

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ESPUMAS GENERADAS EN EL
LAVADO DE CARBONES POR FLOTACIÓN MEDIANTE EL USO DE
MEZCLAS DENSAS TIPO CCTA**

**TATIANA JANETH ARENGAS ROJAS
EDDY RUIDIAZ MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS**

2006

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ESPUMAS GENERADAS EN
EL LAVADO DE CARBONES POR FLOTACIÓN MEDIANTE EL USO DE
MEZCLAS DENSAS TIPO CCTA**

**TATIANA JANETH ARENGAS ROJAS
EDDY RUIDIAZ MUÑOZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

**Director:
ING. M Sc. JORGE LUIS GROSSO VARGAS.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS**

2006

Este trabajo esta dedicado a mis padres, ALVARO Y BLANCA, mis hermanos, JENNY, JIZZETH, ALEXANDER Y RICARDO, mi sobrino, JUAN MANUEL, que han sido grandes colaboradores desde la distancia, a mi director JORGE LUIS GROSSO VARGAS que ha sido un gran guía en este y otros trabajos, y a todas aquellas personas que lo vieron nacer y aportaron su grano de arena para su colaboración.

EDDY...

Dedico este trabajo primeramente a DIOS, a mis padres CECILIA Y LUIS DANIEL, a mis hermanos, a mis amigos, a RODRIGO, quienes con su apoyo incondicional fueron artífices en gran parte del éxito de este trabajo.

TATIANA...

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	10
1. MARCO TEÓRICO	10
1.1. LAVADO DE CARBONES POR FLOTACIÓN	10
1.2. GENERALIDADES DE LAS ESPUMAS	12
1.2.1. Surfactantes	12
1.2.2. Espumabilidad y estabilidad	13
1.2.3. Etapas de la vida de una espuma y los fenómenos asociados	13
1.3. FENÓMENOS INTERFACIALES INVOLUCRADOS EN LOS SISTEMAS CTA Y CCTA	16
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	20
2.1. DISEÑO PRUEBAS CTA (Carbón-Tensoactivo-Agua)	24
2.1.1. Procedimiento.....	25
2.2. PRUEBAS CON CCTA.....	31
2.2.1. Procedimiento.....	33
2.2.2. Resultados.....	34
2.2.3. Análisis de Resultados	34
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
BIBLIOGRAFIA.....	39
ANEXOS.....	42

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ESPUMAS GENERADAS EN EL LAVADO DE CARBONES POR FLOTACIÓN MEDIANTE EL USO DE MEZCLAS DENSAS TIPO CCTA¹

AUTORES:

TATIANA ARENGAS ROJAS
EDDY RUIDIAZ MUÑOZ**

PALABRAS CLAVES:

CTA: Suspensión formada por carbón, tensoactivo y agua.

CCTA: Combustible líquido no convencional formado por la mezcla de carbón, crudo pesado, tensoactivo y agua.

ESPUMA: Colección de burbujas y partículas sólidas sobre la superficie de la pulpa en las celdas de flotación.

FENÓMENOS INTERFACIALES: Todo aquel fenómeno que ocurre en el límite de dos fases inmiscibles.

FLOTACION DE CARBONES: Técnica empleada comúnmente para el lavado de carbón fino. Las partículas hidrofóbicas, atrapadas por burbujas de aire se ubican en la superficie para formar una espuma.

SURFACTANTE: Sustancia agregada para mantener la mezcla uniforme y favorecer la formación de la espuma.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se estudia el comportamiento de las espumas y su influencia en el lavado de carbones por flotación en sistemas CCTA. Se empleó el diseño factorial a dos niveles para las pruebas de lavado con CTA y CCTA. Las variables de respuesta fueron: espumabilidad, estabilidad, reducción en el porcentaje de cenizas y recobro de carbón.

Se encontró que a diferencia del lavado con CTA, en la CCTA la espuma era muy inestable lo cual facilita los procesos siguientes a la flotación y el recobro de carbón, alcanzándose un valor máximo de 84%, por otro lado la reducción en el porcentaje de cenizas fue similar en los dos casos mostrando reducciones máximas del 41% para la CTA y del 37% para la CCTA.

El lavado por flotación de la CCTA resulta ser un proceso satisfactorio en la reducción de cenizas. Para futuros estudios, se recomienda la implementación de unidades en serie, con lo que se mejoraría la eficiencia del proceso.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: M sc Jorge Luis Grosso Vargas

TITTLE: STUDY OF THE FROTH BEHAVIOR PRODUCED IN FLOTATION COAL CLEANING USING HEAVY MIXTURES CCTA*

AUTHORS:

TATIANA ARENGAS ROJAS
EDDY RUIDIAZ MUÑOZ**

KEY WORDS:

CTA: Suspension created by coal, surfactant and water.

CCTA: No conventional fuel constituted by mixtures of coal, heavy oil, surfactant and water.

FROTH: A collection of bubbles and particles on the surface of a pulp in froth flotation cell.

INTERPHASE PHENOMENON: Every phenomenon that occurs in the border of two immiscible phases

FROTH FLOTATION: A process of cleaning fine coal in which hydrophobic particles, attach to air bubbles and rise to the surface to form froth.

SURFACTANT: A reagent used in flotation to conserve a uniform mixture and to control the stability of the air bubbles.

DESCRIPTION

In this work the froth behavior and its influence in coal cleaning using CCTA is studied. Some cleaning test with CTA and CCTA were done, using factorial design in two levels, analyzing the foaming, stability, coal recovery and ash rate decrease.

One of the findings in CCTA cleaning process was the instability of the froth, which made easier the process after the flotation and the coal recovery, getting a peak value of 80%. The ash rate decrease was similar in coal cleaning using CTA and CCTA, showing highest reductions of 41% and 37% respectively.

The CCTA cleaning, using froth flotation is a satisfactory process for ash rate decreasing. On future studies, it is recommended to use serial units in order to improve the process efficiency.

* Degree Work.

** Physic-Chemical faculty, Chemical engineering school, Director: M Sc Jorge Luis Grosso Vargas

INTRODUCCION

El carbón es un energético que esta tomando gran auge a nivel mundial, sin embargo debido al gran impacto que produce su combustión, se hace necesario buscar alternativas que además de facilitar su manejo, ayuden al mejoramiento de su calidad reduciendo las impurezas presentes.

Dentro de los métodos empleados para la eliminación de impurezas del carbón esta el lavado por flotación. Este es un proceso de separación de partículas finas basado en la diferencia de hidrofobicidad de los componentes (carbón, cenizas, pirita). Para que la flotación se lleve a cabo, es necesaria la presencia de un soluto (Surfactante o tensoactivo), que ayude a mantener el sistema disperso y permita la formación de espumas.

Al igual que la presencia de tensoactivo, existen otros factores que influyen en la eficiencia del proceso, determinado por la cantidad y calidad de la espuma formada, entre estos está: El flujo de aire alimentado, la concentración de carbón y el uso de colector. La apropiada combinación de estas variables, aseguran un proceso eficiente de lavado.

Además de la flotación convencional, se realizará el lavado de CCTA², un novedoso y eficiente combustible formado a partir de carbón-crudo-tensoactivo-agua, asimismo, se compararán los dos procesos mediante el estudio de la composición y calidad (espumabilidad y estabilidad) de la espuma formada, junto con el análisis de los fenómenos interfaciales presentes.

²U.S Patent No 5,902,359. GROSSO VARGAS JORGE LUIS. On line and/or batch process for production of fuel mixtures consisting of coal/asphaltenes, fuel oil/heavy crude oil, surfactant and water (CCTA) and the obtained products.

El lavado de carbones usando sistema denso CCTA tiene algunas características especiales. En primer lugar, la presencia de crudo hace el papel de colector, aunque en concentraciones más altas. Por otro lado la mezcla contiene parte del tensoactivo necesario para asegurar la formación de espuma y por ende el lavado. Teóricamente, estas características, traen beneficios al proceso de flotación, sin embargo mediante el desarrollo experimental se determina si la eficiencia del proceso es mayor cuando se utiliza CCTA.

Debido a la necesidad de mejorar la calidad y eficiencia del carbón como energético, unido las bondades y el gran auge industrial de las espumas, el lavado de carbones por flotación resulta ser un método favorable para remover las impurezas y a su vez disminuir la contaminación ambiental generada por su uso sin previo tratamiento.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. LAVADO DE CARBONES POR FLOTACIÓN

El lavado de carbones es una técnica empleada para remover los componentes no combustibles del carbón. Existen una gran variedad de métodos utilizados para este fin, tales como los ciclones, concentradores, aglomeración con aceites, entre otros, que reportan un rendimiento parcial en la reducción de impurezas³. Debido al éxito limitado de estos procesos, se ha incrementado el uso de la flotación de carbones como una alternativa para el tratamiento de partículas finas de carbón.

El proceso de lavado por flotación se basa en las diferencias de hidrofobicidad de los componentes del carbón. Por la inyección de aire en el seno de una suspensión, las partículas finas son arrastradas por las burbujas generadas desde la fase continua hasta la espuma. Una parte del material arrastrado retorna al medio disperso por acción del drenaje gravitacional del líquido (Ver figura 1).

Para que la flotación se lleve a cabo es necesario que se formen espumas, esto se logra con adición de un componente, surfactante, que además de cumplir con esta función asegura una buena dispersión al disminuir la tensión interfacial⁴ entre el agua y el carbón.

En algunos casos para mejorar la eficiencia del lavado se emplean colectores, sustancias compuestas por moléculas heteropolares (consisten en dos grupos: polar y apolar) o polares, que al reducir la hidratación de las zonas inter-burbujas

³ PAPER EROL, Murat, COLDUROGLU, Cigdem. The effect of the reagents and reagent mixtures on froth flotation coal fines. Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Ankara University, Ankara-Turkey. 2002

⁴ Sección 1.3. Fenómenos interfaciales involucrados en sistemas CTA y CCTA.

aumentan la adhesión⁵ de los sólidos y por tanto su arrastre en la espuma. A diferencia del sistema convencional de lavado formado por carbón-Surfactante y agua (CTA), la CCTA*, contiene Crudo pesado que cumple las funciones de colector.

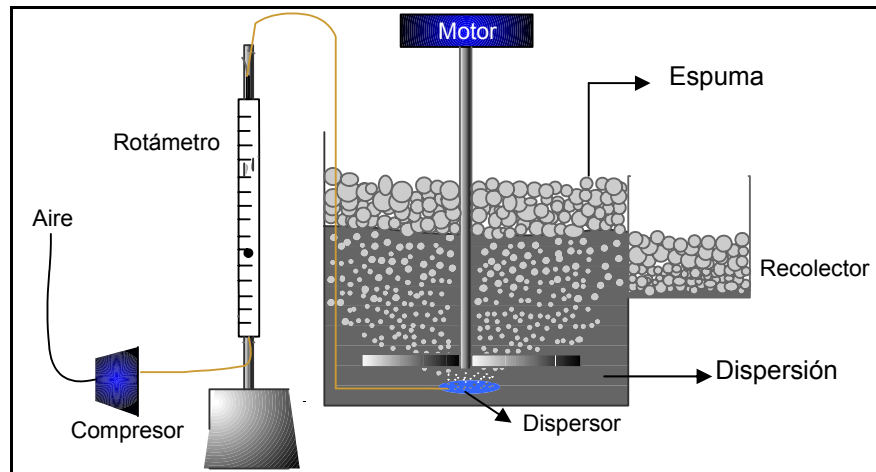


Figura 1. Esquema del lavado de carbones por flotación

La técnica de lavado por flotación además de eliminar las cenizas presentes en el carbón, permitirá determinar, con base en el estudio de la espuma formada, con cual de los dos mecanismos (con dispersiones CTA o sistemas densos CCTA), se obtiene una mayor eficiencia en el proceso.

⁵ Sección 1.3. Fenómenos interfaciales involucrados en sistemas CTA y CCTA.

* **CCTA:** Mezcla líquida compuesta de Carbón, crudo pesado, tensoactivo y agua; es preparada a partir de una emulsión crudo/agua utilizando un surfactante aniónico (Mugroson®), y una suspensión Carbón/Agua con el mismo surfactante. Finalmente, ambos fluidos se mezclan formando el combustible.

1.2. GENERALIDADES DE LAS ESPUMAS⁶

Las espumas juegan un papel importante en el lavado de carbones por flotación, pues sus características influyen notoriamente en la eficiencia del proceso.

Una espuma se define como la dispersión de un gas en una cantidad relativamente pequeña de un líquido. Debido a que un líquido puro no puede formar espuma, es necesaria la existencia de un soluto que se adsorba en la interfase líquido-gas (surfactante).

1.2.1. Surfactantes

Los surfactantes son sustancias cuyas moléculas poseen a la vez un grupo polar y un grupo apolar. La parte polar tiene afinidad para los solventes polares, particularmente el agua, mientras que la parte apolar tiene afinidad para los solventes orgánicos, en particular los hidrocarburos, aceites o grasas, o simplemente está repelida por el agua. Por esta razón la parte polar se denomina también hidrofílica, mientras que a la parte apolar le corresponde el calificativo de lipofílico o hidrófobo.

De acuerdo al tipo de disociación de las moléculas, se clasifican en surfactantes aniónicos, catiónicos y no iónicos⁷. Los aniónicos en solución acuosa se disocian en un anión anfífilo y un catión; por otro lado, los catiónicos disocian en un catión anfífilo y un anión; finalmente, los no iónicos no forman iones en solución acuosa, ya que su parte hidrofílica está formado por grupos polares no ionizados

⁶ SALAGER, Jean-Louis y FORGIARINI, Ana. Espumas: Espumantes y antiespumantes. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de fenómenos interfaciales y recuperación del petróleo. Mérida-Venezuela. 1993.

⁷ SALAGER, Jean Luis. Fenómenos Interfaciales en dispersiones polifásicas y medios porosos. Universidad de los Andes. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2002.

1.2.2. Espumabilidad y estabilidad

La espumabilidad y la estabilidad son fenómenos que están involucrados durante toda la vida de la espuma. La espumabilidad hace referencia a la cantidad relativa de espuma que se obtiene en un proceso de formación. Por otro lado la estabilidad se define como la persistencia de la espuma en el tiempo.

La espumabilidad esta relacionada con la estabilidad de la espuma en los instantes iniciales donde el resultado es el compromiso entre la dispersión del gas en el líquido y la coalescencia de las burbujas.

1.2.3. Etapas de la vida de una espuma y los fenómenos asociados⁸

Durante la vida de las espumas, se presentan etapas que difieren entre si por los fenómenos interfaciales y/o superficiales presentes. Estas etapas son: Formación de la espuma, que va de unos segundos a minutos y maduración de la espuma, paso de la espuma húmeda a la espuma seca, tarda de unos minutos a unas horas.

Formación de la espuma

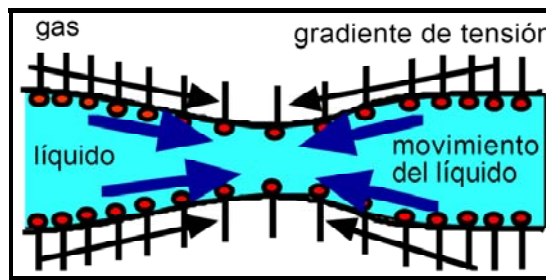
Para que esto ocurra, es necesario que un gas se disperse en un líquido; esto se puede lograr:

⁸ SALAGER, Jean-Louis, ANDÉREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Influencia de la formulación sobre las espumas. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2003.

- Por inyección mecánica de un gas en el líquido.
- Por generación química de un gas en el líquido.
- Liberación de un gas disuelto en el líquido por descompresión.

Durante la formación de espumas se observan varios fenómenos asociados, entre estos los más importantes son:

- ★ *Adsorción del surfactante en la superficie gas-Líquido:* Con la formación de las burbujas, se originan interfases y superficies aptas para la migración del surfactante hacia esas zonas (adsorción), lo que produce una disminución de la tensión interfacial que a su vez facilita la creación de un área superficial o interfacial.
- ★ *Separación del gas por gravedad y acumulación de burbujas:* Debido a las diferencias de densidad entre el líquido y la fase gaseosa, las burbujas de gas se acumulan, y es en este proceso que se forman las películas inter-burbujas, cuya resistencia será una de las causas de la formación de las espumas.
- ★ *Efecto de Gibbs-Marangoni:* Es un fenómeno físico de desplazamiento del líquido presente en la interfase entre dos burbujas desde las zonas de menor tensión superficial hasta las zonas de mayor tensión, con el fin de detener el estiramiento de la película inter-burbuja, lo que provocaría una ruptura de la misma. Estas diferencias de tensión se presentan por el movimiento de las burbujas (figura 2).



* **Figura 2.** Efecto de Gibbs-Marangoni.

- ★ *Máximo de espumabilidad y concentración micelar crítica:* Existe una relación directa entre la espumabilidad y la concentración del surfactante, pero eso solo se cumple hasta llegar a la concentración micelar crítica (CMC), de allí en adelante, la espumabilidad disminuye con el aumento de la concentración de surfactante. En la concentración micelar crítica, se forman agregados poliméricos denominados micelas. Las micelas tienen gran capacidad para solubilizar las sustancias apolares.

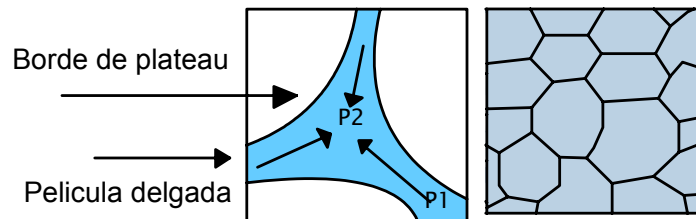
Maduración de la espuma

En esta etapa se presentan diferentes mecanismos: Segregación y drenaje gravitacional, succión capilar, Difusión gaseosa inter-burbuja.

- ★ *Segregación y drenaje gravitacional:* La segregación de las burbujas ocurre en los primeros instantes de formación de esta debido al principio de Arquímedes. El drenaje gravitacional del líquido se presenta durante toda la vida de la espuma pero es más significativo en la espuma húmeda.
- ★ *Succión capilar:* Este fenómeno se basa en la diferencia de presiones que ocasiona la forma poliédrica que toman las burbujas y que hacen

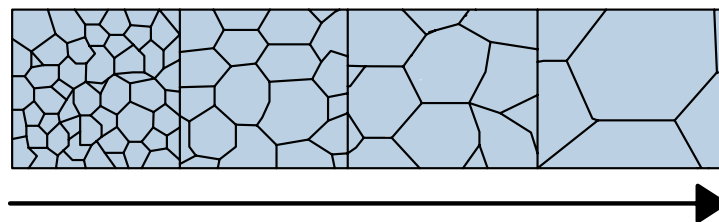
* **Fuente :** SALAGER, Jean-Louis, ANDÉREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Influencia de la formulación sobre las espumas. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2003.

que el líquido se desplace del centro de la película hasta los bordes de plateau, para luego ser desalojado por drenaje gravitacional.



***Figura 3.** Fenómeno de succión capilar.

- ★ *Difusión gaseosa intra-burbuja-Maduración de Ostwald:* Consiste en el paso de gas desde las burbujas pequeñas hacia las más grandes a través de las películas planas y delgadas que las separan. Esta difusión gaseosa se debe a la diferencia de presión entre las burbujas de diferentes tamaños (Las burbujas pequeñas tienen mayor presión).



+Figura 4. Maduración de Ostwald

1.3. FENÓMENOS INTERFACIALES INVOLUCRADOS EN LOS SISTEMAS CTA Y CCTA

Como un fenómeno interfacial se conoce todo aquel suceso que ocurra en límite entre dos fases inmiscibles. En procesos de dispersiones y emulsiones, generalmente se observan fenómenos interfaciales en el equilibrio, tales como:

***+ Fuente:** SALAGER, Jean-Louis, ANDÉREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Influencia de la formulación sobre las espumas. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2003.

Variación de la tensión interfacial, cohesión y adhesión, mojabilidad y ángulo de contacto⁹. Estas manifestaciones se ven influenciadas por la presencia de surfactantes o tensoactivos en sistemas en los que se encuentra una fase continua líquida.

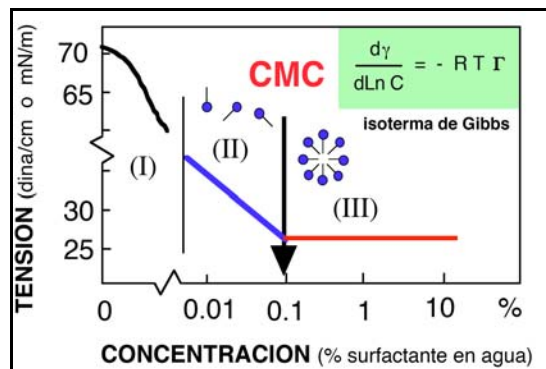
La adsorción de un surfactante produce en general una reducción de la tensión superficial o interfacial (figura 5), lo que favorece la deformación y la ruptura de las interfases, y la formación de los sistemas dispersos¹⁰. La Fig. 5 posee todas las características del caso general. A partir del valor que corresponde al agua pura, se observa una disminución de la tensión superficial con el aumento de concentración de surfactante; en esta primera zona (I), la gran mayoría de las moléculas de surfactante se adsorben en la superficie agua-aire, y la concentración superficial crece rápidamente.

En la zona II, la superficie está ocupada por una capa monomolecular de surfactante, y la tensión interfacial decrece linealmente con el logaritmo de la concentración.

A partir de una cierta concentración, la fase acuosa se satura en moléculas individuales de surfactante, y se observa el cambio a la tercera zona (III), en la cual la tensión superficial permanece constante. En esta región, cualquier molécula suplementaria de surfactante se encuentra encima de su límite de saturación en fase acuosa, y su solubilización ocurre en agregados de tipo coloidal llamados micelas.

⁹ SALAGER, Jean Luis. Fenómenos interfaciales en dispersiones polifásicas y en medios porosos. Universidad de los Andes. Laboratorio de interfases, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2002.

¹⁰ SALAGER, Jean-Louis, ANDEREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Surfactantes en solución acuosa. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 1993.



¹¹Fig. 5. Variación de la tensión superficial con la adición de surfactante

La *cohesión* y la *adhesión* son fenómenos que se deben a interacciones moleculares. Mientras que la cohesión hace referencia a la fuerza necesaria para separar dos caras de sustancias iguales, la adhesión es el mismo concepto aplicado a sustancias diferentes (Ver figura 6).

Los conceptos de cohesión y adhesión determinan las fuerzas atractivas entre partículas, gotas o burbujas dispersas en los sistemas CTA y CCTA. Estas fuerzas atractivas tienden a reunir los fragmentos de fase dispersa y por lo tanto a desestabilizar la mezcla.

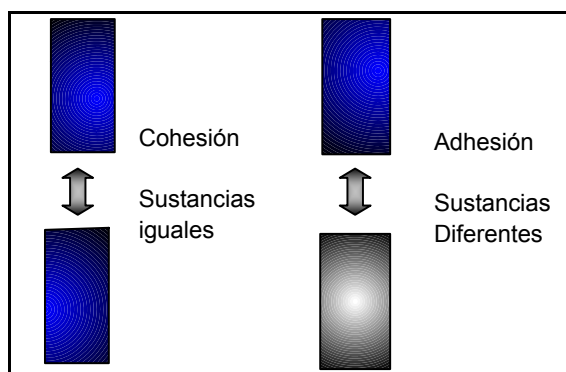


Figura 6. Fenómeno de Cohesión y Adhesión

¹¹ SALAGER, Jean-Louis, ANDEREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Surfactantes en solución acuosa. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 1993.

Existe una semejanza entre los fenómenos de *mojabilidad* y *ángulo de contacto* (figura 7); aunque ambos hacen referencia a la afinidad entre un líquido y un sólido, el primero es un concepto cualitativo y el segundo es cuantitativo.

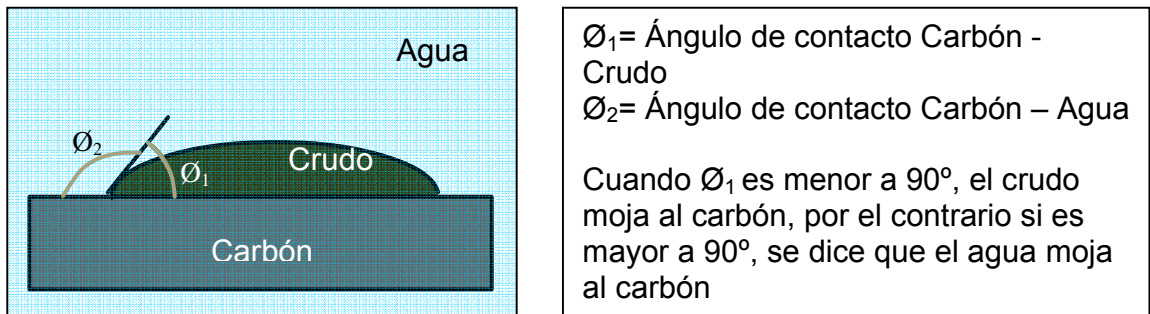


Figura 7. Fenómeno de mojabilidad y ángulo de contacto.

El ángulo de contacto varía con la cantidad de surfactante en la mezcla, pues al disminuir la tensión interfacial se facilita la mojabilidad y se crea una mayor estabilidad en la mezcla.

En la mayoría de los casos, estos fenómenos son reportados con base a observaciones macroscópicas y cualitativas en las que se indica el efecto que producen ellos en los procesos en los que se ven involucrados.

Aunque en algunas aplicaciones industriales las espumas resultan ser un producto no deseado, en el lavado de carbones por flotación son un elemento de gran valor gracias a los fenómenos interfaciales asociados a ellas desde su formación hasta su ruptura.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el diseño de experimentos, y subsiguiente interpretación de datos se emplea un diseño factorial de dos niveles¹², en el que cada variable a analizar solo ocurre a dos versiones (niveles). Este tipo de diseños posee ciertas ventajas, por ejemplo, requieren pocos experimentos por variable (factores), y aún cuando no se puede explorar exhaustivamente una amplia región si muestra una tendencia para futuras investigaciones, además de la facilidad en la interpretación de los resultados obtenidos.

El número de experimentos a realizar con base en el diseño factorial de dos niveles es 2^n , donde n representa el número de variables o factores en los experimentos.

Las variables de respuesta para este análisis fueron: Espumabilidad, estabilidad de la espuma, la reducción de cenizas¹³ y el recobro de carbón en la espuma.

- Medida de la espumabilidad: Se toma como el tiempo que tarda una columna de espuma en subir una altura dada, durante la inyección de aire.
- Estabilidad: Se midió como la variación en la longitud de una columna de espuma en el tiempo, desde el momento en que se detiene el suministro de aire.

¹² BOX, George, HUNTER William y HUNTER, J Stuart. Estadística para investigadores. Reverté S.A. Barcelona 1993. p. 317-361.

¹³ Norma ASTM D 3174-89. Standard test method for Ash in the Analysis sample of Coal and Coke from Coal.

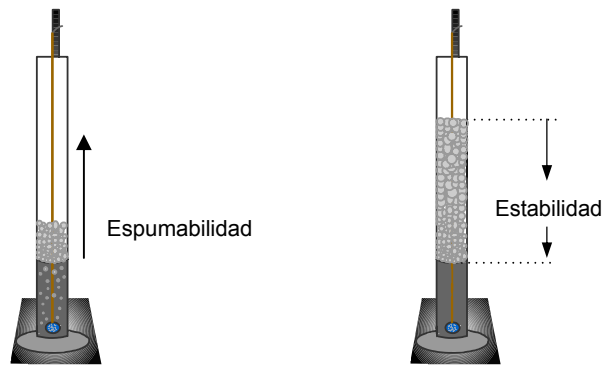


Figura 8. Representación de la medida de la espumabilidad (izquierda) y estabilidad (Derecha).

- Recobro de Carbón: Cantidad del carbón inicial arrastrado por la espuma expresado en porcentaje.

$$\%R_c = (C_o/C_f) \times 100$$

Donde,

$\%R_c$ = porcentaje del carbón inicial arrastrado en la espuma.

C_o = cantidad de carbón inicial en la mezcla.

C_f = cantidad de carbón que es arrastrado en la espuma.

- Reducción de cenizas: Primero se calcula los valores iniciales y finales del porcentaje de cenizas en el carbón. El calculo de reducción de cenizas se hizo como sigue:

$$\%R_A = \frac{\%A_o - \%A_f}{\%A_o} \times 100$$

Donde,

$\%R_A$ = Porcentaje de reducción de cenizas

$\%A_o$ = Porcentaje de cenizas en el carbón sin lavar

$\%A_f$ = Porcentaje de cenizas en el carbón lavado

★ *Constituyentes de las mezclas CTA y CCTA*

CARBÓN	†TENSOACTIVO	CRUDO
Humedad libre: 2.802% Ceniza: 11.85% Densidad: 1298 Kg./m ³ Diámetro*: 53 – 88 micras.	Nombre: Mugroson® Naturaleza: surfactante aniónico. Densidad: 1.0106 g/cm ³ Ingrediente activo: 17% (P/P).	Mezcla Suria/Castilla 40/60 (V/V) Viscosidad: 194 cp. Densidad: 0.9303 Kg./m ³

Tabla 1. Componentes de las mezclas CTA y CCTA

Se empleo la mezcla Suria-Castilla con el fin de disminuir la viscosidad de el crudo castilla (6700 cp), con crudo de Suria (6.83 cp), lo que facilita la formación de espumas y por ende el proceso de lavado[⊠].

★ *Equipos Utilizados*

Para la preparación de las mezclas se empleo un agitador mecánico[‡] y un vaso de precipitados (figura 9).

⊠ Anexo B. Pruebas de espumabilidad del surfactante

* Anexo A1: Curva de distribución.

⊠ Anexo C Selección de la mezcla Suria-Castilla

‡ Anexo A2 Curva de calibración del agitador.

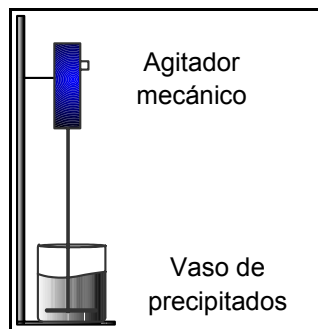


Figura 9. Equipo empleado en la preparación de las mezclas

Durante la flotación, Se emplea un diseño análogo al convencional que se muestra en la figura 10 y que consta de los siguientes elementos: Probeta de vidrio, dispersor de aire, rotámetro[^], soportes universales, pinzas con nuez compresor de aire y accesorios (mangueras, uniones, varilla de cobre).

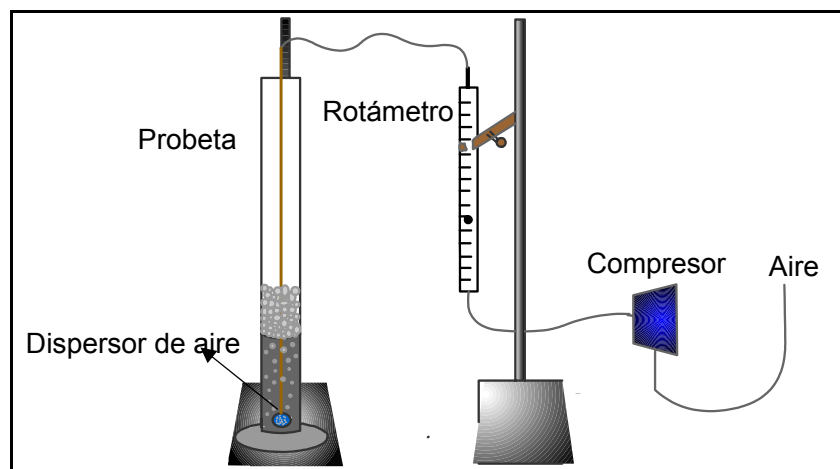


Figura 10. Sistema de flotación empleado.

[^] Anexo A3 Curva de calibración del rotámetro.

2.1. DISEÑO PRUEBAS CTA (Carbón-Tensoactivo-Agua)

Se aplicó el diseño factorial a dos niveles con tres variables para un total de ocho experimentos.

Las variables en este diseño son:

Variables	Valores	
	Menor	Mayor
Concentración de carbón en la suspensión (%p/p)	5	20
Concentración de tensoactivo (ppm)*	3000	8000
Flujo de aire alimentado (L/min.)	4	7

Tabla 2. Variables seleccionadas para la flotación de CTA.

Para la selección de estas variables se tomo como referencia la norma ASTM D-5114¹⁴ y la patente No 5, 902,359¹⁵.

La matriz de diseño factorial para las pruebas es la siguiente:

*ingrediente activo en la suspensión

¹⁴ Norma ASTM **D 5114-90** Standard test method for laboratory froth flotation of coal in a mechanical cell.

¹⁵ U.S Patent No 5,902,359.. GROSSO VARGAS JORGE LUIS. On line and/or batch process for production of fuel mixtures consisting of coal/asphaltenes, fuel oil/heavy crude oil, surfactant and water (CCTA) and the obtained products.

Experimento	Concentración de carbón en la suspensión (%p/p)	Flujo de aire (L/min.)	Concentración de surfactante* (ppm)
1	5	4	3000
2	20	4	3000
3	5	7	3000
4	20	7	3000
5	5	4	8000
6	20	4	8000
7	5	7	8000
8	20	7	8000

Tabla 2. Matriz de diseño factorial para las pruebas con CTA.

2.1.1. Procedimiento

A continuación se muestra el procedimiento que se llevo a cabo para el desarrollo de cada una de las pruebas de lavado de carbones con CTA,

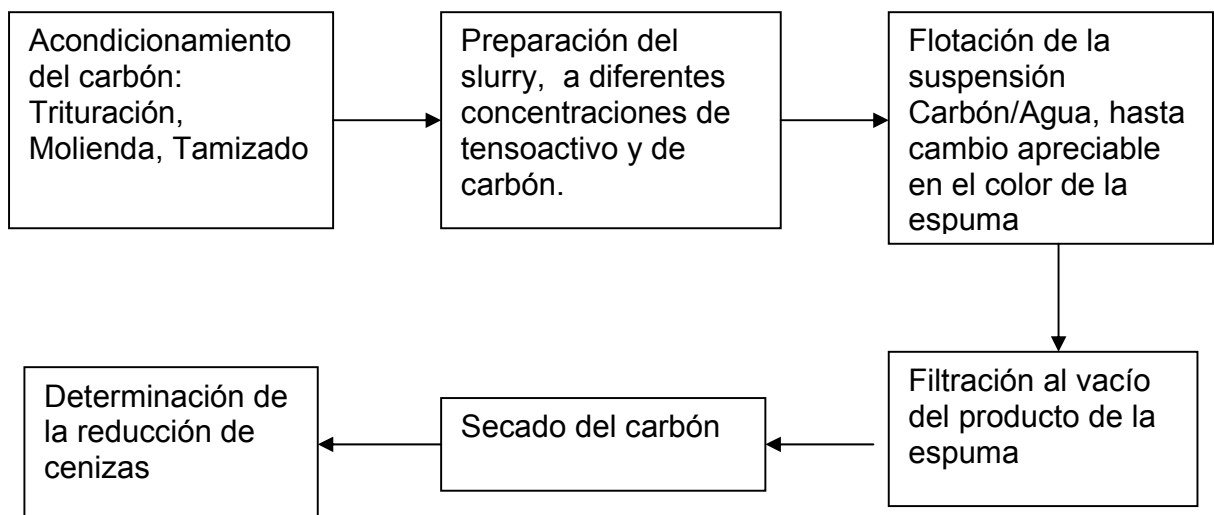


Figura 11. Diagrama del proceso de lavado por flotación de carbones con sistema CTA.

* Concentración de Ingrediente activo en la suspensión

2.1.2. Resultados*

Experimento	Concentración de carbón (%p/p)	Cantidad de surfactante (ppm)	Flujo de aire (L/min.)	¹⁶ Espumabilidad	Porcentaje de reducción de cenizas(p/p)	¹⁸ Recobro de carbón (% p/p)
1	5	3000	4	10.07	40.9	35.68
2	20	3000	4	7.43	32.9	26.45
3	5	8000	4	18	47.1	48.3
4	20	8000	4	20	32.7	36.83
5	5	3000	7	29	36.5	61.53
6	20	3000	7	37.3	28.18	23.54
7	5	8000	7	36	34.0	41.29
8	20	8000	7	30	15.27	36.68

Tabla 3. Resultados de espumabilidad, porcentaje de reducción de cenizas, recobro de carbón en la CCTA.

* Los resultados de estabilidad se muestran en el anexo D.

¹⁶ Altura de la espuma en 10 seg. (cm)

¹⁸ Cantidad del carbón inicial arrastrado por la espuma expresado en porcentaje.

2.1.3. Análisis de resultados pruebas CTA

- La cantidad de espuma formada se ve directamente influenciada por el caudal de aire, la cantidad de surfactante y en menor grado por la cantidad de carbón. El primer efecto se debe a que un mayor flujo de aire permite la formación más rápida de burbujas, mayor velocidad de ascenso a la superficie del fluido, y a su vez una absorción más fácil del surfactante en la interfase. Por otro lado, el aumento en la cantidad de surfactante, produce mayor absorción de soluto (surfactante) en la interfase, formando así una espuma homogénea. En la figura 12 (abajo) se aprecia que la concentración de carbón es una variable que no aporta significativamente en la espumabilidad.

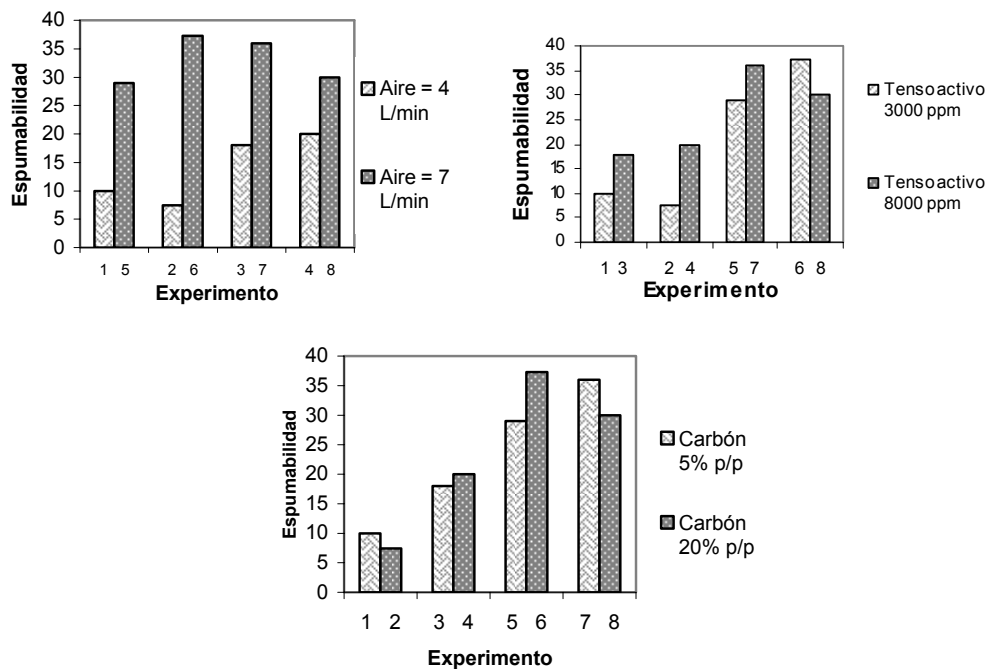


Figura 12. Variación de la espumabilidad con el flujo de aire (Superior-izquierda), Cantidad de tensoactivo (Superior-derecha) y Cantidad de carbón (inferior). *Altura de la espuma (cm.) en 10 seg. de aireación.

- Tal como se examina en la figura 13, La cantidad de aire suministrado y la concentración de carbón afectan de forma apreciable la reducción de cenizas. Por tanto, cuando el flujo de aire es alto, las partículas sólidas son arrastradas rápidamente a la espuma y el drenaje de líquido es muy poco (La velocidad de ascenso de las burbujas es mucho mayor a la velocidad de descenso del líquido en la espuma); esto evita que las partículas hidrofílicas (cenizas) que se fueron a la espuma retornen a través de las películas inter-burbujas. A una mayor cantidad de carbón las partículas sólidas tienen menos espacio de interacción con el medio y así se reduce la posibilidad de que las cenizas se depositen en la fase acuosa.

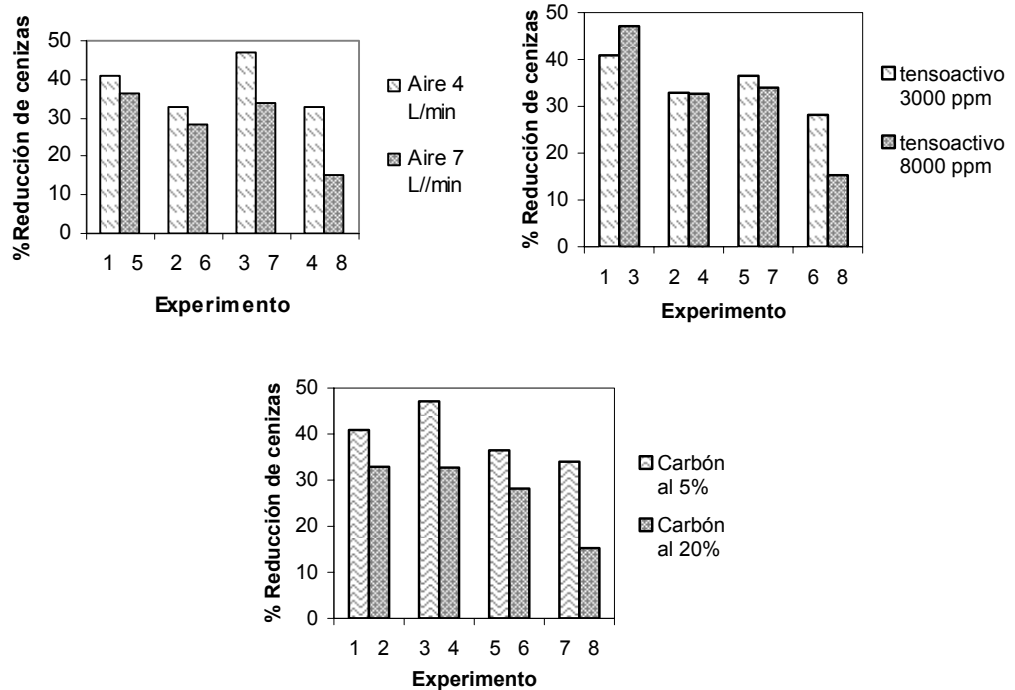


Figura 13. Variación del porcentaje de cenizas con el flujo de aire (Superior-izquierda), Cantidad de tensoactivo (Superior-derecha) y Cantidad de carbón (inferior).

- El recobro de carbón se reduce cuando su concentración aumenta en la dispersión, una menor cantidad de carbón conlleva a la formación de suspensiones mucho más estable y uniformes que en el momento de la flotación, esto trae consigo un mayor arrastre de carbón en la espuma. Las variaciones del flujo de aire al igual que en la concentración de tensoactivo, no muestran una tendencia para la respuesta (Ver figura 14).

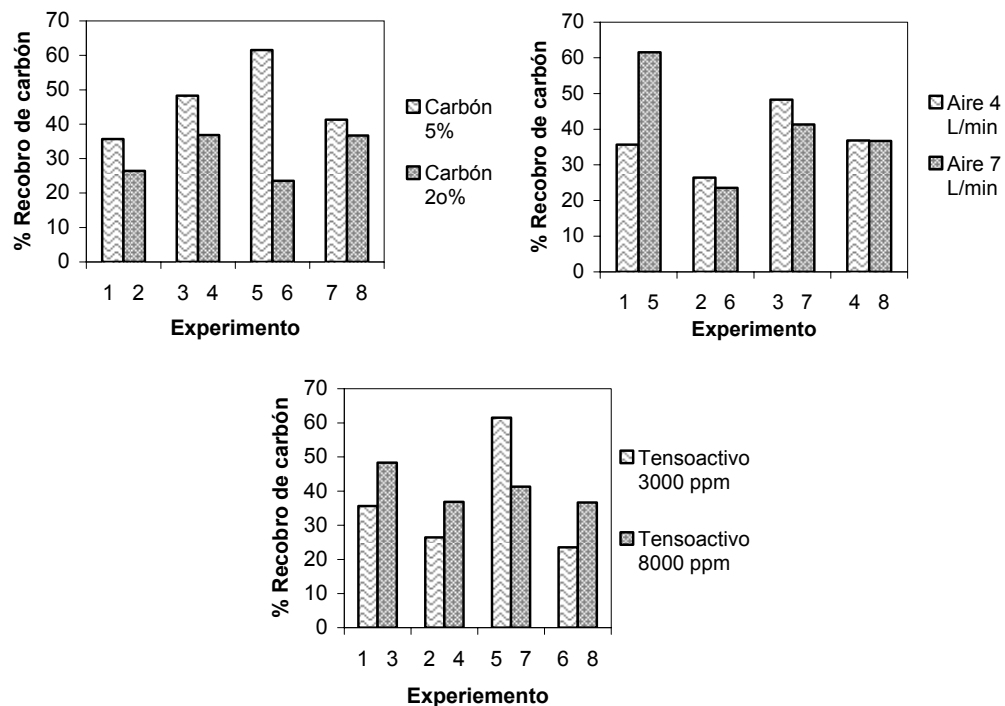


Figura 14. Variación del recobro de carbón con el flujo de aire (Superior-izquierda), Cantidad de tensoactivo (Superior-derecha) y Cantidad de carbón (inferior).

- La concentración de carbón, afecta notoriamente la estabilidad de la espuma, para las suspensiones que contenían 20% de carbón el tiempo de vida es aproximadamente 20 horas, mientras que en suspensiones al 5% de carbón, la espuma tardó entre 3 y 4 horas en romperse ¹⁷. La gran

¹⁷ Anexo D Curvas de estabilidad sistema CTA.

cantidad de carbón que se ubica en las películas interburbujas, impide el arrastre de grandes cantidades de líquido hacia la espuma, como consecuencia de esto, se forman espumas secas y estables.

- Un segundo factor mucho menos influyente, pero relacionado con la tendencia a formar espumas estables, es la concentración de tensoactivo en la suspensión. El arrastre de líquido con mayor contenido de surfactante que se ubica en zonas interbubujas permite un mejor arreglo de las burbujas lo que facilita fenómenos interfaciales tales como el efecto de Gibbs-Marangoni¹⁸ y retarda el proceso de maduración y ruptura de la espuma.

¹⁸ Sección 1.2.2. Etapas de la vida de una espuma y los fenómenos asociados

2.2. PRUEBAS CON CCTA

Se aplicó el diseño factorial a dos niveles con dos variables para un total de cuatro experimentos.

Las variables en este diseño son:

Variables	Valores	
	Menor	Mayor
Relación Carbón/Crudo (p/p)	30/40	40/30
CCTA/Agua (v/v)	25/75	50/50

Tabla 4. Variables seleccionadas para la flotación de CTA.

Durante el lavado se mantuvieron los siguientes valores fijos

Tamaño de partícula[°]	(88-53 μm)
Cantidad de tensoactivo⁺ (ppm)	20000 [£]
Flujo de aire (L/min.)	4
Volumen de solución (ml)	200

Tabla 5. Valores fijos en el lavado de CCTA

[°] Curva de distribución Anexo A

⁺ Concentración de Ingrediente activo en la mezcla CCTA

[£] Anexo E. Selección de la cantidad de tensoactivo en la CCTA

La matriz de diseño factorial para las pruebas es la siguiente:

Experimento	Relación C/O (Para la CCTA sin dilución)	Relación CCTA/W
1	30/40	25/75
2	40/30	25/75
3	30/40	50/50
4	40/30	50/50

Tabla 6. Diseño factorial para las pruebas con CCTA

2.2.1. Procedimiento

El procedimiento que se llevo a cabo para cada experimento con CCTA es el siguiente^{*}:

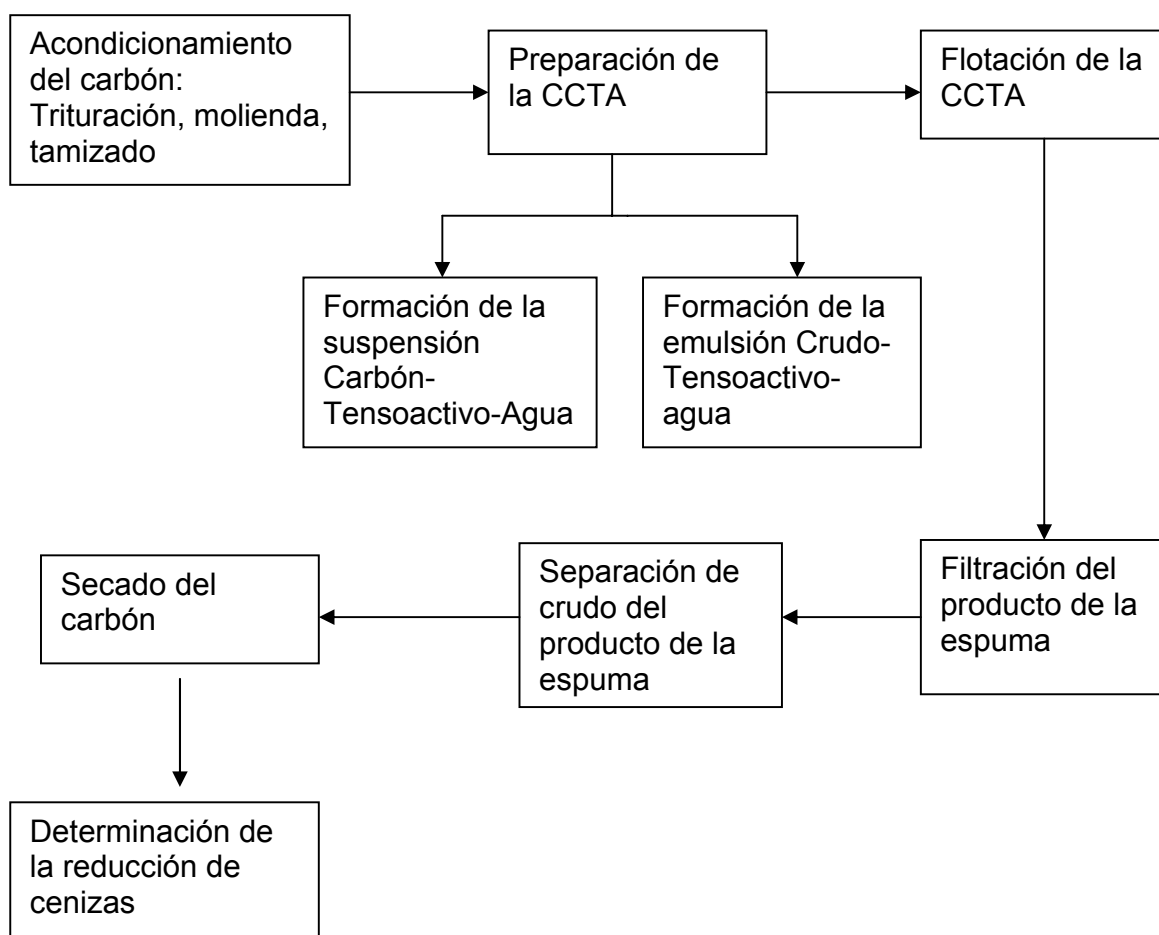


Figura 15. Diagrama del proceso de lavado de carbones por flotación con sistema CCTA.

^{*} **Preparación de la CCTA:** inicialmente se forma la mezcla densa; constituida por una dispersión CTA (80/20) y una emulsión de crudo/agua (60/40) con una cantidad suficiente de tensoactivo (ingrediente activo 20000 ppm en la CCTA), para mantener estable el sistema y permitir la formación de espuma. A partir de esta toman las cantidades apropiadas para hacer las diluciones necesarias para los experimentos.

2.2.2. Resultados

Experimento	Relación C/O (p/p)	Relación CCTA/W (v/v)	Concentración de carbón*	*Recobro de carbón (%p/p)	Porcentaje Reducción de cenizas (p/p)
1	30/40	25/75	7.5	84.57	32.9
2	40/30	25/75	10	46.53	36.8
3	30/40	50/50	15	20.24	23.1
4	40/30	50/50	20	21.89	26.6

Tabla 6. Resultados de los experimentos para las pruebas CCTA.

2.2.3. Análisis de Resultados

- La espumabilidad o cantidad de espuma formada se ve afectada significativamente por la presencia de grandes cantidades de crudo en el sistema denso. La espuma se caracterizó por un gran tamaño, el gran arrastre de combustible (crudo, carbón), tiempo de vida muy corto (unos pocos segundos) y la ausencia de fenómenos interfaciales comunes en la etapa de maduración, tales como succión capilar y maduración de ostwald.
- La presencia de crudo durante la flotación, permite mayor arrastre de carbón en la espuma (figura 16 izquierda). A mayor cantidad de crudo se disminuye la hidratación del sistema lo que facilita la unión entre las partículas hidrofóbicas (carbón) y las burbujas de aire. pero cuando la cantidad de crudo es tal que satura las películas inter-burbujas el resultado

* Concentración de carbón en la CCTA luego de realizar las diluciones.

‡ Cantidad del carbón inicial arrastrado por la espuma expresado en porcentaje.

es la formación de agregados en la fase continua que dificultan la flotación y la calidad de la espuma; es por esta razón que la CCTA diluida al 75% produce una mayor recobro de carbón (figura 16 derecha).

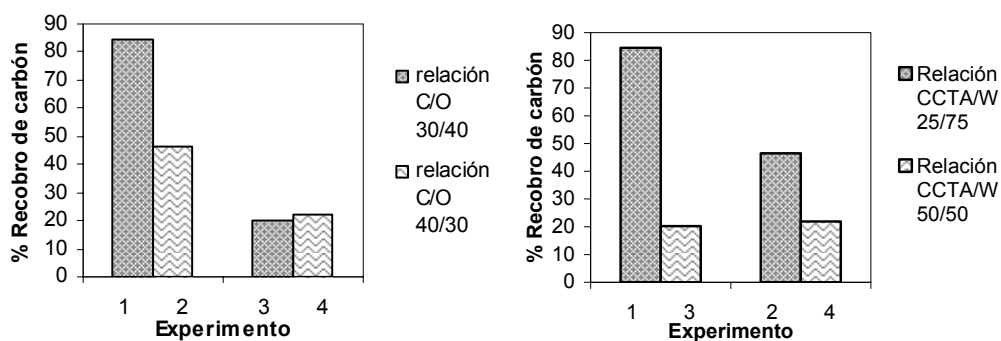


Figura 16. Variación del porcentaje de recobro de carbón con la relación C/O (izquierda), y la relación CCTA/W (derecha)

- La reducción de cenizas se ve afectada por el grado de dilución de la CCTA y por la relación carbón/crudo. Aunque este último no produce cambios significativos en la respuesta, se observa que la tendencia es que a mayor relación C/O la reducción es más alta (figura 17 izquierda). La reducción de cenizas mejora cuando hay mayor hidratación de la CCTA (figura 17 derecha), ya que el aumento de la fase continua permite un mayor tiempo de interacción entre las partículas de carbón con el medio, haciendo posible la separación de impurezas del carbón.

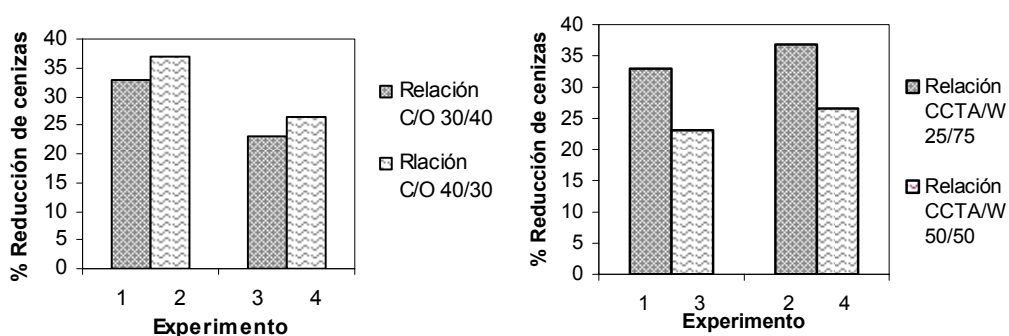


Figura17. Variación de la reducción de cenizas con la relación C/O (izquierda), y la relación CCTA/W (derecha)

- La estabilidad de la espuma formada en el proceso de flotación es muy baja tanto así que tardaba tan solo segundos en romperse totalmente, esto se atribuye al gran arrastre de crudo, que facilita el rompimiento de la espuma. Esa inestabilidad de la espuma, luego de la formación y el arrastre de sólidos favorable en los procesos de lavado, pues facilita los procesos subsiguientes a la flotación.
- La saturación con aire de sistema denso antes de iniciar la flotación, facilitó el proceso de lavado ya que generó una mayor adhesión entre las partículas sólidas y las burbujas de aire lo que se ve cuantificado en un mayor recobro de carbón en la espuma.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las características de la espuma formada en los dos sistemas (CTA y CCTA), cumplen un papel primordial en el proceso de lavado por flotación. Tal como se muestra en los resultados, la formación de espumas estables en el sistema CTA, ocasionada por una mayor presencia de tensoactivo en las películas inter-burbujas y por la ausencia de crudo (que hace el papel de colector), reduce la eficiencia del lavado al retardar los procesos siguientes a la flotación (filtración, secado, etc).
- A bajas concentraciones de carbón (5-10%), el recobro, en el lavado por flotación es mas eficiente en el sistema tipo CCTA. Por otro lado, para ambos casos (CTA y CCTA), la reducción de cenizas es mayor cuando se emplean bajas cantidades de carbón (5-10%), alcanzándose reducciones de hasta 44% en el porcentaje inicial de cenizas cuando la concentración de carbón es 5% en la CTA, comparado con un 35% para la CCTA.
- La CCTA resulta ser un proceso satisfactorio cuando el requerimiento en los valores de ceniza en el carbón no es riguroso, debido al mayor recobro de carbón y la poca estabilidad de la espuma formada. Las condiciones para que se tienen mejores resultados son aquellas en que la relación Carbón/crudo y CCTA/agua son 30/40 y 25/75 respectivamente en las que se obtiene un recobro de carbón de 85% y una reducción de 35% en el porcentaje de cenizas.

- Debido a que experimentalmente se han conseguido remociones de hasta 80%¹⁹ en el contenido de cenizas cuando se emplean unidades en serie para el lavado convencional del carbón, se sugiere para futuros estudios analizar el efecto que tiene esta modificación en el lavado de la CCTA.
- Para estudios siguientes de espumas y lavado de CCTA, se recomienda observar el efecto del tamaño partícula del carbón y de las burbujas de aire. La literatura muestra que estos dos parámetros influyen considerablemente en el proceso de flotación y más exactamente en el recobro de carbón²⁰.
- Adicionalmente se recomienda realizar un balance de contenidos de azufre antes y después de la flotación para determinar el efecto que tiene la presencia de crudo en este parámetro. De igual forma, hacer un análisis de la relación flujo de aire-diámetro de la celda, y su efecto económico a escala industrial.

¹⁹ PAPER: Sulfur removal by fine coal cleaning processes. *Fuel* Vol. 76, No. 13, pp. 1187-1194, 1997. Elsevier Science

²⁰ KLASSEN V.I and MOKUROUSOV V.A. An Introduction to the theory of flotation. Butterworth & co. Canada. p

BIBLIOGRAFIA

1. U.S Patent No 5,902,359. GROSSO VARGAS JORGE LUIS. On line and/or batch process for production of fuel mixtures consisting of coal/asphaltenes, fuel oil/heavy crude oil, surfactant and water (CCTA) and the obtained products.
2. ASTM D 3174-89. Standard test method for Ash in the Analysis sample of Coal and Coke from Coal.
3. ASTM D 5114-90 Standard test method for laboratory froth flotation of coal in a mechanical cell.
4. BOX, George, HUNTER William y HUNTER, J Stuart. Estadística para investigadores. Reverté S.A. Barcelona 1993. p. 317-361.
5. FORGIARINI, Ana, SALAGER, Jean Louis. Espumas: Espumante y antiespumante. Venezuela: Laboratorio de fenómenos interfaciales y recuperación del petróleo. Universidad de los Andes (Mérida-Venezuela). 1993.
6. GROSSO VARGAS, JORGE LUIS y colaboradores. Evaluación del lavado de mezclas carbón-tensoactivo-agua y carbón-combustoleo-tensoactivo-agua utilizando celdas de flotación. Colombia: CARBOCOL-COLCIENCIAS-ICP-UIS.

7. GROSSO VARGAS, Jorge Luis. Influencia de los parámetros fluidodinámicos en el proceso de formación de una mezcla carbón-Combustóleo-tensoactivo-agua CCTA. ICP-Ecopetrol-UIS.
8. KLASSEN V.I and MOKUROUSOV V.A. An Introduction to the theory of flotation. Butterworth & co. Canada.
9. Paper: Naik, Padyumna, Reddy, PSR y Misra, Vibhuti. Optimization of coal flotation using statistical technique. Fuel processing technology Vol 85. Elsevier. 2004.
10. Paper: Naik, Padyumna, Reddy, PSR y Misra, Vibhuti. Interpretation of interaction effects and optimization of reagent dosages for fine coal flotation. International journal of mineral processing. Vol 75. pp. 83-90. Elsevier. 2005
11. Paper: RUBIERA, Fernando, HALL, Steve T y SHAH, Chandu L. Sulfur removal by fine coal cleaning processes. *Fuel* Vol. 76, No. 13, Elsevier Science pp. 1187-1194, 1997.
12. Paper: BROWN, D.W y HALL, S.T. Froth flotation: preparation of a laboratory standard. School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham. pp. 1-9. 1998. Elsevier Science.
13. PAPER. EROL, Murat, COLDUROGLU, Cigdem. The effect of the reagents and reagent mixtures on froth flotation coal fines. Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Ankara University, Ankara-Turkey. 2002

14. SALAGER, Jean Luis. Fenómenos Interfaciales en dispersiones polifásicas y medios porosos. Universidad de los Andes. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2002.

15. SALAGER, Jean-Louis y FORGIARINI, Ana. Espumas: Espumantes y antiespumantes. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de fenómenos interfaciales y recuperación del petróleo. Mérida-Venezuela. 1993.

16. SALAGER, Jean-Louis, ANDÉREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Influencia de la formulación sobre las espumas. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 2003.

17. SALAGER, Jean-Louis, ANDEREZ, José María y FORGIARINI, Ana. Surfactantes en solución acuosa. Laboratorio de formulación, interfase, reología y procesos. Mérida-Venezuela. 1993.

ANEXOS
ANEXO A. CURVAS DE CALIBRACIÓN

A1. Curva de distribución: Tamaño de partícula del carbón

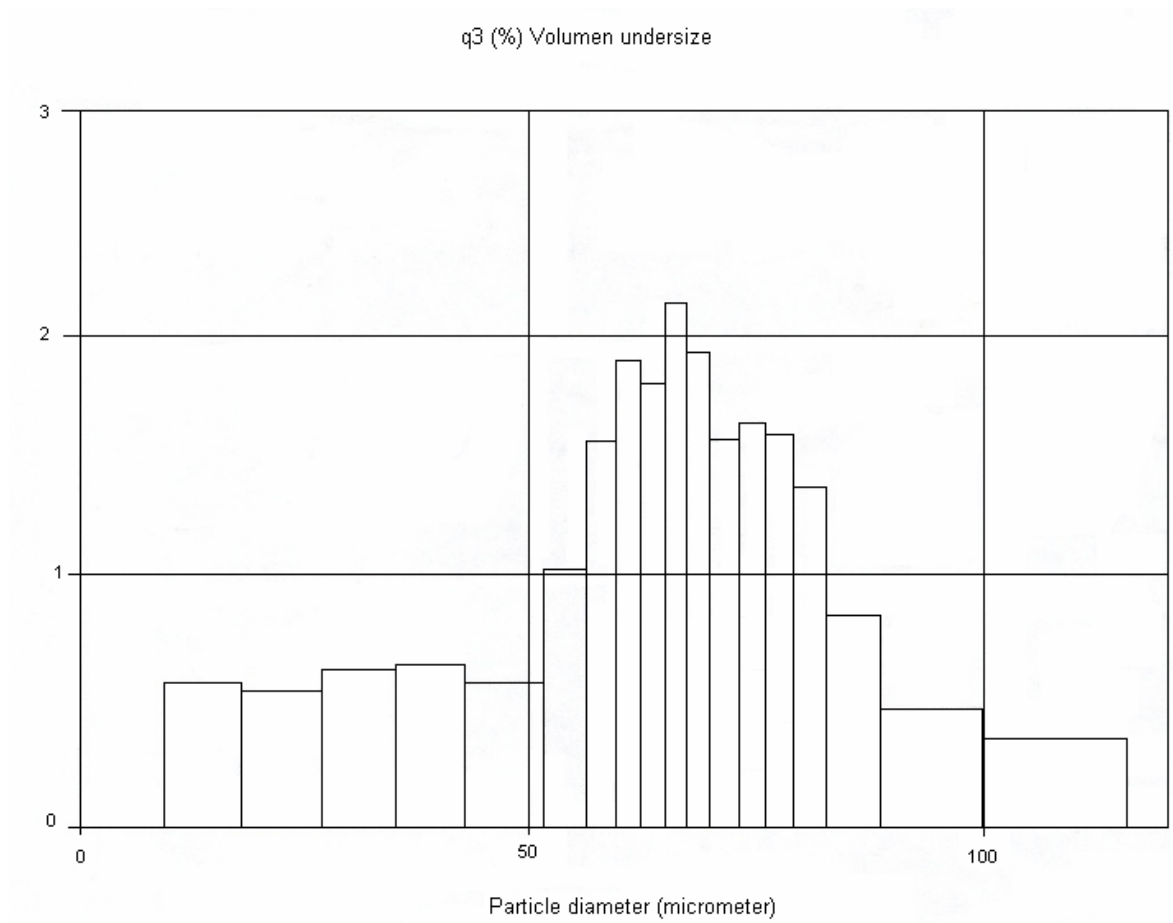
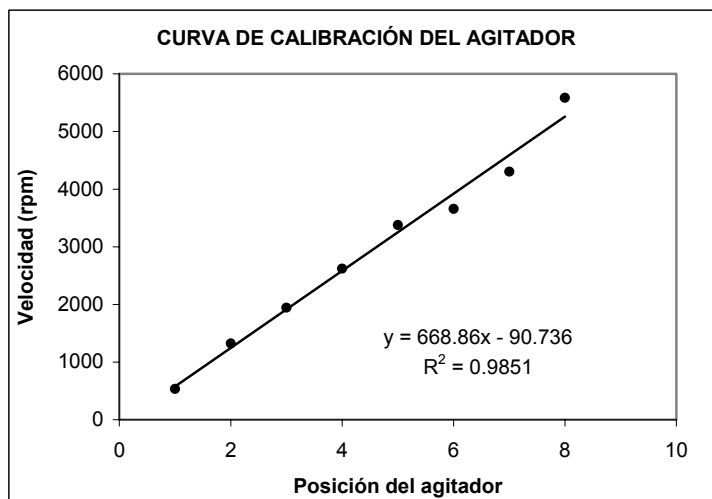


Figura A1. Distribución de tamaños de partícula del carbón.

A2. Curva de calibración del agitador mecánico

Para realizar este procedimiento, se empleo un foto tacómetro, que media las revoluciones por minuto del agitador mecánico. Los datos graficados se muestran a continuación:

Posición	rpm
1	535.1
2	1323
3	1944
4	2621
5	3377
6	3660
7	4305
8	5588



Gráfica A2. Curva de calibración del agitador mecánico

A3. Curva de calibración del rotámetro

Se calibró tomando como referencia el flujo de aire comprimido del laboratorio de ing. Química. A continuación se presenta un dibujo esquemático del montaje realizado:

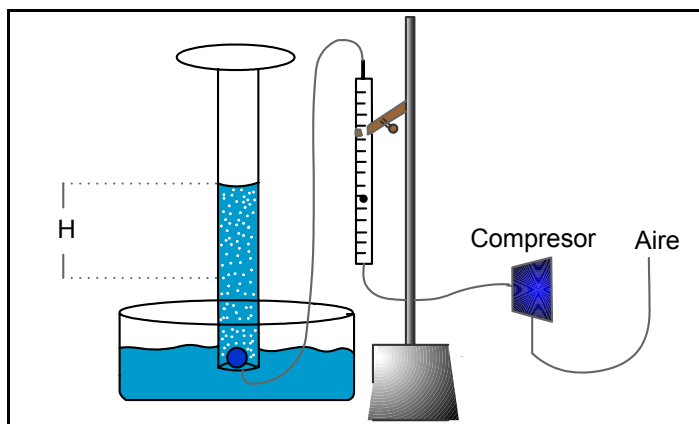
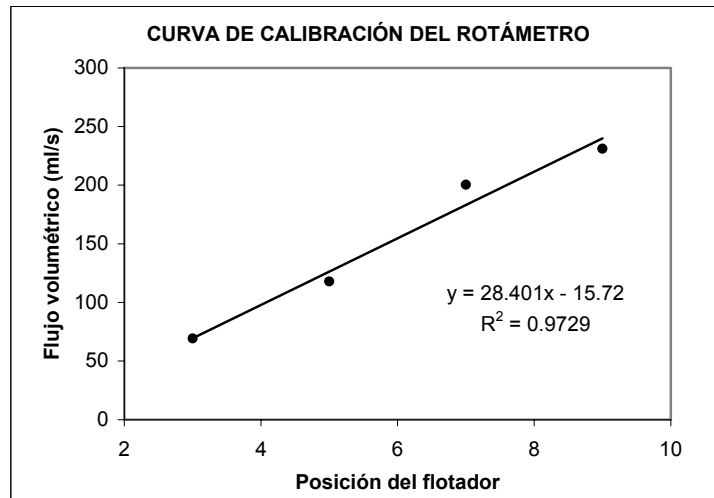


Fig. A3. Esquema de Calibración del rotámetro

Los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio y la respectiva curva de calibración se presentan a continuación.

Volumen (agua desplazada) (ml)	Tiempo (s)	Posición del rotámetro	Flujo volumétrico (ml/s)	Promedio flujo (ml/s)
1800	27.46	3	65.5498908	
1800	24.66	3	72.9927007	69.2712957
1800	15.16	5	118.733509	
1800	15.37	5	117.111256	117.922382
1800	9.2	7	195.652174	
1800	8.77	7	205.245154	200.448664
1600	7.28	9	219.78022	
1600	6.6	9	242.424242	231.102231

Tabla A3. Resultados de pruebas de calibración del rotámetro



Gráfica A3. Curva de calibración del rotámetro

ANEXO B: PRUEBAS DE ESPUMABILIDAD DEL SURFACTANTE MUGROSON®

Se hicieron pruebas de espumabilidad del surfactante en soluciones acuosas. La concentración del surfactante se vario para valores de 500 1000 y 3000 ppm, el procedimiento para estas pruebas fue el siguiente:

Se tomó el tiempo que tardaba la espuma en subir hasta una posición determinada en la probeta, midiéndose así la espumabilidad bajo c/u de las condiciones de los experimentos, luego se midió la altura de la espuma para periodos de tiempo que oscilaban entre 10-15 minutos, determinándose así la estabilidad de la espuma.

Los resultados de espumabilidad se muestran a continuación

Experimento	Concentración de surfactante (ppm)	Flujo de aire (ml/s)	Flujo de aire	Tiempo
1	1000	69.27	4	33.59
2	3000	69.27	4	37.56
3	1000	117.92	7	19.01
4	3000	117.92	7	18.29
5	500	69.27	4	39.24
6	500	117.92	7	19.96

Los resultados de estabilidad se presentan el la figura B1

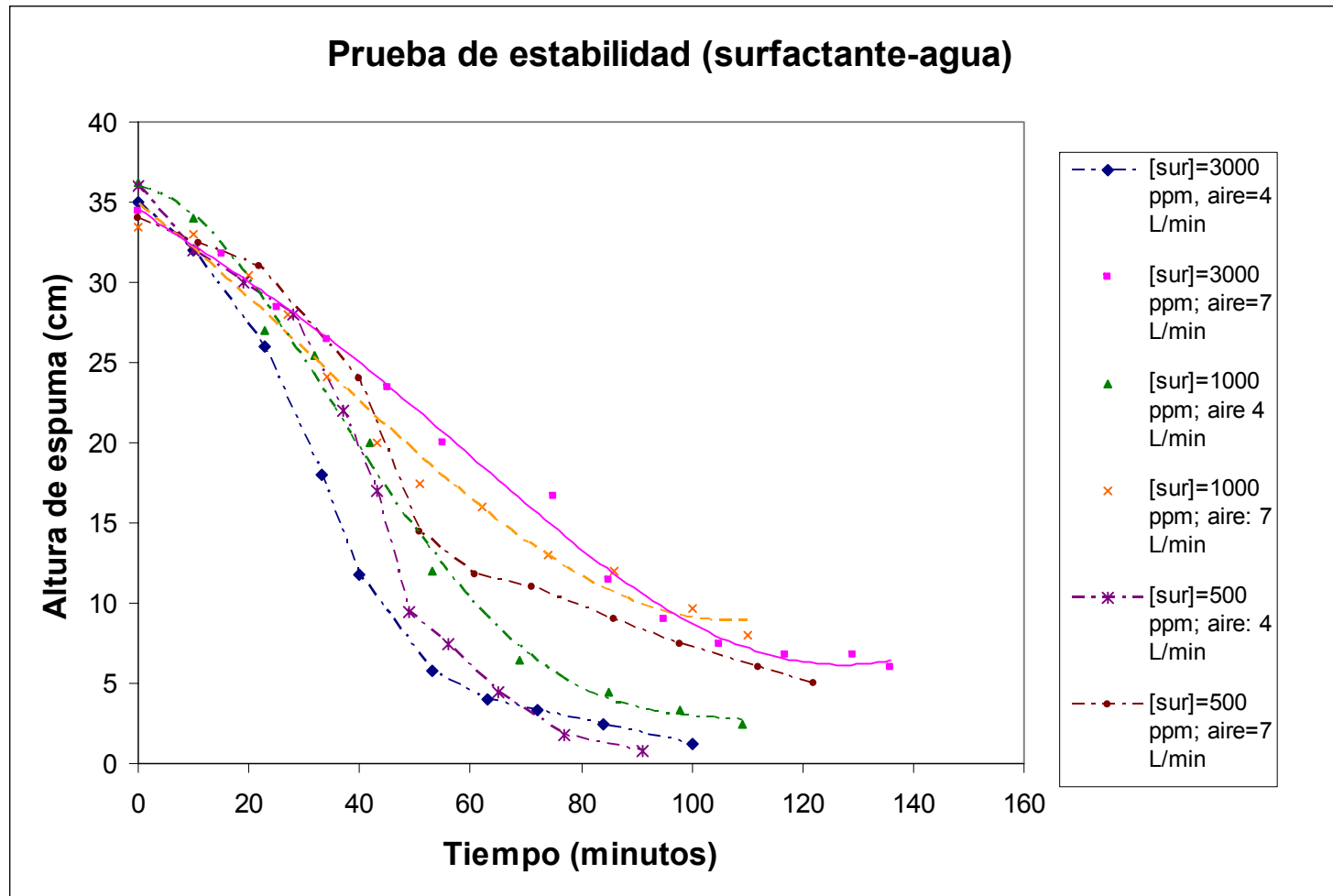


Figura B1. Pruebas de estabilidad para la solución de surfactante en agua

La condición con la que se presentó mayor estabilidad en la espuma formada fue para los valores más altos de las variables de operación, que corresponden a un flujo de aire de 7.08 L/min. y una concentración de surfactante de 3000 ppm, El resultado es el esperado de acuerdo a la literatura debido a que una mayor presencia de surfactante y un mayor flujo de aire, en la suspensión, proporciona mayor resistencia y elasticidad en la película (debido a la gran cantidad de surfactante presente en ella), por lo tanto, su maduración y ruptura son procesos mucho mas estables.

ANEXO C. Selección de la mezcla Suria-Castilla

Para realizar esta prueba se siguió el procedimiento descrito a continuación:

- Se determinó la viscosidad de ambos crudos (6699 cp para Castilla y 6.83 cp para Suria), seguido de esto, se prepararon mezclas a diferentes concentraciones de Suria para calcular sus viscosidades (Figura C1)

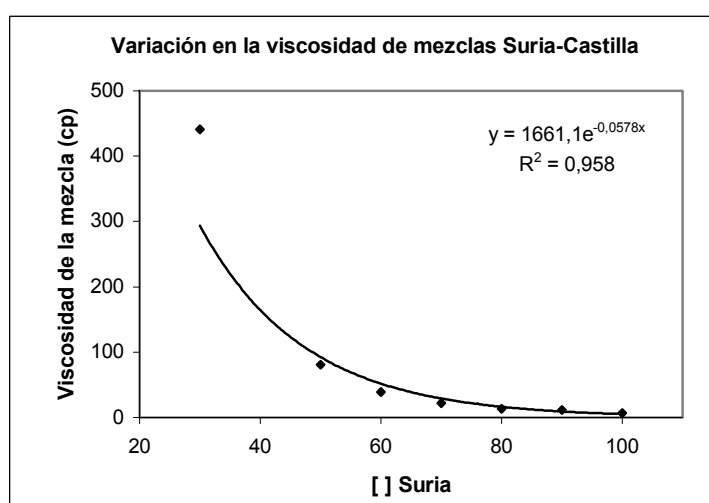


Figura C1. Variación de la viscosidad para diferentes mezclas Suria-Castilla

Luego se prepararon mezclas de crudo Zuria-Castilla, a diferentes proporciones, con el fin de determinar con cual de ellas, sin disminuir la espumabilidad de la emulsión, disminuía al mínimo la viscosidad del sistema. Los resultados se muestran a continuación.

Flujo de aire (L/min.)	4
Volumen de solución (ml)	200
Concentración de crudo % (V/V)	70
*Tensoactivo en la emulsión (ppm)	4000

Tabla C1. Parámetros Fijos

* Ingrediente activo en la suspensión (ppm)

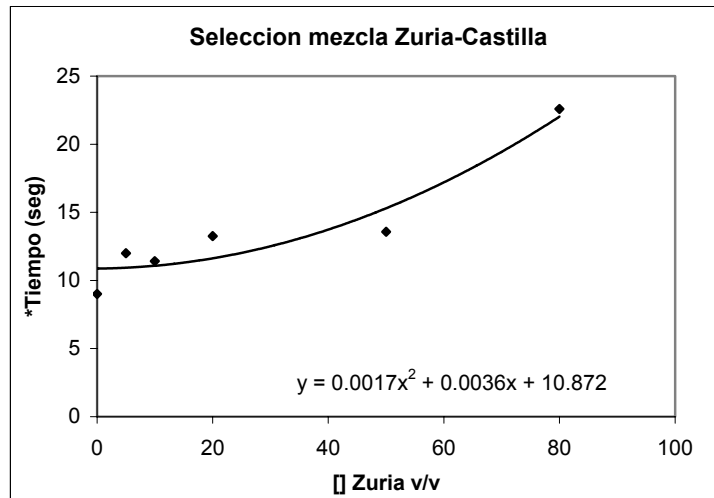


Figura C2. Variación de la espumabilidad en la emulsión con la viscosidad de la mezcla Zuria-Castilla. *Tiempo que tarda la espuma en alcanzar 16 cm. de altura.

Tal como se muestra en la figura 3, se encontró que para concentraciones de Suria de hasta un 50% no se afecta de forma apreciable la espumabilidad. Para el diseño factorial con CCTA, se escogió una mezcla 40% Suria – 60% Castilla, que mantiene la espuma en un nivel apropiado y a su vez disminuye la viscosidad en un 97.1% al pasar de 6699 a 193.4 cp (Ver figura 16).

ANEXO D: Resultado de las pruebas de estabilidad para la CTA

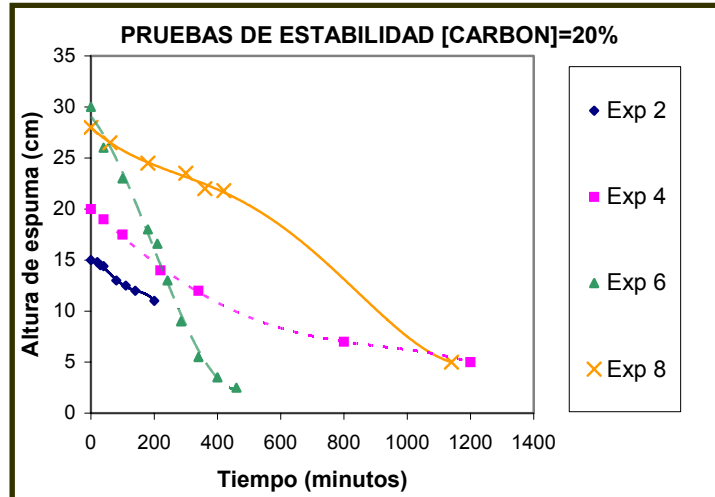


Figura D1. Curva de estabilidad de la CTA, concentración de carbón de 20%

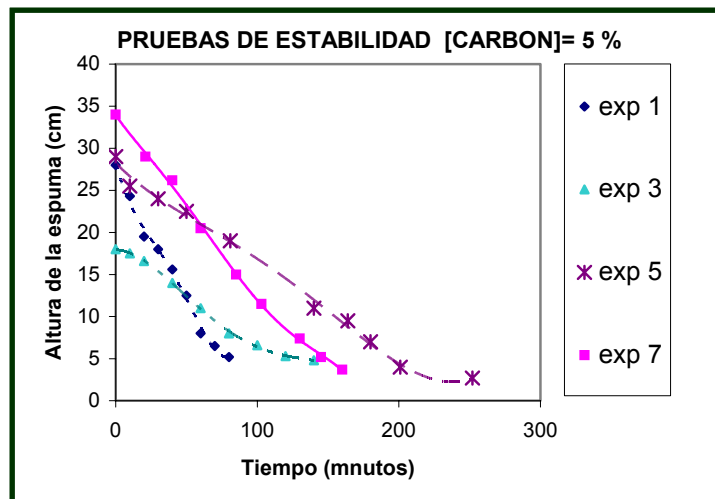


Figura D2. Curva de estabilidad de la CTA, concentración de carbón 5%

ANEXO E. Selección de la cantidad de tensoactivo en la CCTA.

Se elaboraron pruebas para la selección de las concentraciones de tensoactivo que se van a utilizar en el diseño factorial para las pruebas de flotación con CCTA.

En este caso se prepararon mezclas CCTA variando la concentración de tensoactivo y se midió el tiempo que tardaba la espuma en subir una altura determinada (5.5 cm.), debido a la alta viscosidad del sistema denso, es necesario saturar de aire el seno del fluido y así facilitar la flotación. Además de estas pruebas se realizaron flotaciones a diferentes valores de dilución de la CCTA. Los resultados se muestran a continuación.

Parámetros fijos:

Flujo de aire (L/Min.)	4.16
Volumen de solución (ml)	200
[£] Concentración de carbón % (P/V)	40
[£] Concentración de crudo % (P/V)	30
[¶] Composición del crudo (Suria/Castilla)	40/60

Tabla 4. Parámetros fijos para la selección de la cantidad de tensoactivo y los valores de dilución en la mezcla densa CCTA.

[£] U.S Patent No 5,902,359.. GROSSO VARGAS JORGE LUIS. On line and/or batch process for production of fuel mixtures consisting of coal/asphaltenes, fuel oil/heavy crude oil, surfactant and water (CCTA) and the obtained products.

[¶] Anexo B. Selección de la mezcla Suria-Castilla a utilizar.

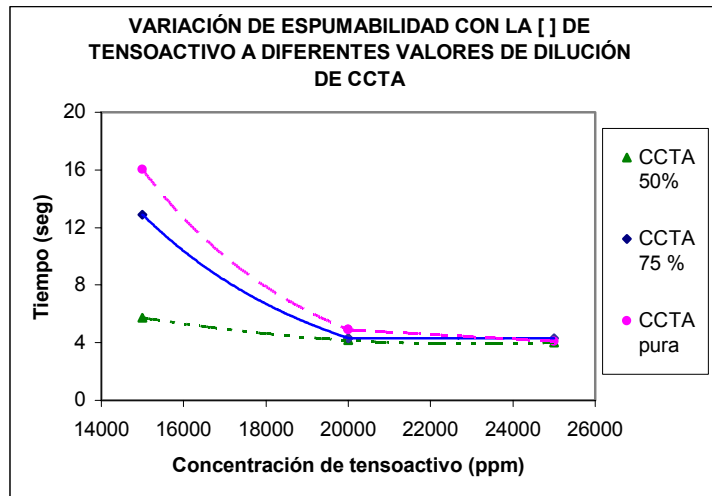


Figura 4. Selección de la cantidad de tensoactivo y el grado de dilución de la mezcla densa CCTA.

La cantidad de tensoactivo solo produce efecto considerable en la espumabilidad cuando la viscosidad del medio es alta (CCTA pura), y para cambios de 15000 a 20000 ppm, luego de este valor final la adición de mas surfactante no produce un cambio apreciable. El efecto en la cantidad de tensoactivo se va reduciendo, con la adición de agua, hasta que para la CCTA diluida al 50%, no hay cambios significativos en la espumabilidad cuando se agrega más tensoactivo. Por estas razones, para el diseño factorial se escoge un valor fijo de 20000 ppm de tensoactivo en el sistema denso.