

**APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCION COMO FUENTE DE
OBTENCION DE "SODA ASH" (CARBONATO DE SODIO)**

CAMILO ANDRÉS DÍAZ GUTIÉRREZ

JUAN CAMILO NAVARRO SOTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2014

**APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCION COMO FUENTE DE
OBTENCION DE "SODA ASH" (CARBONATO DE SODIO)**

CAMILO ANDRÉS DÍAZ GUTIÉRREZ

JUAN CAMILO NAVARRO SOTO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:

INGENIERIA QUÍMICA

INGENIERIA DE PETRÓLEOS

Director

Ph.D. Gustavo Emilio Ramírez Caballero

Codirector

MSc. Emiliano Ariza León

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2014

AGRADECIMIENTOS

“Si la educación te parece cara, prueba con la ignorancia”

Albert Einstein

“Una inversión en conocimiento siempre paga el mejor interés.”

Benjamin Franklin

Queremos mostrar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que de alguna manera contribuyeron e hicieron posible la entrega del trabajo de investigación “Aprovechamiento de aguas de producción como fuente de obtención de "soda ash" (carbonato de sodio).

En primer lugar al Director del proyecto, el profesor Gustavo Emilio Ramírez Caballero, por su apoyo, correcciones y constante seguimiento del progreso del trabajo. Al codirector, el Profesor Emiliano Ariza León, por su apoyo, disposición y confianza brindada. Al coordinador de actividades dentro del laboratorio, el profesor Luis Eduardo Carreño, ya que gracias a su asesoría, disposición, paciencia y solidaridad pudimos llevar a cabo las modificaciones necesarias para lograr los objetivos de la práctica experimental.

Además, queremos hacer un agradecimiento especial al Campo Escuela Colorado, por las facilidades que nos brindaron en la realización de las actividades programadas en el proyecto, por el aporte económico y la confianza en el manejo y la compra de equipos para cumplir a cabalidad la tesis.

Finalmente, gracias al apoyo recibido por parte de nuestros padres, quienes nos impulsaron a concluir con éxito este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	15
1. CONCEPTOS TEORICOS	16
1.1 AGUA DE PRODUCCION.....	16
1.1.1 PRINCIPALES COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	16
1.1.2 ANALISIS DE LOS COSTOS GENERADOS POR EL AGUA DE PRODUCCION EN LOS CAMPOS PETROLEROS	17
1.2 CAMPO ESCUELA COLORADO.....	18
1.2.1 GENERALIDADES.....	18
1.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CAMPO ESCUELA COLORADO	19
1.3 GENERALIDADES Y METODOS DE OBTENCION DEL CARBONATO DE SODIO	20
1.3.1 PROCESO SOLVAY.....	20
1.3.2 APLICACIONES DEL CARBONATO DE SODIO	23
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
2.1 EQUIPO DE LABORATORIO	24
2.2 MONTAJE DEL EQUIPO.....	25
2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	27
2.3.1 DESCRIPCION DETALLADA DEL EXPERIMENTO	28
2.3.2 MODIFICACION EN LAS VARIABLES DE ENTRADA.....	34

3. RESULTADOS Y ANALISIS	36
3.1 OBTENCION DE UNA SOLUCION DE BICARBONATO DE SODIO Y OTRAS SALES DISUELTAS (SOLUCION MATRIZ) A PARTIR DE SALMUERA PREPARADA A UNA CONCENTRACION DE CLORURO DE SODIO ESPECIFICA	37
3.2 OBTENCION DE UNA SOLUCION MATRIZ A PARTIR DE AGUA DE PRODUCCION FILTRADA AL VACIO Y ABLANDADA	38
3.3 OBTENCION DE UNA SOLUCION MATRIZ A PARTIR DEL AGUA DE PRODUCCION PRETRATADA FILTRADA AL VACIO Y ABLANDADA AUMENTANDO SU CONCENTRACION DE CLORURO DE SODIO INICIAL .	39
3.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	40
5. RECOMENDACIONES	43
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	44
7. ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización agua de producción Campo Escuela Colorado	19
Tabla 2: Presencia de calcio y magnesio a eliminar y cálculo de cantidad de cal sodada necesaria para eliminar el calcio y magnesio presentes. 31	
Tabla 3: Dosificación de reactivos para la preparación de la cal sodada	31
Tabla 4: Parámetros químicos analizados para el agua de producción tratada por flotación y ablandamiento.	35
Tabla 5: Caracterización solución matriz a partir de salmuera y Na_2CO_3 obtenido a partir del bicarbonato disuelto.	38
Tabla 6: Caracterización solución matriz a partir de agua de producción de C.E.C.....	38
Tabla 7: Caracterización solución matriz a partir de agua de producción de C.E.C concentrada con NaCl y Na_2CO_3 obtenido a partir del bicarbonato disuelto.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama del proceso Solvay.....	21
Figura 2: Diagrama del diseño del equipo de laboratorio	26
Figura 3: Muestra de agua de producción únicamente filtrada al vacío y próxima a decantar.	29
Figura 4: a) Agua de producción en agitación con cal sodada. b) En reposo con precipitado y agitador magnético sumergido.	32
Figura 5: Solución matriz obtenida en la prueba con la solución preparada a partir de agua destilada y sal. Precipitado solido blanco amorfo obtenido en el fondo del balón	37
Figura 6: Solución matriz obtenida de agua de producción de C.E.C. (Nótese la presencia de precipitado).....	39
Figura 7: Solución matriz obtenida de agua de producción del C.E.C pre tratada y concentrada manualmente en cloruro de sodio. (Nótese la presencia de precipitado solido en el producto.	40

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Fotografía real del equipo montado y en funcionamiento.....	46
Anexo B: Informe de resultados - Análisis fisicoquímico del agua de producción de Campo Escuela Colorado	47
Anexo C: Fotografías unidades del equipo de laboratorio	48
Anexo D: Dedución de la expresión para calcular la cantidad de cal sodada para llevar a cabo el ablandamiento	50
Anexo E: Cal sodada preparada	51
Anexo F: Equipo de filtrado al vacío	52
Anexo G: Determinación de los flujos volumétricos de gas	53
Anexo H: Calculo estequiometrico para determinar la cantidad de sal necesaria para concentrar la muestra de agua del C.E.C	55
Anexo I: Informe - Análisis químico de las 3 soluciones matriz	57
Anexo J: Medición del cambio de temperatura por reacción exotérmica	59
Anexo K: Cantidad de productos químicos importados	60
Anexo L: Características del agua de producción de los pozos COL 42, COL 52 y COL 69 de Campo Escuela Colorado	61
Anexo M: Descomposición térmica del NaHCO_3 para obtener Na_2CO_3 ..	62

RESUMEN

TITULO: APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCION COMO FUENTE DE OBTENCION DE SODA ASH (CARBONATO DE SODIO)¹

AUTORES: CAMILO ANDRES DIAZ GUTIERREZ²

JUAN CAMILO NAVARRO SOTO³

PALABRAS CLAVES: Soda ash, bicarbonato de sodio, solución, montaje de laboratorio, aprovechamiento, agua de producción, petróleo y gas, proceso Solvay.

CONTENIDO: Para la industria petrolera el agua de producción representa un inconveniente, debido al impacto ambiental que podría generar su manejo inadecuado y a los gastos relacionados con esta.

El objetivo de este estudio es evaluar la posibilidad de obtener soda ash (carbonato de sodio) aplicando el proceso Solvay, a partir de aguas de producción de Campo Escuela Colorado (C.E.C), haciendo uso de un montaje de laboratorio construido y puesto en marcha para esta investigación, con el fin de aprovechar estas aguas y obtener un producto agregado con valor comercial.

Inicialmente se tomaron muestras representativas del agua de producción de C.E.C (de los tanques de almacenamiento) y se caracterizaron fisicoquímicamente. Se observó una cantidad considerablemente alta de iones cloruro y sodio, lo que llevo a considerar la aplicación del proceso Solvay. Debido a la presencia de magnesio y calcio se hizo necesario un tratamiento para remover estos cationes antes de llevar a cabo este proceso.

El experimento se realizó para tres muestras, la primera con una salmuera preparada a una concentración conocida, la segunda para una muestra de agua de producción de C.E.C ablandada y la tercera para una muestra de agua de producción de C.E.C concentrada con cloruro de sodio.

Como resultados de estas pruebas, se obtuvieron tres soluciones matrices concentradas de bicarbonato de sodio (disuelto y precipitado). A partir este bicarbonato producido, se obtuvo soda ash mediante un proceso de descomposición térmica. Estos resultados demuestran que el montaje de laboratorio funciona satisfactoriamente lo que implica que se puede obtener carbonato de sodio a partir de aguas de producción de C.E.C y que aguas de producción con mayor salinidad involucran una mayor producción de bicarbonato de sodio y posteriormente de soda ash.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Codirector: Emiliano Ariza León.

³ Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Petróleos. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Codirector: Emiliano Ariza León.

ABSTRACT

TITLE: PRODUCED WATER USE AS SOURCE OF SODA ASH PRODUCTION (SODIUM CARBONATE)⁴

AUTORS: CAMILO ANDRES DIAZ GUTIERREZ⁵

JUAN CAMILO NAVARRO SOTO⁶

KEY WORDS: Soda ash, sodium bicarbonate, dissolution, laboratory setup, produced water, oil and gas, Solvay process.

CONTENT: Produced water represents an inconvenience for the oil and gas industry, due to the environmental impact that it might generate if it is not properly disposed and the costs related with it.

The objective of this research is to evaluate the possibility of obtaining sodium carbonate (soda ash) applying the Solvay process to the Campo Escuela Colorado (C.E.C) produced water, using a laboratory equipment that was built and launched for this research in order to obtain a product with commercial value.

Initially, representative produced water samples from C.E.C were taken (from the storage tanks) and a chemical analysis was made. A considerably high amount of chloride and sodium ions was observed, which led to consider the Solvay process application. Due to the presence of magnesium and calcium in the water, a treatment to remove these cations was needed before carrying out this process.

The experiment was conducted for three samples. First for prepared brine at a known concentration, secondly for a C.E.C produced water sample and thirdly for another produced water sample concentrated in sodium chloride.

As a result of these tests, three concentrated solutions of sodium bicarbonate (dissolved and precipitated) were obtained. From this produced bicarbonate, sodium carbonate was obtained by a thermal decomposition process. These results demonstrate that the laboratory assembly works in a satisfactory way, meaning that sodium bicarbonate and therefore sodium carbonate can be obtained from C.E.C produced water. If the sodium chloride concentration increases, more sodium carbonate can ultimately be obtained.

⁴ Degree Project

⁵ Physical-Chemical Faculty. Chemical Engineering School. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Codirector: Emiliano Ariza León.

⁶ Physical-Chemical Faculty. Chemical Engineering School. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Codirector: Emiliano Ariza León.

INTRODUCCION

Los altos cortes de producción de agua en campos petroleros han sido por mucho tiempo un inconveniente para la industria, debido al posible impacto ambiental ocasionado por un mal manejo o disposición de ésta. Por otro lado generan costos operacionales, ya que el agua de producción debe ser sometida a una serie de tratamientos antes de llegar al lugar de disposición final.

Generalmente, en el agua de producción hay presencia de iones de calcio, magnesio, sodio, hierro, bario, estroncio, radio, cloruros, carbonato, bicarbonato y sulfato⁷, además por su naturaleza química, posee sales disueltas, entre ellas el cloruro de sodio, siendo éste compuesto el eje principal en el desarrollo de esta investigación.

La eliminación de impurezas genera costos que no van a ser recuperados, debido a que este proceso se lleva a cabo para cumplir con regulaciones ambientales impuestas por cada país y no hacen parte del negocio de la industria petrolera. Por lo tanto surge la necesidad de crear procesos de aprovechamiento de estas impurezas, para que de esta manera, se pueda ofrecer una alternativa de ingresos a partir del tratamiento de aguas de producción.

Una opción para lograr lo anteriormente descrito es el proceso Solvay, que consiste en la obtención de carbonato de sodio o “soda ash”, a partir de las reacciones de salmuera con amoníaco gaseoso (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). La soda ash es un producto ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales como en la producción de vidrio, detergentes, y el tratamiento de aguas duras, entre otros. La soda ash producida en Colombia no satisface la demanda interna, obligando al país a importar grandes cantidades de carbonato de sodio.⁸ Partiendo del hecho de que el agua producida durante una operación

⁷ CARVALHINHO GRIMALDI Mauricio, et al. Produced Water Reuse for Production of Chemicals. SPE 127174. Brasil 2010.

⁸ CENTRO VIRTUAL DE NEGOCIOS S.A.S (CNV), Informe Sector Químico, Colombia – 2010.

petrolera generalmente posee una cantidad considerable de sal (NaCl), se definió un procedimiento a escala de laboratorio con el fin de obtener una solución matriz de bicarbonato de sodio a partir de la cual se produce soda ash mediante una operación de descomposición térmica, utilizando aguas de producción como materia prima.

1. CONCEPTOS TEORICOS

1.1 AGUA DE PRODUCCION

En los campos de producción de petróleo maduros, el agua requiere un adecuado manejo y control para evitar problemas ambientales. Si bien a menudo el agua es utilizada para impulsar la producción primaria e interviene en la producción secundaria, su exceso representa costos significativos para las compañías de petróleo y gas. Hoy en día, el mejoramiento de las técnicas de manejo de la producción de agua permite minimizar el volumen de agua llevado a la superficie, convirtiendo el excedente de agua producida en un recurso. Las aguas de producción se componen de aguas de formación, que son aquellas provenientes de las formaciones geológicas obtenidas normalmente durante la extracción del petróleo, y de aguas que se contaminan al inyectarlas a un yacimiento petrolero (actividad que utiliza una gran cantidad de agua superficial).

1.1.1 PRINCIPALES COMPONENTES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Los principales componentes del agua de producción considerados fueron los siguientes:

Cationes: el Ca^{+2} es el mayor constituyente del agua de formación. Este catión forma precipitados insolubles a determinadas condiciones de presión y

temperatura, lo que puede formar una escama adherente. El Mg^{+2} se presenta en menor concentración y también forman incrustaciones. El Na^{+1} junto con el ion cloruro, es el ion más abundante en las salmueras de yacimientos petrolíferos. Generalmente se halla en concentraciones superiores a 35,000 partes por millón (ppm). Se considera únicamente problemático al precipitarse como cloruro de sodio en grandes cantidades. Por último, el Fe^{+3} y el Fe^{+2} se encuentra en concentraciones muy bajas. Su presencia muchas veces indica problemas de corrosión.

Aniones: el Cl^{-1} es casi siempre uno de los iones predominantes en las aguas de producción. El problema principal del manejo de los cloruros es la corrosión que pueden causar. Por otro lado, los iones Carbonato (CO_3^{-2}) y Bicarbonato (HCO_3^{-1}) pueden formar costras insolubles, al igual que los iones sulfato (SO_4^{-2}), que también son fuente alimenticia para bacterias, que pueden llevar a la formación de H_2S .

1.1.2 ANALISIS DE LOS COSTOS GENERADOS POR EL AGUA DE PRODUCCION EN LOS CAMPOS PETROLEROS

Las compañías petroleras producen un promedio de tres barriles de agua por cada barril de petróleo que extraen de los yacimientos agotados. Se gastan más de 40 mil millones de dólares por año para hacer frente a los problemas del agua indeseada.⁹ En muchos casos, las tecnologías innovadoras para el control del agua pueden significar una reducción de los costos y un aumento en la producción de hidrocarburos. Si se tiene en cuenta que la producción mundial de agua es de aproximadamente 240 millones de barriles por día que acompañan a los 85 millones de barriles por día de petróleo, se podría decir que muchas compañías se han convertido prácticamente en empresas productoras de agua. Se estima un costo de entre 5 a más de 50 centavos por barril de agua, en un pozo que produce

⁹ BAILEY B, CRABTREE M, TYRIE J, ELPHICK J, KUCHUK F, ROMANO C, ROODHART L, "Control del agua" *Oilfield review*. Verano de 2000.

petróleo con un 80% de corte de agua³. En estos casos, el costo del manejo del agua puede ascender a US\$4 por barril de petróleo producido. Los productores buscan formas económicas para mejorar la eficiencia de la producción y los servicios de control del agua resultan ser uno de los métodos más rápidos y menos costosos para reducir los costos operativos y aumentar la producción de hidrocarburos en forma simultánea. Los costos operativos, que comprenden las tareas de levantamiento, separación, filtrado, bombeo y reinyección, se suman a los costos totales. Por otra parte, los costos de eliminación del agua pueden variar enormemente: desde 10 centavos por barril, cuando el agua se descarga en áreas marinas, hasta más de \$1,50 por barril cuando se transporta con camiones en tierra firme. Debido a la presencia de estos costos a causa del agua, que en realidad no están ligados a un aumento de producción de hidrocarburos, se propone una solución que además de tratar el agua, se pueda obtener un producto adicional con posibilidad de comercialización, que genere un flujo de ingresos extra a partir de un desecho, y que ayude a aliviar el monto de los costos generados por este.

1.2 CAMPO ESCUELA COLORADO

Campo Escuela Colorado es una unidad académica y de operación de hidrocarburos, producto del convenio de cooperación empresarial suscrito entre la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL en el 2006, con una vigencia de diez años.

1.2.1 GENERALIDADES

Campo Escuela Colorado está localizado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en la provincia estructural del piedemonte occidental de la

cordillera oriental, en inmediaciones del municipio de San Vicente de Chucurí, al sureste del municipio de Barrancabermeja (Santander) y al sur del campo La Cira Infantas, en el área de la antigua Concesión de Mares. Mugrosa, su principal formación productora tiene acumulaciones de aceite liviano y gas con gravedad 36 a 42 API. En la actualidad el sistema de producción de los pozos del C.E.C se realiza mediante levantamiento artificial por bombeo mecánico. Actualmente, hay 76 pozos, de los cuales a partir de una campaña de reactivación, se encuentran 36 activos, 12 inactivos, 17 abandonados, y 23 sin operación definida.

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CAMPO ESCUELA COLORADO

Mediante un análisis de caracterización fisicoquímica realizado por la empresa Sistemas Hidráulicos y Sanitarios LTDA, se definió la composición de los parámetros de interés para este proyecto de investigación. El muestreo se realizó en los tanques de almacenamiento del campo en donde se mezclan las aguas provenientes de los pozos activos. Estas muestras pueden considerarse representativas para realizar la aplicación del proceso Solvay. Los resultados de los parámetros de interés analizados se muestran en la tabla 1 (Ver Anexo B):

Tabla 1: Caracterización agua de producción Campo Escuela Colorado

TANQUES DE ALMACENAMIENTO CAMPO ESCUELA COLORADO	
Muestra	Resultado
Cl⁻ [mg/L]	10216
Na [mg/L]	2490
Fe [mg/L]	5
Mg [mg/L]	179
Ca [mg/L]	714

Turbiedad [NTU]	151
pH	7.1

Fuente: El autor

1.3 GENERALIDADES Y METODOS DE OBTENCION DEL CARBONATO DE SODIO

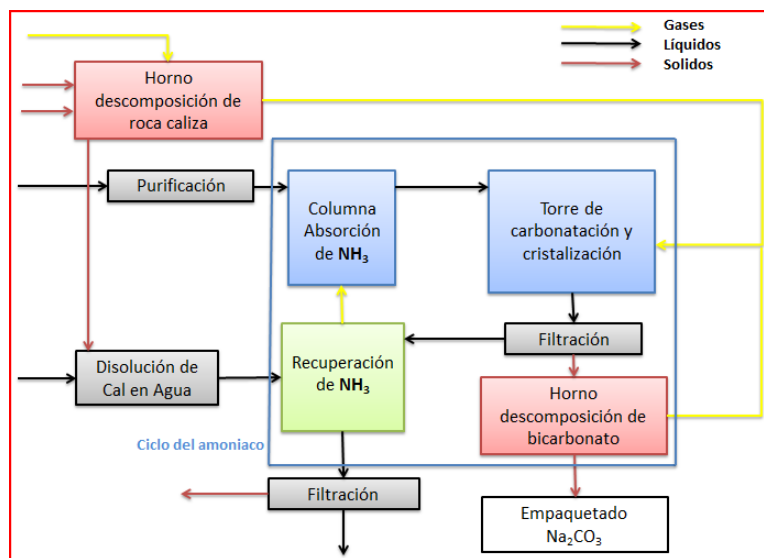
El proceso Leblanc o también llamado “black ash” fue desarrollado en el periodo de 1825 hasta 1890. La mayor desventaja de este proceso era su impacto ambiental con la emisión de grandes cantidades de HCl gaseoso y la producción de sulfito de calcio sólido, residuo que no sólo pierde sulfuro valioso sino que también produce gases venenosos.

En 1861 Ernest Solvay redescubrió y mejoró el proceso basado en la sal común, piedra caliza y amoníaco. La competición entre los dos procesos duró años, pero la relativa simplicidad, los costos de operación minimizados y sobretodo el reducido impacto ambiental del proceso Solvay, aseguró su éxito y la paulatina desaparición del método Leblanc.

1.3.1 PROCESO SOLVAY

El método de producción Solvay se basa en la obtención de carbonato sódico a partir de la utilización de materias primas muy básicas como NaCl y piedra caliza (CaCO_3). Los pasos que sigue el proceso se pueden explicar a partir del diagrama de bloques que se muestra a continuación:

Figura 1: Diagrama del proceso Solvay



Fuente: RECERCAT, "Planta de producción de carbonato sódico"

El proceso parte de la salmuera que llega a la planta por conducción directa en tuberías. Esta salmuera que está presente en forma de solución es el recurso principal del proceso. Por este motivo deberá someterse a un proceso de tratamiento en el cual se eliminarán las impurezas que esta lleva asociada, principalmente iones calcio y magnesio. Una vez esta salmuera está purificada se puede introducir en el proceso de producción.¹⁰

Ciclo del CO_2 :

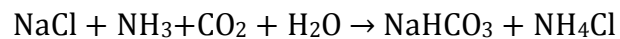
La piedra caliza se calcina en los hornos de cal donde se logra, por un lado, óxido de calcio que va a un disolvedor en el que se hidrata y se convierte en hidróxido de calcio; y, por otro, dióxido de carbono (CO_2), que a través de una estación de compresión se envía a las columnas de carbonatación. El resto de gas necesario es liberado en la etapa de descomposición térmica del bicarbonato sódico. Ambas

¹⁰ ABRAHAM J.M, et al. "Didáctica de la Química y Vida Cotidiana". Madrid, 2003. Universidad Politécnica de Madrid. Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

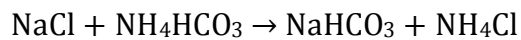
corrientes serán comprimidas para poder ser introducidas al proceso en la zona de carbonatación.

Ciclo del NH₃:

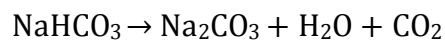
Este ciclo supuso un importante avance en la producción de carbonato sódico y, consecuentemente, hizo que el proceso Solvay tuviera un rápido éxito. El proceso plantea una recuperación casi total del amoníaco, lo que supone no sólo un beneficio a nivel de impacto ambiental, sino también un importante ahorro económico en el proceso. Así, el amoníaco entra en la columna de absorción, donde formará parte de una solución de sal amoniacal. La corriente pasa a las torres de carbonatación donde el fluido que llega de la absorción reacciona con CO₂ proveniente de los hornos de descomposición y calcinación. Es en estas torres donde se produce la principal reacción del proceso:



Esta reacción general se puede expresar en dos reacciones secundarias:



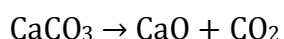
En la parte inferior de las torres de carbonatación se debe aplicar un enfriamiento de la solución, lo que provoca la cristalización del bicarbonato sódico. Los cristales formados se separarán del resto de solución en una etapa de filtrado. De aquí se llevarán a un horno de descomposición térmica donde el bicarbonato dará lugar a la formación del producto final.



La solución obtenida con el filtrado es trasladada hasta la zona de recuperación de amoníaco donde, a partir de una serie de columnas de destilación, se conseguirá la recuperación casi total del amoníaco utilizado en el proceso.

A continuación, se muestra de manera resumida la secuencia de reacciones, incluyendo las de recuperación de amoníaco y de hidróxido de calcio, lo que representa el ciclo cerrado de la recuperación de reactivos valiosos, la no emisión de subproductos perjudiciales y un panorama resumido del proceso en su totalidad:

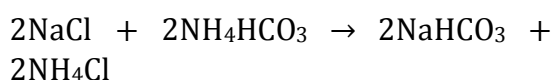
1. Obtención de CO₂:



2. Obtención de NH₄HCO₃:



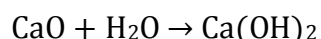
3. Obtención de NaHCO₃:



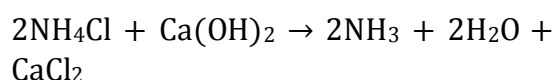
4. Obtención de Na₂CO₃:



5. Obtención de Ca(OH)₂:



6. Recuperación de NH₃:



1.3.2 APLICACIONES DEL CARBONATO DE SODIO

El carbonato de sodio es un producto químico utilizado en múltiples de ramas de la industria, entre las más importantes se encuentran:

- *Siderurgia*: usado para calentar bajo una ráfaga de aire el cromo y otros extractos y disminuye el contenido de azufre y fósforo de la fundición y del acero.
- *Reciclado*: el reciclado de baterías viejas.
- *Vidrio*: se usa para disminuir el punto de fusión del silicio y tener darle la capacidad de una mejor manipulación, también aporta el sólido necesario para formar la red vítrea.
- *Detergentes*: es indispensable en las formulaciones con el objeto de asegurar el correcto funcionamiento del resto de sustancias que lo componen, enzimas, tensoactivos, etc. durante las diferentes fases del lavado.

- Regulador de pH: tratamiento de aguas de la industria, así como en los procesos de flotación.
- Otros Usos: cerámica, jabones, limpiadores, ablandador de aguas duras, refinación de petróleos, producción de aluminio, textiles, pulpa y papel. Procesamiento metalúrgico, preparación de farmacéuticos, soda cáustica, bicarbonato de sodio, nitrato de sodio y varios otros usos.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A pesar de la importancia y la simplicidad de las reacciones involucradas, existen pocos diseños experimentales a escala de laboratorio que reproduzcan con fidelidad el proceso de síntesis de carbonato de sodio mediante el procedimiento Solvay. Por otro lado existen procesos por cochadas o discontinuos, que tienen poca analogía con las operaciones y el análisis del proceso industrial continuo. En este trabajo se describe un montaje, diseñado para reproducir con materiales de laboratorio relativamente sencillos los pasos de absorción de amoníaco y carbonatación de la salmuera, seguido por la precipitación de NaHCO_3 . Además, el equipo hace posible variar las temperaturas de las columnas de absorción de amoníaco y de carbonatación y el flujo relativo de los gases en contracorriente en relación al flujo de la salmuera.

2.1 EQUIPO DE LABORATORIO

Los procedimientos de absorción de amoníaco y carbonatación se realizaron usando el método de flujo en contracorriente, en analogía al proceso industrial.

El equipo consta de las siguientes partes (ver imágenes Anexo C):

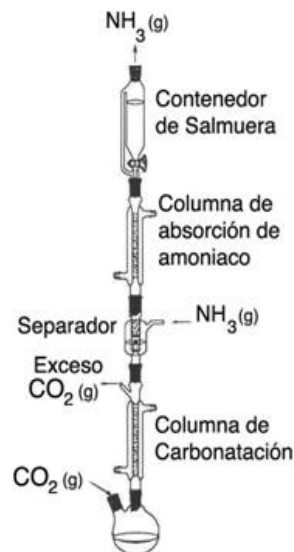
- Dos columnas Vigreux: aproximadamente de 50 cm de alto, con el mayor número de picos posibles para maximizar la superficie de contacto, y esmeriladas en ambos extremos.
- Un separador tipo campana: consiste en un tubo unos 3 cm de diámetro y 5 cm de longitud, en el que la unión superior es tipo hembra y la unión inferior es tipo macho.
- Embudo con ecualizador de presión contenedor de salmuera: el embudo esta a su vez, equipado con un regulador de flujo para controlar el goteo de salmuera y un camino lateral al embudo usado para llevar a cabo la purga de amoniaco.
- Matraz recolector: es un balón de fondo redondo de 2 bocas esmeriladas de una capacidad 1000mL. Aquí se recoge el producto final o la solución matriz. Una de las bocas es insertada a la unión tipo macho de la columna de carbonatación y en la otra se inyecta el CO₂ proveniente de un cilindro.
- Cilindro de amoniaco: se utilizó un cilindro de 58 Kg de contenido neto. Pueden utilizarse cilindros con un menor contenido. El cilindro debe estar equipado con un regulador flujo “*Concoa SERIA 408-2631-01-240*”, especial para este tipo de gas corrosivo y a alta presión.
- Cilindro de dióxido de carbono: el CO₂ es de tipo industrial. Se utilizó un cilindro de 25 Kg de contenido. Debe estar equipado con su respectivo regulador de flujo.

2.2 MONTAJE DEL EQUIPO

Se tomaron las dos columnas Vigreux y se conectaron entre sí por medio del separador tipo campana (figura 2). Este consiste en un tubo abierto (tubo recolector) de aproximadamente 2 cm de largo soldado a la unión tipo macho. El tubo es parcialmente recubierto por otro tubo de mayor diámetro (sellador) con un tapón en la zona intermedia y conectado a la unión hembra. Esto se dispone de

manera similar a una campana garantizando la formación de una pequeña columna de líquido que impide el acceso de CO_2 proveniente de la columna inferior hacia la columna superior, y al mismo tiempo, permite que circule el flujo de salmuera saturada de amoníaco proveniente de la columna superior hacia la inferior. Pequeños orificios en la región comprendida entre la base de la tubería hembra y el sello, le permite al amoníaco fluir hacia la columna de absorción y al mismo tiempo, garantiza el libre flujo de la solución saturada de NaCl con amoníaco ya disuelto, hacia abajo.

Figura 2: Diagrama del diseño del equipo de laboratorio



Fuente: DE ARAÚJO Adriano L, et al. *“Simulação do Processo Solvay no Laboratório Didático”* São Paulo, 1997

El dióxido de carbono, proveniente del cilindro a un flujo constante, se inyecta por la salida lateral del balón recolector que se encuentra conectado a la parte inferior de la columna de carbonatación. El exceso se elimina a través de la salida lateral ubicada en la parte superior de la columna. El NH_3 gaseoso se inyecta en el sistema a través de una entrada lateral del separador y se envía el exceso al

embudo de separación con ecualizador de presión que contiene la salmuera. El flujo de la solución de salmuera se controla aproximadamente a 60 gotas por minuto, mientras se inyecta CO_2 y NH_3 . El precipitado amorfo blanco formado se separa por filtración, y más adelante, se lava con pequeñas fracciones de agua fría y etanol, para luego, mantenerlo en un secador durante la noche en presencia de gel de sílice al vacío.

Detalles a tener en cuenta:

- ✓ Soportar todos los elementos del equipo de manera firme, recta y nivelada, utilizando una reja y unos soportes en buen estado, esto con el fin de garantizar un flujo de una película de líquido homogénea a través de las paredes de las columnas y así lograr una mejor absorción de los gases.
- ✓ En la unión de cada uno de los equipos verificar que no haya presencia de fugas o filtraciones. Para esto, es recomendable utilizar silicona de alto vacío en todas las uniones del equipo.
- ✓ Se debe disponer de un sistema de purga con una manguera que haga circular el flujo de gas hacia una trampa de agua, y ubicarla en un extractor de gases, dado el que el amoniaco es considerado sustancia peligrosa.
- ✓ La columna de carbonatación debe estar enchaquetada para hacer circular agua a manera de refrigerante, ya que la reacción química que se lleva a cabo en esta es de carácter exotérmica.
- ✓ Asegurarse de que no exista una presurización al interior del equipo. Esto se puede dar cuando los flujos de gas son muy grandes para las dimensiones del equipo, o cuando la purga de alguno de los gases no es eficiente (por estrangulación de mangueras, diámetros insuficientemente grandes de mangueras o boquillas).

2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este experimento ilustra varios conceptos fundamentales, como el de transferencia de masa gas-líquido (absorción), equilibrio ácido-base, reacciones y cinética química, solubilidad, hidrólisis, cálculos estequiométricos y la transferencia de calor. Además, el equipo permite variar las temperaturas de ambas columnas y el flujo relativo de estos gases en relación a la salmuera que se hace fluir en contracorriente.

2.3.1 DESCRIPCION DETALLADA DEL EXPERIMENTO

I. Toma de muestras: para el experimento, se realizó el correspondiente muestreo de aguas de producción en los tanques de almacenamiento, y se procedió siguiendo las reglas generales para ingreso a Campo Escuela Colorado (HSEQ C.E.C)¹¹. Los resultados de los análisis de las aguas de producción obtenidos a partir de una fuente bibliográfica¹², muestran que los iones cloruro se encuentran en gran cantidad (9000-26000 mg/L) en los pozos del campo. Se busca definir si esta concentración de sal en el agua presente en los tanques de almacenamiento es lo suficientemente alta para obtener bicarbonato de sodio a partir de ellas.

II. Filtración de las muestras de agua: a partir de los recipientes de 20 L provenientes del campo, se re-ensaron 5L en 2 recipientes de 2.5 L con el fin de facilitar su manipulación al momento de llevar a cabo la filtración de las muestras con la ayuda de una bomba de filtrado al vacío. Luego de esta operación, ambos recipientes fueron dejados en reposo durante 3 días y así, se presenció una separación por gravedad del petróleo aun disuelto en las mismas, formando 2

¹¹ Reglas generales para el ingreso a Campo Escuela Colorado. 21 de julio 2009.

¹² SIMANCAS CARABALLO Diana Carolina, VILLABONA DELGADO Cindy Carolina, "Diseño y evaluación de un fluido para remoción de escamas de carbonato de calcio a partir de una solución EDTA". Caso aplicado Campo Colorado". Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

fases, como se observa en la Figura 3 (el petróleo en la parte superior del recipiente), lo que favorece a eliminar variables que puedan perturbar los resultados.

Figura 3: Muestra de agua de producción únicamente filtrada al vacío y próxima a decantar.



Fuente: El autor

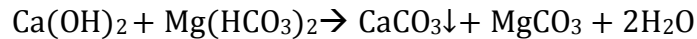
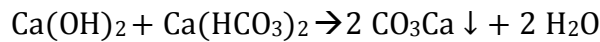
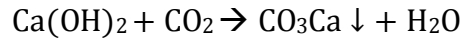
III. Análisis fisicoquímico del agua: con las muestras de agua de producción ya filtradas, se realizó un análisis fisicoquímico de estas. Los parámetros tenidos en cuenta y resultados de este análisis se muestran anteriormente en la Tabla 1. Para el informe completo, ver Anexo B.

IV. Ablandamiento del agua: el ablandamiento químico consiste en la adición de sustancias al agua que reaccionan con los iones calcio y magnesio, transformándolos en compuestos insolubles, que son separados del agua por procedimientos físicos convencionales (decantación y filtración).

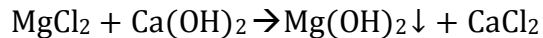
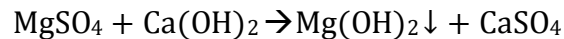
En el agua de producción, hay presencia relativamente alta de metales pesados, sobre todo de magnesio y calcio como se puede comprobar en el análisis fisicoquímico que se realizó de las muestras. Estas sales actúan como contaminante de la salmuera durante la aplicación del proceso Solvay y deben ser

removidas. El ablandamiento del agua de producción a utilizar como salmuera se llevó a cabo mediante un tratamiento con cal sodada. Cuando al agua se le añade cal, tienen lugar las siguientes reacciones de dureza:

Con el calcio:



Con el magnesio:



Determinación de la dosificación necesaria de cal sodada:

Para determinar la dosificación de cal sodada, se tuvo en cuenta la estequiometría de las reacciones. De esta forma puede obtenerse un valor aproximado para realizar la prueba del vaso mediante la siguiente expresión:

$$\text{HC}_T = \text{HC}_{\text{Ca}} + \text{HC}_{\text{Mg}}$$

$$\text{HC}_T = 1.85 \cdot C_{\text{Ca}} + 6.1 \cdot C_{\text{Mg}}$$

en donde, HC_T es el aporte de cal calculado para el tratamiento (en mg/L), C_{Ca} la concentración de calcio que se pretende eliminar del agua (en mg/L), y C_{Mg} la concentración de magnesio que se desea eliminar del agua (en mg/L). La deducción de esta ecuación puede verificarse en el Anexo D.

De esta forma, la cantidad de cal sodada necesaria para ablandar una muestra de agua de producción de estas características, está dada por:

$$\text{HC}_T = 1.85 \cdot (714 \text{ mg/L}) + 6.1 \cdot (179 \text{ mg/L})$$

$$\text{HC}_T = 4825,6 \text{ mg/L}$$

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Presencia de calcio y magnesio a eliminar y cálculo de cantidad de cal sodada necesaria para eliminar el calcio y magnesio presentes.

Concentración [mg/L]	
Calcio	714
Magnesio	179
Cal sodada necesaria	4825,6

Fuente: El autor

La cal sodada se preparó mezclando en un vaso de precipitado, hidróxido de calcio Ca(OH)_2 en un 75%, hidróxido de sodio NaOH en un 3%, hidróxido de potasio KOH en un 1% y agua en un 20% (Ver preparación en Anexo E). Todos estos porcentajes son masicos. Como la cantidad de muestra de agua a tratar fue de 1 Litro, la cantidad de reactivos necesaria se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Dosificación de reactivos para la preparación de la cal sodada

	Masa de reactivo [mg]
Ca(OH)₂:	3667,5
NaOH:	144,8
KOH:	48,3
H₂O:	965,1

Fuente: El autor

Se vertió la mezcla pulverizada de cal sodada en el vaso de precipitado donde se tenía la muestra de agua a procesar y se agitó vigorosamente usando un agitador magnético durante toda la noche. Al día siguiente, se dejó reposar la mezcla por lapso de 5 horas en donde se presencié un aclaramiento del agua y un precipitado solido de color blanco en el fondo (Figura 4), visiblemente más voluminoso que la cantidad inicial agregada de cal sodada.

Figura 4: a) Agua de producción en agitación con cal sodada. b) En reposo con precipitado y agitador magnético sumergido.



a

b

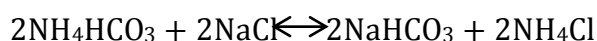
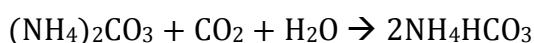
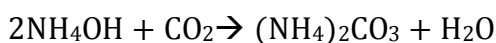
Fuente: El autor

Luego se filtró al vacío toda la muestra en 2 oportunidades. Ver equipo de filtración en Anexo F.

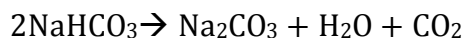
V. Proceso Solvay: para comenzar el experimento se vierten 500mL de salmuera en el embudo contenedor, y se ajusta el flujo a 60 gotas por minuto. Una vez la salmuera alcanza el nivel en el separador para seguir su viaje hacia la columna de carbonatación, los gases (amoníaco y dióxido de carbono) son inyectados por su respectiva entrada a un flujo volumétrico aproximado de 3,70 mL/s para el NH_3 y de 4,21 mL/s para el CO_2 . La técnica utilizada para realizar la medición del flujo de gases se explica en detalle en el Anexo G. Vale la pena tener en cuenta, que la inyección de los gases se hace después ajustar el flujo de líquido, con el fin de formar un nivel de líquido en el separador, que actúa a manera de trampa y asegura que la salmuera descienda hacia la segunda columna a una velocidad constante, y que el CO_2 , que no se absorbió en la columna de carbonatación no ascienda hacia la de absorción de amoníaco y se mezcle con este.

Absorción reactiva

Una vez los gases están fluyendo en el sistema, la salmuera desciende por la primera columna, mientras el amoníaco asciende, dándose así la absorción de NH_3 en la salmuera por flujo en contra corriente. Después de la absorción de amoníaco, la salmuera es llamada salmuera “amoniacal” y está lista para el proceso de carbonatación. Al llegar al separador la salmuera amoniacal, fluye hacia la columna de carbonatación en forma descendente, donde entra en contacto con el CO_2 que está siendo inyectado de forma constante y de manera ascendente en el sistema (al igual que en la columna anterior, la absorción reactiva se da por un flujo en contra corriente). En esta etapa del experimento ocurren las siguientes reacciones:



Finalmente, en el balón recolector se obtiene una solución matriz donde se encuentran impurezas principalmente de NaCl sin reaccionar y de NH_4Cl , y además, el producto de interés disuelto y precipitado (NaHCO_3) a partir del cual se obtiene la soda ash, mediante un proceso de descomposición térmica aplicado al bicarbonato de sodio obtenido (calentamiento entre 160°C – 230°C). A continuación se muestra la reacción que representa este último paso para llegar a la obtención del carbonato de sodio (Ver Anexo M):



VI. Caracterización de la solución matriz: al finalizar el recorrido a través de las etapas que constituyen el experimento que se ha propuesto en este trabajo, se obtiene en el balón colector una solución matriz, que como se mencionó anteriormente posee bicarbonato de sodio disuelto y precipitado. Se solicitó un análisis fisicoquímico de esta solución matriz al departamento de Consultas Industriales de la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados de estos análisis se presentaran en la sección de resultados, junto

con los datos obtenidos de las soluciones matrices, generadas cuando se aplicaron modificaciones en las variables de entrada.

VII. Obtención del carbonato de sodio: una vez obtenido el bicarbonato de sodio en la solución matriz, se realizó el procedimiento de descomposición térmica, llevando el NaHCO_3 hasta una temperatura de entre 180 y 220°C en un crisol (capsula), con la ayuda de un quemador Bunsen y un trípode. Se midió el pH a una solución saturada con el producto obtenido de la descomposición y se obtuvieron valores entre 11 y 12. Esto indica la presencia de carbonato de sodio, pues una solución de bicarbonato posee un pH menos básico (del orden de 8). Además, se comprobó la obtención de la soda ash comparando la masa del compuesto antes y después del proceso en el crisol. La masa obtenida fue la que se predijo estequiometricamente suponiendo que el producto sería carbonato de sodio (Ver Anexo M).

2.3.2 MODIFICACION EN LAS VARIABLES DE ENTRADA

Con el fin de evaluar de manera cuantitativa y cualitativa el funcionamiento del equipo de laboratorio, se establecieron tres alternativas en las cuales se correría el equipo.

1. Salmuera preparada (agua sintética): se preparó una solución de 500 mL en volumen de agua destilada, con 100 g de cloruro de sodio (NaCl) disuelto, para así, obtener una salmuera de 0,2 g/mL o de 200.000 ppm de concentración. Según una fuente literaria consultada, salmueras con valores de concentración alrededor de este orden son las que se suelen usar en las plantas Solvay productoras de soda ash¹³. Estos parámetros fueron tenidos en cuenta con el fin de trabajar una solución de concentración de sal mucho mayor a la presente

¹³ABRAHAM J.M, et al. "Didáctica de la Química y Vida Cotidiana". Madrid, 2003. Universidad Politécnica de Madrid. Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

normalmente en el agua de producción del campo Colorado, y así, bajo estas condiciones poner a punto el equipo, además de incrementar la probabilidad de obtención de producto.

2. Agua de producción pre tratada: una vez comprobado el óptimo funcionamiento del equipo y habiendo garantizado la obtención de producto, se procedió a realizar una nueva prueba; esta vez, con el agua de producción pre tratada (ablandada con cal sodada). Se probó con 500 mL de agua de producción y se repitió el experimento. Se realizaron 2 repeticiones, obteniendo así, dos soluciones matriz de 500mL al final, las cuales se analizaron fisicoquímicamente para evaluar la presencia de bicarbonato de sodio disuelto y precipitado.

3. Agua de producción pre tratada y concentrada en NaCl: finalmente, se realizó una prueba, también con agua de producción pre tratada, pero agregando una cantidad extra de NaCl a la muestra, con el fin de emular aguas de producción con una mayor concentración de sal y así, darle un alcance más allá al procedimiento propuesto y evaluar el proceso Solvay al agua con niveles más altos de salinidad. Se tomó como referencia el análisis del agua en campos maduros en Brasil (Tabla 4), presentado en detalle en el artículo *“Produced Water Reuse for Production of Chemicals”*¹⁴.

Tabla 4: Parámetros químicos analizados para el agua de producción tratada por flotación y ablandamiento.

pH	9,85
Turbiedad (NTU)	8,3
Cl ⁻ (g/L)	34
Na (g/L)	27,6
K (mg/L)	240
Mg (mg/L)	250
Ca (mg/L)	16

¹⁴ CARVALHINHO GRIMALDI Mauricio, et al. Produced Water Reuse for Production of Chemicals. SPE International.

Fuente: CARVALHINHO GRIMALDI Mauricio, et al. "Produced Water Reuse for Production of Chemicals." SPE 127174. Brasil 2010.

Según los datos de sodio y cloruros que se reportan en este estudio, se puede deducir la cantidad de sal disuelta en estas aguas, que dan origen a la concentración de iones Na^+ y Cl^- mediante el siguiente análisis estequiométrico:



Mediante el cálculo mostrado en el Anexo H, se obtuvo que la cantidad de sal necesaria para concentrar una muestra de 500 mL de agua de C.E.C, es de 24,79 g de NaCl, valor que se redondeó a 25 g.

Los resultados obtenidos al correr el equipo Solvay de laboratorio con el agua reacondicionada se presentarán y discutirán posteriormente.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

En los resultados obtenidos en el análisis químico de las soluciones matrices, se presentan datos de concentración de iones bicarbonato (HCO_3^-). Es importante mencionar que estos aniones provienen del bicarbonato de sodio y fueron reportados de esta manera a causa de la metodología de titulación utilizada en el análisis.

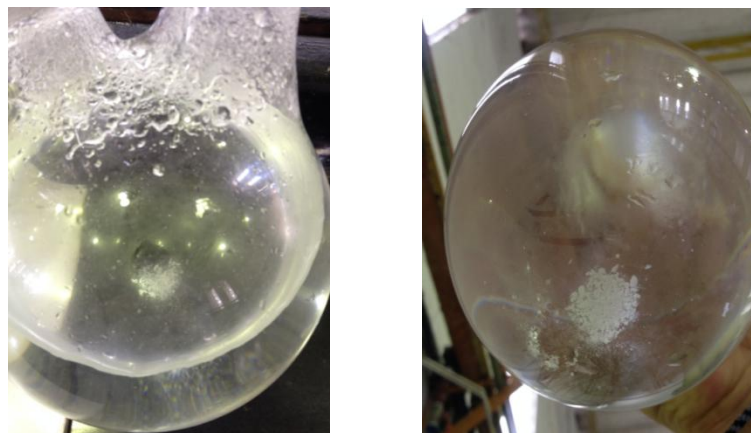
La cantidad de bicarbonato precipitado se presenta en porcentaje en masa. Para determinar la masa bicarbonato, bastaría con conocer la masa total de precipitado y multiplicarla por el porcentaje de bicarbonato reportado en los resultados. No fue posible determinar la masa total de precipitado seco con las técnicas utilizadas en el análisis químico de las muestras.

Después de obtener el bicarbonato de sodio en la solución matriz, disuelto y precipitado, se tomó el disuelto (debido a que se sabía la cantidad exacta) para aplicarle el respectivo procedimiento de descomposición térmica y de esta manera obtener finalmente la soda ash (ver Anexo M).

3.1 OBTENCION DE UNA SOLUCION DE BICARBONATO DE SODIO Y OTRAS SALES DISUELTAS (SOLUCION MATRIZ) A PARTIR DE SALMUERA PREPARADA A UNA CONCENTRACION DE CLORURO DE SODIO ESPECIFICA

Por ser la prueba de carácter preliminar para verificar el correcto funcionamiento del equipo, se modificaron varios aspectos a medida que se hacían corridas. Cuando la mezcla reaccionó, se recolectó en el balón, y al final, fue posible observar la formación de precipitado (Figura 5) en un lapso aproximado de tres horas.

Figura 5: Solución matriz obtenida en la prueba con la solución preparada a partir de agua destilada y sal. Precipitado solido blanco amorfo obtenido en el fondo del balón



Fuente: El autor

Se realizó un estudio fisicoquímico de la solución obtenida. Los resultados de la cantidad de producto deseado (NaHCO_3) presente en la solución matriz, junto con el dato de carbonato de sodio obtenido (Tabla 5) se muestran a continuación:

Tabla 5: Caracterización solución matriz a partir de salmuera y Na_2CO_3 obtenido a partir del bicarbonato disuelto.

SALMUERA	Resultado
Muestra	Valor
HCO_3^- disuelto (mg/L)	17690
HCO_3^- precipitado (%masa)	4,56%
Na_2CO_3 obtenido (mg)	5520

Fuente: El autor

El informe completo se puede encontrar en el Anexo I.

3.2 OBTENCION DE UNA SOLUCION MATRIZ A PARTIR DE AGUA DE PRODUCCION FILTRADA AL VACIO Y ABLANDADA

Siguiendo el mismo protocolo de operación del equipo definido en las pruebas con la salmuera sintética, se procedió con el experimento para una muestra de agua de producción, teniendo en cuenta las consideraciones definidas anteriormente. En esta prueba se observó una mayor cantidad de precipitado blanco en el fondo del balón recolector (ver figura 6). Se observó un calentamiento en la columna de carbonatación. Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan en la Tabla 6. (No se reporta carbonato de sodio, debido a que todo el que se produjo fue en forma de precipitado).

Tabla 6: Caracterización solución matriz a partir de agua de producción de C.E.C.

Agua de producción	Concentraciones
Muestra	Valor

HCO ₃ ⁻ disuelto (mg/L)	0
HCO ₃ ⁻ precipitado (%masa)	30,6%

Fuente: El autor

Figura 6: Solución matriz obtenida de agua de producción de C.E.C. (Nótese la presencia de precipitado).



Fuente: El autor

El informe completo se presenta en el Anexo I.

3.3 OBTENCION DE UNA SOLUCION MATRIZ A PARTIR DEL AGUA DE PRODUCCION PRETRATADA FILTRADA AL VACIO Y ABLANDADA AUMENTANDO SU CONCENTRACION DE CLORURO DE SODIO INICIAL

Una vez más, mediante el mismo el procedimiento ya descrito, se llevó a cabo el experimento con una muestra que se preparó agregando NaCl en la cantidades ya calculadas en la sección 2.3.2 y con más detalle en el Anexo H.

Al final de la prueba se obtuvo el precipitado blanco esperado, también en mayor proporción que con la salmuera sintética y que con el agua de producción ablandada inalterada (ver figura 7). El resultado del análisis realizado a la solución matriz, junto con la soda ash obtenida a partir de la descomposición térmica del NaHCO₃ se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Caracterización solución matriz a partir de agua de producción de C.E.C concentrada con NaCl y Na₂CO₃ obtenido a partir del bicarbonato disuelto.

Agua de producción concentrada en NaCl	Concentraciones
Muestra	Valor
HCO ₃ ⁻ disuelto (mg/L)	13115
HCO ₃ ⁻ precipitado (%masa)	26,7%
Na ₂ CO ₃ obtenido (mg)	4040

Fuente: El autor

Figura 7: Solución matriz obtenida de agua de producción del C.E.C pre tratada y concentrada manualmente en cloruro de sodio. (Nótese la presencia de precipitado solido en el producto.



Fuente: El autor

El informe completo se presenta en el Anexo I.

3.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

- I. Se observó un calentamiento substancial tanto en el separador como en la columna de carbonatación. Esto fue un indicio de que hubo reacción en el equipo, pues se sabe que la reacción del CO_2 con la solución saturada de NaCl y NH_3 es exotérmica. Mediante una pistola de infrarrojo (ver imagen en Anexo J), se cuantificó este cambio de temperatura, resultando en un aumento de aproximadamente 19°C . Este incremento de temperatura hace que la solubilidad de los reactivos gaseosos disminuya (principalmente el NH_3), provocando una disminución en la eficiencia del proceso. Se procedió a refrigerar mediante un flujo constante de agua fría a través del enchaquetado de la columna de modo que asegurara la saturación de la solución con aquellos gases.
- II. Al observar la información obtenida en el análisis químico de las 3 soluciones matriz, se puede afirmar que es posible obtener bicarbonato de sodio utilizando el montaje descrito. Además, este resultado es de gran importancia pues implica que si se opta por agua de producción pre tratada como materia prima, se asegura la obtención de bicarbonato de sodio, y que este, depende directamente de la concentración de NaCl presente naturalmente en el agua de producción a tratar, lo que a su vez significa, la posterior obtención de “soda ash” mediante una descomposición térmica del NaHCO_3 obtenido.
- III. Es recomendable controlar el pH, pues tiende a tomar valores muy altos (superiores a 12), lo que provoca que el bicarbonato reaccione con los compuestos alcalinos y se consuma para formar impurezas, lo que distorsiona cuantitativamente la cantidad de bicarbonato final obtenido¹⁵
- IV. Por otro lado, teniendo en cuenta que es la primera vez que se utiliza el equipo, la cantidad obtenida de producto deseado fue satisfactoria, lo que implica que el diseño de las absorciones en las columnas, del separador y el cálculo de los flujos de entrada de gas fueron acertados.

¹⁵ SANCHEZ SAN ROMAN Javier, “Especies Carbonatadas”. Universidad de Salamanca. Departamento de Geología

4. CONCLUSIONES

- ✓ La puesta en marcha del equipo que representa el proceso Solvay a escala de laboratorio resultó satisfactoria en relación con los objetivos planteados. Este quedará disponible para futuros trabajos en el laboratorio de procesos de ingeniería química.
- ✓ Se logró obtener una cantidad apreciable de bicarbonato de sodio, que posteriormente se transformó en soda ash, como producto de este experimento, a partir de agua de producción pre tratada como materia prima.
- ✓ Se observó que la cantidad de producto obtenido depende la concentración de NaCl existente en el agua de producción a tratar, del pH tanto del agua como de la solución matriz final, del control de la presión interna del equipo, de la temperatura del separador y de la columna de carbonatación, del flujo de los gases inyectados y de la acumulación de producto en las paredes del equipo.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar futuras investigaciones involucrando operaciones o técnicas que puedan llegar a aumentar la eficiencia del proceso solvay realizado a escala de laboratorio y utilizando como materia prima aguas de producción de campos petroleros.
- ✓ Llevar a cabo un modelamiento en un simulador tipo ASPEN PLUS o ASPEN HYSYS para evaluar el proceso Solvay con agua de producción a escala piloto e industrial, teniendo en cuenta los datos y la información obtenida en la presente tesis.
- ✓ Hacer un estudio económico y financiero sobre la viabilidad del proceso Solvay utilizando aguas de producción. Estudiar el montaje y puesta en marcha de una planta de este tipo. Evaluar costos fijos, variables, inversión inicial, portafolio de servicios, modelo de negocio y flujo de ingresos operacionales
- ✓ Se considera de gran valor poder realizar una investigación más profunda sobre las reacciones primarias y secundarias involucradas en este proceso, partiendo de los datos experimentales obtenidos en esta tesis. Determinar la cinética de las reacciones y la información termodinámica para detallar aún más la naturaleza del proceso y el futuro diseño de una planta de este tipo.
- ✓ Garantizar el manejo adecuado de los flujos de gas, y tener en cuenta todas las medidas de precaución y seguridad para manejo de sustancias peligrosas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Artículos:

1. CARVALHINHO GRIMALDI Mauricio, CATRISANA Walterli José, CORADINI TOLFO Fabiano, TRASNPETRO; PROTTI CHRISTINO Fernando, LIMOEIRO GERALDO Lucia María, COUTINHO SALIBA Gustavo, BASTOS LOPES Daniela Emilia, PETROBRAS, **“Produced Water Reuse for Production of Chemicals.”** Publicación Society of Petroleum Engineers, SPE. Rio de Janeiro, 2010.
2. DE ARAÚJO Adriano L., NEVES Carlos A., FERREIRA Ana María C., ARAKI Koiti, **“Simulação do Processo Solvay no Laboratório Didático”** São Paulo, 1997.
3. CVN, Centro Virtual de Negocios S.A.S., **“Informe Químico del Sector”**www.centrovirtualdenegocios.com
4. ARPEL, Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe **“Disposición y Tratamiento del Agua Producida.”**
5. ARNOLD Richard, BURNETT David B, ELPHICK Jon, FEELEY Thomas J, GALBRUN Michel, HIGHTOWER Mike, JIANG Zhizhuang, KHAN Moin, LAVERY Matt, LUFFEY Fred, VERBEEK Paul, **“Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso”** Publicación Oilfield Review 2004.
6. RECERCAT, **“Planta de producción de carbonato sódico”**<http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/3575/projecte%20c1-c2.pdf?sequence=4>.
7. BAILEY B, CRABTREE M, TYRIE J, ELPHICK J, KUCHUK F, ROMANO C, ROODHART L, **“Control del agua”** Oilfield review. Verano de 2000.
8. ESPIGARES GARCIA M, PEREZ LOPEZ J.A, **“Precipitación química, ablandamiento del agua”**.
9. ALDANA CUESTAS Harold Andrés, ARAMBURO VELEZ Daniel Andrés, **“Agua de formación”**. Bogotá, 2011. Universidad de América. Facultad de Ingeniería de Petróleos.

10. SANCHEZ SAN ROMAN Javier, **“Especies Carbonatadas”**. Universidad de Salamanca. Departamento de Geología

Libros:

1. BROWN Theodore L, LEMAY H. Eugene, BURSTEN Bruce E, MURPHY Catherine J, **“Química La Ciencia Central”**. Prentice Hall. México, 7ª ed., 1998.
2. HIMMELBLAU, David. **“Principios básicos y cálculos en ingeniería química”**. Prentice Hall Iberoamericana. México 1997.

Tesis:

1. SIMANCAS CARABALLO Diana Carolina, VILLABONA DELGADO Cindy Carolina, **“Diseño y evaluación de un fluido para remoción de escamas de carbonato de calcio a partir de una solución EDTA”**. Caso aplicado Campo Colorado”. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

Manuales:

1. ABRAHAM J.M, et al. **“Didáctica de la Química y Vida Cotidiana”**. Madrid, 2003. Universidad Politécnica de Madrid. Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales


7. ANEXOS

Anexo A: Fotografía real del equipo montado y en funcionamiento




Fuente: El autor

Anexo B: Informe de resultados - Análisis fisicoquímico del agua de producción de Campo Escuela Colorado




SIHSA
SISTEMAS HIDRÁULICOS Y SANITARIOS LTDA.

LABORATORIO AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



IDEAM
Nov. 2008 de 10 Octubre 2011



SGS
"Hacia el cumplimiento, gestión de calidad, satisfacción, excelencia y ética en servicio para el bienestar de la comunidad."
Publicación de agua. Tratamiento de agua residual. Tratamiento de agua industrial. Tratamiento de agua de consumo humano.

Informe No.1141/13
Fecha de emisión: Diciembre 20 de 2013

Solicitante – Contacto:	CAMILO ANDRES DIAZ GUTIERREZ
Dirección, teléfono del cliente:	Calle 108 # 22ª 98 –Tel: 6364589
Identificación de la muestra:	Muestra N°1
Protocolo de muestreo:	Procedimiento del Cliente
Matriz de la muestra:	Agua Residual Industrial
Lugar y punto de muestreo:	Salida del Proceso
Fecha y hora de muestreo:	Diciembre 16 de 2013 11:00
Muestra tomada por:	Sr: Camilo Andrés Díaz
Fecha y hora recepción laboratorio:	Diciembre 16 de 2013 – 12:30
Muestras recibidas por:	Bact: Jorge Novoa
Fecha de análisis:	Diciembre 16 – Diciembre 20 de 2013

ANALISIS	UNIDADES	RESULTADO	METODO ANALITICO
TIPO DE MUESTRA: PUNTUAL			
ANALISIS FISICOQUIMICOS EN LABORATORIO			
pH	Unidades pH	7.11	SM 4500 H ⁺ B / Potenciométrico
Turbiedad	NTU	151	SM 2130 B / Turbidimétrico
Calcio	mg Ca/L	714	SM 3500 Ca-B / Titulométrico EDTA
Magnesio	mg CaCO ₃ /L	179	SM 3500 Mg-B / Cálculo
Hierro Total	mg Fe /L	5	SM 3500 Fe-B / Espectrofotométrico
Cloruros	mg Cl/L	10216	SM 4500 Cl ⁻ B / Argentométrico
Sodio	mg Na/L	2490	Electrodo Ion Selectivo

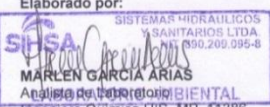
SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition, 2005, APHA, AWWA, WEF.

- Laboratorio autorizado para realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos para agua de consumo humano, según resolución N° 4353 del 23 de Octubre de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social.
- Parámetros Acreditados: DBO₅, DQO, Grasas y Aceites, pH, Sólidos Disueltos Totales, Sólidos Suspendedos totales, Sólidos totales, Calcio Disuelto, Dureza Cálcica, Dureza Total, Alcalinidad, Cloruros, Sulfatos, Conductividad Eléctrica, Muestreo simple y compuesto.

Observaciones: Ninguna.

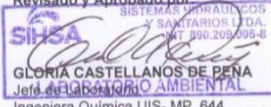
"Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él"
Prohibida su reproducción sin la autorización del LABORATORIO AMBIENTAL SIHSA LTDA

Elaborado por:



MARLEN GARCÍA ARIAS
Ingeniera Química UIS- MP. 11386

Revisado y Aprobado por:



GLORIA CASTELLANOS DE PEÑA
Ingeniera Química UIS- MP. 644

FL-0031 Rev: 10 Septiembre 04 de 2013. Página 1 de 1

Sistemas Hidráulicos y Sanitarios Ltda.
Cra 30 # 31 - 35 Bucaramanga, Colombia - Sitio Web: www.sihsa.co
E-mail: info@sihsa.co - Teléfonos: +57 7 635 17 44, +57 7 645 07 56
Fax: +57 7 634 38 96
Celular: +57 320 3332345

www.sihsa.co

Fuente: El autor

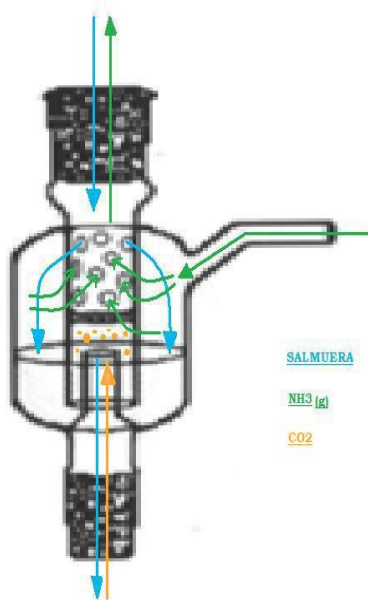
Anexo C: Fotografías unidades del equipo de laboratorio

- Dos columnas Vigreux:



Fuente: El autor.

- Un separador tipo campana:



a



b

a) Esquema de flujo de gases y salmuera a través del separador tipo campana. b) Separador tipo campana real desmontado.

Fuente: El autor.

- Embudo con ecualizador de presión contenedor de salmuera:



Fuente: El autor.

- Matraz recolector:



Fuente: El autor

- Cilindro de amoniaco:



Fuente: El autor

- Cilindro de dióxido de carbono:



Fuente: El autor

Anexo D: Deducción de la expresión para calcular la cantidad de cal sodada para llevar a cabo el ablandamiento

La eliminación de un mol de calcio (40 g), en forma de bicarbonato, requiere un aporte de un mol de hidróxido de calcio (74 g). La eliminación de una determinada concentración de calcio (C_{Ca}), se producirá con la siguiente cantidad de hidróxido cálcico (HC_{Ca}):

$$HC_{Ca} = \frac{C_{Ca}(74)}{40} = (1,85)C_{Ca}$$

La eliminación de un mol de magnesio (24.3 g), requiere dos moles de cal, ya que se necesita un mol para su transformación en carbonato de magnesio y otro mol para convertir éste en hidróxido de magnesio, de acuerdo con su reacción. Por tanto, la eliminación de una determinada concentración del exceso de magnesio del agua (C_{Mg}), se producirá con la siguiente cantidad de hidróxido de calcio (HC_{Mg}):

$$HC_{Mg} = \frac{C_{Mg}(2)(74)}{24,3} = (6,1)C_{Mg}$$

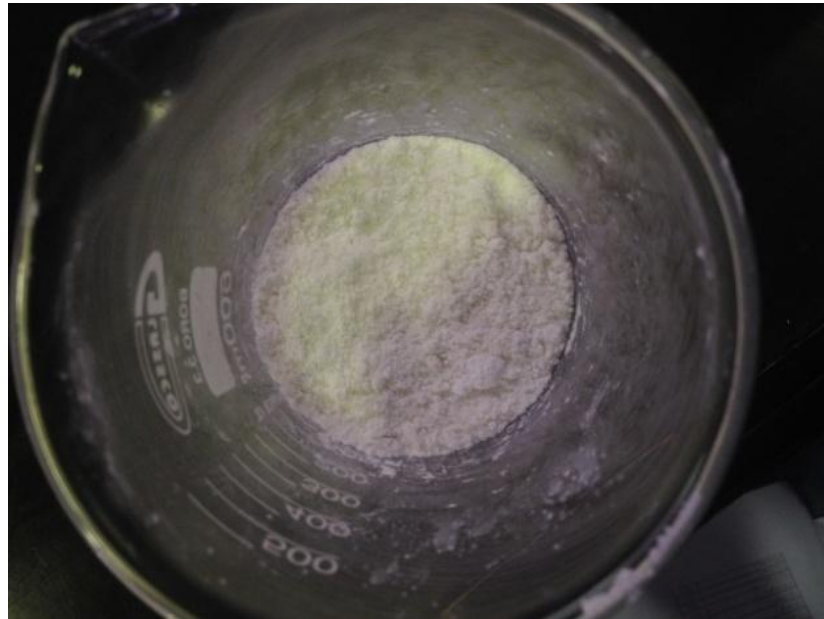
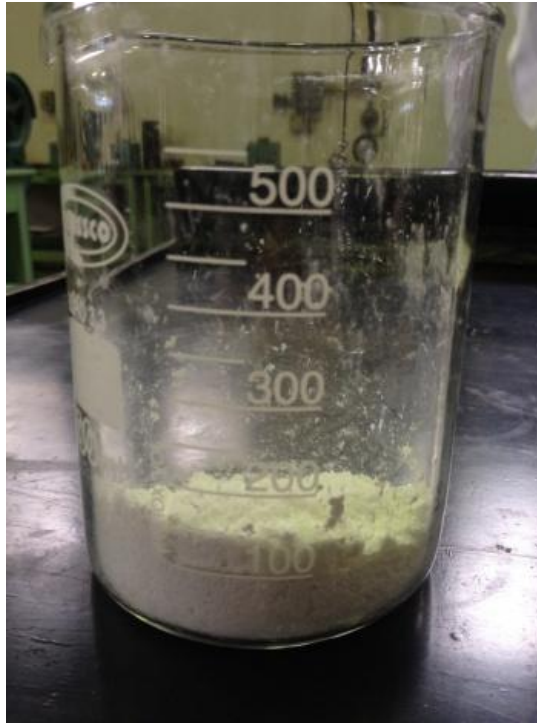
Entonces, la cantidad HC_T de cal sodada necesaria esta dada por:

$$HC_T = HC_{Ca} + HC_{Mg}$$

$$HC_T = 1.85 \cdot C_{Ca} + 6.1 \cdot C_{Mg}$$

en donde, HC_T es el aporte de cal calculado para el tratamiento (en mg/L), C_{Ca} la concentración de calcio que se pretende eliminar del agua (en mg/L), y C_{Mg} la concentración de magnesio que se desea eliminar del agua (en mg/L).

Anexo E: Cal sodada preparada



Fuente: El autor

Anexo F: Equipo de filtrado al vacío



a



b

Fuente: El autor

Anexo G: Determinación de los flujos volumétricos de gas

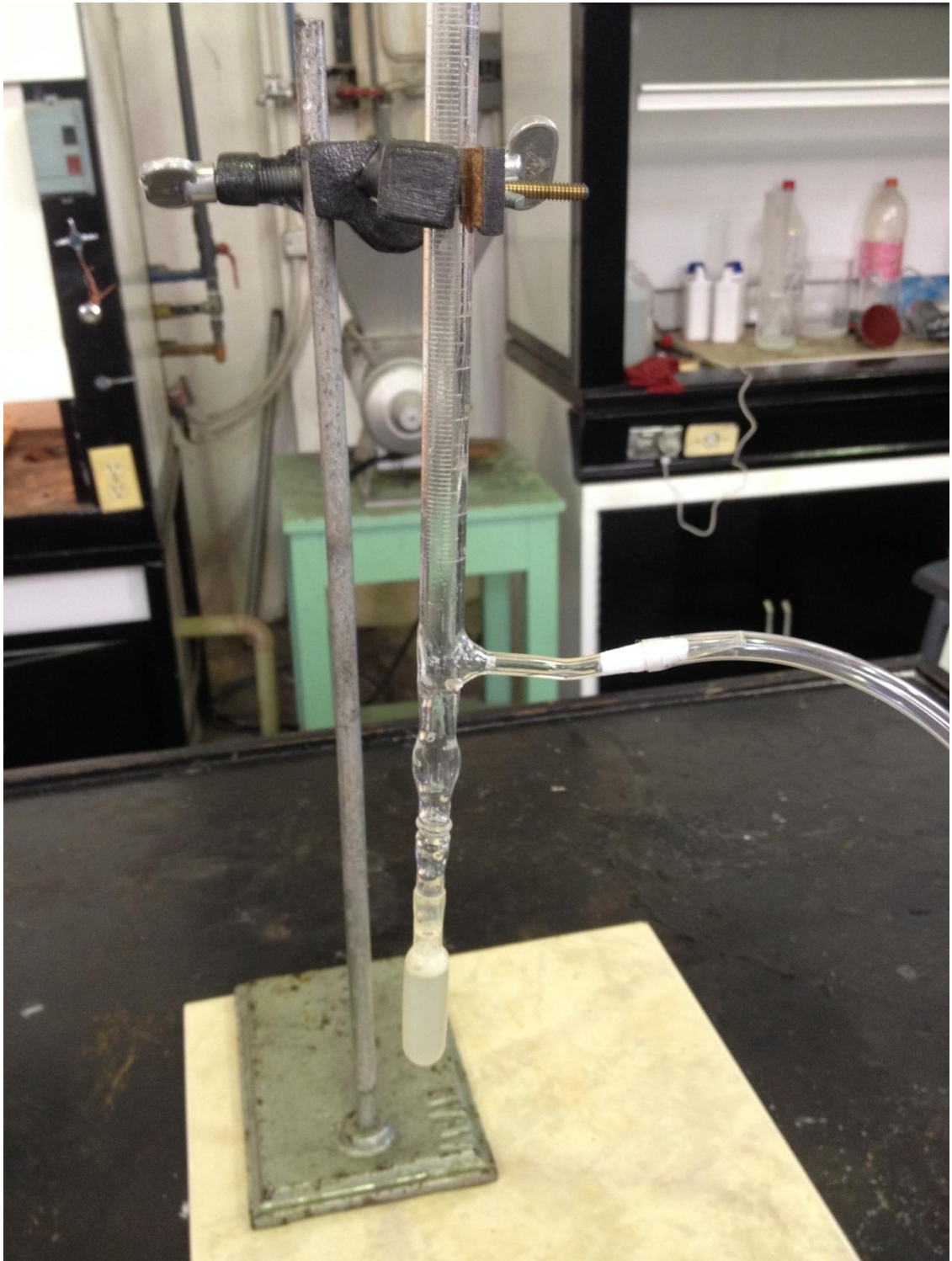
Los flujos fueron calculados mediante la implementación de una bureta con entrada lateral y un bulbo con una solución de agua y jabón para formar burbujas. Estas recorren un volumen determinado a lo largo de la bureta cuando el gas es inyectado por la entrada lateral. Midiendo el tiempo en el que las burbujas recorren una cantidad de volumen definida, se puede medir el flujo volumétrico de entrada del gas, para cada sustancia por separado. Se realizaron 5 ensayos para un volumen fijo y se cronometró el tiempo en recorrerlo. Luego, redefinió el volumen que debía recorrer y se volvió a cronometrar. Este procedimiento se repitió en 3 volúmenes diferentes en el caso del amoniaco y en 2 volúmenes en el del dióxido de carbono. Trabajando con este último, se pudo notar que las burbujas se revientan con más rapidez y por esta razón, solo se pudieron realizar mediciones solamente con 2 volúmenes definidos y más pequeños. Se promedió el resultado obtenido para los 5 ensayos en cada volumen y así se obtuvo un flujo volumétrico promedio para cada gas, con un menor margen de error. En la siguiente tabla, se muestran los datos obtenidos mediante este procedimiento y el cálculo final del flujo de los gases.

NH ₃ Volumen [mL] Ensayo	tiempo [s]		
	25	20	15
1	6,76	5,62	4,00
2	6,41	5,61	4,21
3	6,53	5,38	4,24
4	6,47	5,42	4,14
5	6,65	5,52	3,96
t _{promedio} [s]	6,56	5,51	4,11

Flujo volumétrico promedio [mL/s]	3,70
--	-------------

CO ₂ Volumen [mL] Ensayo	tiempo [s]	
	15	10
1	3,48	2,61
2	3,62	2,42
3	3,49	2,30
4	3,5	2,42
5	3,39	2,38
t _{promedio} [s]	3,50	2,43

Flujo volumétrico promedio [mL/s]	4,21
--	-------------



Fuente: El autor

Anexo H: Calculo estequiometrico para determinar la cantidad de sal necesaria para concentrar la muestra de agua del C.E.C



Esto significa que por cada mol de iones sodio presente se requiere 1 mol de NaCl para generarlos. El mismo razonamiento aplica para los iones cloro.

Según los datos de la tabla, tenemos:

$$\text{Concentracion de Na} = 27,6 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 0,0276 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

$$\text{Concentracion de Cl} = 34 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 0,034 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Utilizando los pesos moleculares, se puede calcular la cantidad de masa necesaria para llevar a cabo dicha reacción de disociación.

$$0,0276 \text{ g Na} * \frac{1 \text{ mol Na}}{23 \text{ g Na}} = 1,2 * 10^{-3} \text{ moles Na}$$

$$0,034 \text{ g Cl}^- * \frac{1 \text{ mol Cl}^-}{35,45 \text{ g Cl}^-} = 9,5774 * 10^{-4} \text{ moles Cl}^-$$

Entonces, aquí se puede decir que se necesitan $9,5774 * 10^{-4}$ moles de NaCl para tener una concentración de iones igual a la del agua de producción reportada en el artículo. Esto en masa seria:

$$9,5774 * 10^{-4} \text{ moles NaCl} * \frac{58,45 \text{ g NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} = 0,0559 \text{ g NaCl}$$

Ahora, se hace exactamente el mismo procedimiento, pero ahora teniendo en cuenta los datos obtenidos a partir de la caracterización fisicoquímica del agua de producción de Campo Escuela Colorado para así averiguar la cantidad de NaCl que debe estar presente en el agua para lograr una concentración de iones igual a la reportada en el análisis de laboratorio:

$$2,54 * 10^{-3} g Na * \frac{1 mol Na}{23 g Na} = 1,0826 * 10^{-4} moles Na$$

$$0,10216 g Cl^{-} * \frac{1 mol Cl^{-}}{35,45 g Cl^{-}} = 3,4302 * 10^{-4} moles Cl^{-}$$

Así, las moles necesarias de NaCl para lograr esta concentración de iones Na y Cl es de $1,0826 * 10^{-4} moles$. La masa necesaria en gramos es de:

$$1,0826 * 10^{-4} moles NaCl * \frac{58,45 g NaCl}{1 mol NaCl} = 6,32 * 10^{-3} g NaCl$$

Entonces, para encontrar la cantidad de NaCl que se necesita agregar a 1 mL de agua de producción, basta con restar la cantidad de cloruro de sodio presente en el “pozo más salado” menos la cantidad presente en los pozos del Campo Colorado. Esto es:

$$0,0559 g NaCl - 6,32 * 10^{-3} g NaCl = 0,0495 g NaCl$$

Como se decidió que el volumen de agua de producción concentrada a tratar mediante el Proceso Solvay es de 500 mL, entonces:

$$0,0495 \frac{g}{mL} NaCl * 500 ml sln = \mathbf{24,79 g NaCl}$$

Anexo I: Informe - Análisis químico de las 3 soluciones matriz

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 2	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1659 de 2011, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 5534 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-14-009	Fecha de emisión:	Enero 31 de 2014
Cliente:	CAMILO ANDRES DIAZ Y JUAN CAMILO NAVARRO		
Dirección del cliente:	Escuela de Petróleos (UIS)		
Solicitud de servicio No.	14-029	No. de muestras:	03
Fecha de recepción de las muestras:	Enero 27 de 2014		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Enero 29 de 2014 – Enero 31 de 2014		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	14-029-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Solución Matriz #. 2		
Matriz de la muestra:	Solución		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Laboratorio Procesos Ingeniería Química / Equipo		
Fecha del muestreo:	Enero 22 de 2014		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO
Bicarbonato Disuelto (mg HCO ₃ ⁻ /L)	0	Titrimétrico
Bicarbonato Precipitado (% HCO ₃ ⁻)	30,6	Titrimétrico

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	14-029-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Solución Matriz #3		
Matriz de la muestra:	Solución		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Laboratorio Procesos Ingeniería Química / Equipo		
Fecha del muestreo:	Enero 24 de 2014		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO
Bicarbonato Disuelto (mg HCO ₃ ⁻ /L)	13115	Titrimétrico
Bicarbonato Precipitado (%HCO ₃ ⁻)	26,7	Titrimétrico

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com;
laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

(Muestra 1: solución matriz de agua obtenida de producción del campo Colorado ablandada.
 Muestra 2: solución matriz obtenida de agua de producción del campo Colorado ablandada y aumentando su concentración de sal)

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 2	

Informe de resultados No. I -14-009 Solicitud de servicio No. 14-029

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	14-029-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Solución Matriz #4		
Matriz de la muestra:	Solución		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Laboratorio Procesos Ingeniería Química / Equipo		
Fecha del muestreo:	Enero 24 de 2014		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO
Bicarbonato Disuelto (mg HCO ₃ ⁻ /L)	17690	Titrimétrico
Bicarbonato Precipitado (%HCO ₃ ⁻)	4,56	Titrimétrico

Observaciones: La solución matriz # 2 tiene una mezcla de hidróxidos y carbonatos.

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Elaboró: Amparo López Guerrero

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com;
laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

(Muestra 3: solución matriz obtenida de salmuera preparada con una concentración de NaCl específica)

Anexo J: Medición del cambio de temperatura por reacción exotérmica



Fuente: El autor

Anexo K: Cantidad de productos químicos importados

CANTIDAD DE PRODUCTOS QUIMICOS EN KGS. ENERO - OCTUBRE ULTIMOS DOS AÑOS			
PRODUCTO QUÍMICO	CANTIDAD EN KGS 2009	DIFERENCIA 2009-2010	CANTIDAD EN KSG 2010
Sulfato de disodio	135.943.372,98	23,37%	167.717.175,09
Carbonato de disodio	96.176.744,75	54,65%	148.739.453,85
En disolución acuosa (lejía de sosa o soda cáustica)	89.661.043,22	-9,09%	81.507.510,60
Amoniaco anhidro	62.133.627,88	13,33%	70.418.639,60
Metanol (alcohol metílico)	37.775.715,25	50,00%	56.663.380,94
Trifosfato de sodio (tripolifosfato de sodio)	19.318.742,70	9,64%	21.181.655,36
Peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), incluso solidificado con urea.	15.584.820,62	20,01%	18.703.846,71
Ciclohexano	1.691.392,75	895,76%	16.842.188,04
Acetato de vinilo	14.012.963,07	5,05%	14.720.480,60
Metiloxirano (óxido de propileno)	11.806.255,41	-6,59%	11.028.219,00
2Etilhexanol	11.449.156,54	-12,15%	10.058.396,39
Hidrogenocarbonato (bicarbonato) de sodio	5.176.511,07	75,01%	9.059.645,81
Toluendiisocianato	7.554.744,76	18,97%	8.987.964,14
Acido acético	8.325.846,33	6,77%	8.889.661,62
Hidróxido de aluminio	2.502.252,71	244,84%	8.628.715,90
Alcohol propílico	6.525.803,55	21,98%	7.960.186,15
Ácido fosfórico de concentración superior o igual al 75%	8.877.821,66	-11,71%	7.837.807,65
Etileno	4.890.970,80	52,33%	7.450.444,50
Acido cítrico	3.687.748,03	82,97%	6.747.618,35
Glyfosato (ISO)	3.343.786,02	55,38%	5.195.628,05
	546.439.320,10	25,97%	688.338.618,35

Fuente: Informe sector Químico. "Mas de 300 millones en químicos importa Colombia". Centro Virtual De Negocios S.A.S. (CVN). www.centrovirtualdenegocios.com

Anexo L: Características del agua de producción de los pozos COL 42, COL 52 y COL 69 de Campo Escuela Colorado

COL 42		
Muestra		Medida Promedio
Cationes mg/L	Calcio	241,47
	Bario	0,3
	Hierro	0,93
	Magnesio	38,73
	Potasio	42,19
Aniones mg/L	Bicarbonatos	261,79
	Sulfatos	13,17
	Cloruros	11829,52
Dureza total mg CaCO ₃ /L		4028,93
Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L		214,58
Conductividad mS/cm		34,2
Resistividad Ωm		0,29
PH		6,81

COL 52		
Muestra		Medida Promedio
Cationes mg/L	Calcio	357,93
	Bario	3,31
	Hierro	4,01
	Magnesio	213,55
	Potasio	61,36
Aniones mg/L	Bicarbonatos	498,64
	Sulfatos	9,64
	Cloruros	18109,28
Dureza total mg CaCO ₃ /L		2729,39
Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L		408,72
Conductividad mS/cm		52,22
Resistividad Ωm		0,19
PH		7,18

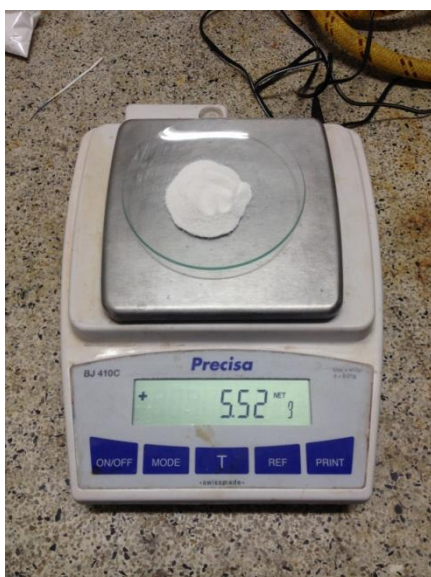
COL 69		
Muestra		Medida Promedio
Cationes mg/L	Calcio	541,63
	Bario	0,25
	Hierro	2,62
	Magnesio	28,6
	Potasio	38,43
Aniones mg/L	Bicarbonatos	243,47
	Sulfatos	3,35
	Cloruros	9717,94
Dureza total mg CaCO ₃ /L		1544,4
Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L		199,56
Conductividad mS/cm		29,55
Resistividad Ωm		0,34
PH		6,84

Fuente: SIMANCAS CARABALLO Diana Carolina, VILLABONA DELGADO Cindy Carolina, *“Diseño y evaluación de un fluido para remoción de escamas de carbonato de calcio a partir de una solución EDTA”*. Caso aplicado Campo.

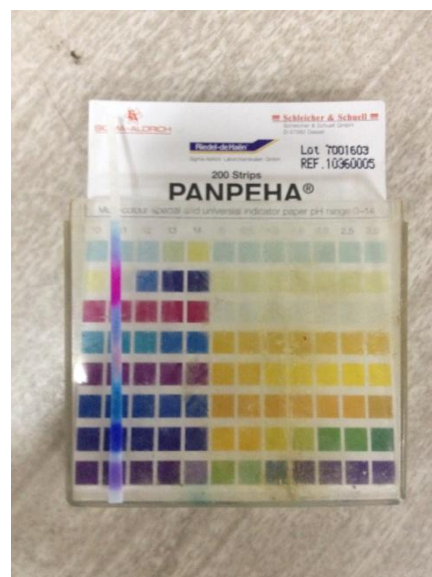
Anexo M: Descomposición térmica del NaHCO_3 para obtener Na_2CO_3



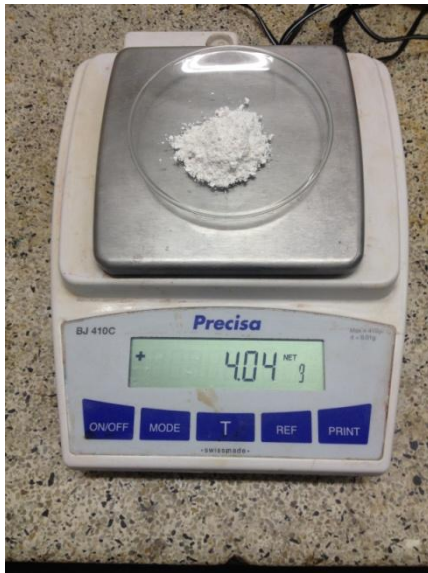
Procedimiento alternativo de descomposición del bicarbonato de sodio para obtener carbonato de sodio



Carbonato de sodio obtenido a partir del bicarbonato disuelto resultante de la salmuera preparada.



Valor de pH comprobante de que el sólido obtenido en esta prueba es carbonato de sodio.



Carbonato de sodio obtenido a partir del bicarbonato disuelto resultante del agua de producción concentrada.



Valor de pH comprobante de que el sólido obtenido en esta prueba es carbonato de sodio.

Fuente: El autor