMARNAT-1996.....	22
Caracterización de la muestra.....	22
Límites Máximos Permisibles (LMP)	24

Desarrollo experimental	25
Conceptualización del tren de tratamiento	25
Sistema de Pretratamiento. Coagulación-floculación	25
Ablandamiento Químico. Proceso cal-soda, por lotes	27
Ablandamiento Químico. Proceso cal-soda, continuo.	28
Análisis de resultados y discusión.....	36
Caracterización de las muestras utilizadas	36
Caracterización M671-5	36
Caracterización M671-6	38
Caracterización M671-6-A y M671-6-B	41
Caracterización M821-7	44
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Referencias y Fuentes de Consulta	50
Anexo A	54
Diagrama de flujo para la determinación de pH.....	54
Diagrama de flujo para la determinación de conductividad.....	55
Diagrama de flujo para la determinación de alcalinidad	55
Diagrama de flujo para la determinación de Dureza Total	56
Diagrama de flujo para la determinación de Dureza de Calcio	56
Diagrama de flujo para la determinación de Sulfatos	57
Diagrama de flujo para la determinación de cloruros.....	57
Diagrama de flujo para la determinación de Sólidos Totales	58
Diagrama de flujo para la determinación de Sólidos Suspendidos	58
Diagrama de Flujo para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno	59
Anexo B	60
Anexo C	62
Anexo D	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos máximos y mínimos en algunos parámetros para agua congénita (neff et al.,2011)	4
Tabla 2. Características del agua según su aplicación (USGS,2016).....	5
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las tecnologías para remoción de aceites	7
Tabla 4. Ventajas y desventajas por tecnología	8
Tabla 5. Comparativo de tecnologías de desinfección	9
Tabla 6. Comparativo de métodos para la disminución de sólidos	9
Tabla 7. Comparativo de tecnologías.....	11
Tabla 8. Ventajas y desventajas para los procesos con membranas aplicables al agua.....	12
Tabla 9. Principales especies causantes de dureza	13
Tabla 10. Clasificación del agua según su dureza.	14
Tabla 11. Límites establecidos en la norma 143	22
Tabla 12. Límites máximos permisibles para ciertos parámetros establecidos en la norma.....	22
Tabla 13. Valores máximos permitidos para agua congénita	25
Tabla 14. Identificación de equipos para la propuesta de tratamiento utilizada	29
Tabla 15. Datos de diseño para el reactor, R-001	32
Tabla 16. Datos de diseño para el sedimentador, TA-002.....	35
Tabla 17. datos de diseño para el filtro, F-001	35
Tabla 18. resumen de resultados para la caracterización de la prueba M671-5....	36
Tabla 19. resultados de la caracterización de la muestra M671-6.	39
Tabla 20. Resultados de la caracterización de la muestra M671-6-a y b.....	41
Tabla 21. Resultados de la caracterización de la muestra M821-7	44
Tabla 22. Concentración de algunas sales en la muestra M821-7	46

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Uso del agua congénita en México	5
Gráfica 2. Resultados para el pH de la muestra M671-5.....	37
Gráfica 3. Resultados para la alcalinidad de la muestra M671-5.....	37
Gráfica 4. Resultados de Dureza para la muestra M671-5.....	38
Gráfica 5. Resultados de la medición de pH en la muestra M671-6	40
Gráfica 6. Alcalinidad para la muestra M671-6.....	40
Gráfica 7. Resultados de dureza para la caracterización de la muestra M671-6 ..	41
Gráfica 8. Restultados de dureza para la muestra M671-6-A y B.....	442
Gráfica 9. Cantidad de sulfatos en el tratamiento de la muestra M671-6-A.....	43
Gráfica 10. Cantidad de DQO para la muestra M671-6-A	43

INTRODUCCIÓN

El petróleo crudo que se obtiene en el proceso de extracción siempre se encuentra acompañado de agua; dicho líquido cuenta con características especiales que lo catalogan como un producto sin aprovechamiento; con base en ese hecho, y aunado a la gran producción de agua en el pozo petrolero, tomando en consideración que es mayor la proporción de agua extraída en pozos agotados, se vuelve necesario desarrollar procesos que garanticen su disposición segura. Para ello se recurre a las prácticas más empleadas y permitidas por la normativa aplicable, siendo la reinyección en el pozo la más empleada (Guerra et al., 2011). En el informe de Sustentabilidad 2017, PEMEX reporta que para ese año se separaron 17.6 MMm³ de agua congénita. Del volumen total separado el 95.1 % fue reinyectado y el 4.9% fue tratado y/o descargado.

Para que el reúso del agua asociada al crudo (agua congénita), sea una actividad factible es necesario procesar este líquido de modo tal que cumpla con ciertos parámetros dictados por las normas NOM-143-SEMARNAT-2003 y NOM-001-SEMARNAT-1996, principalmente. Es de especial interés el disminuir los índices de incrustación en el agua pues esto afecta en la recuperación mejorada de crudo por estrategia de inyección de químicos y también causa daños severos a tuberías de transporte, en los equipos de proceso de la refinería o del campo petrolífero.

En este trabajo se plantea la aplicación de un proceso de ablandamiento químico para disminuir la concentración de sales incrustantes en el agua congénita; con ello se busca hacer más eficiente el proceso de extracción de crudo, del cual depende la economía mexicana.

A menudo, un sistema de tratamiento de agua congénita consistirá de varios tipos de unidades de proceso en serie para remover una amplia variedad de contaminantes que no pueden ser removidos con un solo proceso. Las principales tecnologías aplicadas se relacionan a la remoción de materia orgánica y particulada, desalinización y desinfección. Las tecnologías de desalinización son usadas para reducir el costo de energía del proceso o mejorar la recuperación de crudo. (Guerra, 2011).

Entre las opciones para desalinizar el agua se encuentra el ablandamiento químico con el que, añadiendo hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] y carbonato de sodio (Na₂CO₃), se logra precipitar calcio y magnesio en forma de carbonato e hidróxido respectivamente; siendo estos cationes los que mayor implicación tienen en la dureza del agua.

JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto consiste en el tratamiento de Agua Congénita para su reinyección en pozos petroleros; se busca minimizar el efecto de la incrustación en los equipos debido al contenido de sales en el agua, así como el cumplimiento de la normativa nacional e internacional en materia ambiental, utilizando los métodos de tratamiento de agua de Coagulación- Floculación, así como Ablandamiento Químico.

Con el tratamiento del agua congénita se busca el ahorro de uso de agua de primer uso para la extracción de gas y aceite. La aplicación de un proceso de tratamiento específico para cualquier pozo resulta imposible debido a la gran variación de parámetros de interés como los Sólidos Totales Disueltos (TDS), Sólidos Suspendidos Totales (SST), grasas y aceites. Sin embargo, el agua congénita, para cualquiera que sea su origen, posee grandes concentraciones de sales inorgánicas por lo que el ablandamiento químico resulta una solución recurrente en los procesos de tratamiento.

Dado que la dureza del agua congénita es un parámetro prioritario a reducir, se destaca al ablandamiento como el método de tratamiento factible para su implementación en campo. En el presente documento se plantean distintas formas de operación; desde la operación en continuo hasta la operación por lotes. También distintas maneras de cálculo para la dosis de reactivos, pruebas con un tratamiento fisicoquímico previo y sin él; todo con el fin de proponer la forma de operación que brinde un agua manejable sin riesgo a impregnarse.

OBJETIVOS

GENERAL:

- ✓ Evaluar la eficiencia del proceso de ablandamiento químico a escala laboratorio con la intención de procesar agua de tipo congénita para obtener agua con las características adecuadas al remover los altos contenidos de TDS, DQO y otros contaminantes que le dan a este tipo de agua la característica de un residuo peligroso.

Particulares:

- ✓ Diseñar, construir y operar un sistema de tratamiento de agua residual tipo congénita previamente tratada, para obtener un efluente que cumpla con lo establecido en la normatividad para su disposición, reúso y/o aprovechamiento.

- ✓ Establecer un sistema integral de un tren de tratamiento utilizando un proceso fisicoquímico seleccionado, así como las mejores condiciones de operación del sistema de ablandamiento realizando pruebas en continuo, con el fin de automatizar el proceso.

MARCO TEÓRICO

TRATAMIENTO DE AGUA

El tratamiento del agua es necesario cuando alguna de sus propiedades le confiere al fluido un estatus de sustancia peligrosa. Los distintos tipos de tratamiento se clasifican de la siguiente manera:

- Higiénicos: Tienen como principal objetivo la remoción de bacterias, venenos o sustancias nocivas para los seres vivos.
- Estéticos: Son empleados para el tratamiento del olor, color, sabor y turbidez del agua.
- Económicos: Su aplicación implica un beneficio económico para la operación de los procesos a aplicar; incluye reducción de dureza y corrosión.

AGUA CONGÉNITA

El agua congénita o de formación, es agua salada que se encuentra dentro de la roca, asociada a la presencia de hidrocarburos; es el resultado de una mezcla de agua inyectada, agua de formación, hidrocarburos y/o aditivos. Es considerada como un residuo. En campos petrolíferos maduros se obtienen, en promedio, 3 barriles de agua congénita por cada barril de crudo extraído; con el paso del tiempo el volumen de líquido extraído puede corresponder a un 90% de agua con lo que deja de resultar rentable la extracción en el sitio. (Mancilla et al., 2012)

Estas aguas contienen sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonato de sodio, cloruro de potasio, sulfatos de calcio o de bario, así como gases disueltos, bacterias sulfato-reductoras, aditivos (biocidas, inhibidores de corrosión y emulsión); puede incluso contener algunos metales pesados. La concentración de estos componentes puede ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados. (Lavariega, 2011)

Las características del agua presentan grandes variaciones en función del tiempo y de la localización, por lo que no puede hablarse de valores específicos que dicten la composición del líquido, pero sí de rangos reportados; en ese sentido en la **Tabla 1** se muestran los valores mínimos y máximos encontrados para agua congénita.

TABLA 1. RANGOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN ALGUNOS PARÁMETROS PARA AGUA CONGÉNITA (NEFF ET AL.,2011)

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Densidad (kg/m ³)	1014	1140
Conductividad (µS/cm)	4200	58,600
Tensión Superficial (din/cm)	43	78
pH	4.3	10
Carbón Orgánico Total (mg/L)	0	1500
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1.2	1000
Grasas y Aceites (mg/L)	2	565
Cloruros (mg/L)	80	200,000
Carbonatos (mg/L)	77	3990
Sulfatos (mg/L)	<2	1650
Sulfitos	-	10
Calcio (mg/L)	13	25,800
Sodio (mg/L)	132	97,000
Potasio (mg/L)	24	4300
Magnesio (mg/L)	8	6000
Hierro (mg/L)	<0.1	100
Aluminio (mg/L)	310	410
Boro (mg/L)	5	95
Bario (mg/L)	1.3	650
Cadmio (mg/L)	<0.005	0.2
Cobre (mg/L)	<0.02	1.5

Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición del agua congénita son: la eventual contaminación de acuíferos en el proceso de inyección a formaciones receptoras, la contaminación de cuerpos receptores si no se cuenta con parámetros de limpieza, y la contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte. (Neff et al.,2011)

En la antigüedad (siglos XIX y XX) el agua congénita se evaporaba en estanques, pero se ha convertido en una medida inaceptable debido a las políticas ambientales y sociales que se han adoptado en los últimos tiempos. (Guerra,2011)

La tendencia mundial coincide en que las opciones óptimas para la disposición del agua congénita asociada a la producción de hidrocarburos es su inyección en formaciones receptoras subterráneas, o su disposición al mar. (SEMARNAT, 2003).

Para tener un panorama del grado de disminución que deben obtenerse en algunos parámetros en la **Tabla 2** se presentan los valores a adoptar con base en la aplicación del agua.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SEGÚN SU APLICACIÓN (USGS,2016)

Parámetro	Agua potable	Para irrigación	Para ganado	Para reinyección
pH	6.5-8		6.5-8	7-8
Sólidos Totales Disueltos	500	2000	5000	4000-20,000
Cl ⁻	250		1500	1000-2000

Para su empleo en la industria resulta necesario reducir, entre otros parámetros, la cantidad de sales de calcio y magnesio dado que ocasionan problemas de incrustación en los equipos de proceso, así como también interfieren en la eficiencia de los procesos de recuperación mejorada (EOR). (CDPHE,2009)

SITUACIÓN ACTUAL DE PEMEX-EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN LA RECUPERACIÓN DE AGUA CONGÉNITA

En México, PEMEX-Exploración y Producción es la dependencia gubernamental encargada del monitoreo y disposición del agua congénita producida como resultado de la extracción de hidrocarburos. La **Figura 1** muestra que la principal estrategia empleada por PEMEX para el agua congénita es la inyección en pozos petroleros.



Gráfica 1. Uso del agua congénita en México (Fuente: PEMEX, 2014).

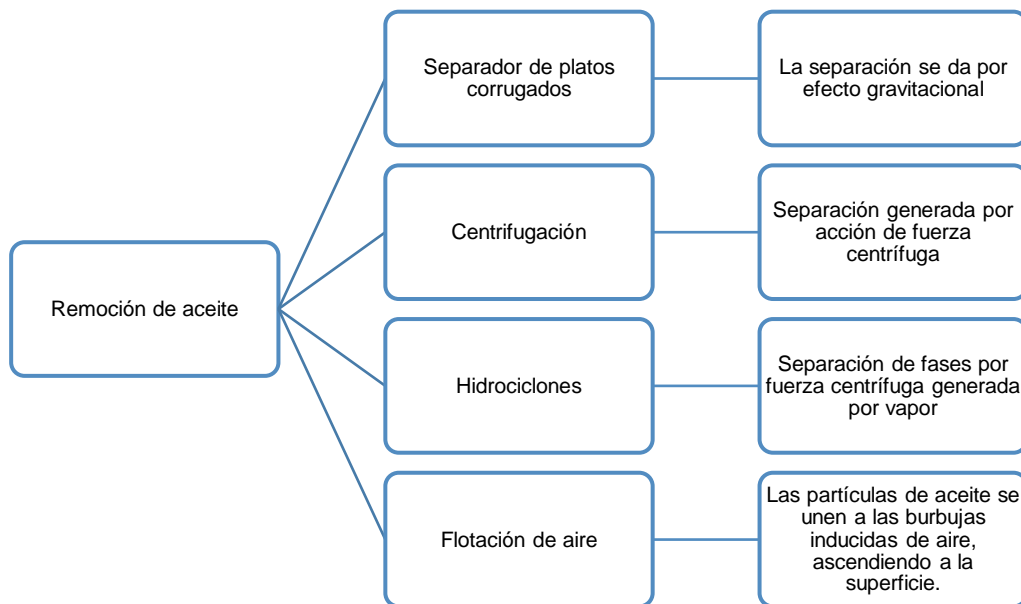
PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA CONGÉNITA

Arthur (2005) indica que los objetivos generales para el tratamiento de agua congénita se pueden dividir de la siguiente manera

1. Remoción de aceite. Separación de las grasas y aceites dispersos en el agua. La presencia de grasas y aceites en el agua producen una interfase que impide el paso del oxígeno y con ello el proceso de fotosíntesis, afectando la vida marina.

1.1 Tratamientos para aguas con un contenido de grasas y aceites mayor a 1000 mg/L. En el **Diagrama 1** se muestran las principales tecnologías disponibles para la remoción de aceite.

DIAGRAMA 1. PROCESOS EMPLEADOS PARA REMOVER ACEITE CON CONCENTRACIÓN MAYOR A 1000 mg/L



En la **Tabla 3** se muestra un comparativo entre las tecnologías aplicables en materia de separación de aceite.

TABLA 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS PARA REMOCIÓN DE ACEITES

Remoción de aceite con contenido mayor a 1000 mg/L		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Separador de platos corrugados	-No requiere energía -Efectivo para remover aceite voluminoso y sólidos suspendidos	-Poco efectivo al remover partículas finas de aceite -Alto tiempo de residencia
Centrifugación	-Alta remoción de partículas finas de aceite y sólidos suspendidos -Cortos tiempos de residencia	-Costos de mantenimiento elevados -Alto consumo energético
Hidrociclones	-Módulos compactos -Alta eficiencia en remover partículas finas de aceite	-No se da separación de sólidos -Altos costos de mantenimiento -Ensuciamiento
Flotación de gas	-Elevada remoción debido al proceso de coalescencia -Fácil operación	-Generación de grandes cantidades de aire -Requiere de un gran tiempo de retención

1.2 Tratamientos para aguas con un contenido de grasas y aceites menor a 1000 mg/L, se ilustran en el **Diagrama 2**, mientras que la **Tabla 4** indica las ventajas y desventajas de cada tratamiento.

DIAGRAMA 2. TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE AGUA CON BAJA CANTIDAD DE ACEITE

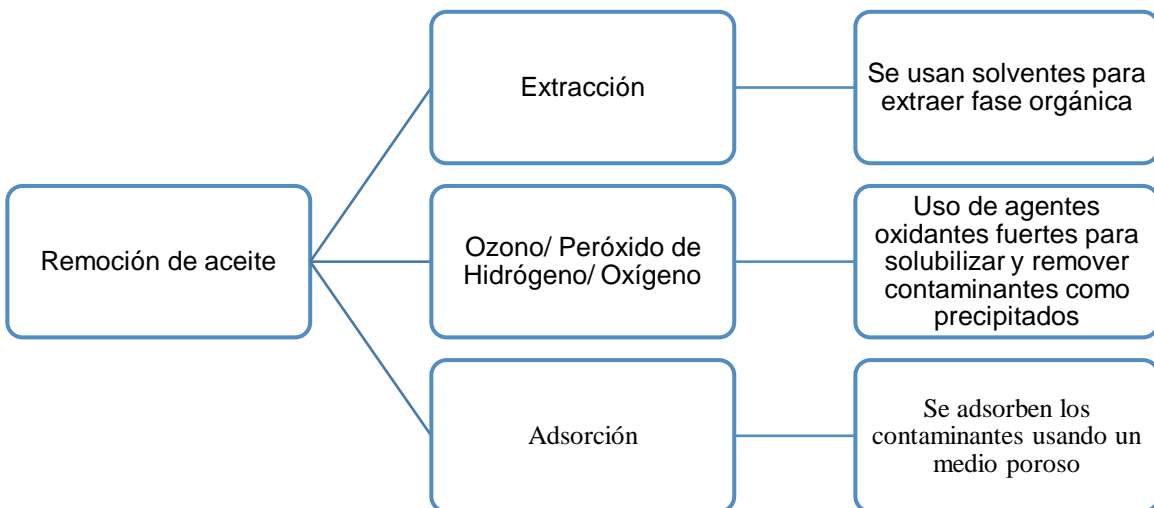


TABLA 4. VENTAJAS Y DESVANTAJAS POR TECNOLOGÍA

Remoción de aceite con contenido menor a 1000 mg/L		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Extracción	-No requiere de energía -Fácil operación	-Requiere usar solventes -Regeneración de los solventes
Ozono/ Peróxido de hidrógeno/ Oxígeno	-Fácil operación	-Dificultad para separar los precipitados -Obtención de dióxido de carbono como subproducto
Adsorción	-Equipo compacto -Tecnología barata y eficiente	-Altos tiempos de retención -Disminución de eficiencia al aumentar la carga de contaminantes

2. Remoción de compuestos orgánicos disueltos. Cierta cantidad de materia orgánica también se remueve junto con el proceso de disminución de grasas y aceites.
3. Desinfección. Remoción de bacterias, microorganismos, algas, etc. Los principales métodos a aplicar para desinfectar el agua pueden consultarse en el **Diagrama 3**; mientras que la **Tabla 5** indica la comparación entre cada método.

DIAGRAMA 3 . TRATAMIENTOS DISPONIBLES PARA DESINFECTAR AGUA

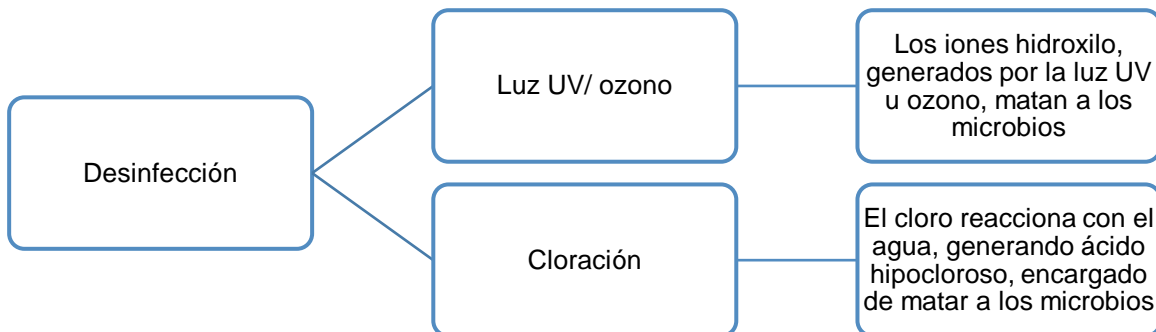


TABLA 5. COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE DESINFECCIÓN

Desinfección		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Luz UV/ozono	-Fácil operación -Gran eficiencia en desinfección	-Algunos contaminantes reducen la remoción de microorganismos
Cloración	-Método económico	-No remueve todos los tipos de microbios

4. Remoción de sólidos suspendidos.

En el **Diagrama 4** se muestran las principales tecnologías aplicadas al agua con el fin de disminuir la cantidad de sólidos disueltos, como puede consultarse en la **Tabla 6**, se trata de métodos más bien económicos.

DIAGRAMA 4. TÉCNICAS PARA LA DISMINUCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN AGUA

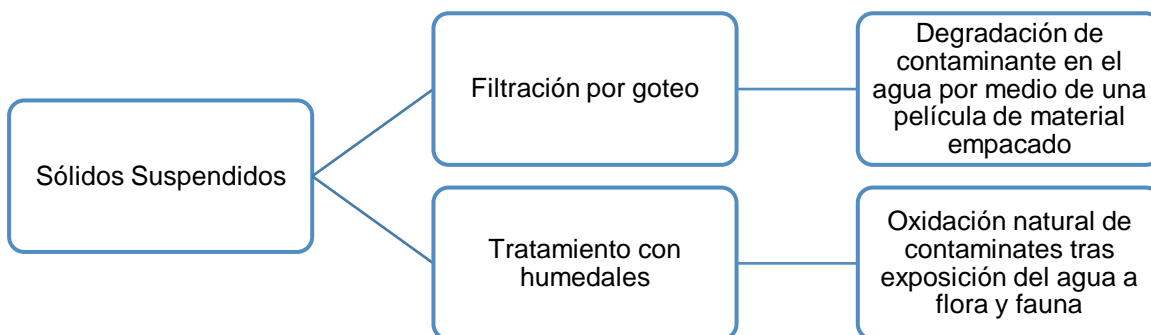


TABLA 6. COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA LA DISMINUCIÓN DE SÓLIDOS

Remoción de Sólidos Suspendidos		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Filtración por goteo	-Método barato, eficiente y limpio	-Requerimiento de oxígeno -El filtro es de gran dimensión
Tratamiento con humedales	-Tecnología barata, eficiente. -Remueve contaminantes disueltos y suspendidos	-Tiempo de residencia grande -Vulnerable a cambio en temperatura y pH

5. Remoción de gases disueltos (CO₂, O₂, CH₄, H₂S)

5.1 Desgasificación

Descripción: Se desorbe el gas disuelto en el agua.

Ventajas: Tecnología económica

Desventajas: Baja eficiencia, se necesita de tratamiento posterior.

6. Desalinización o desmineralización. Remoción de sales disueltas, sulfatos, nitratos, contaminantes, agentes incrustantes, etc.

Las distintas tecnologías pueden dividirse para su estudio en dos; aquellas que emplean el uso de membranas (**Diagrama 6**) y en las que no resulta necesario (**Diagrama 5**), en las **Tablas 7 y 8** se muestran las ventajas y desventajas de cada proceso, respectivamente.

6.1 Tratamientos sin membranas

DIAGRAMA 5. ALTERNATIVAS SIN MEMBRANAS PARA LA DISMINUCIÓN DE SALES EN EL AGUA

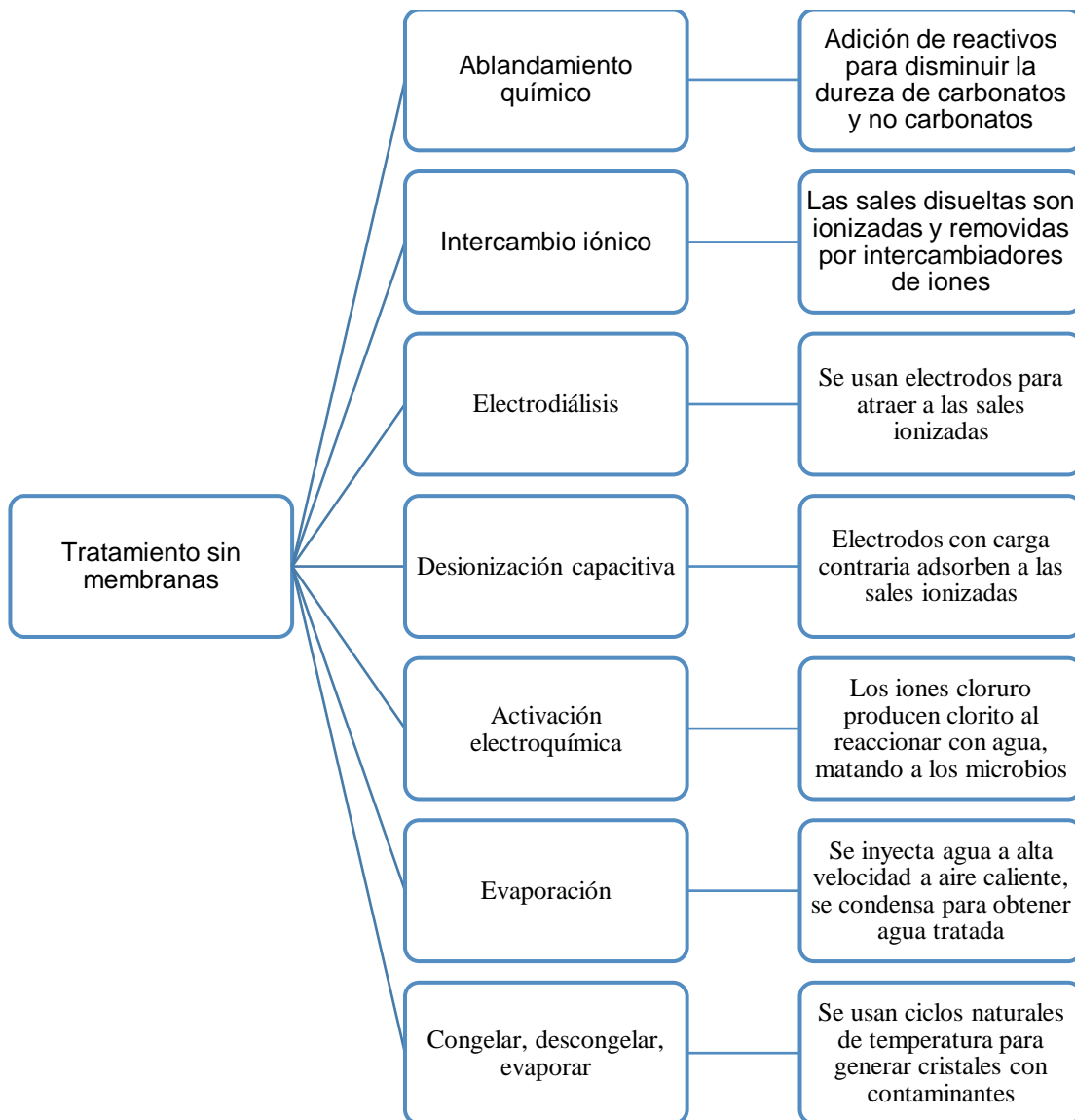


TABLA 7. COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS

Remoción de sales		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Ablandamiento Químico	-Tecnología barata y accesible	-Resulta necesario un tratamiento posterior
Intercambio iónico	-Regeneración continua -Bajos requerimientos energéticos	-Requiere de tratamiento previo y posterior
Electrodialisis	-Tecnología limpia -No necesita adición de químicos	-Requiere regeneración del medio -Menos eficiente a mayor carga de sales
Desionización capacitiva	-Requiere baja cantidad de energía	-Electrodos caros y susceptibles a ensuciamiento
Activación electroquímica	- Disminución simultánea de microorganismos y sales	-Electrodos caros
Evaporación	-Efluente de alta calidad	-Requerimientos altos de energía para calentar el aire
Congelar, descongelar, evaporar	-Tecnología barata	-Baja conversión

6.2 Tratamiento con membranas

DIAGRAMA 6. PROCESOS CON MEMBRANAS PARA LA DISMINUCIÓN DE SALES EN EL AGUA

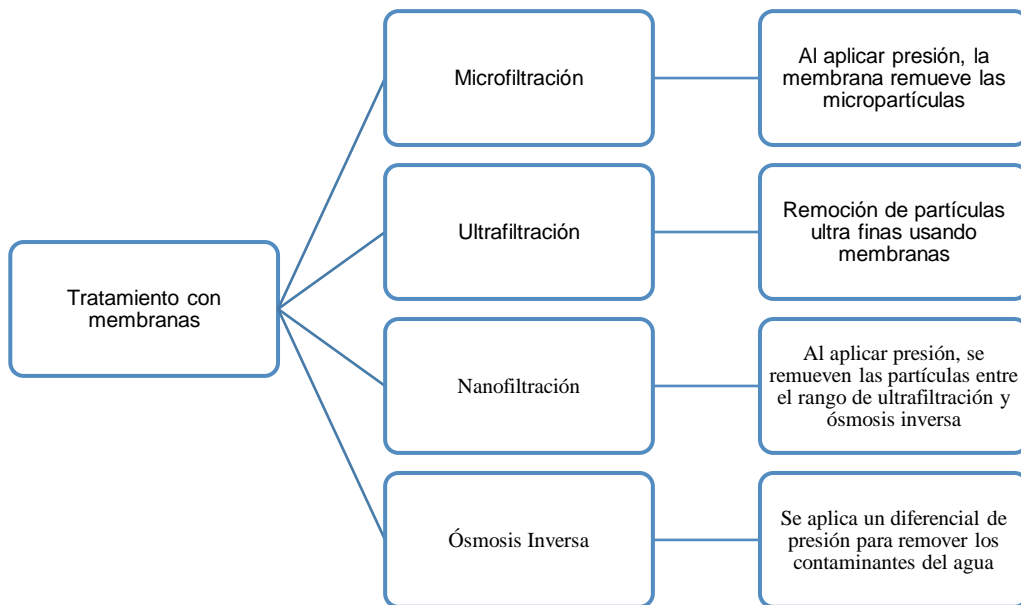


TABLA 8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS PARA LOS PROCESOS CON MEMBRANAS APLICABLES AL AGUA

Remoción de sales		
Tecnología	Ventajas	Desventajas
Microfiltración	-Módulos compactos -Alta recuperación de agua	-Disminuye su eficiencia para sales mono y divalentes -Requiere gran cantidad de energía
Ultrafiltración	-Disminución de virus y materia orgánica	-Gran cantidad de energía -Ensuciamiento en membrana
Nanofiltración	-Remoción de compuestos orgánicos con bajos pesos moleculares además de dureza	-Alto requerimiento energético -Ensuciamiento en la membrana
Ósmosis inversa	-Remueve sales monovalentes y contaminantes disueltos	-Pequeñas trazas de grasas y aceites provocan ensuciamiento

7. Ablandamiento. Remoción del exceso de dureza en el agua.
8. Ajuste en la Velocidad de adsorción de sodio (SAR). Parámetro de interés para agua destinada a irrigación. La permeabilidad del suelo depende de las concentraciones de calcio, magnesio y sodio, debe controlarse la concentración del último para evitar pérdida de permeabilidad.

8.1 Ajusta SAR

Descripción: Se adicionan iones Calcio y Magnesio al agua cuando la relación de concentración de sodio es alta.

Ventajas: Opción barata.

Desventajas: Adición de químicos.

9. Misceláneos. Remoción de materiales radiactivos de origen natural (NORM)

9.1 Tratamiento NORM

Descripción: Extracción de material radioactivo usando soluciones acuosas.

Ventajas: Proceso eficiente para reducir el volumen de residuos radioactivos.

Desventajas: La materia extraída necesita de tratamiento futuro.

DUREZA

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. Las principales especies que contribuyen a la dureza se listan en la **Tabla 9**.

Resulta de la disolución de minerales en las formaciones geológicas con calcio y magnesio, en los que la calcita (CaCO_3) y dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] son los más comunes. El proceso natural para la formación de dureza es el siguiente:

- El agua pluvial se filtra por el suelo; los microorganismos presentes, por medio de la respiración, incrementan el contenido de dióxido de carbono (CO_2) en el agua.
- El dióxido reacciona con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3) el cual reacciona con la calcita y dolomita para generar bicarbonato de calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] y de magnesio [$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$]; estos dos compuestos resultan muy solubles en agua, aumentando la concentración de calcio y magnesio (Davis, 2010).

La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías, lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. El término de dureza se aplicó en principio para representar al agua en la que era difícil (duro) lavar y se refiere al consumo de jabón para lavado, en la mayoría de las aguas alcalinas esta necesidad de consumo de jabón está directamente relacionada con el contenido de calcio y magnesio. (Secretaría de Economía, 2001)

TABLA 9. PRINCIPALES ESPECIES CAUSANTES DE DUREZA

Cationes	Aniones
Calcio (Ca^{2+})	Bicarbonato (HCO_3^-)
Magnesio (Mg^{2+})	Sulfato (SO_4^{2-})
Estroncio (Sr^{2+})	Cloruro (Cl^-)
Hierro (Fe^{2+})	Nitrato (NO_3^-)
Manganeso (Mn^{2+})	Silicato (SiO_3^{2-})

FUENTE: SAWYER, 1967

Para su estudio, existen dos tipos de dureza, el tipo de tratamiento a aplicar estará en función del objetivo de remoción de agentes incrustantes y/o la regulación ambiental aplicable.

DUREZA PERMANENTE¹

¹ Conocida ocasionalmente como Dureza de no Carbonatos.

Este tipo de dureza se atribuye a todas las sales de, principalmente, calcio y magnesio; a excepción de los carbonatos y bicarbonatos (considerados en la dureza temporal). A diferencia de la dureza de carbonatos, no puede removerse calentando la muestra de agua.

DUREZA TEMPORAL ²

Es la dureza proveniente del contenido de carbonatos y bicarbonatos, principalmente, de calcio y magnesio. Puede eliminarse al hervir el agua, para después filtrar los precipitados formados. Está relacionada con la alcalinidad.

La clasificación internacional para el agua de acuerdo a su dureza, en concentración de carbonato de calcio, se presenta en la **Tabla 10**.

TABLA 10. CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN SU DUREZA.

Dureza medida como Carbonato de Calcio (CaCO₃)	
Concentración(mg/L)	Clasificación
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente Dura
120-180	Dura
>180	Muy Dura

FUENTE: UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS)

El control del índice de dureza en el agua resulta fundamental para evitar dos casos:

- 1) Concentraciones elevadas: Es latente la posibilidad de incrustaciones en tuberías, calentadores, torres de enfriamiento e intercambiadores de calor.
- 2) Concentraciones bajas (30< mgCaCO₃/L): Eliminar completamente la dureza no resulta necesario e implicaría en todo caso un gasto de recursos innecesario.

PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

El proceso es empleado, mayoritariamente como tratamiento previo, con el objetivo de eliminar los coloides en la muestra los cuales tienen la capacidad de pasar por medios filtrantes y son los responsables de gran parte de la turbiedad y color del fluido, por lo que se vuelve necesaria su remoción.

Los agentes químicos con posibilidad de utilizarse en el proceso se clasifican como:

- Coagulantes: Compuestos de hierro y aluminio, producen hidróxidos no solubles que absorben las impurezas del agua.

² También conocida como Dureza de Carbonatos.

- Alcalinizantes: Se puede utilizar óxido de calcio, hidróxido de calcio, hidróxido de sodio o carbonato de sodio; la naturaleza de las sustancias confiere a la muestra un pH básico.
- Coadyuvantes: Se usan arcillas, sílice o polielectrolitos para formar flóculos más firmes.

La coagulación tiene como objetivo desestabilizar las partículas en suspensión con lo que se facilita su aglomeración; para ello se inyectan distintos reactivos. El proceso se caracteriza por una agitación rápida en la que se emplea Policloruro de Aluminio como agente coagulante.

En cuanto a la floculación, tiene como objetivo el promover, mediante agitación lenta, la unión de las partículas previamente desestabilizadas; el resultado es un floculo fácilmente separable por decantación.

La naturaleza de los flóculos formados depende del coagulante empleado, constituyendo la mayor proporción del “lodo” en forma del hidróxido del metal del coagulante.

El proceso puede remover hasta el 95% de los sólidos suspendidos además de alrededor del 50% de los compuestos orgánicos solubles y los metales pesados presentes (Coker, 2007).

PROCESO DE ABLANDAMIENTO QUÍMICO

Se le denomina Ablandamiento al proceso destinado a reducir las concentraciones de calcio y magnesio, siendo las sales de estos iones las que mayores implicaciones conllevan en la incrustación en los equipos de proceso. (Arndt, 1978)

- Ablandamiento Químico: Consiste en la adición de compuestos al agua, los cuales reaccionan con los iones calcio y magnesio presentes en el medio; se forman sustancias insolubles, facilitando su separación mediante procesos físicos (decantación y filtración). Mediante este proceso resulta imposible remover totalmente la dureza pues los precipitados son ligeramente solubles al agua y cierta cantidad de dureza se quedan en ella (50-85 mgCaCO₃/L).

Un proceso de ablandamiento típico incluye un tanque de mezclado rápido, floculación, sedimentación, carbonatación y filtración. En algunos casos se aplica un pretratamiento por aeración y presedimentación. La aeración es empleada para influentes con grandes concentraciones de dióxido de carbono mientras que la presedimentación se utiliza con muestras con grandes cantidades de material turbio.

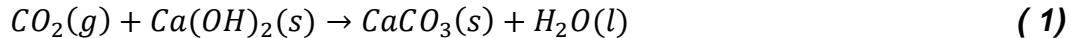
Con la precipitación química se consigue al elevar el valor de pH del agua, provocando la precipitación principalmente de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio. Junto con la disminución de dureza, también se consiguen reducciones de arsénico, compuestos orgánicos disueltos, color y contaminantes microbianos.

El parámetro de mayor importancia a controlar en el proceso es el pH; al precipitar carbonato de calcio el pH aumenta hasta 10, mientras que el precipitar hidróxido de magnesio el pH del medio aumenta hasta más de 11. La remoción de arsénico incrementa a pH mayor de 10.5, también se sabe que a mayor pH mayor es la remoción del Carbono Orgánico Total (COT) y color.

En su mayoría, se suelen aplicar tres vertientes para el proceso, la selección de algún método se encuentra en función del costo, la calidad de agua requerida, así como de las preferencias del usuario final. (Palmer,1978)

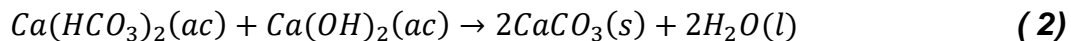
Hidróxido de Calcio

Es aplicado para eliminar únicamente dureza temporal; debe añadirse la cantidad necesaria de reactivo con el fin de alcanzar un pH de, por lo menos, 10.8 en el cual se presentan las siguientes reacciones:



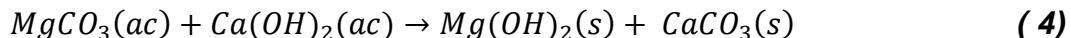
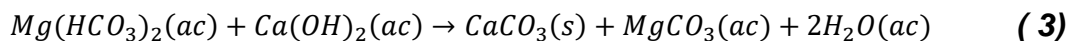
Neutralización de ácido carbónico (H₂CO₃)

Para elevar el pH, el ácido carbónico se neutraliza con cal; no hay remoción de dureza en esta reacción.



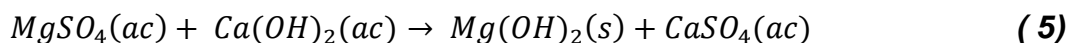
Precipitación de dureza de carbonatos debido al calcio

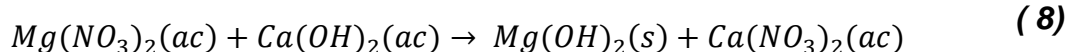
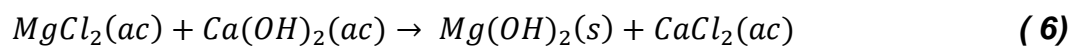
Todos los bicarbonatos de calcio son convertidos a carbonatos, con el objetivo de precipitar el calcio en forma de carbonato de calcio.



Precipitación de dureza de carbonatos debido al magnesio

Se añade cal en exceso para remover la dureza de carbonatos magnésicos. La reacción ocurre en 2 etapas (3) y (4).





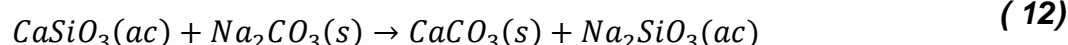
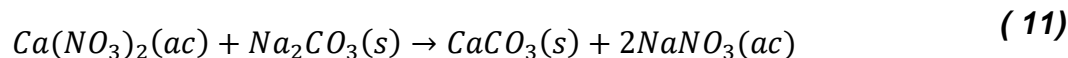
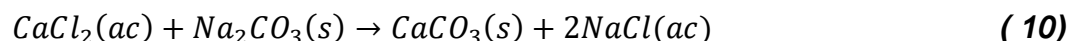
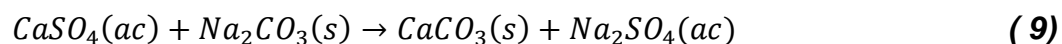
Remoción de dureza de no carbonatos debido al magnesio

El hidróxido de calcio provee los iones hidroxilo (OH⁻) necesarios para precipitar al magnesio. Esto aplica para (5), (6), (7) y (8).

Debido a la solubilidad del hidróxido de calcio en agua (consultar Anexo C), 17 mg/L como CaCO₃ permanecerán en solución aportando a la cantidad de dureza.

HIDRÓXIDO DE CALCIO Y CARBONATO DE SODIO. (PROCESO CAL-SODA)

El añadir carbonato de sodio (Na₂CO₃) se vuelve necesario cuando es de interés el también disminuir la cantidad de dureza permanente del agua; el pH aumenta aún más (>11), ocurren 4 reacciones adicionales:



Remoción de dureza de no carbonatos debido al calcio

Para los compuestos de calcio generados en las reacciones (5)-(8) se agrega carbonato de sodio precipitando el calcio en forma de Carbonato de Calcio.

Resulta imposible obtener un efluente libre de dureza añadiendo ambos reactivos, en el caso del bicarbonato de sodio resultan 9 mg/L como CaCO₃, en forma de dureza. Por lo tanto, la menor dureza obtenible con el proceso Cal-Soda resulta de 26 mg/L.

Con el proceso de ablandamiento, con carbonato de sodio e hidróxido de calcio, también se presentan remociones en otros parámetros.

Arsénico

Se pueden conseguir remociones de entre el 60%-90%, dependiendo del estado de oxidación del arsénico presente en el agua.

Hierro y Manganeso

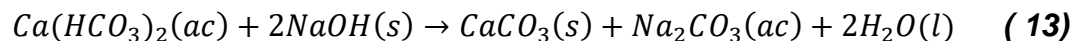
Para procesos de ablandamiento que produzcan efluentes con un pH mayor a 9.8, se dan remociones de hasta el 100% para el hierro y manganeso.

Materia Orgánica

- Con la precipitación de carbonato de calcio se remueven entre el 10%-30% del color y Carbono Orgánico Total (COT).
- La precipitación de hidróxido de magnesio genera una disminución de entre el 30%-60% del Carbono Orgánico Total y 50%-80% del color.

HIDRÓXIDO DE SODIO

El añadir sosa al agua resulta una vertiente posible; la reacción que ocurre es:



El proceso resulta más caro que el tratamiento cal-soda, aunque se obtiene menor generación de precipitado (lodos).

PRECIPITADOS

Los precipitados, o también llamados lodos, se generan en cualquier de las tres alternativas de ablandamiento químico. Su naturaleza depende de los reactivos elegidos pudiendo ser, en su mayoría, Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) e Hidróxido de Magnesio ($Mg(OH)_2$).

Mientras que la cantidad generada depende de la dureza inicial del agua, su tratamiento puede ser muy costoso elevando así el costo global del proceso; para tratar de reducir la cantidad a tratar se emplea como práctica común recircular cierta cantidad de precipitado y así disminuir la cantidad de reactivo a alimentar.

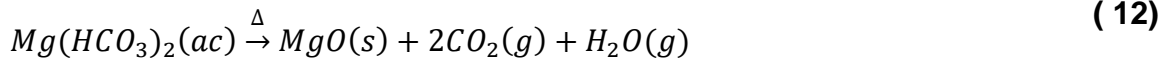
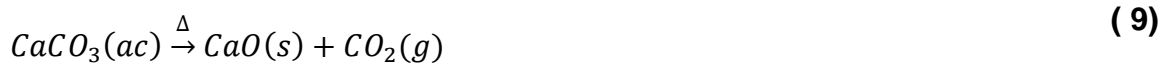
La disposición de los lodos suele ser:

- Rellenos sanitarios.

- Lagunas de secado.
- Aplicación a rellenos de suelo.
- Calcinación

Respecto al último punto, representa un método efectivo para agregar valor a los mismos. El proceso consiste en concentrar el lodo por centrifugación, por lo menos, 60% de sólidos para después someterlos a una temperatura de 1093°C; en la cual el carbonato de calcio e hidróxido de magnesio se convierten a óxidos; con lo que puede obtenerse el Hidróxido de Calcio que se ocupa para las reacciones de ablandamiento. (Palmer,1978)

A continuación, se presentan las reacciones que se llevan a cabo al calcinar:



Como resultado del proceso también se obtiene el dióxido de carbono empleado para estabilizar el agua.

ECUALIZACIÓN DE FLUJO Y NEUTRALIZACIÓN

La ecualización de flujo y la neutralización química son dos componentes importantes en el manejo del tratamiento de agua. Previene grandes variaciones en el flujo y calidad de agua. Por otro lado, la neutralización química se encamina a balancear el exceso de acidez o alcalinidad en el agua, para ello se ajusta el pH de la muestra hasta valores que convengan con el tratamiento empleado o disposición final.

ECUALIZACIÓN DE FLUJO

Es recomendable contar con tanques mezcladores que homogenicen la muestra antes de entrar a los sistemas de tratamiento, con el fin de minimizar posibles cambios en la composición del influente (Ramesh et al., 2005).

NEUTRALIZACIÓN

Debido a que muchos tratamientos químicos, tales como precipitación de fósforo, metales, coagulación y ablandamiento químico son dependientes del pH se vuelve necesario ajustarlo con el fin de obtener la mejor eficiencia posible en el proceso.

Además, por cuestiones ambientales, la descarga de agua en materia de pH sólo podrá darse con efluentes con un pH de entre 5-9 (USEPA, 2005).

Para tales efectos, la neutralización se emplea al añadir ácidos o bases en función de lo requerido.

PRÁCTICAS DE NEUTRALIZACIÓN

NEUTRALIZACIÓN DE ACIDEZ

Las siguientes son acciones comunes de tratamiento: (Ramesh,2005)

- 1) Mezclar desechos alcalinos y ácidos para neutralizarse entre sí.
- 2) Pasar el agua ácida a través de una cama de piedra caliza.
- 3) Mezclar el agua con lodos de cal.
- 4) Añadir sosa cáustica (NaOH) o carbonato de sodio (Na_2CO_3).

NEUTRALIZACIÓN DE ALCALINIDAD

Cuando el pH del agua resulta mayor a 10 debe disminuirse con el fin de ajustarse a la normatividad (pH 5-9). Las prácticas más comunes para disminuir el pH son:

- 1) Carbonatación
- 2) Agregar ácido, los más usados son: ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO_3).

ABLANDAMIENTO Y NEUTRALIZACIÓN

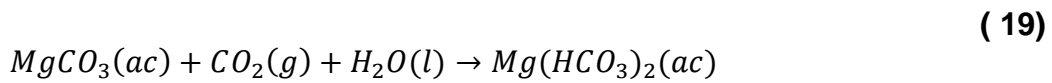
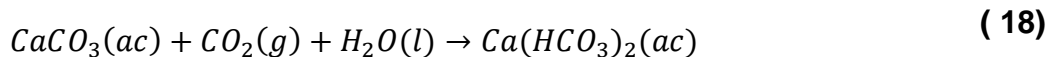
El agua ablandada usualmente tiene pH mayor a 10.5; para su uso futuro se aplica la neutralización añadiendo ácido como medida más económica.

ESTABILIZACIÓN

Una vez que el agua ha sido ablandada y sedimentada, debe estabilizarse para prevenir incrustación en los sistemas de distribución. A pesar de que la mayoría de las partículas de carbonato de calcio se sedimentan rápidamente, cierta cantidad permanece en suspensión por lo que quedará remanente una porción de dureza con la posibilidad de precipitar con el tiempo.

Lo anterior implica que, en una operación convencional de ablandamiento, el efluente causará problemas de incrustación a menos de que se tomen medidas para acelerar la completitud de la reacción y la estabilización del agua; para lo cual se encuentran a disposición 5 métodos auxiliares en la estabilización.

1. **Largo tiempo de reacción.** A mayor tiempo de reacción, más cantidad de precipitado se forma; el método requiere de tanques de mezclado y contenedores de grandes dimensiones.
2. **Carbonatación.** La conversión de carbonatos a bicarbonatos se favorece al añadir dióxido de carbono (CO₂) al agua. Su adición solubiliza una mayor porción de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio disminuyendo la alcalinidad y estabilizando el agua. En contraparte, se introduce cierta cantidad de dureza al agua. Sin embargo, con un adecuado control del pH, el aumento puede ser minimizado. Las reacciones que ocurren en el proceso son las siguientes:



La reacción (18) es posible al agregar dióxido de carbono, con una primera dosis el pH disminuye hasta 10-10.5. Mientras que para conseguir la segunda reacción (19), debe agregarse mayor cantidad resultando en un agua con un pH final entre 8.4-8.6.

3. **Adición de agua cruda.** Sólo es recomendable cuando el agua contenga alto contenido de dióxido de carbono y sin bacterias peligrosas; sin embargo, la cantidad a agregar debe monitorearse detalladamente debido a que resulta disminuida la remoción de turbidez, así como el efecto del hidróxido de calcio al matar las bacterias contenidas en el agua.
4. **Adición de Bicarbonato de Sodio.** En caso de no contar con dióxido de carbono, el pH puede ser disminuido al adicionar bicarbonato de sodio.
5. **Filtración con arena.** Los filtros con arena ayudan a disminuir la turbidez del agua, para ello resulta fundamental revisar continuamente el sistema de filtración ya que los granos de arena pueden incrustarse de precipitados provenientes del ablandamiento, generando taponamientos.

MARCO NORMATIVO APLICABLE

En México, se cuenta con dos normas que regulan las características del agua congénita y son de carácter obligatorio en todo el país; éstas son:

NOM-AA-143-SEMARNAT-2003

Establece los límites máximos permisibles (**Tabla 11**) para la descarga de agua congénita a cuerpos de agua, así como la metodología de manejo para su posible reinyección a pozos petroleros.

TABLA 11. LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA NORMA 143

Parámetro	LMP (mg/L)	
	Agua Dulce	Aguas costeras y marinas
Hidrocarburos	15	40
Sólidos disueltos totales	500	32,000

NOM-AA-001-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles (**Tabla 12**) de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.

TABLA 12. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CIERTOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN LA NORMA

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos						
Parámetro (mg/L)	Ríos			Aguas costeras		
	Uso en riego	Uso público urbano	Protección de vida acuática	Explotación pesquera y navegación	Recreación	Estuarios
Temperatura (°C)	N/A	40	40	40	40	40
Grasas y aceites	15	15	15	15	15	15
Sólidos Suspendidos Totales	150	75	40	150	75	75
Arsénico	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
Cadmio	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
Cobre	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Plomo	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2
Zinc	10	10	10	10	10	10

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.

Para la caracterización del agua congénita se realizaron 10 determinaciones (**Anexo A**) con los parámetros más importantes según lo dicta el efluente; éstas son:

1. Determinación de pH; (NMX-AA-008-SCFI-2011)

La regulación del pH del agua congénita resulta importante para evitar el deterioro de los organismos acuáticos en caso de disponerla a un cuerpo de agua; a su vez, su control es crucial para el óptimo funcionamiento de los procesos de tratamiento de agua (Desmineralización, Ablandamiento, Coagulación-Floculación; etc....).

Existen dos tipos de métodos para su medición, los colorimétricos y los electrométricos, siendo estos últimos los más precisos.

2. Determinación de Temperatura; (NMX-AA-007-SCFI-2000)

Las temperaturas elevadas son un indicativo de la actividad biológica, física y química de una muestra de agua, a su vez, la descarga de efluentes a altas temperaturas afecta los ecosistemas marinos y la vida en ellos; por lo que se vuelve necesario su control en la descarga.

3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno, DQO; (NMX-AA-030-SCFI-2001)

La medición de la Demanda Química de Oxígeno es un indicativo de la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada por un oxidante fuerte, la prueba se basa en el empleo de dicromato de potasio para oxidar la muestra, el consumo de dicromato se cuantifica espectrofotométricamente obteniendo la cantidad de materia oxidada. Tiene como función representar un indicativo de la calidad del agua.

4. Determinación de Sólidos Disueltos; (NMX-AA-034-SCFI-2001)

Debido a que el agua no puede utilizarse directamente por la industria, dado el potencial peligro de taponamiento en equipos o líneas de tubería, así como la reducción de penetración de luz en el mar, interfiriendo con la vida de plantas acuáticas; se vuelve necesario determinar la cantidad de sólidos totales y suspendidos en una muestra. Su medición consiste en un método gravimétrico al que se somete cierto volumen de muestra, tras ser evaporada y calcinada.

5. Determinación de Alcalinidad; (NMX-AA-036-SCFI-2001)

La alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ion hidroxilo (OH⁻), como son las bases

fuertes, y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; contribuyen también en forma importante a la alcalinidad los carbonatos y fosfatos.

La prueba es un método volumétrico, en el que se cuantifica el volumen de ácido clorhídrico (0.1 N) empleado para llevar a la muestra hasta un pH de 4.5.

6. Determinación de Dureza Total; (NMX-AA-072-SCFI-2001)

El método consiste en una titulación, en la cual se utiliza como titulante a una disolución de sal sódica del ácido etilen-diamino-tetra-acético (EDTA), la cual forma compuestos complejos con el calcio y magnesio presente en el medio usando negro de eriocromo como indicador; se presenta cambio de coloración de rosado a azul conforme se añade el titulante.

7. Determinación de Cloruros Totales; (NMX-AA-073-SCFI-2001)

Sí bien cierta concentración de cloruros es deseable en el agua, altos contenidos de ellos representan daños en estructuras metálicas e impiden el crecimiento de plantas, con lo que se vuelve necesaria su regulación. La corrosión del medio aumenta al aumentar la concentración del ion.

8. Determinación de Grasas y Aceites; (NMX-AA-005-SCFI-2000)

El método se basa en la capacidad de las grasas, aceites, ácidos grasos, hidrocarburos, ceras y jabones de disolverse en hexano, en medio ácido; es una determinación gravimétrica con la cual se adquiere una noción del grado de contaminación del agua residual.

9. Determinación de Sulfatos; (NMX-AA-074-1981)

Los sulfatos presentes en el agua provienen de rocas sedimentarias, yeso y anhidrita. Cuando la concentración del ion sulfato es alta le confiere al agua propiedades corrosivas.

Se emplea un método turbidimétrico, en el que, por medio de un turbidímetro, se lee el grado de suspensión del ion sulfato cuando es precipitado por cloruro de bario en medio ácido.

10. Determinación de Conductividad; (NMX-AA-SCFI-2000)

La medición de la conductividad permite tener cierto grado de conocimiento de la cantidad de minerales presentes en la muestra, dependiendo del destino del agua, serán distintos los límites permisibles para su uso.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP)

En las normas previamente descritas se establecen los valores sujetos del cumplimiento para cualquier cuerpo de agua. A pesar de que no todos los parámetros fueron determinados se presentan con carácter informativo en la **Tabla 13**. Cabe mencionar que algunos valores de parámetros dependen de la aplicación final que tenga el agua.

TABLA 13. VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA AGUA CONGÉNITA

Parámetro	Unidades	LMP
pH		5-9
Grasas y Aceites	mg/L	35
Sulfatos	mg/L	250
Cloruros	mg/L	250
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	30
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	32,000
Temperatura	°C	40
Sólidos Suspendidos	mg/L	1

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO

El agua congénita a tratar proviene del pozo PR-167, localizado en el municipio de Poza Rica, Veracruz. Se dispone del agua una vez ya desengrasada y sin aceite, por lo cual el tratamiento para remover estos parámetros no se encuentra descrito en la presente sección.

Con motivo de trabajos de tesis anteriores, se emplea el proceso de coagulación-floculación como tratamiento previo del agua con miras a disminuir la turbidez y demanda química de oxígeno. El siguiente tratamiento propuesto consiste en la aplicación del ablandamiento químico para disminuir la cantidad de sales incrustantes, así como remoción de metales pesados.

SISTEMA DE PRETRATAMIENTO. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Con la remoción de grasas y aceites el agua se encuentra lista para su procesamiento. Se agita vigorosamente el bidón con agua, con el fin de homogenizar lo máximo posible la muestra, entonces se colecta un volumen de 10 litros de agua; es preciso calentar la muestra a temperatura ambiente acompañado de agitación.

Para realizar el proceso de Coagulación-Floculación se utilizaron 10 L de agua congénita, esta prueba se llevó a cabo en un equipo conocido como “prueba de jarras” (**Figura 1**); el cual consiste, básicamente, en 6 vasos de precipitados con su correspondiente agitador mecánico, el equipo viene integrado con una serie de luces colocadas debajo de los vasos con el fin de poder apreciar de mejor forma la sedimentación de los lodos generados durante el tratamiento. El procedimiento que se siguió durante la prueba es la siguiente:

1. Llenar cada vaso con 700 mL de agua congénita, previamente llevada a temperatura ambiente.
2. Agregar 1.5 mL de Policloruro de Aluminio (al 25 % V/V), PCA; tratar de añadir consecutivamente a cada vaso.
3. Accionar el equipo, la muestra pasa por una agitación rápida (150 RPM por 3 minutos) y una lenta (25 RPM por 25 minutos).
4. Dejar sedimentar por dos horas.
5. Decantar el agua tratada y, en caso de postergar su análisis, conservarla en contenedores de vidrio a 4°C; en caso contrario comenzar a caracterizar pH, Conductividad, Alcalinidad y Dureza, de ser posible.
6. El volumen de lodos producidos se deja sedimentar para su posterior disposición.
7. Desmontar las aspas de los agitadores, lavar bien (se aconseja lijarlas después). Apagar el equipo.



FIGURA 1. EQUIPO PARA REALIZAR EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.

Como resultado del proceso por cada 4.2 L de agua congénita se obtiene un aproximado de 1.2 L de precipitado, para un total global de 7 litros de agua tratada y 3 litros de lodos.

La cantidad de precipitado resulta menor que la reportada previamente ya que, con el paso de los días, el agua remanente se sedimenta; pero por cuestiones de tiempo se colecta de forma inmediata.

Para el ablandamiento químico sólo se dispone de 6 litros de agua tratada ya que uno se requiere para caracterizar la muestra.

Con el objetivo de poder comparar el funcionamiento de la forma de operación, se realizó el proceso de ablandamiento por lotes y en continuo.

ABLANDAMIENTO QUÍMICO. PROCESO CAL-SODA, POR LOTES

El agua coagulada debe estar a temperatura ambiente, para realizar este proceso se tiene un contenedor de 4 L; de éste se bombea el líquido hacia el sistema de tratamiento; el sistema consta de tres tanques con capacidad máxima de 4 L cada uno (**Figura 2**); su función es:

- Tanque 1: Reactor químico, en el que se lleva a cabo la reacción de los agentes incrustantes con el hidróxido de calcio y el carbonato de sodio, la agitación se realiza con aire, dando un tiempo de 1 hora de reacción; cuando el tanque se vacía, se llena el tanque con los 2 L de agua sobrantes. El agua pasa, por medio de una bomba, hacia el sedimentador.
- Tanque 2: Sedimentador, se deja reposar la mezcla por un período de 2 horas, se toma el sobrenadante para llevarlo al tercer tanque utilizando otra bomba.
- Tanque 3: Filtro, conformado por una capa de arena equivalente a 2 litros, el tanque cuenta con un orificio en la parte inferior y es aquí donde se obtiene el agua congénita tratada para su posterior análisis.

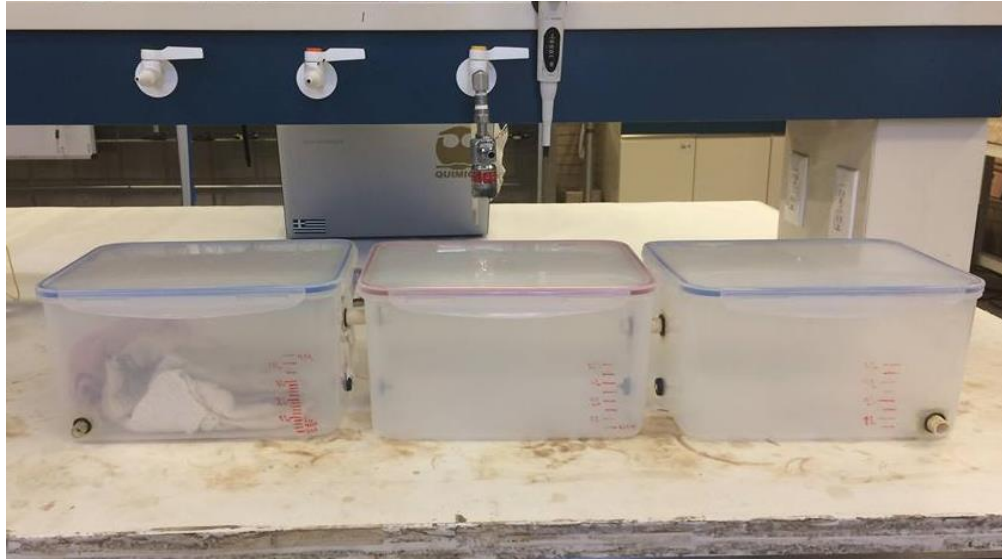


FIGURA 2. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE ABLANDAMIENTO QUÍMICO

La formación de lodos es mayor de 1.5 L, dando como resultado una cantidad aproximada de 4.5 litros de agua ablandada.

ABLANDAMIENTO QUÍMICO. PROCESO CAL-SODA, CONTINUO.

El sistema propuesto presenta las características citadas en la **Tabla 14** las cuales fueron establecidas bajo los criterios de diseño generales empleados en el proceso, con base en las recomendaciones bibliográficas.

Elección de mangueras: el diámetro se seleccionó de acuerdo a las bombas ya disponibles en el laboratorio y su correspondiente cabezal, determinando utilizar manguera con tubing 14 (DI. 0.5 cm).

Espesor de los equipos: se determinó emplear el espesor comercial para el acrílico disponible, 0.6 cm; debido a que en el proceso no se requiere de grandes presiones se cree que este espesor será suficiente para resistir todo tipo de cargas en el rango de operación establecido.

Material de contenedores: Los tanques de distribución de agua congénita, de agua residual tratada y para recolección de lodos están hechos de polietileno evitando así futuras incrustaciones severas.

TABLA 14. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS PARA LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO UTILIZADA

Equipo	TAG	Capacidad
Tanque distribuidor	TA-001	10 L
Reactor químico	R-001	7 L
Sedimentador	TA-002	4 L
Tanque receptor de lodos	TA-003	2 L
Filtro de arena y carbón activado	F-001	1 L
Tanque receptor	TA-004	5 L

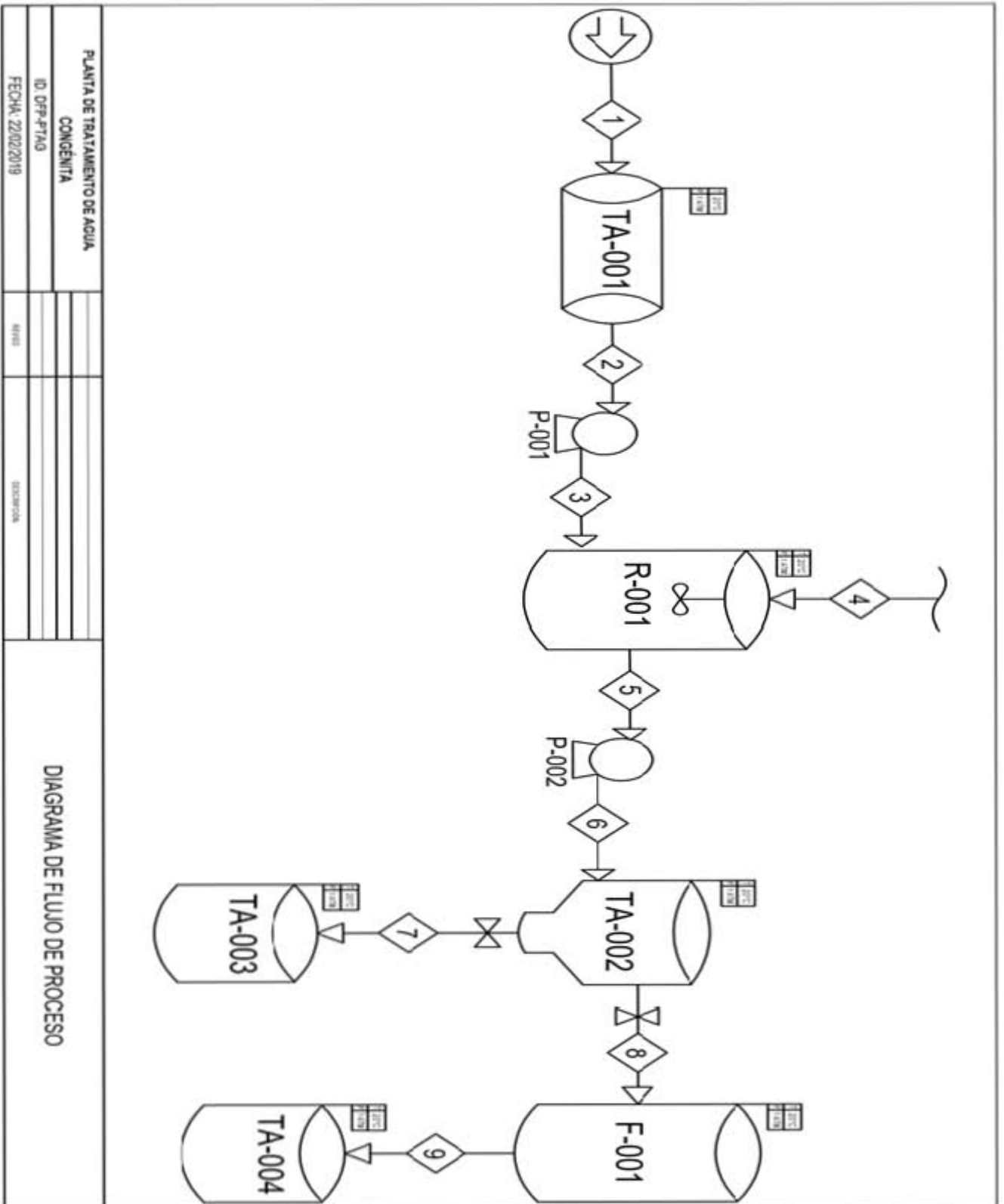
Además, se cuenta con sistemas reguladores de flujo de líquido, tales como:

- 2 bombas Peristálticas MASTERFLEX® L/S con un rango de bombeo desde 0.0006 mL/min hasta 3400 mL/min; P-001 y P-002.
- 3 válvulas de control de flujo normalmente cerradas; VA-001, VA-002 y VA-003.

Para el sistema de conexión entre equipos se realiza utilizando mangueras de silicón con tubing (DI) de 14, necesario para que el cabezal de la bomba pueda bombear el líquido.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de proceso propuesto para la disminución de dureza en agua congénita.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA	
CONGÉNITA	
ID. DEP. PTA.0	
FECHA: 22/02/2019	
REVIS	
REVISIÓN	

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El proceso está diseñado para procesar 7 litros de agua congénita cada 12 horas, tras un pretratamiento de floculación-coagulación, el tanque TA-001 alimenta al reactor, en el cual, por cada litro de agua alimentada se agregan los reactivos, carbonato de sodio (Na_2CO_3) e hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$] con base en los métodos de cálculo expresados en el **Anexo D**.

La mezcla de reacción se agita por dos medios, con el uso de una parrilla de agitación y por medio de aire usando una pipeta volumétrica; se deja agitar por 30 minutos para después activar la bomba P-001 a una velocidad de 26 RPM; en ese tiempo y a esas revoluciones, 1 litro de agua pasa del tanque mezclador al sedimentador, TA-002.

Se deja sedimentar por 2 horas cada litro de agua que entra, llegado el tiempo se abre la válvula VA-002 con el objetivo de expulsar los precipitados formados hasta el momento, también se abre la válvula VA-003 permitiendo el paso del agua hacia el filtro de arena, F-001.

El filtro está conformado por capas de arena gruesa y carbón activado, el agua pasa a través del contenedor para, finalmente, llegar al tanque TA-004 para su análisis correspondiente.

En la **Figura 3**, se muestra el montaje del proceso anteriormente descrito.



FIGURA 3. MONTAJE PARA EL PROCESO DE ABLANDAMIENTO QUÍMICO PARA AGUA CONGÉNITA.

Reactor, R-001

En la **Tabla 15** Se presentan los datos de diseño que se utilizaron para la construcción del reactor químico. En la literatura se recomienda una relación de longitud-diámetro con valores entre 1.5 a 5. La geometría juega un papel importante en la eficiencia del mezclado. Por regla general, los tanques circulares son más eficientes al alcanzar un mayor grado de mezclado en comparación con los tanques rectangulares. Para tanques circulares, una profundidad de líquido igual al diámetro del tanque es lo usualmente empleado. (Davis,2010)

TABLA 15. DATOS DE DISEÑO PARA EL REACTOR, R-001

Parámetro	Simbología	Unidades	R-001
Presión	P	atm	0.7
Temperatura	T	°C	25
Volumen	V	m ³	0.008
Diámetro	D	m	0.140
Longitud	L	m	0.517
Material			Acrílico
Espesor	t	m	0.006
Tiempo de residencia	τ	min	30
Caudal	Q	mL/min	133.33
Longitud/Diámetro	L/D		3.693
	Condición	1.5-5	Aceptable

Davis (2010) recomienda tiempos de agitación-reacción no menores a 30 minutos, para evitar acumulación en el tanque al trabajar en forma continua, se asignó un lapso de 45 minutos para agitar cada litro de agua que ingresa al recipiente.

El diseño final para el reactor, así como los principales parámetros a considerar se muestran en la **Figura 4**.



FIGURA 4. REACTOR QUÍMICO, R-001

Tanque Sedimentador, TA-002

El proceso tiene como fundamento la deposición del material en suspensión por acción de la gravedad. La remoción de materia en suspensión se obtiene al reducir la velocidad de flujo del agua, hasta lograr que las partículas se depositen en el fondo del recipiente. Después de que los sólidos se asienten, el efluente sedimentado debe ser colectado sin crear corrientes hidráulicas que pueden afectar el proceso.

Usualmente se diseñan para tener un tiempo de residencia de 2 horas. Se debe tener cuidado en que el tiempo de sedimentación no resulte demasiado largo ya que los sólidos se compactarán y resultará difícil colectarlos. Para el diseño del tanque se consideró fuera de 4 áreas o zonas:

- a) Zona de entrada: permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador.
- b) Zona de salida: Constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.
- c) Zona de sedimentación: canal cilíndrico con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas.
- d) Zona de lodos: Constituida por una sección cónica con capacidad para depositar los lodos con una tubería y válvula para su evacuación periódica.

Para establecer los factores de diseño, Davis (2010), recomienda las siguientes relaciones para el diseño de un sedimentador circular.

Relación Largo-Diámetro (L/D): 5:1

Velocidad del fluido: 0.005-0.018 m/s

Número de Reynolds, Re: <20,000

Número de Froude, $Fr > 10^{-5}$

Tiempo de retención (horas): 2 a 6

La descarga de lodos se debe ubicar en el primer tercio de la unidad, pues el 80% del volumen de los lodos se deposita en esa zona.

Los datos de diseño del sedimentador se muestran en la **Tabla 16** y en la **Figura 5** se puede observar el diagrama del sedimentador utilizado.



FIGURA 5. SEDIMENTADOR TA-002

TABLA 16. DATOS DE DISEÑO PARA EL SEDIMENTADOR, TA-002

Parámetro	Simbología	Unidades	TA-002
Presión	P	atm	1
Temperatura	T	°C	25
Volumen	V	m ³	0.005
Diámetro	D	m	0.140
Longitud	L	m	0.309
Material			Acrílico
Espesor	t	m	0.006
Tiempo de residencia	τ	min	120
Caudal	Q	mL/min	22.222
Longitud/Diámetro	L/D		2.20
	Condición	1.5-5	Aceptable

Tanto el número de Froude como el de Reynolds no se calcularon debido a que no cumplen con el valor recomendado por la bibliografía para la operación de un sedimentador, debido al pequeño flujo y la velocidad del mismo con la que se opera.

Filtro, F-001

Para el sistema de filtración se utilizó un contenedor disponible en el laboratorio, por lo que no fue posible diseñarlo bajo los parámetros aconsejables en la literatura; no obstante, se encuentra conformado por los materiales óptimos para la remoción de materia en suspensión, arena y carbón activado. Las características del filtro se muestran en la **Tabla 17**.

TABLA 17. DATOS DE DISEÑO PARA EL FILTRO, F-001

Parámetro	Simbología	Unidades	F-001
Presión	P	atm	1
Temperatura	T	°C	25
Volumen	V	m ³	0.001
Diámetro	D	m	0.081
Longitud	L	m	0.309
Material			Polietileno
Espesor	t	m	0.006
Caudal	Q	mL/min	22.222

Longitud/Diámetro	L/D		3.049
	Condición	1.5-5	Aceptable

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de tratamiento se realizó con cuatro modificaciones:

1. Comparativo del proceso por lotes y proceso en continuo. Para ello se empleó el agua congénita con ID M671-5.
2. Proceso de ablandamiento químico en continuo. Se añade la cantidad de reactivo utilizando el primer método de cálculo mostrado en el **Anexo D**, se utilizó al agua con ID M671-6.
3. Efecto del proceso de coagulación como pretratamiento. Se realizaron 2 corridas con las muestras: M671-6-A y M671-6-B.
4. Efecto de la dosis de reactivo en el ablandamiento químico. Usando el segundo método de cálculo del **Anexo D** para la muestra de agua M821-7.

CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS

CARACTERIZACIÓN M671-5

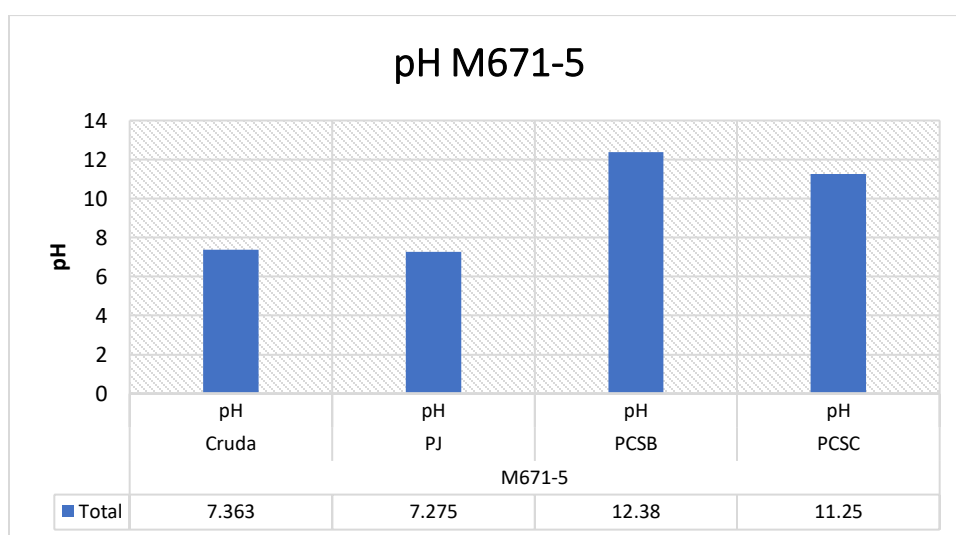
En la **Tabla 18**, se presentan los resultados para la caracterización de la muestra de agua congénita en su estado cruda, por el tratamiento de Coagulación-Floculación (CF) y por el tratamiento de ablandamiento Químico por lotes (CSC) y continuo (PCSC).

TABLA 18.RESUMEN DE RESULTADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA PRUEBA M671-5

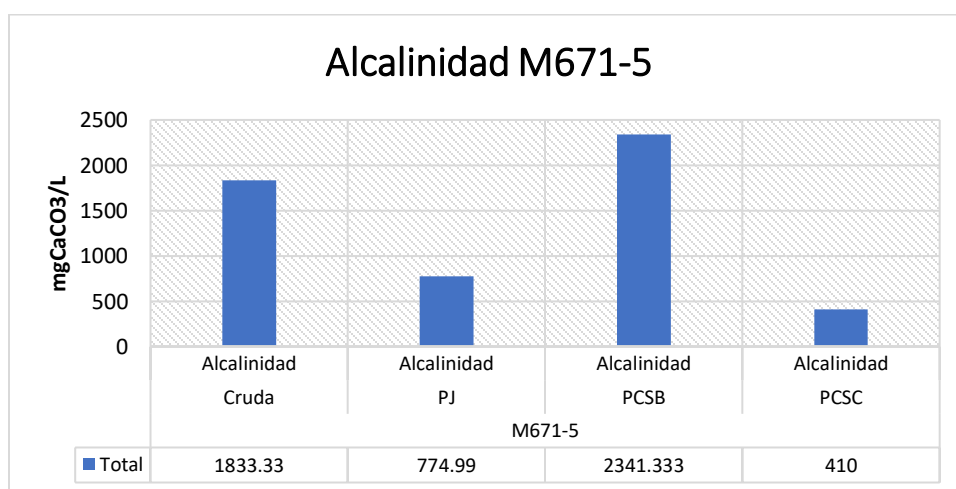
Determinación	Unidad	Cruda	CF	CSC	PCSC
pH		7.363	7.32	12.38	11.25
Conductividad	µS/cm	35.47	42.58	26	37.01
Salinidad	ppt	22.13	27.1	15.74	23.21
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	1833.33	1266.67	2341.333	2289.415
Dureza Total	mgCaCO ₃ /L	4937.75	8574.34	2368.78	1568.07
Dureza_de_Calcio	mgCaCO ₃ /L	3603.23	6172.19	2235.33	1434.62
Sulfatos	mg/L	193.25	175.31	195.94	195.94
Cloruros	mgCl/L	27958.23	26965.63	9429.7	2316.1
DQO	mg/L	2571.97	2224.85	2083.4	2803.65

pH y alcalinidad: Ocurre un aumento en el pH de 7.3 para el agua cruda, hasta 12.38 para la operación por lotes y de 11.25 en modo continuo (**Gráfica 2**) para el tratamiento cal-soda; es totalmente previsible dado que no se cuenta con un

proceso de estabilización (carbonatación o adición de ácido) que permita disminuir el valor de pH; con un valor tan elevado puede inferirse que el agua contará con una gran cantidad de alcalinidad lo que ocurre al tener un valor de 2341.33 mg/L como Carbonato de Calcio (**Gráfica 3**) . Puede preverse que se agregó cantidad en exceso de reactivo ya que el pH se elevó más allá de 12 para el proceso por lotes, por otro lado, un agua con un pH tan alto tenderá a incrustarse en las superficies que la contengan. En cuanto a la alcalinidad, se dio una disminución en el proceso de coagulación y floculación debido a que se hace precipitar hidróxido de aluminio al agregar policloruro de aluminio como coagulante; para los procesos de ablandamiento vuelve a aumentar debido a que se agregan carbonatos e hidróxidos, aumentando la fuerza del agua para neutralizar ácidos.

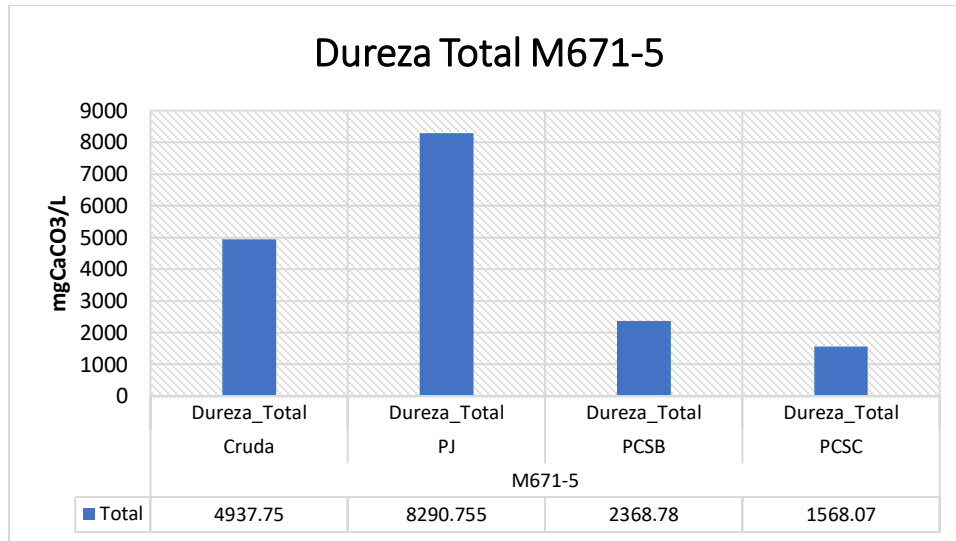


GRÁFICA 2. RESULTADOS PARA EL pH DE LA MUESTRA M671-5.



GRÁFICA 3. RESULTADOS PARA LA ALCALINIDAD DE LA MUESTRA M671-5.

Dureza Total: Se cuenta con un agua cruda con una dureza de 4,938.75 mg/L como carbonato de calcio, presenta un carácter de agua extremadamente dura; con el proceso por lotes se alcanza una disminución del 52%, mientras que con el proceso en continuo del 68%; ambos resultados se presentan bajos con respecto a lo esperado, para más detalles consultar la **Gráfica 4**.



GRÁFICA 4. RESULTADOS DE DUREZA PARA LA MUESTRA M671-5

El comportamiento de la dureza total en el proceso de coagulación-floculación resultó inesperado ya que no debería de darse un cambio tan drástico respecto al agua congénita dado que no se añaden agentes que contengan altas concentraciones de calcio y/o magnesio; por lo que se cree que se realizaron mal las determinaciones de dureza o se utilizó un agua compactada (con alto tiempo de sedimentación) o mal separada del precipitado formado.

Para el proceso por lotes se obtuvo un agua con pH de 12.38, indicador de una mayor dosis de la requerida, alimentar reactivos en exceso ocasiona que la disminución no sea mayor ya que se precipita menor cantidad de hidróxido de magnesio y carbonato de calcio, principalmente; también se presentaron problemas para extraer el sobrenadante del sedimentador, con lo que la fase obtenida no era del todo agua tratada sino una mezcla de agua con precipitado. Para el proceso de ablandamiento en continuo se utilizó el sedimentador del proceso por lotes, con lo que también resultó difícil obtener un agua bien sedimentada, se cree que esa es la principal razón por la que la disminución de dureza total resultó baja.

CARACTERIZACIÓN M671-6

Debido a que el grado de remoción de dureza resultante para la muestra M671-5 no alcanzó los valores deseados se empleó una nueva muestra, en la cual se realizaron

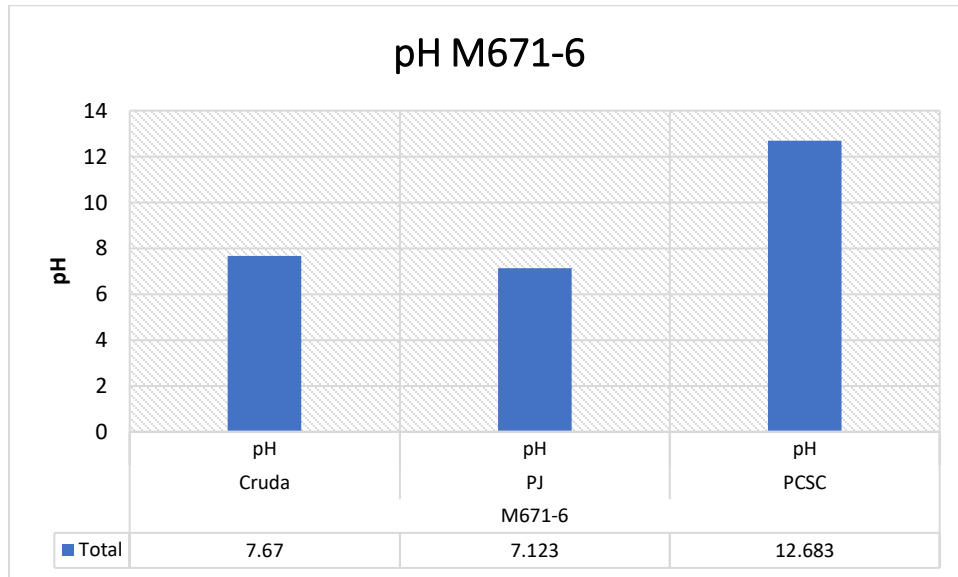
modificaciones en la agitación del reactor así como la habilitación del tanque sedimentador que, previamente, se encontraba fuera de servicio; esto redituó en resultados notablemente mejores; la caracterización obtenida de los diferentes procesos se muestran en la siguiente **Tabla 19**.

TABLA 19.RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA M671-6.

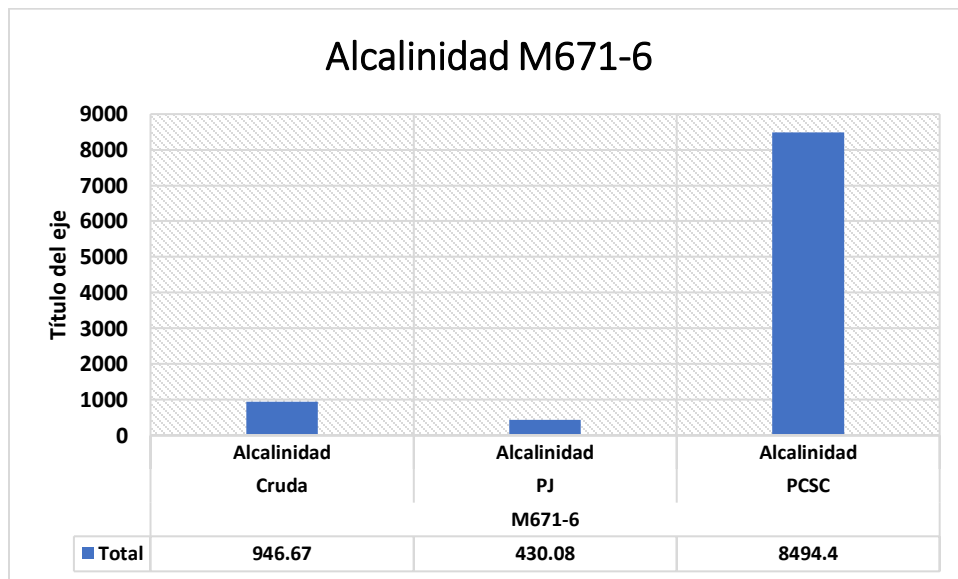
Parámetro	Prueba	Unidades	Valor
<i>pH</i>	<i>Cruda</i>		7.670
<i>pH</i>	<i>CF</i>		7.123
<i>pH</i>	<i>CSC</i>		12.683
<i>Conductividad</i>	<i>Cruda</i>	$\mu\text{S/cm}$	36.993
<i>Conductividad</i>	<i>CF</i>		38.020
<i>Conductividad</i>	<i>CSC</i>		27.0833
<i>DT</i>	<i>Cruda</i>	mgCaCO_3/L	5738.470
<i>DT</i>	<i>CF</i>		5705.107
<i>DT</i>	<i>CSC</i>		366.995
<i>Dca</i>	<i>Cruda</i>	mgCaCO_3/L	4637.484
<i>Dca</i>	<i>CF</i>		4403.942
<i>Dca</i>	<i>CSC</i>		200.179
<i>Salinidad</i>	<i>Cruda</i>	<i>ppt</i>	23.186
<i>Salinidad</i>	<i>CF</i>		23.913
<i>Salinidad</i>	<i>CSC</i>		16.458
<i>AIK</i>	<i>Cruda</i>	<i>mg/L</i>	946.666
<i>AIK</i>	<i>CF</i>		430.080
<i>AIK</i>	<i>CSC</i>		8494.400
<i>Cloruros</i>	<i>Cruda</i>	<i>mg/L</i>	12242.066
<i>Cloruros</i>	<i>CF</i>		9760.566
<i>Cloruros</i>	<i>CSC</i>		9429.700
<i>Sulfatos</i>	<i>Cruda</i>	<i>mg/L</i>	73.612
<i>Sulfatos</i>	<i>CF</i>		15.806
<i>Sulfatos</i>	<i>CSC</i>		126.323
<i>DQO</i>	<i>Cruda</i>	<i>mg/L</i>	2508.930
<i>DQO</i>	<i>CF</i>		1957.315
<i>DQO</i>	<i>CSC</i>		2335.566

pH y Alcalinidad: El agua cruda tenía un pH de 7.67 y para el final del tratamiento de ablandamiento tiene un pH de 12.68 (**Gráfica 5**) con lo cual, nuevamente, se determina que se añadió reactivo en exceso por medio del método de cálculo usado. En cuanto a la alcalinidad (**Gráfica 6**), el aumento es notable, de 946.67 a 8,494.4

mgCaCO₃/L, redundando en un agua con alta capacidad de neutralizar ácidos. El agua sigue presentando un carácter incrustante.

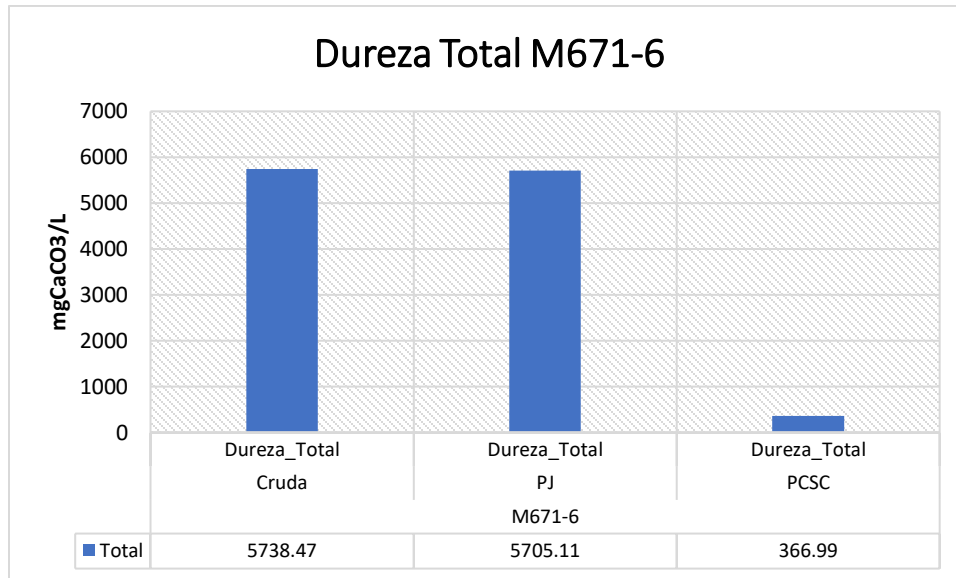


GRÁFICA 5. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE pH EN LA MUESTRA M671-6



GRÁFICA 6. ALCALINIDAD PARA LA MUESTRA M671-6

Dureza Total: Con las modificaciones realizadas al equipo de tratamiento, se alcanzó una remoción de dureza del 93.6%, se obtuvo un efluente con una dureza de 367 mg/L como carbonato de calcio (**Gráfica 7**); de cualquier forma, resulta necesario conseguir una mayor disminución para lograr una clasificación como agua blanda o ligeramente dura.



GRÁFICA 7. RESULTADOS DE DUREZA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA M671-6

A diferencia de lo acontecido en la muestra M671-5, en esta muestra el valor de la dureza total para el agua cruda y para el agua coagulada se mantiene prácticamente constante, lo que indica un comportamiento acorde a lo encontrado en la bibliografía.

CARACTERIZACIÓN M671-6-A Y M671-6-B

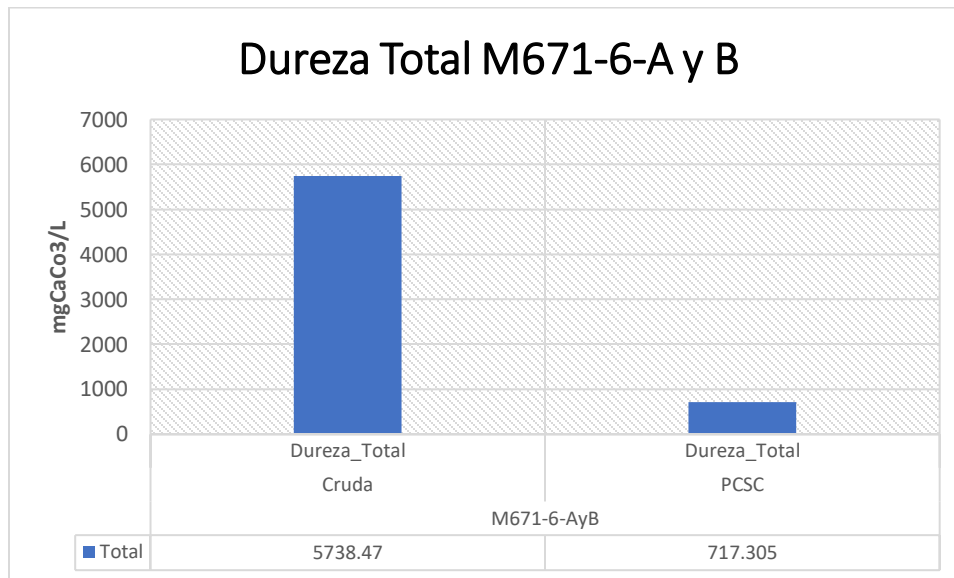
Para estas muestras se realizó sólo el tratamiento de ablandamiento químico en continuo con el fin de analizar el efecto del proceso de coagulación-floculación como tratamiento previo al ablandamiento, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 20**.

TABLA 20. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA M671-6-A Y B

Determinación	Unidad	Cruda	PCSC
M671-6-A			
pH		7.670	9.820
Conductividad	μS/cm	46.993	45.532
Salinidad	ppt	23.185	29.199
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	946.670	2172.595
Dureza_Total	mgCaCO ₃ /L	5738.470	717.305
Dureza_de_Calcio	mgCaCO ₃ /L	4637.480	333.630
Sulfatos	mg/L	134.120	134.925
Cloruros	mgCl/L	4797.570	36891.635
DQO	mg/L	2508.930	3470.320
M671-6-B			
pH		7.670	9.820

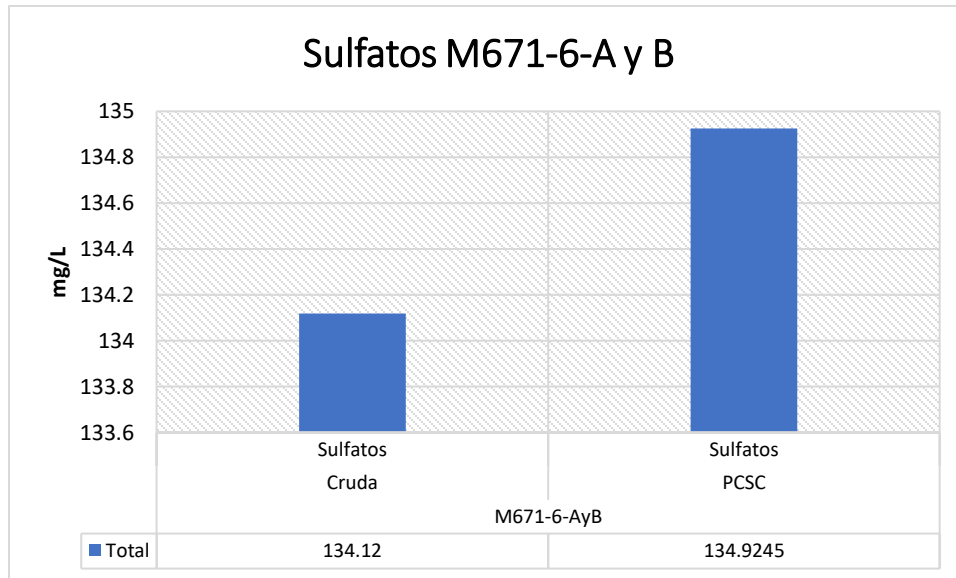
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	46.993	45.532
Salinidad	ppt	23.185	29.199
Alcalinidad	mgCaCO_3/L	946.670	2172.595
Dureza Total	mgCaCO_3/L	5738.470	600.530
Dureza_de_Calcio	mgCaCO_3/L	4637.480	300.270
Sulfatos	mg/L	134.120	134.925
Cloruros	mgCl/L	4797.570	36891.635
DQO	mg/L	2508.930	2172.595

El efluente tiene una dureza de 600 mgCaCO_3/L (**Gráfica 8**), lográndose una remoción del 89.5%; con base en el pH obtenido (9.82), se prevé que la dosis de reactivos agregada no fue suficiente y por ello no se redujo más la dureza total.



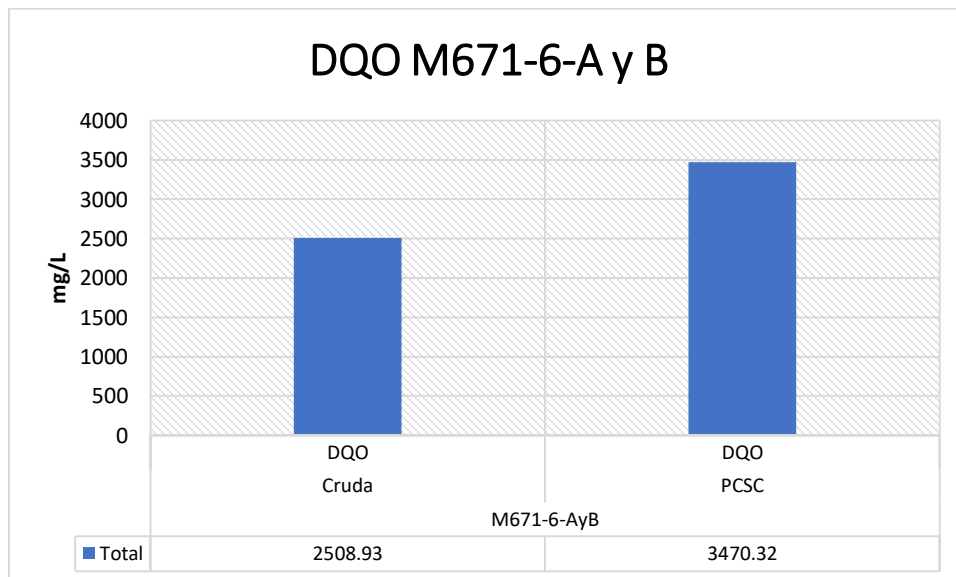
GRÁFICA 8. RESULTADOS DE DUREZA PARA LA MUESTRA M671-6-A Y B

Un beneficio de la coagulación es la disminución de los sulfatos, de forma indirecta al medir la turbidez; en la **Gráfica 9** puede notarse que se da un aumento en el parámetro al no aplicar la prueba de jarras, con lo que se determina útil su aplicación. El no aplicar el proceso resulta en un agua con turbidez visible que resulta antiestética, resultado de materia suspendida, producto de ello es el alto valor en sulfatos.



GRÁFICA 9. CANTIDAD DE SULFATOS EN EL TRATAMIENTO DE LA MUESTRA M671-6-A

Para el valor de la DQO (**Gráfica 10**); se dio un aumento producto de errores al llevar a cabo la metodología señalada por lo norma para el parámetro; de cualquier forma, se sabe que, por el comportamiento de las muestras M671-5 y M671-6, el tratamiento de coagulación-floculación genera una disminución en la materia orgánica oxidable en el agua.



GRÁFICA 10. CANTIDAD DE DQO PARA LA MUESTRA M671-6-A

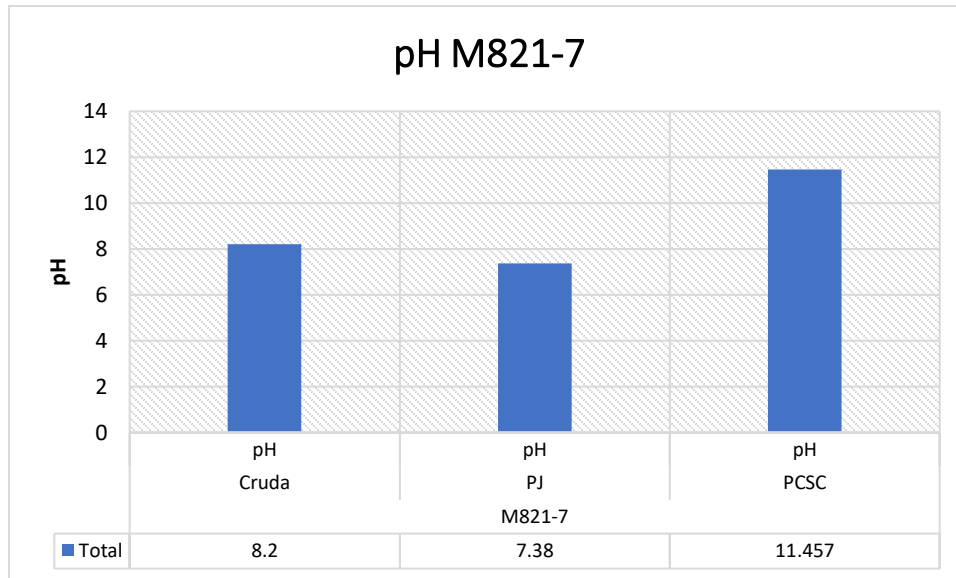
CARACTERIZACIÓN M821-7

Para esta muestra se utilizó el segundo método de cálculo presentado en el **Anexo D** ya que al usar el primer método de cálculo no se obtuvo una remoción satisfactoria para catalogar al agua como blanda; los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 21**.

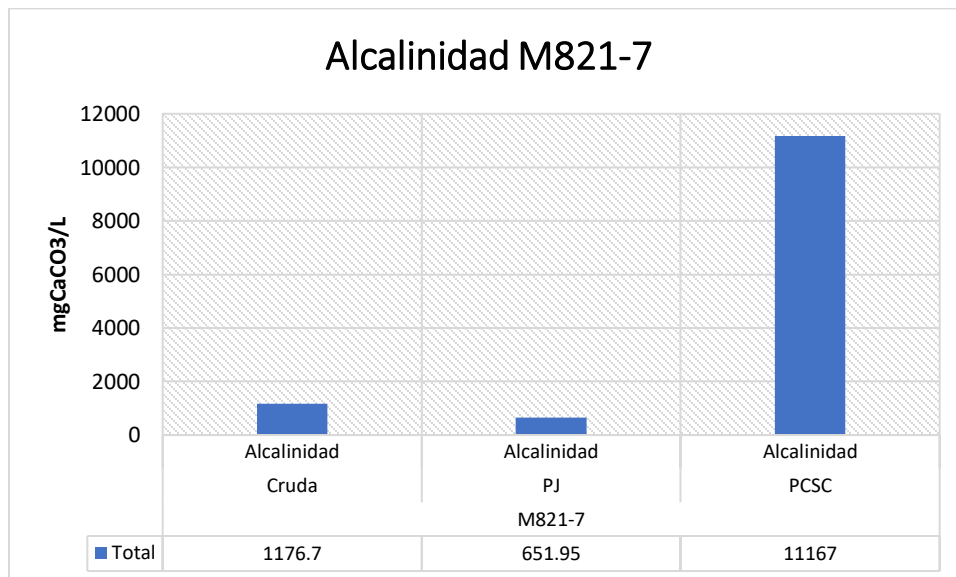
TABLA 21. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA M821-7

Parámetro	Unidad	Cruda	CF	PCSC
pH		8.200	7.380	11.457
Conductividad	μS/cm	34.770	56.667	23.803
Salinidad	ppt	15.631	29.344	10.530
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	1176.700	651.950	11167
Cloruros	mgCl/L	25311.300	22995.233	31266.900
Sulfatos	mg/L	122.326	106.832	147.042
Dureza Total	mgCaCO ₃ /L	5004.480	8340.800	66.726
Dureza_de_Calcio	mgCaCO ₃ /L	4504.032	7373.267	0
DQO	mg/L	2603.493	1058.9703	1074.730

pH y Alcalinidad: Con la aplicación del segundo método de cálculo para reactivos se obtiene un efluente un pH de 11.457 (**Gráfica 11**), para el cual no resulta menor la cantidad de dióxido de carbono o ácido a agregar para disminuir la alcalinidad (**Gráfica 12**) y estabilizar el agua para evitar precipitación futura. El valor de pH para el agua ablandada se encuentra entre los valores esperados dada la adición de carbonato de sodio, por lo que la dosis utilizada fue correcta en cuestión de pH.

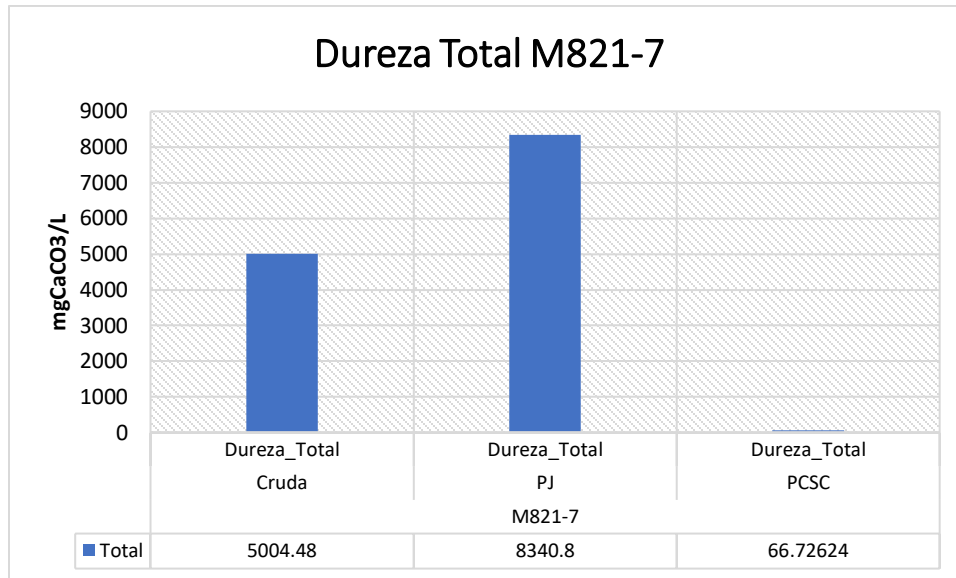


GRÁFICA 11. MEDICIÓN DEL pH PARA LA MUESTRA M821-7



GRÁFICA 12. MEDICIÓN DE LA ALCALINIDAD PARA LA MUESTRA M821-7

Dureza Total: Para esta muestra se obtuvo el mayor porcentaje de remoción para dureza total (98.7%), con un efluente al que se le puede categorizar como moderadamente duro; en función del tipo de tratamiento aplicado, junto con sus objetivos de tratamiento (50-80 mgCaCO₃/L), puede decirse que el segundo método de cálculo resulta mejor para una mayor remoción de sales de calcio y magnesio, principalmente; los resultados para el parámetro se ilustran en la **Gráfica 13**.



GRÁFICA 13. MEDICIÓN DE DUREZA PARA LA MUESTRA M821-7

Adicionalmente, para el lote M821-7, se presenta en la **Tabla 22** el cálculo aproximado (**ANEXO B**) para la cantidad remanente de algunos metales junto con su correspondiente regulación (si aplica); resulta interesante el poder analizar si la implementación de procesos como electrocoagulación pueda llegar a ser redituable para recuperar metales provenientes del agua congénita.

TABLA 22. CONCENTRACIÓN DE ALGUNAS SALES EN LA MUESTRA M821-7

Metal	Unidades	AC	PCSC	LMP(NOM-001)			
				Ríos		Aguas costeras	
				Uso agrícola	Protección vida acuática	Pesca	Estuarios
Cadmio	mg/L	0.0065	0.0003	0.2	0.1	0.1	0.1
Cromo	mg/L	1.8268	0.0532	4	4	4	4
Cobre	mg/L	0.2536	0.0063	1	0.5	0.5	0.5
Plomo	mg/L	0.1023	0.0016	0.5	0.2	0.2	0.2
Manganeso	mg/L	6.0734	1.4416				
Níquel	mg/L	1.4247	0.0369				
Plata	mg/L	0.2680	0.0002				
Zinc	mg/L	3.4928	0.0880	10	10	10	10

Se encuentra pertinente el realizar las siguientes generalidades para las determinaciones de mayor interés:

- pH: Si bien la concentración de protones hidrógeno varía para cada tipo de muestra, se pueden encontrar valores entre 7-8 de pH para el agua cruda; para el proceso de coagulación el pH disminuye un poco pues el coagulante agregado acidifica el medio; en cuanto al proceso de cal-soda lo que se obtiene es un agua con un pH muy básico debido a la naturaleza del hidróxido de calcio, pero sobre todo del carbonato de sodio. Sí la disposición del agua es la descarga al mar, el pH del agua resultaría letal para los organismos viviendo en el agua.
- Conductividad y Salinidad: La conductividad es un indicativo de la cantidad de sales que contiene la muestra, en este sentido se presenta una disminución de conductividad al aplicar el proceso de ablandamiento pues se hacen precipitar, en forma de lodos, sales incrustantes; mientras que al utilizar la prueba de jarras aumenta la concentración de iones en disolución al agregar iones cloruro y aluminio, entre otras sustancias en pequeñas cantidades. La salinidad se obtiene indirectamente con el valor de la conductividad.
- Dureza Total y de Calcio: El agua cruda se caracteriza por presentar grandes cantidades de dureza, con la prueba de jarras no debería de darse un cambio apreciable respecto al agua cruda ya que el proceso no interviene en la precipitación de sales de cationes divalentes, sin embargo, se dieron variaciones para muestras en las que éste parámetro aumentaba, posiblemente debido a errores cometidos en la operación de sedimentación de las fases obtenidas en el proceso o por la degradación en el funcionamiento del coagulante ya que su compra procedía desde el 2017 ; con el proceso de ablandamiento se obtiene un efluente con dureza de 66 mgCaCO₃/L, para la mejor forma de operación, la mejora gradual de la remoción se consiguió al establecer las condiciones de operación óptimas para el proceso incluyendo el establecimiento de caudales, dimensionamiento de equipo y cálculo de dosis de reactivos.
- Alcalinidad: Este parámetro se entiende como la capacidad de una base para neutralizar un ácido, en este sentido su comportamiento es el contrario al presentado con el pH; la aplicación del proceso de ablandamiento genera un aumento significativo de la alcalinidad (aumento de pH) ocasionado al agregar carbonato e hidróxido con los reactivos del proceso. Para el caso de la adición de coagulante, la alcalinidad del medio disminuye debido a que se hace precipitar hidróxido de aluminio.
- Materia Suspendida: El principal objetivo de aplicar un pretratamiento al agua congénita por medio del proceso de coagulación-floculación, es disminuir la

cantidad de sólidos suspendidos totales en el medio, una forma de cuantificar la remoción se da al medir la demanda química de oxígeno (DQO), una relación de la materia orgánica susceptible a oxidarse, cierta cantidad de los sólidos suspendidos tiene naturaleza orgánica y es por eso que se debe dar una remoción al agregar el policloruro de aluminio. La turbidez es otro parámetro relacionado con la materia suspendida en el agua, los compuestos suspendidos normalmente son los que ocasionan que el agua adquiera un color determinado, al agregar el coagulante se precipitan dichos compuestos resultando en un agua clarificada.

CONCLUSIONES

1. Resulta muy importante contar con condiciones de repetibilidad con el fin de obtener la mayor concordancia posible entre los parámetros medidos para una misma muestra; dado que para el agua con ID no se realizaron las determinaciones en un mismo día se obtuvieron resultados muy cambiantes.
2. El objetivo de este estudio se alcanza a nivel de prueba de laboratorio, es decir, se consigue agua congénita tratada con la calidad necesaria para su posible aplicación en inyección en pozos petroleros o su descarga a cuerpos marinos.
3. Es importante resaltar que, para el tratamiento de agua congénita, no es posible obtener un efluente que cumpla con la regulación ambiental usando un solo tratamiento, por lo que resultó necesario construir un sistema de tratamiento que cumpliera con los objetivos planteados.
4. En el presente proyecto se plantea un sistema mixto de tratamiento conformado por coagulación-floculación+ ablandamiento químico; en el primero se consigue disminuir la cantidad de turbidez y materia orgánica del agua, mientras que en el ablandamiento se tiene como parámetro objetivo la disminución de la dureza total y de calcio.
5. Los resultados obtenidos experimentalmente permiten afirmar que las remociones de dichos parámetros que se alcanzan en el proceso en continuo son de hasta 98.5%, con lo que se puede afirmar que el tren propuesto tiene potencial de ser escalado a nivel industrial, siempre que se lleve a cabo una etapa de escalamiento a nivel planta piloto para verificar los elementos de proceso necesarios para el nivel industrial.
6. Debido al elevado pH del agua se logra una remoción de hierro y manganeso aunado a desinfección del agua, con lo que ya no resultaría necesario la implementación futura de remoción para estos parámetros.
7. El agua tratada por ablandamiento químico no resulta aplicable a irrigación debido a que con la disminución de concentración de calcio y magnesio aumenta la proporción de sodio en el agua causando pérdida de

permeabilidad en el suelo; tampoco se prevé como un buen tratamiento para descarga a cuerpos marinos ya que, con la dilución en el agua, la concentración de sales ya no sería un problema mayor. Por otro lado, la aplicación a inyección en pozos, consumo humano, uso ganadero e incluso en sistemas contra incendio, aplicando el ablandamiento químico, resulta atractivo y posible.

RECOMENDACIONES

La evaluación del proceso desarrollado permite la identificación de posibles áreas de mejora, éstas se encuentran en función del presupuesto del proyecto y del alcance del mismo; entre las áreas de oportunidad se encuentra la opción de agregar un sedimentador adicional en el que se haga recircular cierta cantidad de lodos hacia el reactor químico, con el objetivo de analizar el posible aprovechamiento de reactivos sin reaccionar.

La reconfiguración del sedimentador se visualiza como una modificación a realizar con el objetivo de analizar el posible mejoramiento en la sedimentación de los sólidos precipitados.

A su vez, se piensa también necesario la futura implementación de un sistema de acidificación para disminuir el pH del efluente junto con su alcalinidad sin que la concentración de dureza se vea afectada considerablemente.

Una vez en escala industrial, podrá implementarse el uso de un sistema de recuperación de óxido de calcio proveniente de los lodos producidos en el ablandamiento químico, con el objetivo de disminuir los costos de compra de hidróxido de calcio.

Por último, destacar que se cuenta con un proceso subsecuente en el que se busca disminuir la Demanda Química de Oxígeno por medio de un reactor electroquímico, el tren de tratamiento brindaría así un agua tratada con las características óptimas para poder ser reinyectada en el pozo petrolero.

La implementación de tecnologías para la recuperación de metales resultaría de interés para brindar un potencial valor agregado al agua congénita.

REFERENCIAS Y FUENTES DE CONSULTA

1. APHA (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20^a ed. American Public Health Association. Washington, EUA, 1325 pp.
2. Arndt J. (1978). The practicality of the Caldwell-Lawrence diagrams for predicting lime-softened water quality. Tesis de Maestría. South Dakota State University. South Dakota, 92 pp.
3. Arthur J., Langhus B. y Patel C. (2005). Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. [En línea]. <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ALLConsulting-WaterTreatmentOptionsReport.pdf>. 09/02/2019.
4. Brown, Lemay, y Buster (1997). Chemistry: the Central Science, 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, pp. 681-3.
5. CDPHE (2009). Discharges associated with produced-water treatment facilities. Colorado Department of Public Health and Environment [En línea]. https://www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2015/05/015-rec_471874.pdf. 26/01/2019.
6. Choper P.N. (2003). Handbook of chemical engineering calculations. 3^a ed. McGraw-Hill. Columbus, EUA, 519,552 pp.
7. Coker K.A. (2007). Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants. 4^a ed. Elsevier. Oxford, Inglaterra, 372, 384 y 399 pp.
8. Davis M. (2010). Lime-soda softening. En: Water and wastewater engineering. McGraw-Hill, Michigan, EUA, pp. 7.1-7.40.
9. Green D.W. y Perry H.R. (2008). Perry's chemical engineers' handbook. 8ava ed. McGraw-Hill. Kansas. EUA, 2436 y 2003 pp. DOI: 10.1036/0071422943
10. Guerra K, Dahm K y Dundorf S (2011). Oil and gas produced water management and beneficial use in the western United States. Guía. Denver, Colorado.

- 11.Lavariega L. (2011). Trenes de Tratamiento para agua de la industria petrolera. KUXULKAB 17 (33), 25-28. DOI: [10.19136/kuxulkab.a17n33.358](https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a17n33.358).
- 12.Mancilla R. y Mesa H. (2012). Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingenierías físico-químicas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, 202 pp.
- 13.NALCO Company (2009). Precipitation. En: The NALCO water handbook. McGraw-Hill, California, EUA, Vol. 3, pp. 10.1-10.25.
- 14.Neff J., Lee K. y Deblois E. (2011). Produced water: overview of composition, fates and effects. En: Produced water: Environmental risks and advances in mitigation technologies. Springer, Michigan, EUA, pp. 3-54. DOI: 10.1007/978-1-4614-0046-2_1.
- 15.Oliva E.J. (2005). Incorporación del caudal producido por el pozo H6 a la producción de la planta de tratamiento de agua “El Cambrey”, mediante la utilización del método de oxidación con permanganato de potasio”. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. San Carlos, Guatemala, 50 pp.
- 16.OPS (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Organización Panamericana de la Salud. Guía. Lima, Perú, 34 pp.
- 17.Palmer C. (1978). Treatment and design modifications to accommodate lime-soda ash softening at the Lubbock water treatment plant. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Texas Tech University. Texas, EUA, 76 pp.
- 18.PAPIIT (2017). Evaluación de un tren de tratamiento, a escala laboratorio, como una alternativa para el reúso o aprovechamiento de agua residual tipo congénita proveniente de pozos por recuperación mejorada de crudo. Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica. Reporte. Ciudad de México, México, 37 pp.
- 19.PEMEX (2014). Informe de sustentabilidad 2014. Petróleos Mexicanos. Informe. Ciudad de México, México, 83 pp.
- 20.Peters S.M. y Timmerhaus D.K. (1991). Plant design and economics for chemical engineers. 4ª ed. McGraw-Hill. Colorado, EUA, 496 pp.
- 21.Ramesh K.G; Joseph R.V.F y Chen P.J (2005). Flow equalization and neutralization. En: Physicochemical treatment processes. (L.K Wang; Y.T Hung,

Ed.).Humana Press, Nueva Delhi, India, Vol. 3, pp 21-45. DOI: 10.1385/159259820x.

22.Reynolds P.J., Jeris S.J. y Theodore L. (2002). Handbook of Chemical and Environmental Engineering Calculations. Wiley-Interscience. New York, EUA, 616-620 pp.

23.SCFI (1981). Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-1981. Análisis de agua-Determinación del ion sulfato. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 6 de noviembre de 1992.

24.SCFI (2000). Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación de la conductividad electrolítica- Método de Prueba. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 18 de diciembre de 2000.

25.SE (1981). Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-1981. Análisis de agua-Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 8 de abril de 1982.

26.SE (2001). Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación.

27.SE (2001). Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación.

28.SE (2001). Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 1 de agosto de 2001.

29.SE (2001). Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 13 de agosto de 2001.

30.SE (2011). Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua-Determinación del pH-Método de prueba. Secretaria de Economía. Diario Oficial de la Federación. 5 de octubre de 2011.

- 31.SEDAPAL (2000). Tratamiento de Agua, Coagulación y Floculación. Secretaría de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. Lima, Perú, 44 pp.
- 32.SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 23 de abril de 2003.
- 33.SEMARNAT (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003. Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 3 de marzo de 2005.
- 34.Sinnott R.K. (2005). Chemical Engineering Design. 4ª ed. Elsevier. Oxford, Inglaterra, 301 pp.
- 35.Siriverdin, T. y Dallbauman L. (2004). Organic matrix in produced water from the Osage-Skiatook petroleum environmental research site. Chemosphere 57 (6), 463-469.
- 36.Spellman F. (2014). Mathematics for water/wastewater treatment plant operators. En: Water treatment operations. CRC Press, Illinois, EUA, pp. 211-227.
- 37.Szép A. y Kohlheb R. (2010). Water treatment technology for produced water. Water Sci Technol. 62 (10), 2372-2380. DOI: 10.2166/wst.2010.524.
- 38.USEPA (1975). Lime use in wastewater treatment: design and cost data. Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency. Manual. Cincinnati, Ohio; EUA, 316 pp.
- 39.USEPA (2005). Precipitative Softening. United States Environmental Protection Agency [En línea].
<https://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do>. 21/01/2019.
- 40.USGS (2016). Water hardness. United States Geological Survey.[En línea].
<https://water.usgs.gov/edu/hardness.html>. 22/01/2019.
- 41.USIP (2017). Manual de Técnicas Analíticas. Aguas provenientes de la industria petrolera, Unidad de Servicios para la Industria Petrolera. Manual. Ciudad de México; México, 64 pp.
- 42.Walas M.S. (1990). Chemical Process Equipment. Elsevier. Kansas, EUA, 307 y 320 pp

ANEXO A

Diagramas para la caracterización de las muestras

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE PH

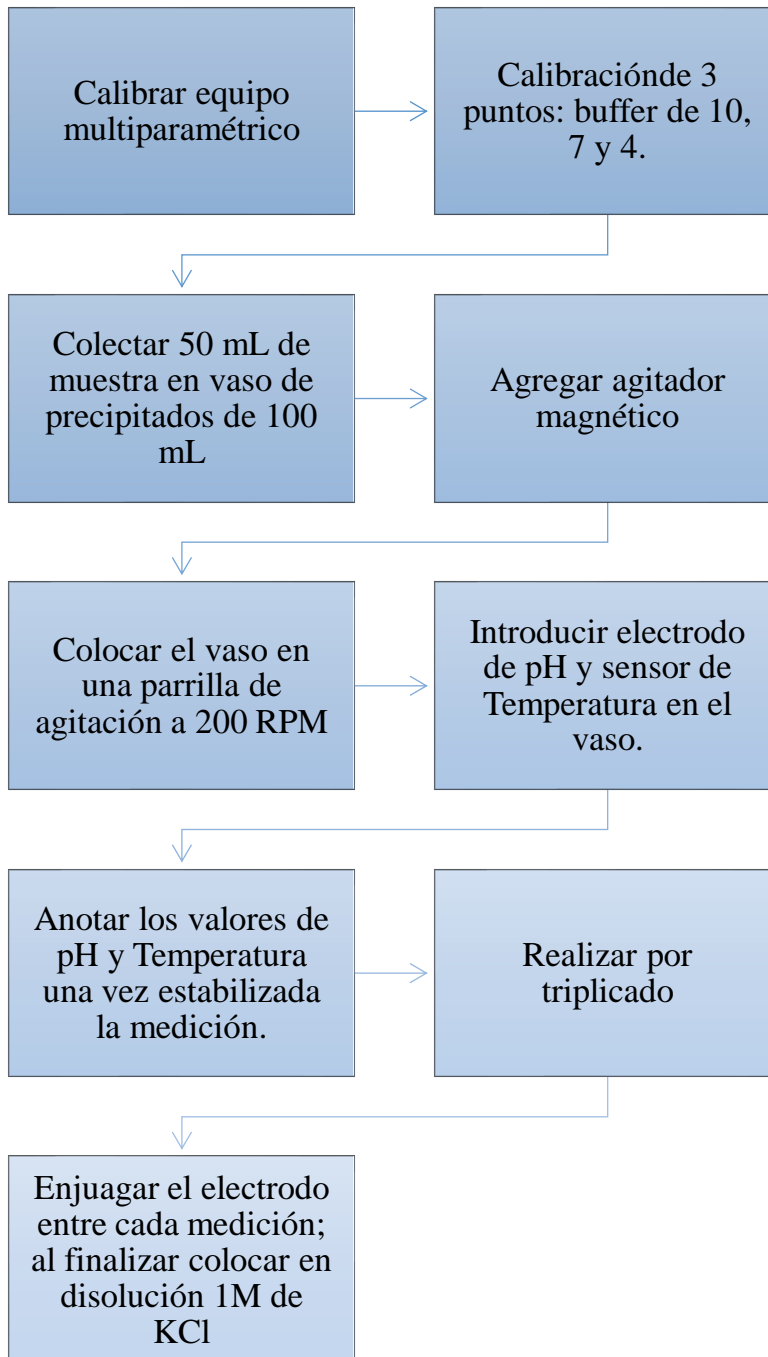


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

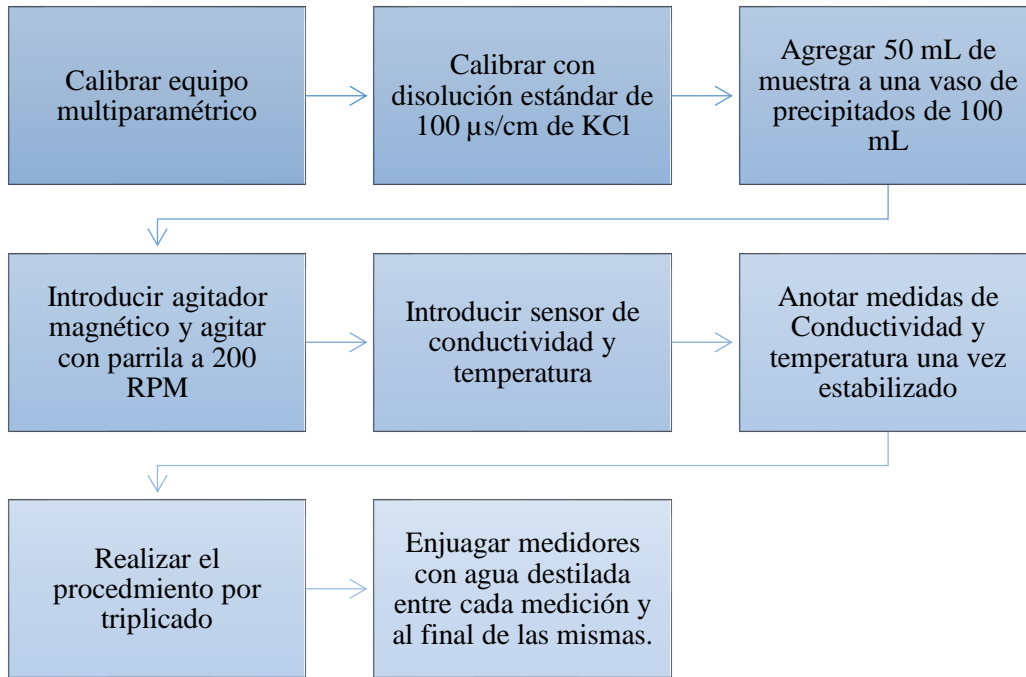


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD

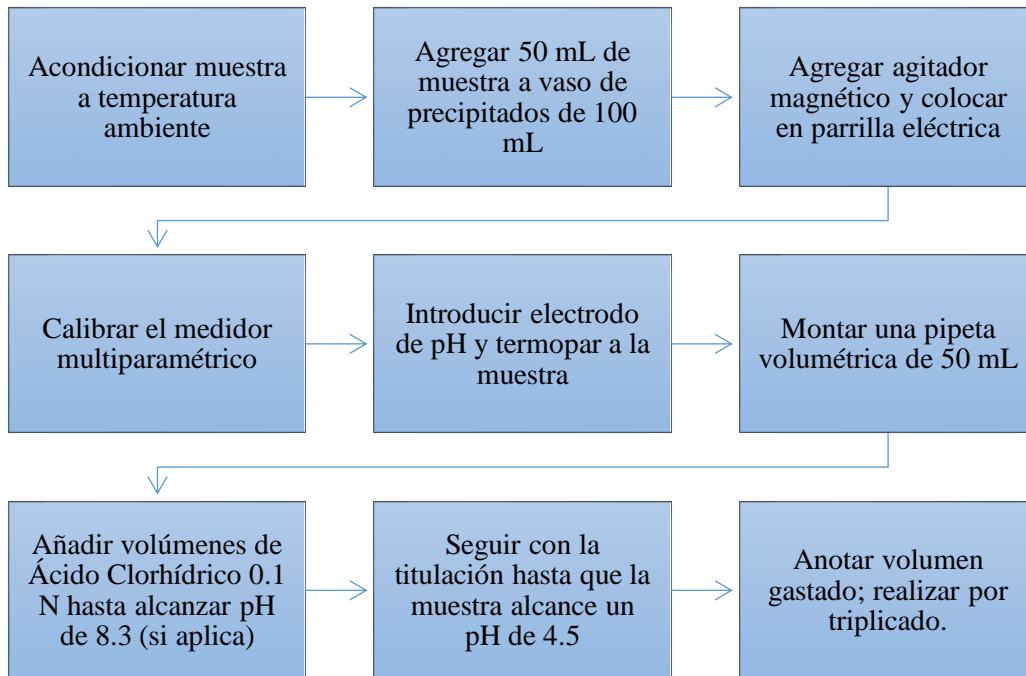


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL

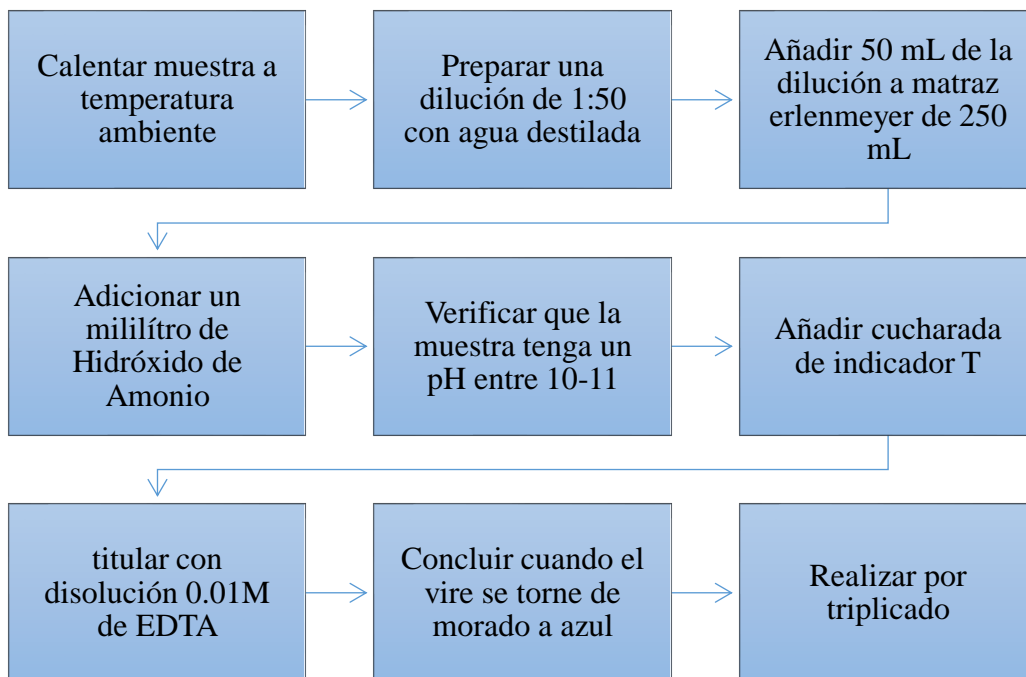


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE DUREZA DE CALCIO

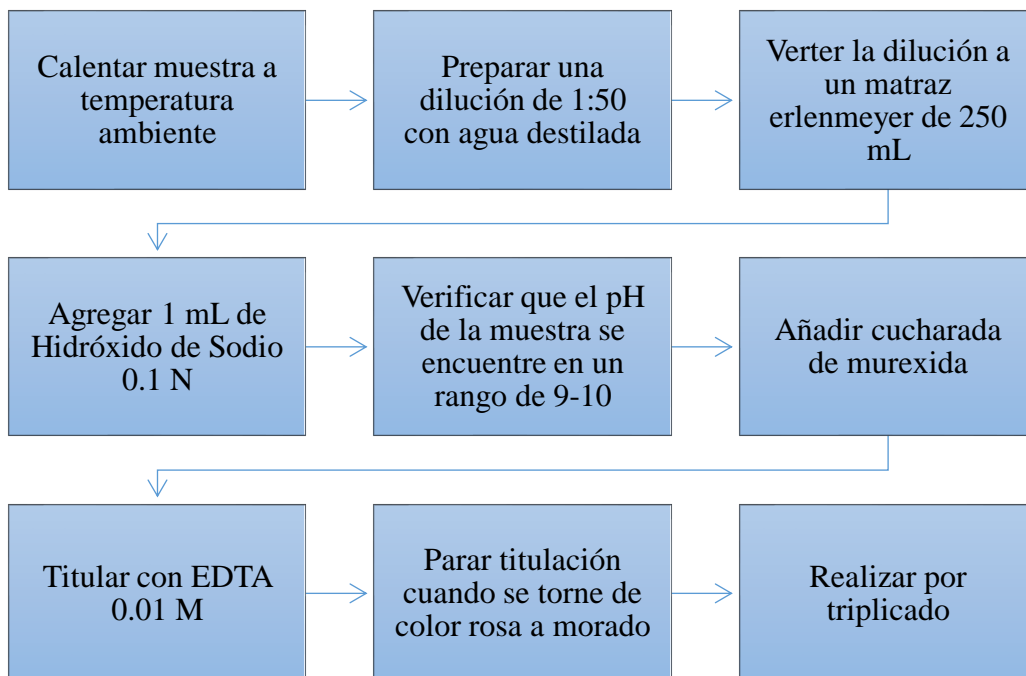


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE SULFATOS

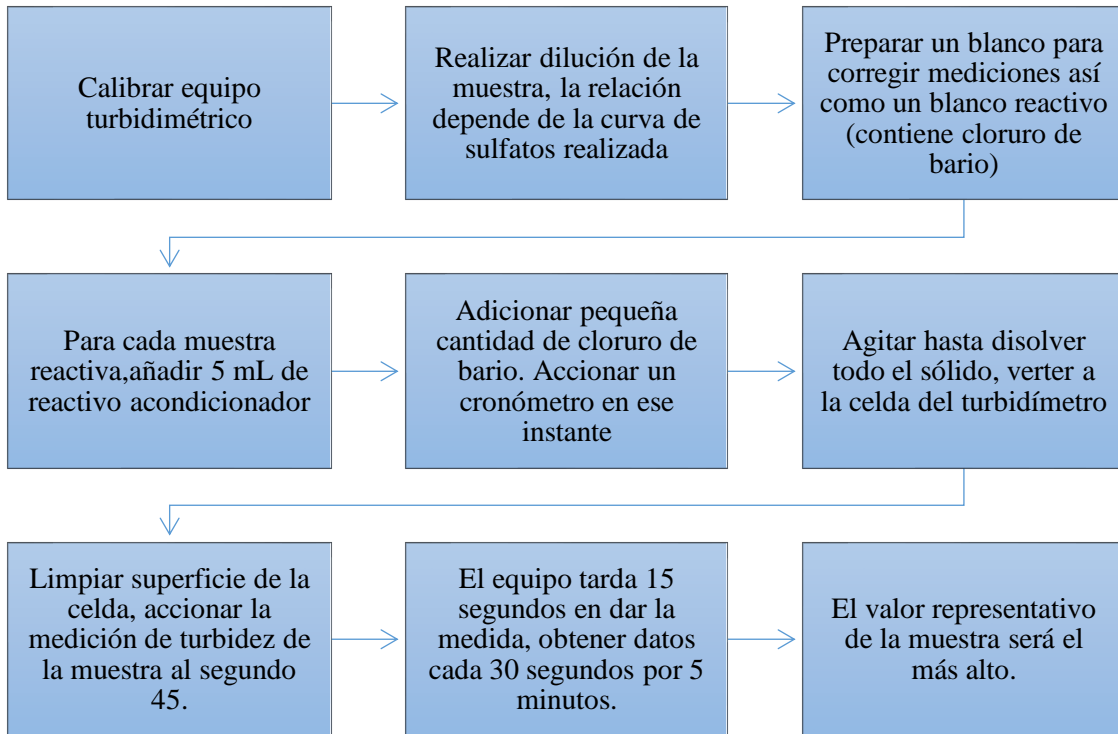


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE CLORUROS

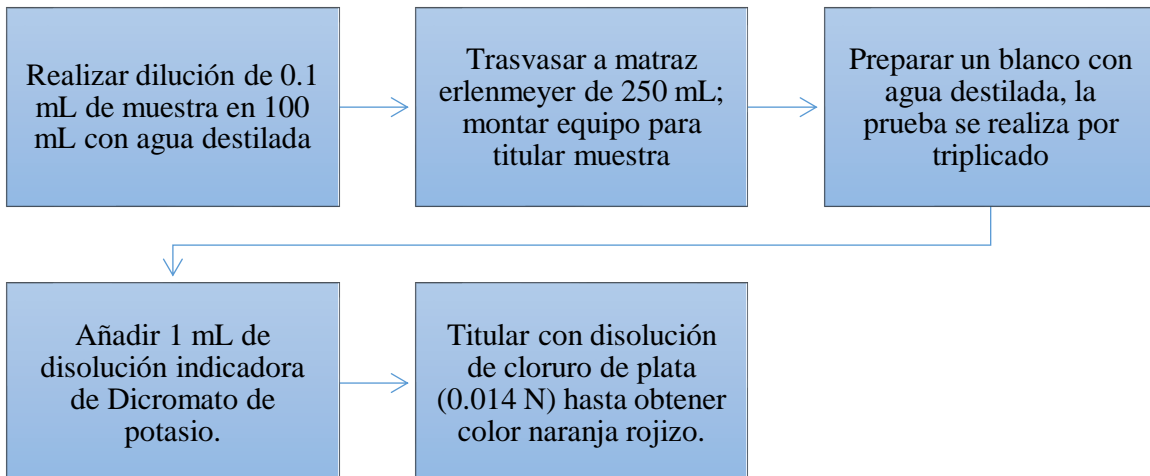


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

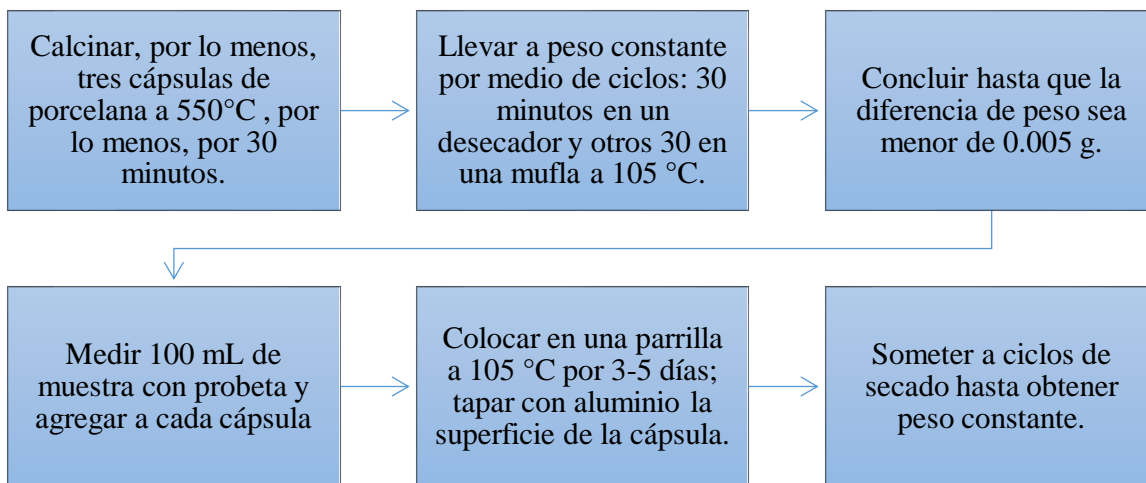


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

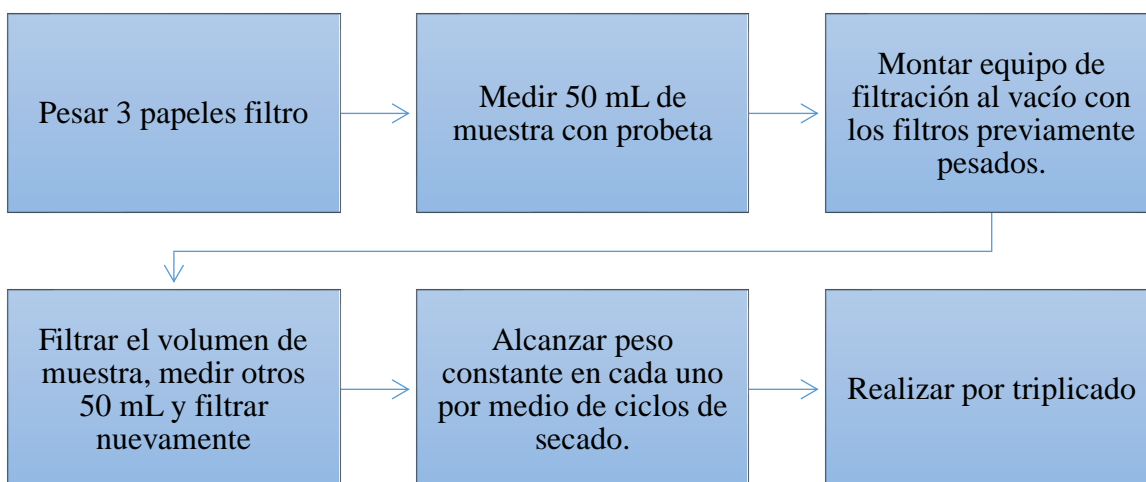
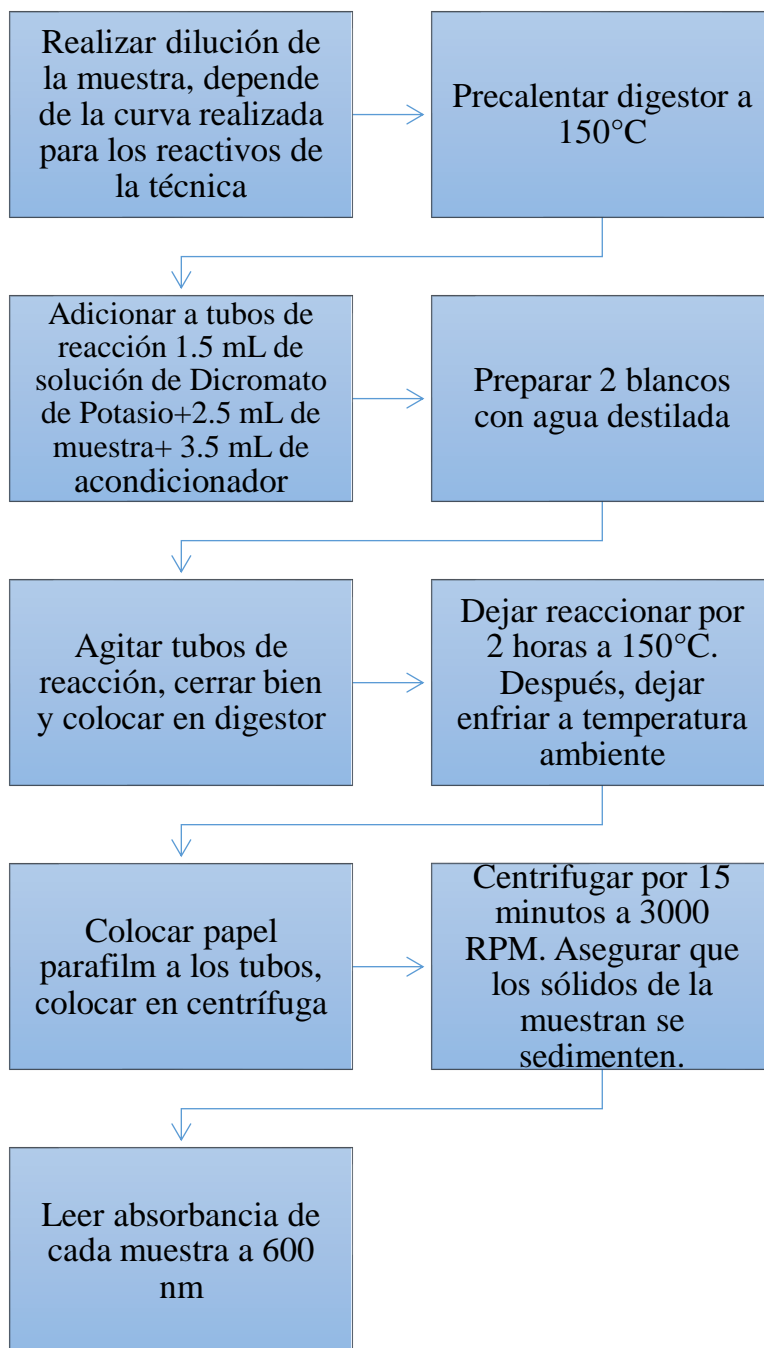


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO



ANEXO B

Metodología de Cálculo para la concentración de algunos metales en agua congénita

Los cálculos siguientes están referidos a la cantidad del metal susceptible a ser recuperado del agua. (USEPA, 2013)

Cadmio, Cd

$$Cd \left[\frac{\mu g}{L} \right] = [1.101672 - \ln(DT) * 0.041838] * e^{[0.7998 * \ln(DT) - 4.6451]} \quad (\text{B.1})$$

Cromo, Cr

$$Cr \left[\frac{\mu g}{L} \right] = e^{[0.819 * \ln(DT) + 0.5340]} \quad (\text{B.2})$$

Cobre, Cu

$$Cu \left[\frac{\mu g}{L} \right] = e^{[0.8545 * \ln(DT) - 1.7428]} \quad (\text{B.3})$$

Plomo, Pb

$$Pb \left[\frac{\mu g}{L} \right] = [1.46203 - \ln(DT) * 0.145712] * e^{[1.273 * \ln(DT) - 4.705]} \quad (\text{B.4})$$

Manganeso, Mn

$$Mn \left[\frac{\mu g}{L} \right] = e^{[0.3331 * \ln(DT) + 5.8743]} \quad (\text{B.5})$$

Níquel, Ni

$$Ni \left[\frac{\mu g}{L} \right] = e^{[0.846 * \ln(DT) + 0.0554]} \quad (\text{B.6})$$

Plata, Ag

$$Ag \left[\frac{\mu g}{L} \right] = e^{[1.72 * \ln(DT) - 9.06]} \quad \text{(B.7)}$$

Zinc, Zn

$$Zn \left[\frac{\mu g}{L} \right] = 0.986 * e^{[0.8525 * \ln(DT) + 0.9109]} \quad \text{(B.8)}$$

Donde DT= Dureza Total [mgCaCO₃/L]

ANEXO C

Propiedades y características de reactivos empleados en el tren de tratamiento

C.1. Policloruro de Aluminio (PCA)

Tabla C.1. Propiedades químicas del PCA

Parámetro	Designación/valor
Nombre Comercial	Poli+Cat 40
Fórmula	$Al_2(OH)_nCl_{3-n}$
Alúmina (Al_2O_3) %peso	13-15
Densidad [kg/m^3]	1.220
Rango pH de funcionamiento	5-9

C.2. Hidróxido de Calcio [$Ca(OH)_2$]

Tabla C.2. Propiedades químicas del Hidróxido de Calcio

Parámetro	Designación/valor
Fórmula	$Ca(OH)_2$
Solubilidad en agua, S(25°C) [g/mL]	0.185/100
Pureza, %	95

C.3. Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)

Tabla C.3. Propiedades químicas del Carbonato de Sodio

Parámetro	Designación/valor
Fórmula	Na_2CO_3
Solubilidad en agua, S(25°C) [g/mL]	30.7/100
Pureza, %	99.5

ANEXO D

Métodos de cálculo para los reactivos empleados en la precipitación química

1) Determinación estequiométrica

El método se basa en la reacción que se lleva a cabo con la determinación de la dureza total de la muestra, utilizando el complejo EDTA.

Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)

$$\begin{aligned} m \text{Na}_2\text{CO}_3(g) \\ = V_{\text{muestra}} \left(\frac{V_{\text{EDTA}}}{1\text{mL}_{\text{muestra}}} \right) \left(\frac{0.01\text{mol}_{\text{EDTA}}}{100\text{mL}_{\text{EDTA}}} \right) \left(\frac{2\text{mol}_{\text{Na}^+}}{1\text{mol}_{\text{EDTA}}} \right) \left(\frac{1\text{mol}_{\text{CO}_3^{2-}}}{2\text{mol}_{\text{Na}^+}} \right) \left(\frac{1\text{mol}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{1\text{mol}_{\text{CO}_3^{2-}}} \right) \left(\frac{PM_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{1\text{mol}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}} \right) \left(\frac{0.995}{1} \right) \quad (\text{D.1.}) \end{aligned}$$

Hidróxido de Calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]

$$\begin{aligned} m \text{Ca}(\text{OH})_2(g) \\ = V_{\text{muestra}} \left(\frac{V_{\text{EDTA}}}{1\text{mL}_{\text{muestra}}} \right) \left(\frac{0.01\text{mol}_{\text{EDTA}}}{100\text{mL}_{\text{EDTA}}} \right) \left(\frac{1\text{mol}_{\text{Ca}^{2+}}}{1\text{mol}_{\text{EDTA}}} \right) \left(\frac{2\text{mol}_{\text{OH}^-}}{1\text{mol}_{\text{Ca}^{2+}}} \right) \left(\frac{1\text{mol}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{2\text{mol}_{\text{OH}^-}} \right) \left(\frac{PM_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{1\text{mol}_{\text{Ca}(\text{OH})_2}} \right) \left(\frac{0.95}{1} \right) \quad (\text{D.2.}) \end{aligned}$$

Donde,

V_{EDTA} [mL]= Cantidad de titulante gastado en la determinación previa al ablandamiento químico, pudiendo ser para agua congénita o prueba de jarras.

$PM_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ [g/mol]= 106

$PM_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ [g/mol]= 79

2) Por concentración de especies

Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)

$$m \left[\frac{g}{L} \right] = \left(DT \left[\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right] - ALK \left[\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right] \right) \left(\frac{106g_{Na_2CO_3}}{100g_{CaCO_3}} \right) \left(\frac{1g}{1000mg} \right) \left(\frac{1}{0.995} \right) \quad (D.3.)$$

Donde,

DT [mgCaCO₃/L]= Dureza Total

ALK [mgCaCO₃/L]= Alcalinidad

Hidróxido de Calcio [Ca(OH)₂]

$$m \left(\frac{g}{L} \right) = \left[ALK \left(\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right) \left(\frac{74g \text{ Ca(OH)}}{100g \text{ CaCO}_3} \right) \right] + \left[DMg \left(\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right) \left(\frac{74g \text{ Ca(OH)}}{24.3g \text{ Mg}} \right) \right] \quad (D.4.) \\ + \left[CO_2 \left(\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right) \left(\frac{74g \text{ Ca(OH)}}{44g \text{ CO}_2} \right) \right] + \left[37 \left(\frac{mg_{Ca(OH)_2}}{L} \right) \right]$$

El último término de la ecuación proviene de la recomendación bibliográfica encontrada en diversas fuentes, representa una cantidad en exceso necesaria para disminuir la dureza de no carbonatos al aumentar el pH e incrementar la velocidad de precipitación.

Para calcular el valor de la concentración de dióxido de carbono se utilizan las siguientes expresiones:

$$[H^+] \left(\frac{mol}{L} \right) = 10^{-pH} \quad (D.5.)$$

$$[HCO_3^{2-}] \left(\frac{mol}{L} \right) = HCO_3^{2-} \left(\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right) \left(\frac{1mol_{CaCO_3}}{50000CaCO_3} \right) \quad (D.6.)$$

$$K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^{2-}]}{[H_2CO_3]} \quad pK_{a1} = 6.35 \text{ a } 25^\circ C \quad (D.7.)$$

$$[H_2CO_3] \left(\frac{mol}{L} \right) = \frac{[H^+][HCO_3^{2-}]}{K_{a1}} \quad , [H_2CO_3] \equiv [CO_2] \quad (D.8.)$$

$$CO_2 \left(\frac{mg_{CO_2}}{L} \right) = \left[CO_2 \left(\frac{mol}{L} \right) \right] \left[\frac{44000mg}{1mol} \right] \quad (D.9.)$$

$$CO_2 \left(\frac{mg_{CaCO_3}}{L} \right) = CO_2 \left(\frac{mg_{CO_2}}{L} \right) \left(\frac{100g_{CaCO_3}}{44g_{CO_2}} \right) \quad (D.10.)$$