

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SURFACTANTES NO IÓNICOS Y SU APLICACIÓN
EN EL DESTINTADO DE PAPEL RECICLADO

JUAN PABLO RODRÍGUEZ SALAZAR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2014

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SURFACTANTES NO IÓNICOS Y SU APLICACIÓN
EN EL DESTINTADO DE PAPEL RECICLADO

JUAN PABLO RODRÍGUEZ SALAZAR

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

HADER HUMBERTO ALZATE GIL

Doctor en Ingeniería

Asesor

GERMÁN CAMILO QUINTANA MARÍN

Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2014

*A la memoria del Amor que me ha enseñado mi madre:
María Esperanza.*

*A la gratitud de la paciencia de mis hermanos:
María Antonia y Mauricio Alejandro.*

A la gratitud del Amor de DIOS para conmigo.

Y a la memoria de Jesús y María.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A Hader Alzate, quien desde su dirección en este proyecto procuró alcanzar un óptimo resultado con los recursos disponibles.

A Germán Quintana, por su asesoría en el desarrollo estadístico del trabajo de grado.

A Mariluz Betancur, del Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA), por facilitar los reactivos necesarios para la titulación en la determinación de la dureza del agua.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. MARCO TEÓRICO.....	13
1.1. TÉCNICA DE IMPRESIÓN.....	13
1.2. TINTA.....	13
1.3. SURFACTANTES.....	14
1.4. RECICLAJE DEL PAPEL.....	21
1.5. DESTINTADO.....	22
1.5.1. Desintegración	22
1.5.2. Curado.....	22
1.5.3. Flotación.....	23
1.6. PROPIEDADES DEL PAPEL.....	24
1.6.1. Puntos no eliminados	24
1.6.2. Blancura	25
1.6.3. Colorimetría: Espacio del color CIELAB.....	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
2.1. MATERIA PRIMA.....	28
2.1.1. Surfactante.....	28
2.1.2. Selección de pulpa.....	28
2.1.3. Determinación de la humedad del papel.....	28
2.1.4. Silicato de sodio.....	29
2.1.5. Determinación de la dureza del agua.....	29
2.2. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS.....	29
2.3. DESTINTADO.....	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
3.1. MATERIA PRIMA.....	33
3.1.1. Humedad.....	33
3.1.2. Selección de pulpa.....	34
3.2. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS.....	36
3.2.1. Tensión superficial.....	36
3.2.2. Punto de turbidez.....	47

3.3. DESTINTADO.....	49
3.3.1. Pérdidas.....	56
4. CONCLUSIONES.....	59
5. RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la estructura molecular del surfactante. (Holmberg et al., 2003)

Figura 2 Ángulo de contacto. (Bracco y Holst, 2013).

Figura 3. Estructura micelar de tensoactivos. (Holmberg et al., 2003).

Figura 4. Variación de la tensión superficial (γ) y la concentración micelar crítica (CMC) de surfactantes iónicos y no iónicos. (Jiao, 2008).

Figura 5. Sistema CIELAB. Tomado de <http://www.flexoglobal.com/flexomag/08-September/flexomag-ploumidis.htm>

Figura 6. Pulper JSR 205.

Figura 7. Celda de flotación Denver.

Figura 8. Formador de hojas manual.

Figura 9. Datacolor CheckPro.

Figura 10. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. A: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (30°C). B: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (30°C). C: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (30°C). D: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (30°C).

Figura 11. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. E: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (40°C). F: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (40°C). G: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (40°C). H: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (40°C).

Figura 12. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. I: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (50°C). J: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (50°C). K: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (50°C). L: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (50°C).

Figura 13. Efecto de la temperatura sobre la tensión superficial.

Figura 14. Efecto de la dosis de surfactante sobre la tensión superficial.

Figura 15. Efecto del silicato de sodio sobre la tensión superficial.

Figura 16. Efecto de la dureza sobre la tensión superficial.

Figura 17. Efecto de la interacción del silicato de sodio y la dureza sobre la tensión superficial.

Figura 18. Efecto de la interacción de la dureza con la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

Figura 19. Efecto de la interacción entre la dureza y la temperatura sobre la tensión superficial.

Figura 20. Efecto de la interacción del silicato de sodio y la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

Figura 21. Efecto de la interacción entre el silicato de sodio y la temperatura sobre la tensión superficial.

Figura 22. Efecto de la interacción entre la temperatura y la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

Figura 23. Blancura ISO de pulpa destintada: Prueba 1: Surfactante [0%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 2: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 3: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 4: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [1%] y prueba 5: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [1%].

Figura 24. Efecto del surfactante sobre los puntos no eliminados.

Figura 25. Efecto del silicato de sodio sobre la blancura ISO.

Figura 26. Efecto del surfactante sobre la blancura ISO.

Figura 27. Pérdidas del proceso final: Prueba 2: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 3: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 4: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [1%] y prueba 5: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [1%].

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicación del concepto de HLB. (Holmberg et al., 2003).

Tabla 2. Masa empleada de cada tipo de papel reciclado

Tabla 3. Humedad papel reciclado

Tabla 4. Selección de papel según “*dirt specks*”

Tabla 5. Análisis de Varianza para Tensión superficial corregida - Suma de Cuadrados.

Tabla 6. Punto de turbidez.

Tabla 7. Ensayos destintado.

Tabla 8. Análisis de Varianza para Puntos no eliminados - Suma de Cuadrados.

Tabla 9. Análisis de Varianza para Blancura ISO - Suma de Cuadrados.

Tabla 10. Espacio del color CIELAB.

Tabla 11. Pérdidas en la selección del papel.

Tabla 12. Pérdidas del proceso final.

RESUMEN

En el presente trabajo de grado se emplean dos ácidos grasos etoxilados, surfactantes no iónicos de HLB 12 y HLB 14 respectivamente, los cuales se mezclan en razón másica de 1:1, dando como resultado un surfactante de HLB 13. Inicialmente se calculó el intervalo de 0.8 g/L a 1.0 g/L para la concentración micelar crítica por medio de mediciones de la tensión superficial; y también se determinó su temperatura de turbidez, la cual fue de 77.0 °C.

Por otra parte, se realiza el destintado por flotación de papel desperdicio de fotocopia – impresión láser en razón de 30:70 con el surfactante no iónico de HLB 13, para determinar el efecto de la presencia de carga iónica en el proceso; esta carga se evalúa de la procedencia de la dureza del agua y del silicato de sodio. A las hojas producidas de la pulpa después del destintado, se le midieron los puntos negros no eliminados o “*dirt specks*”, la blancura ISO y el color CIELAB. Estas mediciones finales proveen los datos necesarios para analizar estadísticamente la influencia estudiada.

PALABRAS CLAVE: PAPEL, DESTINTADO, CARGA IÓNICA, RECICLAJE, TENSIÓN SUPERFICIAL, PUNTO DE TURBIDEZ.

INTRODUCCIÓN

Para el 2011 la industria de la pulpa, papel y cartón en Colombia generó 6000 empleos y tuvo ingresos operacionales por 3.4 billones de pesos, además arrojó un consumo aparente de 1'501.755 toneladas para el total del papel y cartón, del cual 810.551 toneladas fue papel desperdicio, apto para el reciclado, con un incremento del consumo de 8.99% de éste último, respecto al año anterior (ANDI, 2012). Esta tendencia en el incremento del consumo del papel desperdicio, requiere un mejoramiento continuo de las tecnologías que se encargan de procesar dicho material reciclado; ya que de no realizar un desarrollo sostenible, el proceso termina siendo deficiente para la economía sectorial.

A su vez, este mercado está orientado por los procesos empleados en el destintado del papel reciclado, siendo la flotación el método más utilizado (Behin y Vahed, 2006 y Kerekes et al, 2011). Este método se basa en la flotación selectiva entre fibras y un colector que atrapa la tinta y la suciedad del papel reciclado (Alzate, A, 2011).

Los colectores que se emplean son surfactantes que presentan un balance hidrofílico-lipofílico entre el rango de 8 – 18, donde estabiliza las emulsiones aceite en agua y forma micelas en agua; lo cual da una indicación de su solubilidad en fase acuosa o en fase oleosa para predecir el tipo de emulsión que será formada (Jiménez, 2010). Entre estos tensoactivos, son usados ácidos grasos etoxilados (Pugh y Theander, 2004), exponiendo su acción detergente (Johansson y Svensson, 2001).

La identificación de surfactantes apropiados para el destintado del papel reciclado, permite incrementar la producción de los detergentes en Colombia, donde se destaca un crecimiento anual del 15% hasta el 2015 para la industria del aseo según la ANDI (2012). No obstante, en el área metropolitana del Valle de Aburrá se identificaron el año pasado 114 empresas de aprovechamiento de material reciclable, la mayoría microempresas de carácter artesanal y buen nivel de innovación y emprendimiento que incluyen en el trabajo población vulnerable (El Colombiano, 2012). Estas empresas podrán tener mayor demanda del material reciclado en proporción de un proceso técnico más eficiente, que procure disminuir los índices de contaminación regional.

En este proyecto se evalúan parámetros fisicoquímicos de una mezcla 1:1, de dos surfactantes no iónicos (Ácidos grasos etoxilados) de HLB 12 y HLB 14, mediante mediciones de tensión superficial y punto de turbidez. Y se realizan ensayos de destintado por flotación, analizando la calidad óptica de la hoja producida.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. TÉCNICA DE IMPRESIÓN

Es el proceso que se fundamenta en la transferencia de la tinta desde una forma de impresión a un sustrato denominado material de impresión (ANDIGRAF, 1994).

ELECTROFOTOGRAFÍA

Este sistema de impresión también se denomina xerografía que significa impresión seca; fue creado por Chester Carlson en 1938 (Al-Rubaiey, 2001; Banerjee, 2011; González, 2007; González, 2010). En esta técnica se utiliza un portaimagen electrostático, en el que se encuentran las áreas impresoras y no impresoras determinadas por los diferentes valores de las cargas de energía que poseen, negativas y positivas respectivamente, sin embargo, para algunas aplicaciones estas cargas pueden invertirse. De manera que, la turboelectricidad (fuerza eléctrica positiva) atrae al tóner, que cumple la función de la tinta, y lo imprime en el sustrato (papel, plástico o cartón), sólo en las áreas cargadas negativamente (ANDIGRAF, 1994).

Esta técnica de impresión inicialmente la desarrolló el señor Carlson para la fotocopiadora, e investigaciones posteriores de la compañía XEROX, la emplearon en impresoras láser (Banerjee, 2011).

1.2. TINTA

De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española (2014), la tinta es un “líquido coloreado que se emplea para escribir o dibujar, mediante un instrumento apropiado”. Tal líquido está constituido por dos sustancias principales, las cuales son el agente colorante y el ligante, entre los que se tienen para el primero: pigmentos inorgánicos y orgánicos; y para el segundo: aceites, barnices y resinas sintéticas. Además de estos dos componentes, se agregan aditivos a la tinta con el propósito de acondicionar estas

sustancias a las condiciones de impresión óptimas, que varían de acuerdo a la máquina y medio de impresión. (Rosner et al., 2000).

TÓNER

El tipo de tinta que se utiliza en las impresoras láser y en las fotocopiadoras se denomina tóner (PANEK, 1999), el cual es un polvo compuesto por partículas de tamaño de 8 a 12 micrómetros (BANERJEE, 2011). Inicialmente, el tóner era el polvo seco, pero investigando nuevas formas de transporte para una tecnología que ofrece mayor calidad de impresión e imagen copiada, se ha ido reduciendo el tamaño de partícula de tóner, alcanzando hasta los 6 micrómetros (SAMSUNG, 2012). La adhesión del tóner al papel está directamente afectada por las condiciones de fusión, las propiedades viscoelásticas del tóner y la energía relativa de superficie entre el tóner y el papel, alcanzando una máxima adhesión cuando las dos energías relativas de superficie son iguales, de las cuales, los agentes de encolado reducen la energía relativa de la superficie del papel (PANEK, 1999).

El tóner común, está constituido por los siguientes componentes (BANERJEE, 2011):

- Matriz polimérica (70-95%): está constituida por poliéster o co-polímeros de estireno con acrilatos, metacrilatos y butadienos.
- Colorante (5-20%).
- Agente de control de carga (0.2-5%).
- Aditivo de control de flujo (0-3%).
- Cera (según máquina).

1.3. SURFACTANTES

El término surfactante es una abreviación de las palabras inglesas “*surface active agent*”, lo cual significa que es una sustancia de superficie activa que se caracteriza por la tendencia a ser adsorbido en superficies o interfases, de manera que son llamados también como tensoactivos o sustancias anfifílicas que tienen doble afinidad fisicoquímica

de característica polar y apolar. En conjunto existen cinco interfases definidas, y de ellas dos se relacionan como superficies, dadas por:

- Sólido – vapor (superficie).
- Sólido – líquido.
- Sólido – sólido.
- Líquido – vapor (superficie).
- Líquido – líquido.

Típicamente, un anfífilo tiene una molécula que se puede dividir en dos partes (Figura 1). De un lado una parte polar (cabeza) que contiene heteroátomos tales como O, S, N, P, los cuales aparecen en grupos funcionales como alcohol, tiol, éter, éster, ácido, sulfato, sulfonato, fosfato, amina, amida, etc; y de otra parte, un grupo apolar (cola) compuesto en general por un hidrocarburo parafínico, cicloparafínico o aromático, el cual puede eventualmente contener halógenos. Por tanto, la parte polar tiene afinidad por los solventes polares, particularmente el agua, mientras que la parte apolar tiene afinidad para los solventes orgánicos que son repelidos por el agua. Por esta razón la parte polar se denomina hidrofílica, mientras que la parte apolar recibe el calificativo de lipofílica o hidrófoba.

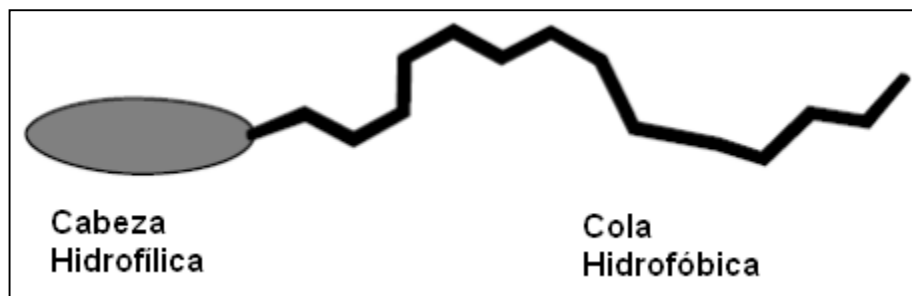


Figura 1. Esquema de la estructura molecular del surfactante. (Holmberg et al., 2003)

Tal combinación anfífilica hace que la fuerza motriz de un tensoactivo que se adsorbe en una interfase, se emplee para reducir la energía libre de dicha frontera de fase. Entonces la energía libre de la interfase por unidad de área, representa la cantidad de trabajo requerida para expandir la interfaz. La tensión de la interfase es el término que usualmente se emplea para referirse a la energía libre de la interfase por unidad de área. Por lo tanto, la tensión superficial del agua es equivalente a la energía libre de la interfase por unidad de área de la frontera entre el agua y el aire. Cuando la interfase está cubierta

por moléculas de tensoactivo, la tensión superficial se reduce, y cuanto más densa sea la capa del tensoactivo en la interfase, mayor ha de ser la reducción de la tensión superficial (Holmberg et al., 2003).

Otra propiedad importante es la mojabilidad de un sólido por un líquido, lo cual se define mediante el ángulo de contacto (θ), éste da una idea del grado de humectación del líquido sobre el sólido. En la Figura 2 se muestran las zonas críticas que puede presentar el ángulo de contacto, en el cual interactúan tres fuerzas interfaciales: líquido-vapor (γ_{lv}), sólido-vapor (γ_{sv}) y sólido-líquido (γ_{sl}); de tal manera que se denomina ángulo de contacto pequeño a aquel cuyo valor es menor que 90° y corresponde a una alta humectación (alta mojabilidad); y se denomina ángulo de contacto grande a aquel cuyo valor es mayor que 90° y corresponde a una baja humectación (baja mojabilidad) (Bracco y Holst, 2013).

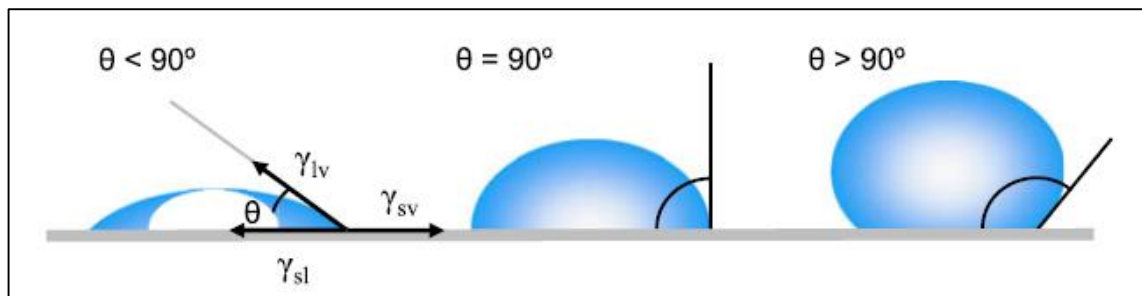


Figura 2 Ángulo de contacto. (Bracco y Holst, 2013).

Los anfífilos que favorecen la mojabilidad de un sólido al agua se llaman humectantes, mientras que aquellos que desfavorecen la mojabilidad al agua se clasifican como hidrofobantes. Los surfactantes pueden compatibilizar el agua con los aceites, permitiendo la formación de estructuras que asocian agua y aceite en una sola fase, llamada solución micelar. Esta acción se llama solubilización o co-solubilización.

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se venden de acuerdo a su uso, es decir a su propiedad de mayor interés práctico en cuanto a la aplicación: jabón, detergente, emulsionante, bactericida, inhibidor de corrosión, dispersante, tensoactivo, humectante, etc; sin embargo, la mayoría de los surfactantes poseen varias de estas propiedades a la vez, y por lo tanto se prefiere clasificar de acuerdo a su tipo de molécula en base al tipo de disociación en solución, tal como sigue (Salager, 2004):

- Surfactantes aniónicos: son aquellos que en solución acuosa se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es generalmente un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este tipo pertenecen los surfactantes de mayor producción, detergentes como alquilbenceno sulfonatos, jabones o sales de ácidos carboxílicos grasos, espumantes como el lauril éster sulfato, etc.

- Surfactantes no iónicos: por orden de importancia industrial vienen justo después de los aniónicos, y hoy en día su producción está aumentando. En solución acuosa no forman iones, ya que su parte hidrofílica está formada por grupos polares no ionizados, como alcohol, tiol, éter o éster. Una gran parte de estos surfactantes son alcoholes o fenoles etoxilados (lavaplatos, champúes). Ciertos derivados del sorbitol producen surfactantes no tóxicos para uso farmacéutico o alimenticio.
- Surfactantes catiónicos: son aquellos que se disocian en un catión anfífilo y un anión generalmente de tipo halogenado. Estos surfactantes se usan solamente en aplicaciones especiales donde la carga positiva del anfífilo produce ventajas como en enjuagues o emulsiones asfálticas. En la mayoría de los casos corresponden a un grupo amonio cuaternario.
- Surfactantes anfotéricos: son aquellos que poseen la combinación en la misma molécula de un grupo con tendencia aniónica y de un grupo con tendencia catiónica, como por ejemplo los aminoácidos, las betaínas o los fosfolípidos. Según el pH del medio una de las dos disociaciones prevalece.
- Surfactantes poliméricos: son aquellos que sobre una macromolécula se injerta un cierto número de grupos hidrofílicos, o se produce policondensación de grupos con ciertas características polares y apolares.

Ahora nos centraremos en las características de una clase particular de tensoactivos, los cuales son empleados en el destintado por flotación.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE SURFACTANTES NO IÓNICOS

Los surfactantes en solución acuosa presentan un ordenamiento autónomo en el cual se disponen para su condición anfífilica, clasificándose en sistemas homogéneos de una fase y sistemas heterogéneos de dos ó más fases. Los sistemas de una fase se dividen en soluciones isotrópicas, líquidos cristalinos y sólidos; mientras que los sistemas heterogéneos se presentan como emulsiones, suspensiones, espumas, geles, entre otros; no obstante, el alcance del presente trabajo abarca las propiedades fisicoquímicas

básicas de los surfactantes no iónicos, tales como la concentración micelar crítica, el punto de turbidez y el balance hidrofílico – lipofílico.

- **Concentración micelar crítica (CMC):** Las moléculas de los surfactantes en solución se asocian para solubilizarse adecuadamente en el medio acuoso, tal estado se caracteriza por las formas de las estructuras asociadas (Figura 3), que a partir de cierta concentración se ordenan en agregados esféricos inicialmente, que después alcanzan diferentes formas como cilíndrica, laminar, vesicular, biocontinua o invertida. A estos agregados se denominan micelas, y la concentración de surfactante a la que comienza su formación se llama concentración micelar crítica.

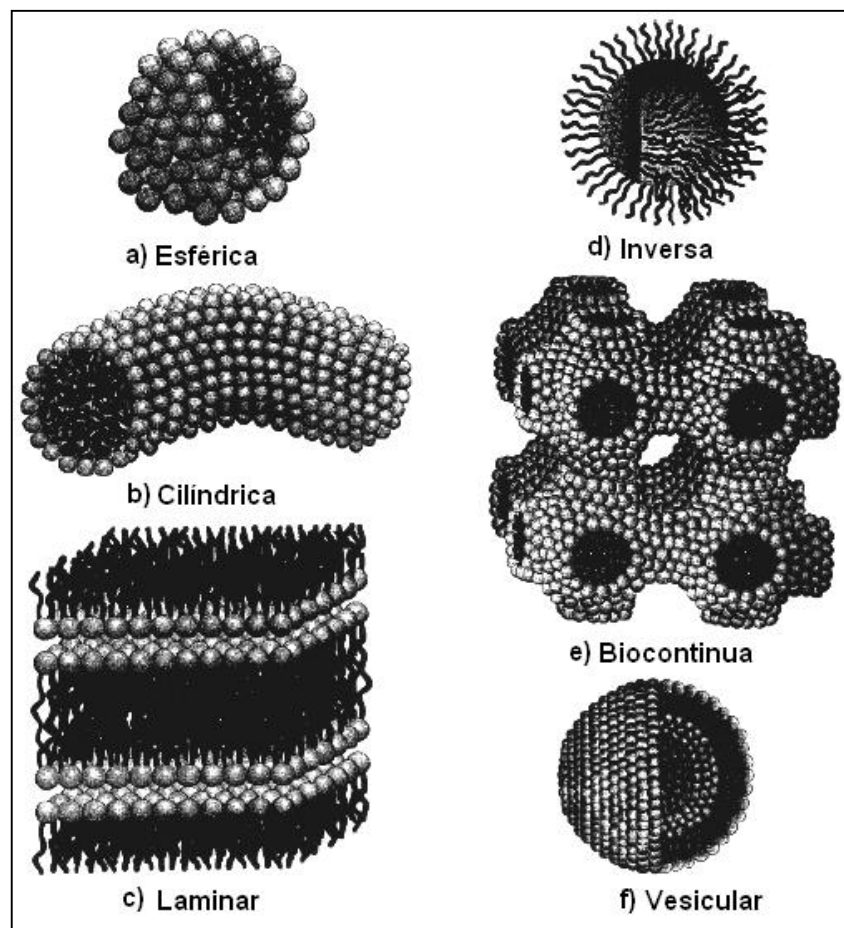


Figura 3. Estructura micelar de tensoactivos. (Holmberg et al., 2003).

La CMC de los surfactantes se mide indirectamente según el valor de alguna propiedad fisicoquímica del tensoactivo, siendo aplicada ampliamente la tensión superficial (Figura 4), y como la CMC no se define como una cantidad exacta, se pueden generar dificultades en su medición. La CMC depende de la temperatura, siendo inversamente proporcional a ésta.

Jiao (2008), expuso que la tensión superficial e interfacial de surfactantes no iónicos etoxilados es generalmente mayor a la que presentan los surfactantes iónicos, debido a la formación de agregados. Este comportamiento presentado en la Figura 4, muestra que los agentes no iónicos tienen su estructura molecular más grande y menos polar que los iónicos, y por consiguiente, tienen la tendencia a asociarse en la superficie a menores concentraciones.

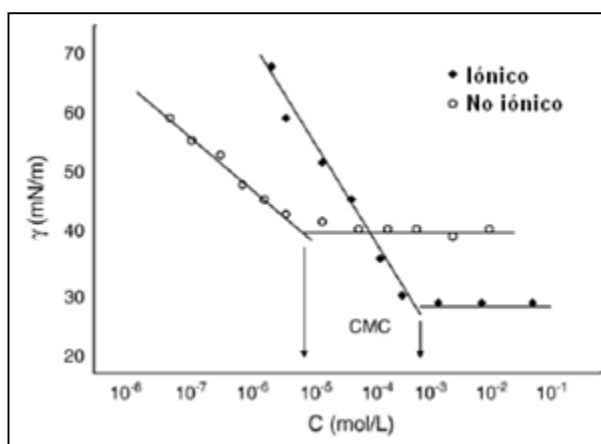


Figura 4. Variación de la tensión superficial (γ) y la concentración micelar crítica (CMC) de surfactantes iónicos y no iónicos. (Jiao, 2008).

- Punto de turbidez: Se observa con el aumento de la temperatura el comienzo del cambio en la turbidez de la solución, de modo que se dispersa la luz fuertemente a partir de la separación de las fases (surfactante y agua) debido a la disminución de la solubilidad. Esta temperatura de turbidez depende de la longitud de la cadena etoxilada y poco de la longitud de la cola del surfactante, ya que ésta se deja fija cuando se estudia. El punto de turbidez se mide fijando la concentración del soluto en 1% en peso (Holmberg et al., 2003).

- Balance hidrofílico – lipofílico (HLB): Griffin en 1949 introduce el concepto de HLB de los surfactantes no iónicos, el cual es determinado para los alcoholes etoxilados y alquilfenoles etoxilados, por el cociente entre el porcentaje en peso de óxido de etileno y cinco (Holmberg et al., 2003). Y representa la afinidad relativa del surfactante para la fase agua (W) y aceite (O). El HLB se mide en una escala de 0 a 20, según la importancia relativa del grupo hidrófilo y del grupo lipófilo en la molécula del surfactante (Alzate, 2011). En la Tabla 1 esta medición se utiliza para identificar o clasificar los surfactantes de acuerdo a su uso.

Tabla 1. Aplicación del concepto de HLB. (Holmberg et al., 2003).

Rango de HLB	Aplicación
3 - 6	Emulsificante W/O
7 - 9	Agente humectante
8 - 14	Emulsificante O/W
9 - 13	Detergente
10 - 13	Solubilizante
12 - 17	Dispersante

Rodríguez et al. (2012) han trabajado la sinergia de las mezclas de surfactantes con el balance hidrófilo-lipófilo (HLB), de modo que lo calculan de la siguiente manera:

$$HLB = w_A \cdot HLB_A + w_B \cdot HLB_B \quad (1)$$

Donde w_i es la fracción másica del surfactante i , y HLB_i es el valor del HLB del surfactante i ; lo cual muestra que el HLB es una propiedad aditiva y las características hidrofílicas y lipofílicas de los componentes independientes se agregan al mezclarlos en solución acuosa, variando de esta manera la solubilidad del agente y su influencia en la aplicación del producto.

1.4. RECICLAJE DEL PAPEL

La disposición final del papel desperdicio como residuo sólido en la vida social del hombre, ha permitido el desarrollo de procesos técnicos para su transformación, de manera que optimizando las variables ambiental y económica, se alcance la ventaja necesaria para preferir el reciclado del papel a otras alternativas tecnológicas.

Zanuttini (2012) indica que la inversión económica es menor para el proceso de reciclaje de papel que para su producción a partir de pulpa virgen; adicionalmente, disminuye la carga contaminante representada en emisiones de dióxido de carbono, óxido de azufre, óxido de nitrógeno y material particulado, en relación a la producción de pulpa con base en fibra virgen por una planta kraft. No obstante, se tiene que para el año 2014 la demanda mundial de papel se estima en 440 millones de toneladas, a partir de la cual se presenta una tendencia creciente proyectada hasta el año 2020 con 480 millones de toneladas; de este crecimiento se espera que el 61% corresponda a fibras recicladas.

Zanuttini (2012) expresa que “en la mayoría de los casos, el reciclado de papel recuperado implica inevitablemente una mezcla de diferentes tipos de fibras que lleva a la pérdida de propiedades específicas que pueden obtenerse en las pulpas vírgenes”, sin embargo, los desarrollos tecnológicos han permitido minimizar estos problemas y seguir adelante con el reciclaje del papel.

Por otra parte, la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y el Papel (TAPPI, por sus siglas en inglés), en el 2001 ha descrito las etapas que se llevan a cabo en el proceso del reciclaje de papel, el cual comienza en la clasificación que hace de éste el reciclador, de manera que debe estar libre de contaminantes, residuos de comida, plástico y otros, si no lo está, se dispone en compostaje, recuperación energética o relleno sanitario. Después de esta clasificación, se recolecta y transporta a la planta de procesamiento, donde será almacenado y luego tratado.

TAPPI (2001), especifica que la primera etapa del proceso es el re-pulpeo que desintegra el papel para luego pasar esta suspensión por un cribado, de donde en algunos casos se lleva posteriormente a un lavado opcional. La unidad que permite retirar la tinta de la fibra del papel es el denominado “lavado de la pulpa”, que puede ser, o bien por lavado, o bien por flotación. Adicionalmente, la pulpa se hace pasar, en caso de necesitarlo, por un proceso de refinación y blanqueo antes de pasar al formador de papel.

1.5. DESTINTADO

Para producir pulpa blanca con base en papel reciclado, de manera que sea adecuada para producir papeles y otros similares, es necesario eliminar las partículas de tinta que tiene dicho papel. El proceso orientado a esa finalidad se denomina destintado (Aragón, 2011).

Básicamente se puede dividir el proceso en tres grandes etapas (Aragón, 2011):

- La desintegración del papel impreso (etapa de pulpeo), en la cual se produce el desprendimiento de la tinta y otros contaminantes por medio de un sistema totalmente mecánico.
- La separación de los mismos de la suspensión fibrosa (etapa de flotación).
- Lavado de la pulpa.

Para éstas dos últimas etapas se emplean una combinación de sistemas mecánicos y químicos; cuando se requiere producir pulpa blanca se aplican procesos de blanqueo.

1.5.1. Desintegración

Después de tener el papel reciclado seleccionado, se lleva a una unidad de desintegración, la cual prepara la pulpa en una suspensión fibrosa, de manera que las fibras de celulosa queden individualmente separadas, además procura una separación eficiente de los contaminantes, tales como tintas, aditivos papeleros, recubrimientos y adhesivos entre otros. Este proceso emplea el uso de variables térmicas y mecánicas, y en algunos casos químicas; realizándose en un equipo denominado “*púlper*” que se puede construir para proceso continuo o discontinuo, en cualquiera de estas dos opciones se puede seleccionar alta, media o baja consistencia para trabajar de acuerdo a las ventajas que presenta cada una (Zanuttini, 2012).

Alzate A. (2011) recopila las siguientes variables que intervienen en el proceso de desintegración de papel reciclado: velocidad angular, tiempo, consistencia, temperatura y concentración de reactivos en el caso de ser empleados desde esta etapa.

1.5.2. Curado

Llamado también tiempo de reacción; esta etapa es opcional para cuando los reactivos no son adicionados desde la etapa de desintegración o se quiere aumentar el tiempo de

reacción de los químicos agregados (Alzate A, 2011). Este proceso se lleva a cabo inmediatamente después de la desintegración, bajo las mismas condiciones de pulpeo (consistencia y temperatura, principalmente), sin embargo, Alzate H. (2011) desarrolla un tiempo de reacción en dos etapas predominantes, tiempo de agitación y tiempo de reposo. El primero se emplea para homogeneizar la suspensión, y el segundo para efectuar la acción de los parámetros y reactivos que afectan el destintado.

1.5.3. Flotación (Aragón, 2011)

Se basa en la adsorción selectiva o la adhesión de materiales en la superficie de burbujas de gas que pasan por una suspensión. En la mayoría de los métodos, las burbujas se elevan para formar una espuma que lleva el material hacia arriba; así el material, deseable o indeseable, se retira del líquido. Por tanto, los métodos de espumación son particularmente adecuados (aunque no de forma exclusiva) para retirar cantidades pequeñas de material de volúmenes grandes de líquidos. Para cualquier método de burbujas de adsorción, si el material que se debe retirar (denominado coligado) no es activo en la superficie, se puede agregar un surfactante adecuado (que se denomina colector) para unirse con él y fijarlo o adsorberlo a la superficie de la burbuja, con el fin de que se pueda retirar. La unión entre el coligado y el colector se puede realizar mediante la quelatación u alguna otra formación compleja. También, se puede retirar un coligado cargado mediante su atracción hacia un colector de carga opuesta.

El proceso de flotación se aplica a partículas con un intervalo de tamaño entre 20 μ m y 300 μ m; sin embargo, es típico encontrar partículas entre 65 mallas (230 μ m) y 270 mallas (53 μ m).

El proceso se realiza en celdas de flotación, donde las partículas de tinta saponificadas y emulsionadas son arrastradas hacia la superficie libre por las burbujas que se forman a partir de una corriente de aire inyectada en su parte inferior. Esta corriente provoca turbulencia, por lo cual no debe ser ni demasiado fuerte ni demasiado suave, para evitar por un lado, que las partículas de tinta adheridas a las burbujas de aire se desprendan de nuevo, y por otro que se produzca una flotación perturbadora de fibras.

El proceso se inicia con la preparación de una mezcla sólido – líquido que puede contener hasta un 40% de sólidos, a la cual se adicionan reactivos químicos llamados colectores desde la etapa de pulpeo. Los aditivos son adicionados para tornar algunos compuestos hidrófobos de modo que ellos se adhieran selectivamente a burbujas de aire introducidas dentro de la suspensión en la celda de flotación; algunos reactivos aumentan la selectividad a través de fenómenos de activación y depresión.

Con la adición del colector se logra finalmente un agregado de menor densidad que asciende y forma una capa de espuma sobre la superficie de la celda. Esta nueva fase debe tener la estabilidad necesaria para evitar que las partículas de tinta vuelvan a depositarse sobre la pulpa. Esta re-deposición se puede prevenir adicionando silicato de sodio a la pulpa. El proceso se completa con la evacuación de la espuma.

1.6. PROPIEDADES DEL PAPEL

El papel es un material flexible que se emplea en la escritura, en el embalaje y una variedad de propósitos adicionales. El papel consiste en una red de fibras de pulpa, usualmente formada a partir de una suspensión acuosa sobre un tamiz, manteniéndose unido por puentes de hidrógeno. El papel contiene adicionalmente, aditivos y cargas (Biermann, 1996).

No obstante que los papeles se hacen esencialmente con la misma materia prima, hay una diferencia considerable en las propiedades de los papeles comerciales. Algunas de ellas son variaciones que el productor del papel introduce intencionalmente; otras son diferencias inevitables. Ciertas propiedades son deseables en unos papeles y muy indeseables en otros.

El fabricante de papel dispone de muchos métodos para cambiar las propiedades de éste; sin embargo, las distintas propiedades del mismo están interrelacionadas y cuando se realiza un cambio para mejorar una propiedad, con frecuencia se afecta otra. El buen productor de papel trata de elegir un término medio en el que la combinación de las distintas propiedades produce el mejor papel para el uso al que se le destina. Las características del papel pueden clasificarse en físicas, ópticas, químicas, eléctricas y microscópicas (Casey, 1991).

1.6.1. Puntos no eliminados

En el destintado de papel reciclado, tras la eliminación parcial de la tinta de la pulpa, se conserva un residuo de tinta dispersado a lo largo del papel formado finalmente, lo cual genera puntos negros en la hoja. Estos puntos negros producen una sensación de suciedad que se debe minimizar para alcanzar niveles adecuados de calidad para su reutilización. Esta característica del papel depende del tipo de surfactante utilizado y del proceso de destintado.

1.6.2. Blancura (Casey, 1991)

La blancura verdadera se refiere a la reflectividad general o claridad (es decir, la eficiencia visual) del papel; es una función de la reflectancia espectacular general del papel, la distribución de energía del iluminante, las condiciones de observación y las características del que observa. Aunque la eficiencia visual es función de la reflectancia sobre el espectro visible, la blancura, según el productor de papel, se basa en una medición de la reflectancia de la luz de los papeles blancos o casi blancos bajo una sola longitud de onda en la región azul del espectro, es decir, luz cuya longitud de onda dominada es de 457 nm.

Al principio, la blancura se utilizó como una prueba para medir la efectividad del blanqueo, al eliminar lo amarillento de las pulpas. La posibilidad de medir la blancura con una sola longitud de onda se basa en el hecho de que pulpas del mismo tipo tienen curvas de reflectancia espectral de una forma semejante; por lo tanto, una lectura con una sola longitud de onda es indicación suficiente acerca de la forma de la curva.

La curva de reflectancia espectral para una pulpa no blanqueada se inicia con una reflectancia relativamente baja en el extremo violeta del espectro y se eleva rápidamente hasta un volumen bastante elevado en el extremo rojo del espectro; en otras palabras, una pulpa sin blanquear tiene un amarillo de baja pureza. El blanqueo eleva la curva de reflectancia espectral a lo largo de todo el margen, pero el aumento es mayor en el margen azul-violeta en el que se mide la blancura, es decir, en la proximidad de 457 nm.

La blancura es también adecuada para medir la permanencia del papel, ya que el cambio en el color del papel al envejecer o por degradación térmica es mayor que en las regiones azul y violeta del espectro, en las que se mide la blancura.

1.6.3. Colorimetría: Espacio del color CIELAB

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés: Commission Internationale de l'Eclairage) ha mejorado en 1976 su sistema colorimétrico a un método que permite medir y ordenar el color de un objeto, y es comúnmente empleado en los sistemas de control de calidad en las industrias: textil, tintas, pinturas, plásticos y papel principalmente. A este sistema se le tiene denominado "CIE 1976 L* a* b*" = CIELAB (DATACOLOR, 2014).

Los principios fundamentales que se proponen para explicar la significancia del sistema CIELAB son los siguientes (DATACOLOR, 2014):

- El color es una sensación que resulta de la combinación de un haz de luz, un objeto y un observador.
- Una fuente luminosa ilumina el objeto.
- Un objeto modifica la luz, reflectándola a un observador.
- El observador percibe la luz reflejada.
- Tres estímulos son valorados como coordenadas de la sensación del color: la luz, el objeto y el observador.
- Se basa en la teoría de los colores opuestos.

TEORÍA DE LOS COLORES OPUESTOS (DATACOLOR, 2014; Santacruz, 2011)

Esta aproximación sigue la idea de que cualquier objeto que se percibe entre los ojos y el cerebro, es captado como información eléctrica por los conos receptores que lo codifican en tres señales que se distribuyen en las siguientes escalas L*: blanco-negro, a*: rojo-verde y b*: amarillo-azul. En el sistema CIELAB (Figura 5) la combinación de este espacio tridimensional permite visualizar cualquier color, de modo que la significación de las coordenadas es:

- L*: Coordenada de la claridad o luminosidad reflectada, donde 100 es máxima blancura.
- a*: Coordenada con $+\infty$ que indica color rojo y $-\infty$ color verde.
- b*: Coordenada con $+\infty$ que indica color amarillo y $-\infty$ color azul.

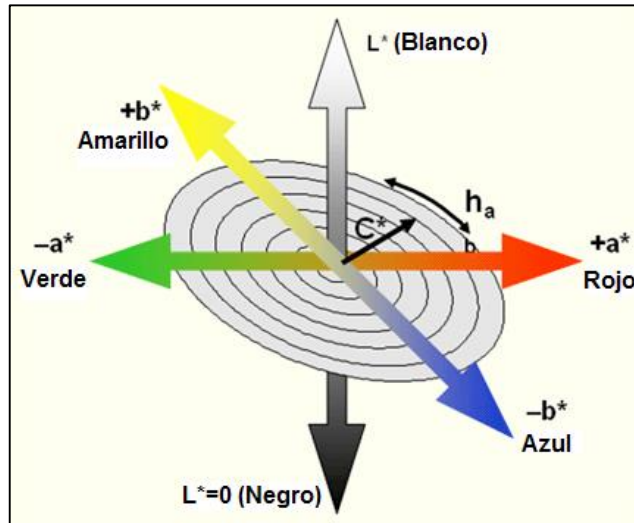


Figura 5. Sistema CIELAB. Tomado de <http://www.flexoglobal.com/flexomag/08-September/flexomag-ploumidis.htm>

El color puede ser expresado como un punto en un espacio vectorial definido por las coordenadas cartesianas (L^* , a^* , b^*) ó por sus coordenadas cilíndricas (L^* , c^* , h^*), definiendo la transformada de la siguiente manera:

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2)$$

$$c^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

El espacio del color $L^*c^*h^*$ se define con la misma L^* , pero con h^* y c^* como sigue:

- c^* : Coordenada cromática o de saturación, como distancia al eje L^* .
- h^* : ángulo de matiz, expresando en grados, con 0° comienzo del eje $a^*(+)$, 90° por el eje $b^*(+)$, 180° por el eje $a^*(-)$ y 270° para el eje $b^*(-)$.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIA PRIMA

2.1.1. Surfactante

Se emplean dos ácidos grasos etoxilados, uno de HLB 12 y otro de HLB 14. La selección de este material se realizó por recomendación de una tesis doctoral previa (Alzate H., 2011). Estos surfactantes se mezclan a una razón másica de 1:1, para obtener un surfactante no iónico de HLB 13, dicha combinación aditiva de tensoactivos en solución acuosa ha sido estudiada y recomendada por Rodríguez et al. (2012).

2.1.2. Selección de pulpa

Se realizan ensayos previos con diferentes mezclas de papel reciclado para definir con cuál pulpa se ha de trabajar en este proyecto, dicha selección se realiza con base en la pulpa destintada con menor cantidad de puntos no eliminados determinados con el software Simpatic Lab de Techpap, a las siguientes mezclas de papel reciclado:

- Fotocopia = 100%.
- Fotocopia – Periódico = 70:30.
- Fotocopia – Impresión chorro de tinta = 70:30.
- Fotocopia – Impresión chorro de tinta = 30:70.
- Fotocopia – Impresión láser = 70:30.
- Fotocopia – Impresión láser = 30:70.
- Fotocopia – Revista = 70:30.

2.1.3. Determinación de la humedad del papel

La medición del contenido de humedad en el pulpa se llevó a cabo mediante la muestra de 3.5g de papel de cada clase (Fotocopia, periódico, impresión chorro de tinta, impresión láser, revista). La muestra se llevó al horno a una temperatura de 105°C por 24h, luego se pasó a un desecador por 15min y luego de alcanzar la temperatura ambiente, se midió el peso de la pulpa seca en una balanza analítica. Estas pruebas se hicieron por duplicado.

2.1.4. Silicato de sodio

Suministrado por el grupo de investigación de Pulpa y Papel de la Universidad Pontificia Bolivariana, como una solución de 42.2°Be.

2.1.5. Determinación de la dureza del agua

La dureza cálcica del agua se calcula por el método de titulación expuesto en el manual de laboratorio de Gómez y Mejía (2007), como partes por millón (ppm) de carbonato de calcio a partir de la adición de cloruro de calcio dihidratado suministrado por el grupo de investigación de Pulpa y Papel de la Universidad Pontificia Bolivariana.

2.2. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Se medirá la tensión superficial por el método del anillo, usando un tensiómetro semiautomático Tensiomat® 21 de Fisher Scientific con anillo de platino - iridio de circunferencia media de 5.987 cm. La concentración micelar crítica se calculará a partir de la gráfica de tensión superficial versus concentración del surfactante en solución acuosa para tres temperaturas (30°C, 40°C y 50°C), para un valor de dureza expresada como mg/L de CaCO₃ y de silicato de sodio. De la misma forma, se hará tal medición en ausencia de dichos iones.

Se determinará el punto de turbidez para el surfactante en solución acuosa, con diferentes valores de dureza expresado como mg/L de CaCO₃ y de silicato de sodio, aumentando la temperatura de 2°C a 4°C por minuto en un tubo de ensayo de acuerdo a la norma ASTM D2024-09, preparando una solución acuosa del surfactante al 1%.

2.3. DESTINTADO

El destintado se realizará a 40°C con 24g de pulpa seca a partir de papel reciclado, el cual se tratará inicialmente a una consistencia de 1.2% en el desintegrador de papel Pulper JSR 205 (Figura 6) a 1915 rpm por 20 minutos después de haber rasgado el papel a mano con dimensión de 2x2 cm de largo y ancho.



Figura 6. Pulper JSR 205.

Luego se adicionará el surfactante a la suspensión para curar la pulpa por 30 minutos, al cabo de los cuales se introducirá en la celda de flotación Denver (Figura 7) por 8 minutos con consistencia de 0.8% para retirar las partículas flotadas, mientras que la fibra destintada se retira por la parte inferior de la celda. El flujo de aire en la celda de flotación es de 1 L/min a presión atmosférica y temperatura ambiente, con una velocidad de rotación de 1150 rpm.



Figura 7. Celda de flotación Denver.

Las fibras obtenidas se lavan con agua y pasan al formador de hojas JSR 206A tipo manual (Figura 8), dicha formación se realizará según las normas TAPPI T205 sp-02 y T272 sp-02.



Figura 8. Formador de hojas manual.

Después de hechas las hojas se determinarán sus propiedades ópticas de acuerdo a la norma Tappi T452 om-02, empleando un medidor de blancura Datacolor CheckPro (Figura 9) y el software simpaticLab medidor de puntos no eliminados.



Figura 9. Datacolor CheckPro.

PÉRDIDAS EN LA FLOTACIÓN

Para la etapa de flotación del destintado, se determinan las pérdidas mediante la cuantificación de la pulpa perdida en base seca que se retira de la celda de flotación junto con la espuma, como el porcentaje del cociente entre la cantidad secada en el horno a 105°C de la espuma colectada durante la flotación y la cantidad de pulpa seca alimentada a la celda de flotación (incluye relleno y tinta) (Bobu et al., 2008).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. MATERIA PRIMA.

Los lotes de papel reciclado que se emplearon en la selección de la pulpa se registran en la Tabla 2, donde se indican los gramos de papel que se segmentaron en partes de 2x2cm² para su posterior uso en el proceso de destintado.

Tabla 2. Masa empleada de cada tipo de papel reciclado

Papel	Cantidad [g]
Fotocopia	746
Periódico	302
Impresión chorro de tinta	560
Impresión láser	517
Revista	392

3.1.1. Humedad.

En la Tabla 3 se exponen los resultados de la determinación de la humedad del papel reciclado, los valores obtenidos al compararse con los datos de Alzate H. (2011) para cada tipo de papel, muestran que para los desperdicios de oficina (MOW) son ligeramente menores en su caso, y de igual manera se observa para el periódico (ONP) y el papel revista (OMG), además el ONP es el papel que muestra un mayor contenido de humedad, mientras que el revista muestra el menor, para ambos trabajos.

Tabla 3. Humedad papel reciclado

Papel	Humedad [%]
Fotocopia	7,79
Periódico	9,92
Impresión chorro de tinta	6,45
Impresión láser	5,69
Revista	5,23

3.1.2. Selección de pulpa.

La mezcla de papel reciclado con el que se ha de trabajar se selecciona de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 2.1.2 y 2.3 de materiales y métodos, llevándose a cabo la experimentación que arroja los resultados de la Tabla 4, se muestra la medición de los puntos no eliminados, que en el argot papelerero se define como “*dirt specks*” o “*dirt count*” de las diferentes hojas formadas después del destintado de las mezclas empleadas. La comparación se realizó entre hoja de pulpa del blanco sin surfactante y hoja de pulpa destintada con el surfactante, con el objetivo de poder evaluar el porcentaje de remoción de las partículas de tinta y así poder definir cuál sería la mezcla de papel reciclado adecuada para los ensayos de destintado.

La mezcla de papel que arrojó el mejor resultado fue para la fotocopia – impresión láser, con una razón de 30:70, mostrando para el porcentaje de remoción, tanto del área sucia como de los puntos no eliminados, valores mayores que 60%, lo cual sobrepasa al de fotocopia – revista en lo que respecta al área sucia. Además la mezcla fotocopia – impresión láser, es la única que tiene como característica, porcentajes de remoción altos para los dos parámetros evaluados; en las mezclas restantes se encuentra que tienen un porcentaje de remoción respecto al área sucia menor al 40%, lo que muestra una ventaja amplia de la mezcla seleccionada al compararse con las demás.

Tabla 4. Selección de papel según “*dirt specks*”

Mezcla de papel	Prueba	Área sucia [mm²/m²]	Remoción [%]	Puntos [No.]	Remoción [%]
F: 70% P: 30%	Blanco	15896	--	294967	4,7
	Surfactante	17547		281051	
F: 100%	Blanco	22365	21,6	292826	45,9
	Surfactante	17524		158307	
F: 70% Ch: 30%	Blanco	17085	28,7	217062	43,7
	Surfactante	12187		122150	
F: 30% Ch: 70%	Blanco	8230	36,3	126431	55,9
	Surfactante	5245		55701	
F: 70% L: 30%	Blanco	21488	27,3	231867	42,2
	Surfactante	15618		133916	
F: 30% L: 70%	Blanco	15752	60,6	184061	64,7
	Surfactante	6210		65057	
F: 70% R: 30%	Blanco	22532	26,7%	595165	65,7
	Surfactante	16508		203944	

Notación de la mezcla de papel: F: Fotocopia, P: Periódico, Ch: Impresión chorro de tinta, L: Impresión láser, R: Revista.

3.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.

3.2.1. Tensión superficial.

La tensión superficial experimental leída en el tensiómetro semiautomático, Tensiomat® 21 de Fisher Scientific, se ha corregido con el valor del agua teórica a cada temperatura de trabajo: Figura 10 para 30°C, Figura 11 para 40°C y Figura 12 para 50°C.

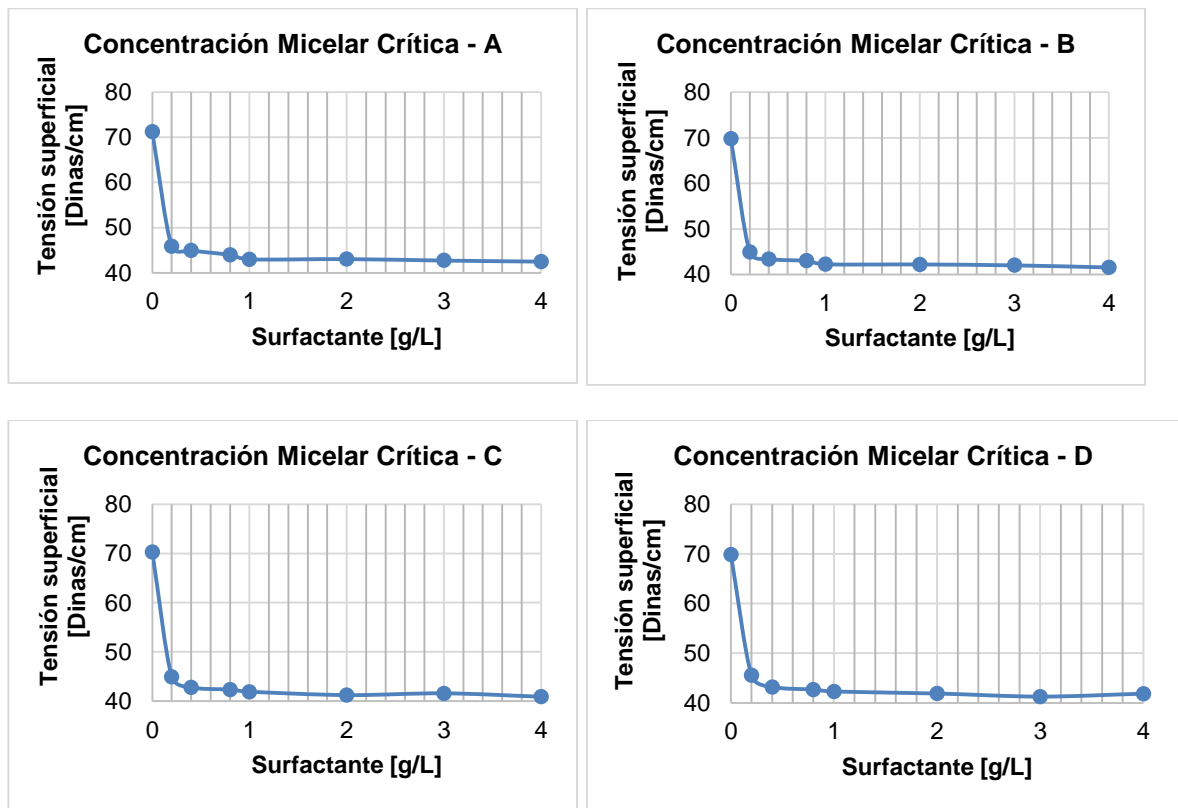


Figura 10. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. A: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (30°C). B: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (30°C). C: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (30°C). D: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (30°C).

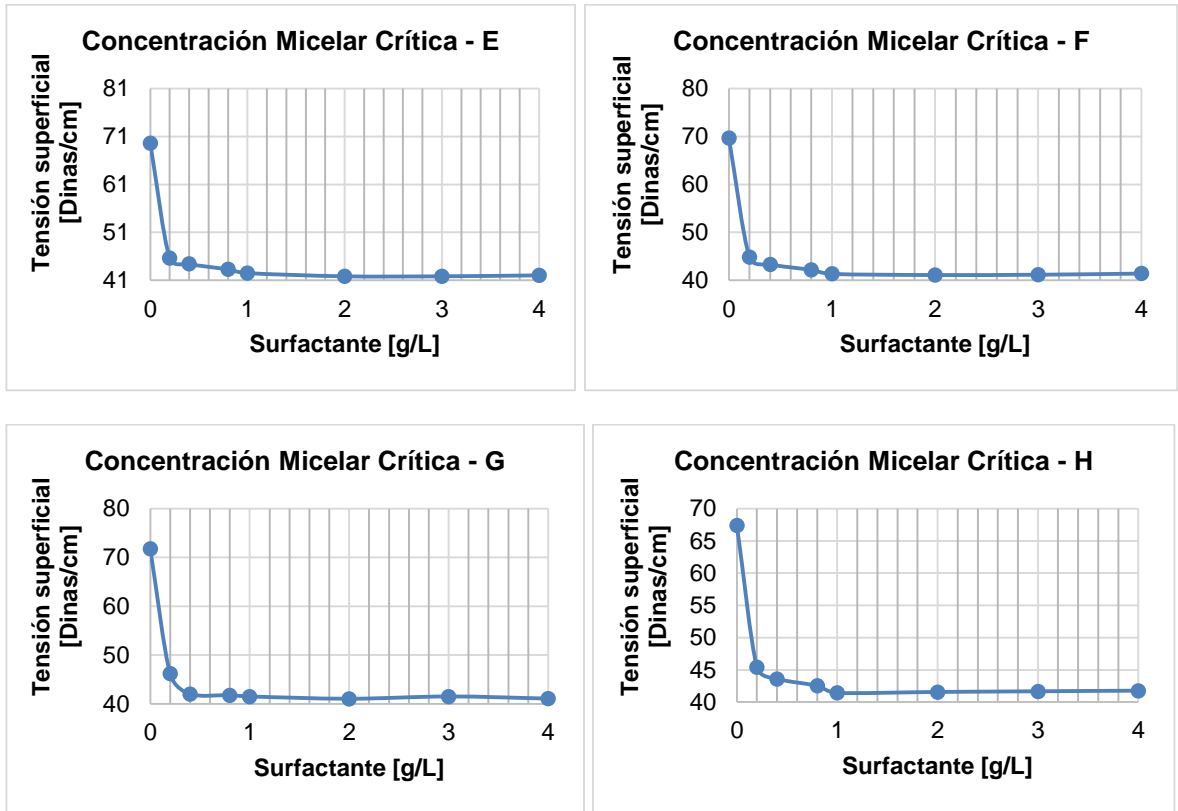


Figura 11. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. E: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (40°C). F: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (40°C). G: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (40°C). H: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (40°C).

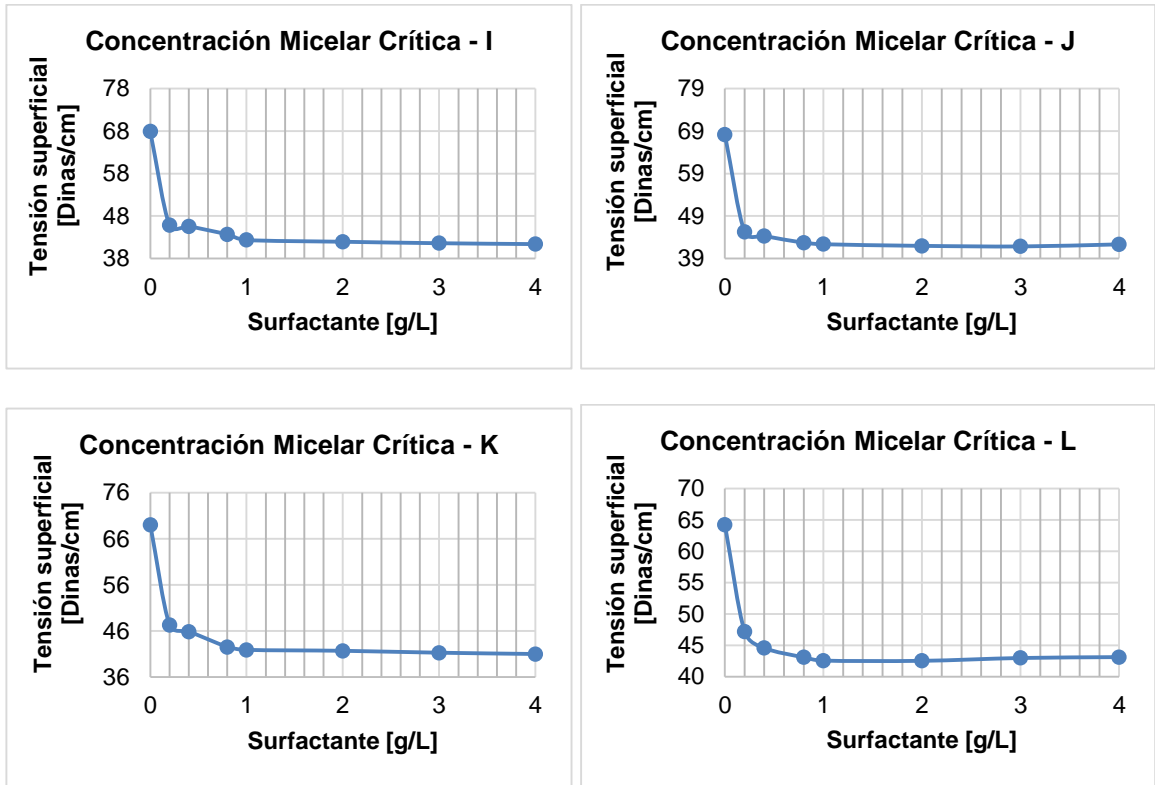


Figura 12. Tensión superficial vs. Concentración de surfactante. I: Silicato [0%], Dureza [0ppm], Temperatura (50°C). J: Silicato [0%], Dureza [150ppm], Temperatura (50°C). K: Silicato [0,5%], Dureza [0ppm], Temperatura (50°C). L: Silicato [0,5%], Dureza [150ppm], Temperatura (50°C).

Se realizó el análisis de varianza multifactorial, ANOVA, con el software Statgraphics, definiendo como variable dependiente la *Tensión superficial corregida* [Dinas/cm], con los siguientes factores: Dureza [ppm], Silicato [%], Surfactante [g/L] y Temperatura [°C]. Se llevaron a cabo 288 casos completos de medición de la tensión superficial, de acuerdo al diseño de experimentos. El StatAdvisor de Statgraphics ejecuta un análisis de varianza y realiza varias pruebas y gráficas para determinar cuáles factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la tensión superficial corregida y evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, cuando el valor residual P es menor que 0.05.

En la Tabla 5 se muestra la fuerte interacción entre los diferentes factores, de manera que los valores-P de la última columna registran que su interacción es estadísticamente significativa al no tener ninguno superior a 0.05, pero si muestra una reducción parcial de la interacción entre la dureza y la temperatura al tener un valor-P de 0.0023.

Tabla 5. Análisis de Varianza para Tensión superficial corregida - Suma de Cuadrados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F*	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dureza	6,39031	1	6,39031	45,74	0,0000
B:Silicato	5,6392	1	5,6392	40,36	0,0000
C:Surfactante	22113,8	7	3159,11	22610,53	0,0000
D:Temperatura	9,4209	2	4,71045	33,71	0,0000
INTERACCIONES					
AB	7,9667	1	7,9667	57,02	0,0000
AC	28,8166	7	4,11666	29,46	0,0000
AD	1,75146	2	0,875729	6,27	0,0023
BC	12,9833	7	1,85476	13,27	0,0000
BD	8,92882	2	4,46441	31,95	0,0000
CD	87,2424	14	6,2316	44,60	0,0000
ABC	33,1091	7	4,72988	33,85	0,0000
ABD	4,43465	2	2,21733	15,87	0,0000
ACD	16,3508	14	1,16791	8,36	0,0000
BCD	10,8312	14	0,773656	5,54	0,0000
RESIDUOS	28,782	206	0,139719		
TOTAL (CORREGIDO)	22376,4	287			

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

No obstante, los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Tensión superficial corregida con un 95,0% de nivel de confianza.

De la Figura 13 a la Figura 22 muestran un intervalo alrededor de cada media, los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher y están contruidos de tal manera que, cualquier par de intervalos que no se traslapen verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa.

Levine (2004), expone que el valor de la tensión superficial de un líquido disminuye de forma continua cuando la temperatura va aumentando hasta llegar a la temperatura crítica del líquido, debido a que la fase líquida se parece más a la fase vapor, y por tanto, la interfase que divide al líquido del gas va desapareciendo hasta que se presenta una sola fase, la gaseosa. Sin embargo, de acuerdo a la Figura 13 donde están presentes todas las interacciones evaluadas en el análisis ANOVA para el conjunto de todas las pruebas (Figura 10 a Figura 12); la tensión superficial a los 50°C se afecta por la presencia de la carga iónica, de manera que la tensión superficial se incrementa respecto a la presentada a 40°C, y debido a que los intervalos se traslapan para 30°C y 50°C, se considera que la tensión superficial no se ve afectada por el incremento de la temperatura en presencia de carga iónica.

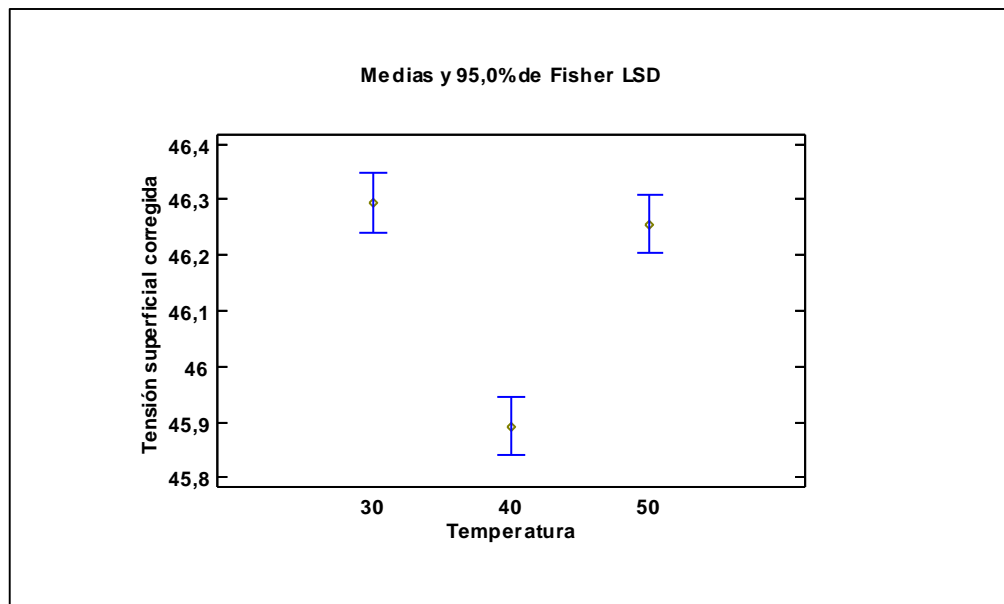


Figura 13. Efecto de la temperatura sobre la tensión superficial.

La concentración micelar crítica que se define por la Figura 14 está comprendida en el rango de 0.8 g/L y 1.0 g/L de surfactante para las tres niveles de temperatura. Lo que implica que no hay variaciones considerables de la CMC del surfactante empleado en medio acuoso con presencia de carga iónica.

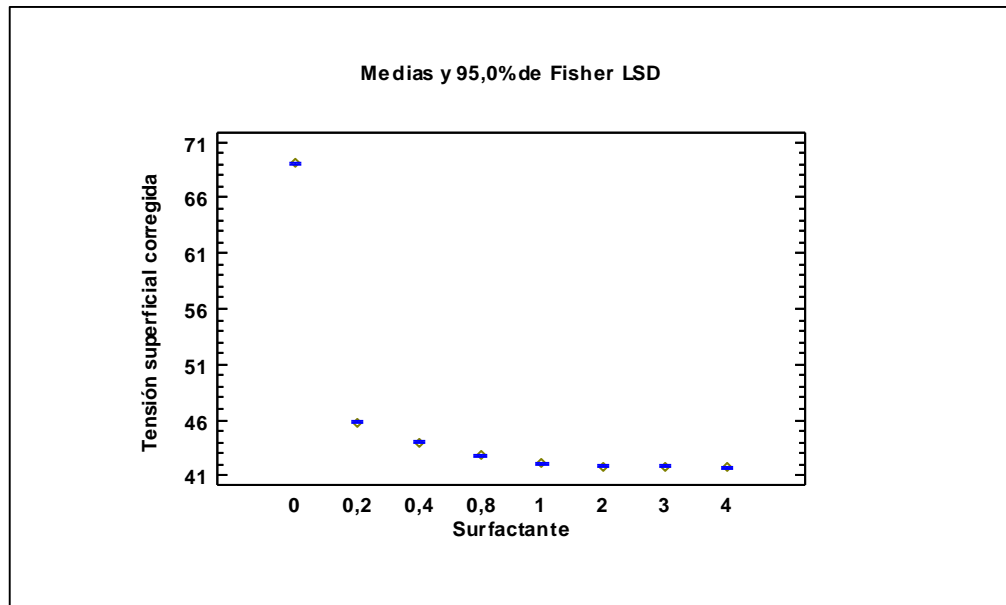


Figura 14. Efecto de la dosis de surfactante sobre la tensión superficial.

La tensión superficial de la solución del surfactante no iónico, de acuerdo a la Figura 15 se reduce cuando hay presencia de silicato de sodio (SESA, 2014), debido a que probablemente disminuye las atracciones intermoleculares en la superficie de la solución, de manera que aumenta la afectación del surfactante sobre tales fuerzas. Este mismo comportamiento se observa en la Figura 16, respecto al efecto independiente de la dureza en la solución acuosa del surfactante. Se destaca que los valores superiores se encuentran alrededor de 46,3 dinas/cm para la tensión superficial, mientras que los menores se presentan cercanos a 46 dinas/cm; esta diferencia que es estadísticamente significativa no es muy grande numéricamente.

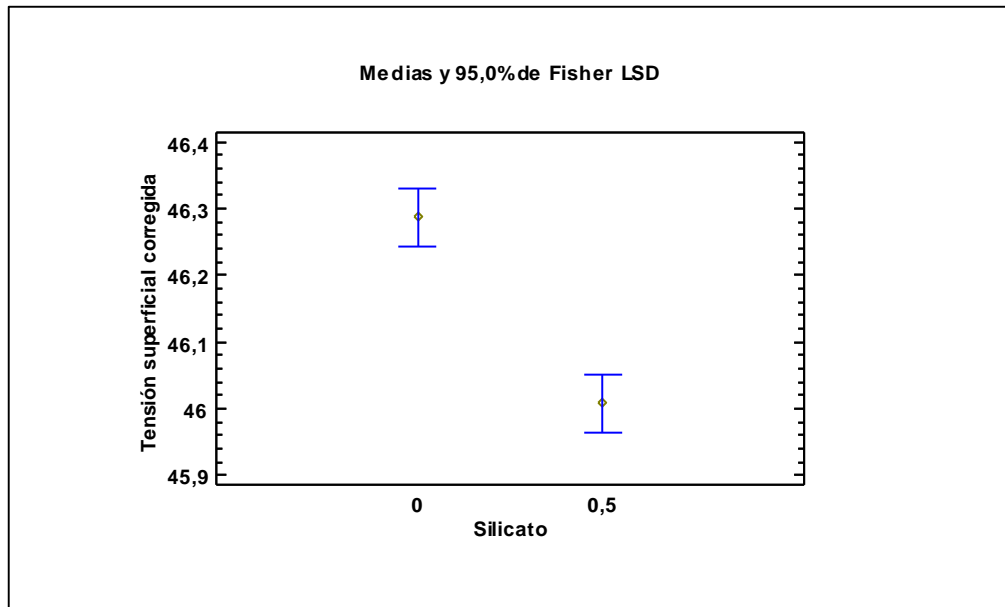


Figura 15. Efecto del silicato de sodio sobre la tensión superficial.

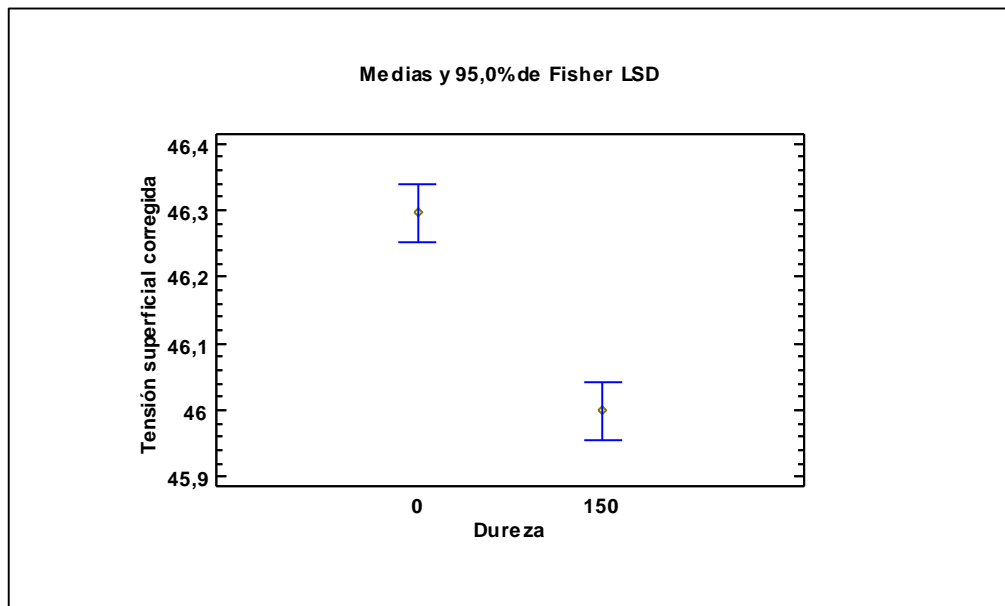


Figura 16. Efecto de la dureza sobre la tensión superficial.

No obstante, se destaca en la Figura 17 que la interacción entre el silicato y la dureza inhibe el efecto de aquel cuando ambos iones se encuentran presentes en la solución, debido a la reacción que ocurre entre el cloruro de calcio y el silicato de sodio (SISO,

2014). Mientras que la reducción de la tensión superficial respecto a la concentración de dureza en la solución, es probable que el reactivo límite sea el silicato de sodio.

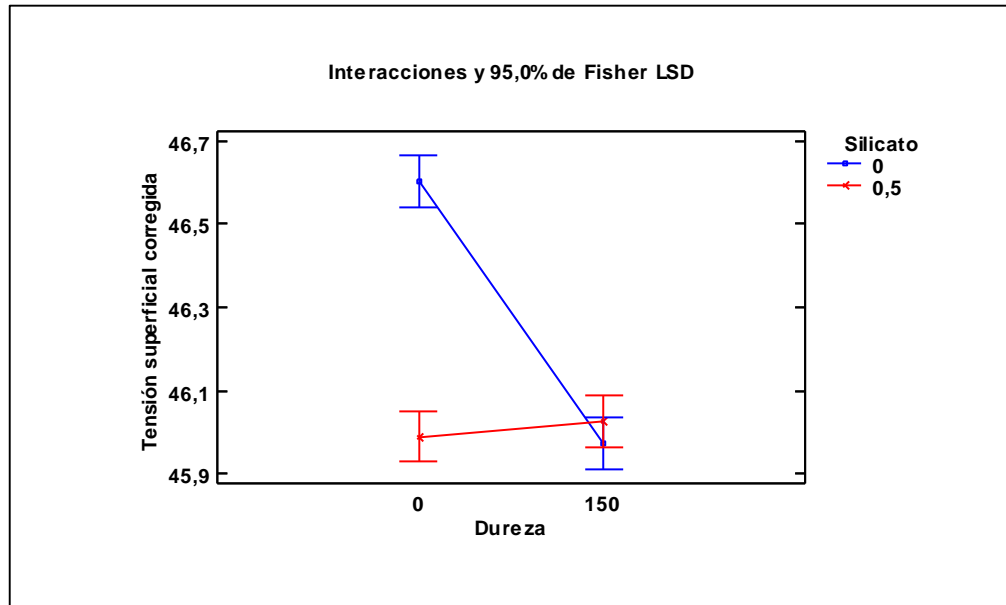


Figura 17. Efecto de la interacción del silicato de sodio y la dureza sobre la tensión superficial.

La Figura 18 es útil para interpretar la interacción entre Dureza y Surfactante. Las dos líneas trazadas en la gráfica representan cada uno de los 2 niveles de Dureza y conectan las medias de mínimos cuadrados para los 8 niveles de Surfactante. Si no existiera ninguna interacción, estas líneas serían paralelas. Entre más fuerte sea la interacción, más diferente será la forma de las líneas. Cualesquiera dos intervalos que no se traslapen corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa.

En este caso, se lee una CMC para 1 g/L de surfactante, tanto para ausencia de dureza como en presencia de ésta (Figura 18). Esto significa que no hay incidencia de la carga iónica generada por la presencia de la dureza de la solución sobre la CMC del surfactante, a pesar de la disminución de la tensión superficial de la solución antes de alcanzar la CMC, esta variación se asume despreciable por el entrecruzamiento de las líneas a lo largo de su trayectoria. Alzate y su equipo de trabajo (2011), exponen una CMC de 0.1% (1 g/L) para surfactantes no iónicos ácidos grasos etoxilados (AcGE) con HLB de 10 a 14, cual resultado muestra similitud con la CMC que se determinó a partir de la Figura 18.

A pesar de que Salager (1993) describe la disminución de la CMC para surfactantes no iónicos por la presencia de electrolitos en solución acuosa, debido a que la solubilidad del grupo hidrofílico se reduce por desolvatación, indicando también, un aumento de las interacciones entre el grupo lipofílico y la solución acuosa; para los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 18), la variación se presenta a partir de la CMC para los valores por debajo de esta, y no como una constante a lo largo de la trayectoria de las pruebas.

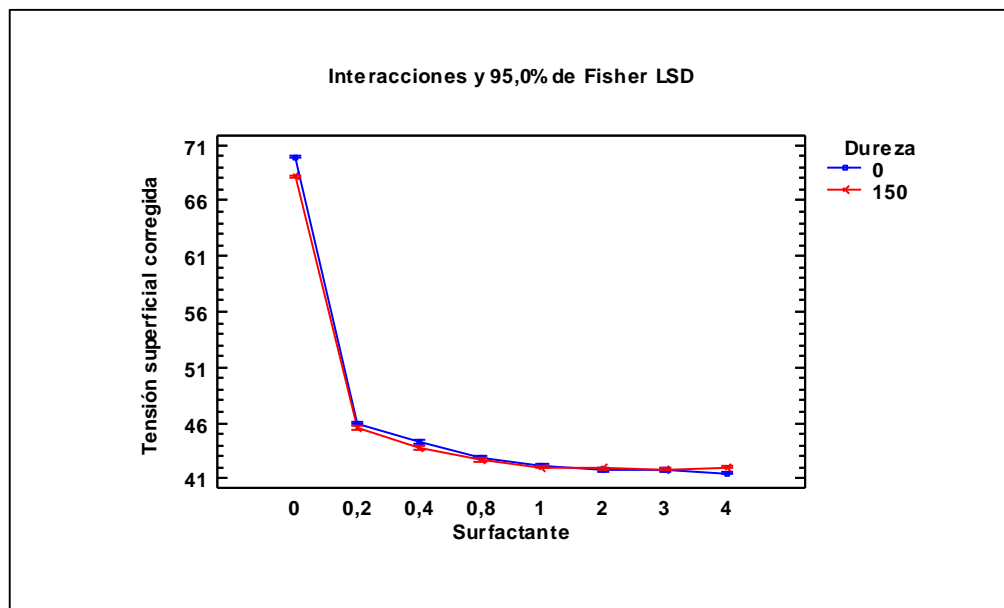


Figura 18. Efecto de la interacción de la dureza con la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

En la Figura 19 se muestra el efecto que tiene la interacción entre la dureza y la temperatura sobre la tensión superficial, dicha interacción es sólo valorable cuando hay una concentración de 150 ppm de dureza cálcica, porque en ausencia de ésta la tensión superficial disminuye con el aumento de la temperatura; pero cuando se existe presencia de la dureza en la solución acuosa, la tensión superficial no tiene diferencia estadística para los valores de 30°C y 50°C, mientras que para 40°C muestra un decaimiento propio del incremento de la temperatura.

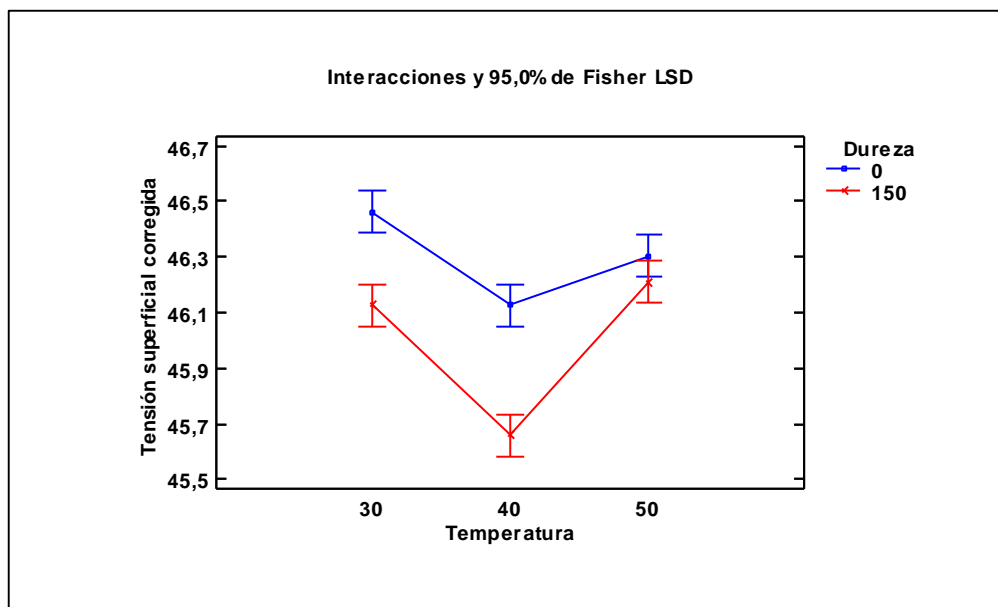


Figura 19. Efecto de la interacción entre la dureza y la temperatura sobre la tensión superficial.

En la interacción del silicato de sodio con el surfactante, al igual que para la dureza, no se registra ningún efecto considerable de acuerdo a la Figura 20, de manera que se obtiene el mismo valor para la CMC (de 1 g/L de surfactante).

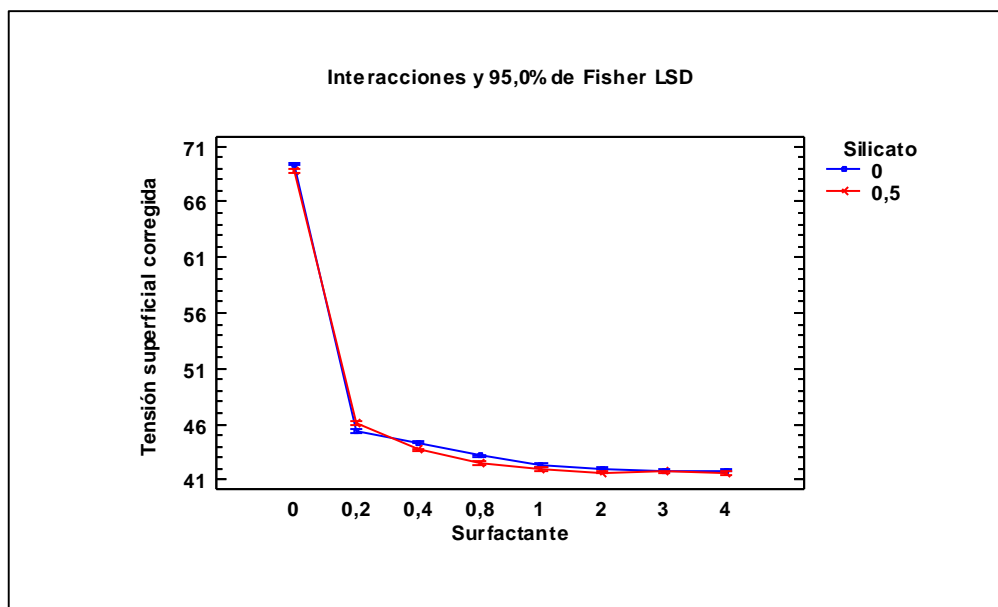


Figura 20. Efecto de la interacción del silicato de sodio y la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

Según la Figura 21, cuando la concentración del silicato de sodio en la solución acuosa es 0%, la tensión superficial disminuye con el incremento de la temperatura; pero a 50°C y una concentración de 0.5% de silicato de sodio, ocurre que los iones de sodio y de silicato de hidrógeno presentes de la disolución acuosa (Ferguson, 1992), intensifican las atracciones intermoleculares de la superficie líquida y por tanto se incrementa el trabajo necesario para incrementar el área interfacial, es decir, aumenta la tensión superficial en relación con el efecto presentado por estos iones a menores valores de temperatura. Sin embargo, nótese que la interacción de los iones presentes queda inhibida con el incremento de la temperatura y su presencia afecta bajos valores de temperatura (menores que 40°C), los cuales no son los más frecuentes en el destintado por flotación (Turrado et al., 2008; García y Torres, 1991).

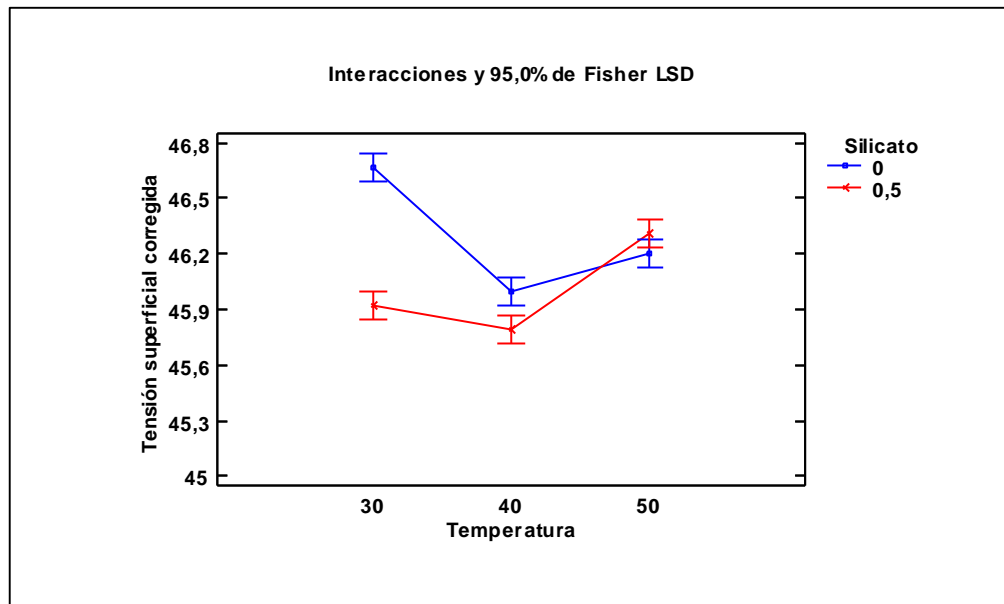


Figura 21. Efecto de la interacción entre el silicato de sodio y la temperatura sobre la tensión superficial.

Para determinar la concentración micelar crítica del surfactante a diferentes temperaturas se emplea la Figura 22, donde se tiene que la variación de la temperatura no genera cambios en la CMC y por tanto, el incremento abrupto de la tensión superficial a 50°C en la concentración de 0.4 g/L de surfactante, es un hecho aislado y no manifiesta la tendencia del comportamiento a lo largo de los demás niveles evaluados de surfactante.

Por otra parte, se aprecia que en agua pura, es decir, a 0 g/L de surfactante, la tensión superficial decrece con el incremento de la temperatura, lo cual corrobora lo expuesto por Levine (2004).

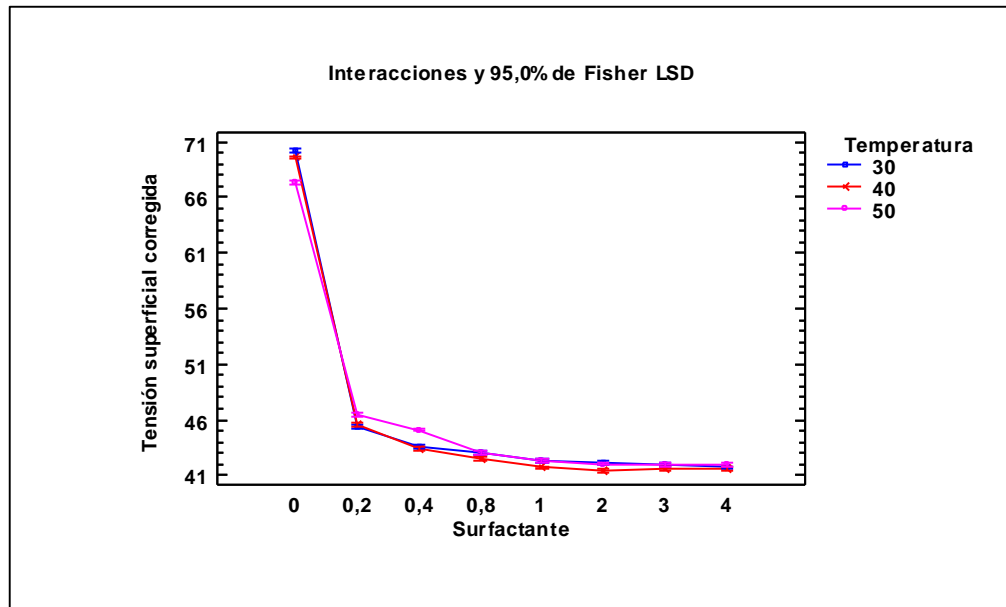


Figura 22. Efecto de la interacción entre la temperatura y la dosis del surfactante sobre la tensión superficial.

3.2.2. Punto de turbidez.

La determinación del punto de turbidez se muestra en la Tabla 6, y se realizó según el procedimiento descrito en el numeral 2.2 de materiales y métodos, con una concentración de surfactante al 1%, para 3 niveles de silicato de sodio y 2 niveles de dureza cálcica.

La descripción del fenómeno físicoquímico del punto de turbidez ha sido expresada por varios autores (Holmberg et al., 2003; Mishra et al., 2011; Wang et al., 2008), además de éstos, se destaca su empleo para establecer las condiciones de operación del proceso de destintado de papel reciclado, ya que si no se lleva a cabo a temperaturas inferiores al punto de turbidez, alrededor de 5°C inferior (Alzate H., 2011) el surfactante puede perder actividad superficial. Aunque García y Torres (1991) recomiendan trabajar el destintado a temperaturas comprendidas en el intervalo de 38°C a 71°C, inclusive hasta valores alrededor de 100°C para incrementar la velocidad del desfibrado y el desprendimiento de la tinta por el efecto del calor; se debe evaluar el surfactante no iónico que se ha de emplear en cada caso particular para caracterizar su modo de empleo.

Tabla 6. Punto de turbidez.

Ensayo	Silicato de sodio	Dureza	T_{turbidez 1}	T_{turbidez 2}	T_{turbidez}
	[%]	[ppm]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0,0	0,0	77,3	77,9	77,6
2	0,5	0,0	76,5	76,8	76,7
3	1,0	0,0	77,1	76,8	77,0
4	0,0	150,0	76,9	77,2	77,1
5	0,5	150,0	77,2	76,4	76,8
6	1,0	150,0	76,8	77,1	77,0

Se realizaron las pruebas descritas en la Tabla 6 para determinar la temperatura de turbidez, las cuales tienen una precisión de 1°C según la norma empleada, esta reproducibilidad muestra que no existe variación significativa en los resultados de la prueba, y por tanto las interacciones generadas por el efecto del silicato de sodio y la dureza cálcica no afectan la separación de fases que se presenta en la prueba, de manera que la menor temperatura de turbidez que se observó fue a 76.7 °C para Silicato de sodio al 0,5% y 0 ppm de dureza; mientras que la mayor temperatura de turbidez se alcanzó a 77.6 °C en ausencia de iones de silicato y dureza. Sin embargo, Singh (2011) muestra que la temperatura de turbidez disminuye a altas concentraciones de la carga iónica (30% a 60%), y presenta mayor pendiente a concentraciones altas de surfactante. No obstante, los resultados expuestos en la Tabla 6 están de acuerdo con lo presentado por Alzate (2011), donde alcanza la temperatura de turbidez para AcGE de HLB 12 y 14, a 66°C y 87°C respectivamente, con una concentración al 1% de surfactante, debido a que esta temperatura varía proporcionalmente con la longitud de la cola etoxilada del surfactante (Holmberg et al., 2003).

3.3. DESTINTADO.

En la Tabla 7, se muestran los resultados para las pruebas realizadas a la pulpa seleccionada a destintar (Fotocopia – Impresión láser, 30:70), se destaca la realización de dos tipos de blanco diferentes, el primero sin surfactante que pasa del pulper al formador de hojas, y el segundo con la dosis específica de surfactante que pasa por la celda de flotación. En cada prueba se controla el valor del pH para que el destintado sea cercano a neutro, mediante la adición de ácido clorhídrico al 0.1%.

Tabla 7. Ensayos destintado.

N°	Surfactante	Silicato	Dureza	Puntos no eliminados	Blancura ISO
	[%]	[%]	[ppm]	[No]	[%]
1	0	0	0	162570	80,92
2	0	0	0	134306	81,12
3	0	0	0	118711	81,72
4	0,125	0	0	70467	85,08
5	0,125	0	0	67640	84,23
6	0,125	0	0	59940	85,23
7	0,125	0	150	61890	86,64
8	0,125	0	150	73001	85,41
9	0,125	0	150	68517	86,66
10	0,125	1	150	62182	82,24
11	0,125	1	150	66276	81,12
12	0,125	1	150	69102	76,78
13	0,125	1	0	69687	83,74
14	0,125	1	0	75632	82,93
15	0,125	1	0	73488	83,12
16	0,125	1	0	67153	84,12

Para describir el comportamiento de las pruebas realizadas respecto a los resultados del parámetro óptico de la Blancura ISO, se calcularon los valores promedios de cada condición operacional de la Tabla 7 y se eliminó el N° 12 de la misma referencia por considerarse desfasado. En la Figura 23 se tiene la descripción gráfica del comportamiento del experimento, en el que se observa un nivel máximo de blancura ISO para la prueba 3 cuando no hay silicato de sodio presente y existe una concentración de 150 ppm de dureza cálcica en el solución, mientras que para la prueba 4 se observa la menor blancura ISO que es cuando hay presencia de las dos cargas iónicas analizadas, por lo cual se manifiesta una reducción cercana al 5% para este caso y del 3% para el último (prueba 5) en el que sólo existe el efecto del silicato de sodio en el destintado.

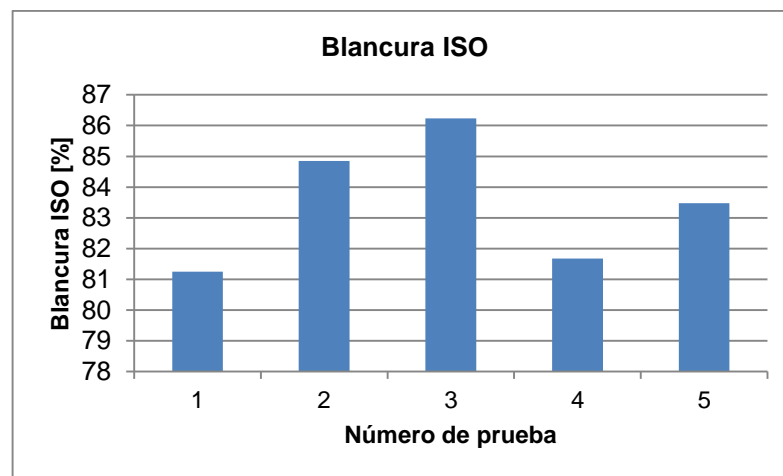


Figura 23. Blancura ISO de pulpa destintada: Prueba 1: Surfactante [0%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 2: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 3: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 4: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [1%] y prueba 5: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [1%].

Para comparar los resultados del proceso de destintado en los diferentes niveles de carga iónica que se empleó se realizó un análisis de varianza, ANOVA multifactorial, con el apoyo del software Statgraphics, evaluando los siguientes criterios (Alzate, 2011; Chalá, 2013): puntos no eliminados (Tabla 8) y blancura ISO (Tabla 9), con tres factores a saber: dureza [ppm], Silicato de sodio [%] y surfactante [%]. Estas pruebas se realizaron en 16 casos completos.

La Tabla 8 descompone la variabilidad de Puntos no eliminados en contribuciones debidas a los factores principales, teniendo en cuenta los valores-P que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores, de manera que si un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Puntos no eliminados con un 95,0% de nivel de confianza, lo cual muestra que para los factores dureza y silicato de sodio, no existe efecto significativo para la variación de los puntos no eliminados, y la calidad de este criterio se basa únicamente por el efecto del surfactante, esto se manifiesta en la Figura 24 donde la reducción de los puntos no eliminados es de aproximadamente 56%.

Tabla 8. Análisis de Varianza para Puntos no eliminados - Suma de Cuadrados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F*	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dureza	1,51677E7	1	1,51677E7	0,15	0,7063
B:Silicato	1,29855E7	1	1,29855E7	0,13	0,7272
C:Surfactante	8,61058E9	1	8,61058E9	84,56	0,0000
RESIDUOS	1,22192E9	12	1,01827E8		
TOTAL (CORREGIDO)	1,33514E10	15			

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

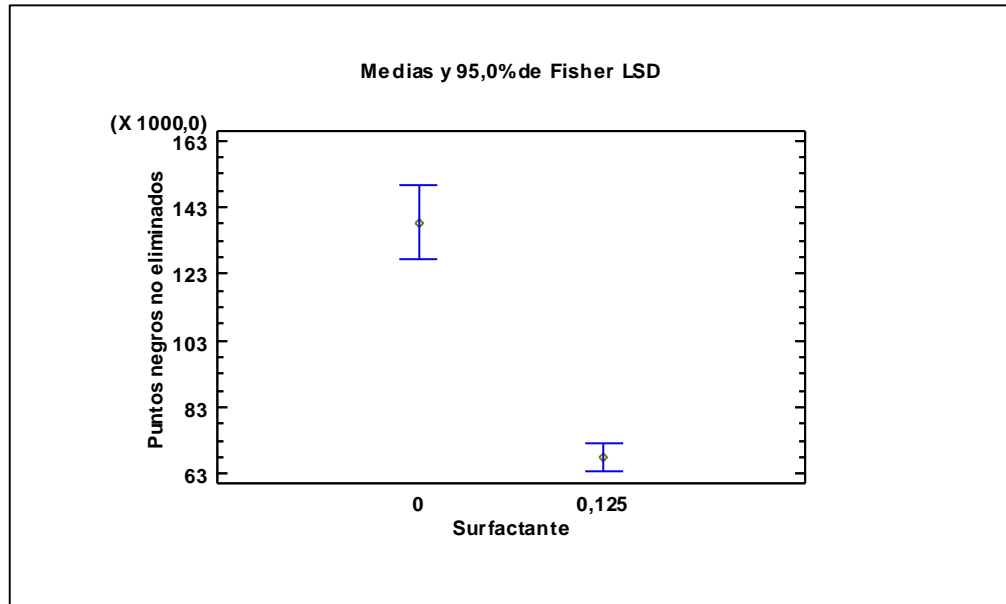


Figura 24. Efecto del surfactante sobre los puntos no eliminados.

El ANOVA multifactorial para la blancura ISO muestra en la Tabla 9, que el valor-P para la dureza es mayor que 0.05, lo cual prueba que no hay significancia estadística para este factor. Puesto que para silicato de sodio (Figura 25) y surfactante (Figura 26), los valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Blancura ISO con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 9. Análisis de Varianza para Blancura ISO - Suma de Cuadrados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F*	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dureza	4,484	1	4,484	1,41	0,2576
B:Silicato	42,0954	1	42,0954	13,26	0,0034
C:Surfactante	41,1985	1	41,1985	12,98	0,0036
RESIDUOS	38,0891	12	3,17409		
TOTAL (CORREGIDO)	96,8012	15			

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La Figura 25 muestra la media de Blancura ISO para cada uno de los niveles de Silicato. También muestra un intervalo alrededor de cada media, donde los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, por tanto, el par de intervalos que no se traslapen verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa, y para este caso existe tal diferencia en los dos niveles de silicato de sodio.

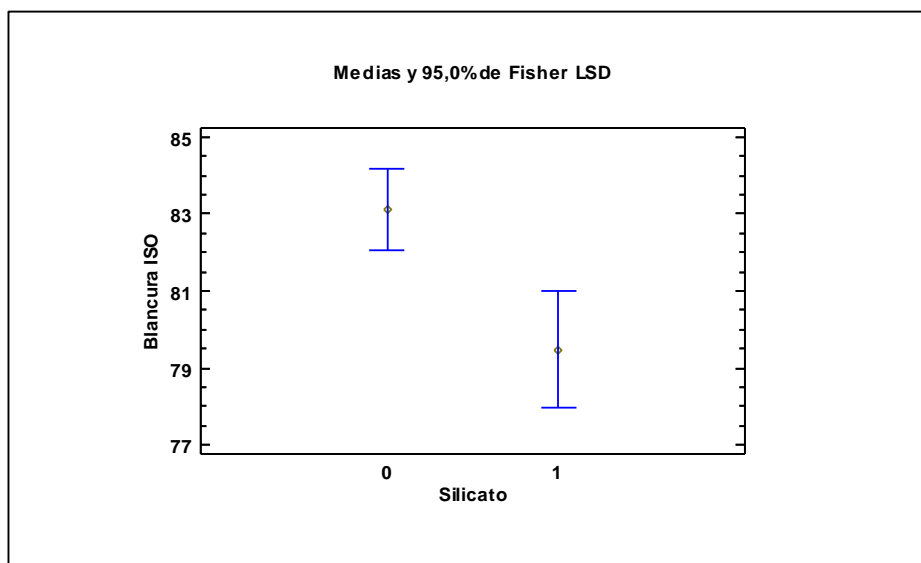


Figura 25. Efecto del silicato de sodio sobre la blancura ISO.

Los trabajos de Ferguson (1992) y Pauck y Marsh (2002) exponen un efecto dispersante para el silicato de sodio con efecto estabilizante al peróxido de hidrógeno, y Ferguson (1992) indica un incremento de la blancura ISO con el incremento de la dosis de silicato de sodio, pero a diferencia del presente trabajo, aquellos lo realizaron en presencia de NaOH y peróxido de hidrógeno, este último es empleado en el proceso de blanqueo debido a que produce el ion perhidroxilo, el cual es el agente activo de este proceso (Ferguson, 1992; Pauck, 2004). Es relevante que en el presente trabajo el proceso de destintado se realizó cercano a neutro, en ausencia de la interacción entre silicato de sodio con el NaOH y el peróxido de hidrógeno, de manera que se genera un decremento en el valor reportado para la blancura ISO, reduciéndose el efecto dispersante del silicato.

La Figura 26 muestra la media de Blancura ISO para cada uno de los niveles de Surfactante, a su vez como lo hemos visto antes, muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, y están contruidos de tal manera que, el par de intervalos que no se traslapan verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa, lo que se traduce en nuestro caso para el efecto del surfactante no iónico sobre el incremento de la blancura ISO, debido a la eficiencia de su acción detergente como lo exponen Alzate y su grupo de colaboradores (2011).

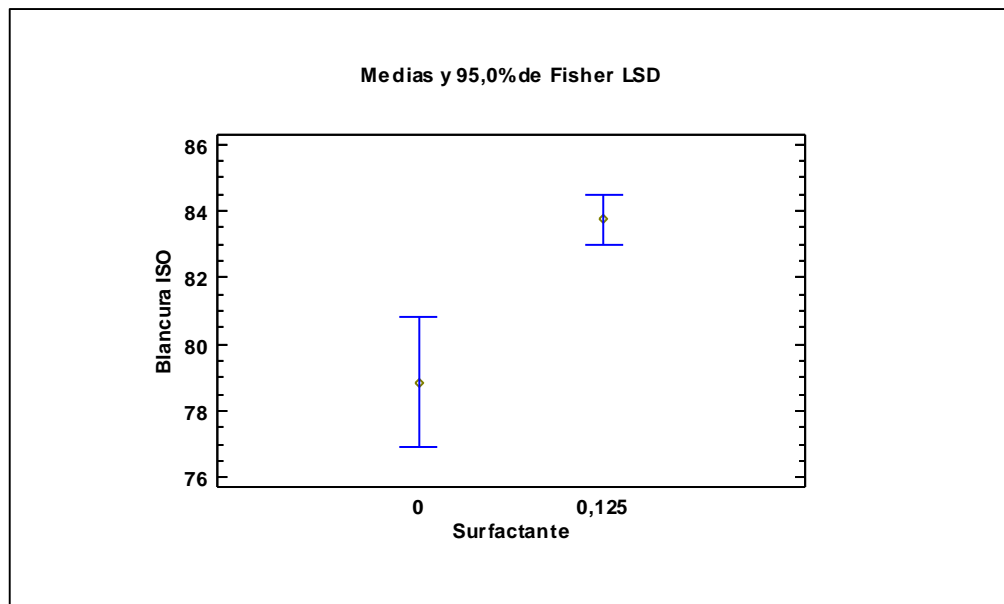


Figura 26. Efecto del surfactante sobre la blancura ISO.

COLORIMETRÍA: Espacio del color CIELAB

De acuerdo a la Tabla 10, se encuentra que la luminosidad es alta al estar cercana al límite superior del eje L^* , es decir cercano a 100. El eje a^* indica que la coloración del papel es tendiente al rojo, mientras que para b^* es azul. Claro está, que el valor para los ejes a^* y b^* es cercano al cero, mostrando una coloración muy leve que representa la neutralidad del blanco. Es importante destacar que todos los valores del eje a^* se encuentran en un mismo sector de coordenadas, lo cual sucede también para el b^* .

Se destaca que para las pruebas 8 a 13, que es donde hay presencia de silicato de sodio, tiende a disminuir la coloración azul del eje b^* , mientras que para el eje a^* se conserva en un promedio aritmético. De otro modo, la presencia de surfactante (pruebas 3 a 13) incrementa la luminosidad del papel, y también incrementa suavemente la coloración roja al pasar de valores de 1,2 a valores de 1,4 a 1,6.

Tabla 10. Espacio del color CIELAB.

Prueba	L^*	a^*	b^*
1	90,11	1,2	-3,53
2	90,55	1,27	-3,38
3	92,04	1,48	-3,31
4	91,59	1,43	-3,46
5	92,16	1,44	-3,19
6	92,6	1,56	-3,49
7	91,99	1,57	-3,64
8	91,52	1,57	-2,04
9	91,18	1,6	-1,77
10	91,96	1,48	-2,41
11	91,7	1,43	-2,26
12	91,48	1,49	-2,8
13	92,04	1,33	-2,57

3.3.1. Pérdidas

En la Tabla 11 y en la Tabla 12, se tienen tabulados los resultados para los criterios de eficiencia del proceso de destintado, los cuales hacen referencia a las pruebas que emplearon surfactante y no a los blancos. Para la selección de la pulpa a destintar, en la Tabla 11 se observa que la pulpa seleccionada presentó un valor intermedio para la pérdida respecto a los demás ensayos de la misma Tabla 11, el cual fue de 14,5%.

Tabla 11. Pérdidas en la selección del papel.

Ensayo	Mezcla papel	Papel	Residuo	Pérdidas
		[g]	[g]	[%]
1	F:70% P:30%	24	1,8953	7,9
2	F:100%	24	2,0453	8,52
3	F:70% Ch:30%	24	2,0866	8,69
4	F:30% Ch:70%	24	1,969	8,2
5	F:70% L:30%	24	2,8305	11,79
6	F:30% L:70%	24	3,4789	14,5
7	F:70% R:30%	24	4,5067	18,78

En la Tabla 12 se muestra que para las pruebas de destintado realizadas a la pulpa seleccionada, se tiene un valor mínimo de pérdidas de 13,54% y un máximo de 17,44%. También se tiene que para las menores pérdidas de las pruebas definitivas no hay presencia de carga iónica (sin dureza ni silicato de sodio), mientras que la mayor pérdida se obtuvo en presencia de silicato de sodio al 1% y de dureza a 150 ppm, lo cual implica que los subprocesos (colisión de la partícula y la burbuja de aire, adhesión de la partícula a la burbuja de aire y eliminación del complejo burbuja-partícula de la pasta) que presenta García (2001) referentes al modelo de separación probabilístico del destintado, se destacan cuando existe la presencia de los dos últimos factores, de manera que favorece el arrastre de pulpa en la espuma en la celda de flotación.

Tabla 12. Pérdidas del proceso final.

Silicato	Dureza	Mezcla papel	Papel	Residuo	Pérdidas
[%]	[ppm]		[g]	[g]	[%]
0	0	F:30% L:70%	24	3,518	14,66
0	0	F:30% L:70%	24	3,2498	13,54
0	0	F:30% L:70%	24	3,3615	14,01
0	150	F:30% L:70%	24	3,8513	16,05
0	150	F:30% L:70%	24	4,0013	16,67
0	150	F:30% L:70%	24	4,097	17,07
1	150	F:30% L:70%	24	4,1746	17,39
1	150	F:30% L:70%	24	4,1763	17,4
1	150	F:30% L:70%	24	4,1844	17,44
1	0	F:30% L:70%	24	3,447	14,36
1	0	F:30% L:70%	24	3,7455	15,61
1	0	F:30% L:70%	24	3,524	14,68
1	0	F:30% L:70%	24	3,9459	16,44

Una descripción gráfica de las pérdidas en el proceso final de destintado del papel reciclado se observa en la Figura 27, la cual muestra que la flotación se llevó a cabo con buena estabilidad, es decir todas las pruebas conservaron los mismos niveles de pérdidas, ya que comparado con otros trabajos (Alzate et al., 2011 y Bobu et al., 2008) se encuentra que las pérdidas para el proceso de destintado por flotación de papel reciclado siempre obtiene valores menores al 20%.

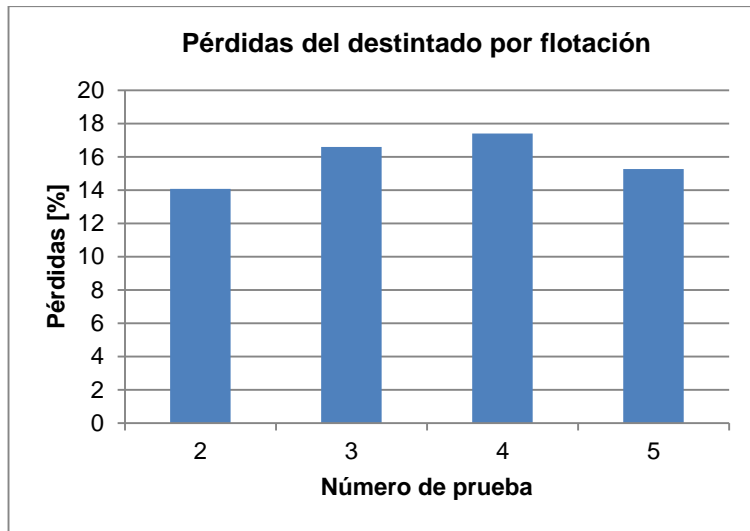


Figura 27. Pérdidas del proceso final: Prueba 2: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 3: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [0%], prueba 4: Surfactante [0.125%], dureza [150ppm] y silicato de sodio [1%] y prueba 5: Surfactante [0.125%], dureza [0ppm] y silicato de sodio [1%].

4. CONCLUSIONES

La tensión superficial del ácido graso etoxilado de HLB 13 se reduce cuando hay presencia de carga iónica proveniente del silicato de sodio y del cloruro de calcio, no obstante, el silicato de sodio tiene un efecto quelante sobre los iones de calcio (Pauck, 2004) y por tanto se debe evitar su presencia simultánea, ya que esto inhibe la acción sobre la tensión superficial.

La concentración micelar crítica (CMC) del surfactante no iónico se da en el rango de: 0,8 g/L y 1,0 g/L de éste en solución acuosa, además esta CMC con la incidencia de los iones presentes en la solución tiende al límite superior, pero se conserva en el intervalo dado, es decir que estadísticamente no se afecta por la presencia de iones.

La presencia de iones de silicato de sodio y de calcio en la solución acuosa del ácido graso etoxilado al 1%, no generó ninguna variación al punto de turbidez, el cual fue de 77,0 °C. De acuerdo a lo sugerido por Alzate H. (2011) el destintado por flotación con AcGE de HLB 13, se debe realizar a una temperatura inferior a los 72°C con el objetivo de que el surfactante no iónico no pierda actividad superficial.

La presencia de silicato de sodio en el proceso de destintado en medio cercano al neutro y con un surfactante no iónico reduce la blancura ISO de la pulpa destintada, y tal vez sea más apropiado efectuar dicho proceso en un medio alcalino con NaOH y peróxido de hidrógeno para obtener pulpas con mayor blancura.

A una dureza cálcica de 150 ppm, el proceso de destintado por flotación con AcGE de HLB 13 no muestra las interacciones que se presentan con esta carga iónica cuando se realiza el destintado con jabones iónicos (García y Torres, 1991).

Como se indicó en el análisis de resultados, la presencia de AcGE de HLB 13 mejora en alrededor 5 puntos la blancura ISO de la pulpa destintada, sin embargo, en casos en que se desee una mayor blancura implicaría un proceso adicional de blanqueo.

La propiedad óptica de los puntos no eliminados que se midió a las hojas de la pulpa destintada con silicato de sodio y dureza cálcica, muestra que no hay variaciones significativas estadísticamente, y por tanto, su presencia no muestra ninguna sinergia relativa al proceso de destintado por flotación.

5. RECOMENDACIONES

Se ha determinado la concentración micelar crítica para un AcGE de HLB 13, el cual es empleado en el destintado por flotación de papel reciclado, lo que permite determinar la concentración de surfactante en solución acuosa en la cual se genera una saturación de este, definiendo los límites máximos de dosificación para el proceso operativo, por tanto la variación de esta concentración afecta el uso de los insumos requeridos para el trabajo, por consiguiente se recomienda evaluar el efecto del pH sobre la concentración micelar crítica de surfactantes no iónicos empleados en el destintado de papel reciclado, ya que la carga adicionada de silicato de sodio incrementa su valor desde 7 unidades de pH hasta alrededor de 9 unidades de pH. En consecuencia con lo anterior, y a pesar de que el valor del pH en el presente trabajo se mantuvo cercano a neutro, se recomienda su evaluación en el proceso de destintado por flotación para determinar la interacción de este parámetro con la calidad óptica de la pulpa destintada, y su incidencia en la variación de la carga iónica, además se puede evaluar la eficiencia del proceso empleando AcGE con diferentes valores de HLB, con otras mezclas de papel reciclado o con etapas adicionales de blanqueo para observar que tanto mejora la blancura ISO.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Rubaiey, Hussain. (2001). Electrostatic toner transfer and efficiency in electrophotography. Tesis de grado para optar por el título de Master. Helsinki University of Technology.

Alzate, A. (2011). Metodos utilizados en el destintado de papel desperdicio-aproximación al estado del arte. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. UPB.

Alzate, Hader. (2011). Mecanismo de acción de los agentes de tensión superficial en el destintado por flotación en medio neutro. Tesis para optar al título de Doctor en ingeniería. UPB.

Alzate, H., Turrado, J., Dovale, A. M., Quintana, G. y Velásquez, J. (2011). Evaluación fisicoquímica de ácidos grasos etoxilados de distintos HLB en el proceso de destintado neutro. En: Ingeniería Química. No. 498.

ANDI. (18 de agosto de 2012). Cámara industria pulpa, papel y cartón. Información general. Tomado de:
<http://www.andi.com.co/pages/comun/infogeneral.aspx?Id=15&Tipo=2>

ANDI. (18 de agosto de 2012). Cámara industria pulpa, papel y cartón. Estadísticas. Tomado de:
http://www.andi.com.co/pages/proyectos_paginas/proyectos_detail.aspx?pro_id=43&Id=15&clase=8&Tipo=2

ANDI. (16 de Agosto de 2012). Cámara industria cosmética y de aseo. Tomado de:
<http://www.andi.com.co/pages/comun/infogeneral.aspx?Id=19&Tipo=2>

ANDIGRAF, Asociación Colombiana de Industrias Gráficas. (1994). Procesos en la Industria Gráfica: Manual de Inducción. Bogotá, DC: Autor.

Aragon, Darlin. (2011). Destintado de papel desperdicio por flotación aplicando ácidos grasos etoxilados. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. UPB.

Banerjee, Soumya. (2011). Development of a novel toner for electrophotography based additive manufacturing process. Tesis doctoral. De Montfort University. England.

Behin, J, y Vahed, Sh. (2006). Effect of alkyl chain in alcohol deinking of recycled fibers by flotation process.

Biermann, Christopher J. (1996). Handbook of pulping and papermaking. Oregon: Elsevier. Segunda edición.

Bobu E., Ciolacu F y Cretu A. (2008). Deinkability of mixed prints: alkaline vs. neutral deinking. En: Progress in paper recycling. Vol. 18 No. 1.

Bracco, G. y Holst, B. (2013). Springer series in surface sciences: Surface science techniques. Berlín: Springer. Vol. 51.

BUSINESS NEWS AMÉRICAS. (18 de Agosto de 2012) Petroquímicos. Mercado Surfactantes. Tomado de: http://www.bnamericas.com/news/petroquimicos/Mercado_mundial_de_surfactantes_debi_era_llegar_a_US*16,650mn_el_2012

Casey, James. (1991). Pulpa y papel: química y tecnología química. México D.F: Editorial Limusa S.A. Tercera edición.

Chalá, Virney. (2013). Destintado de papel fotocopia con pretratamiento enzimático empleando celulasa y amilasa. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. UPB.

DATACOLOR. (15 de mayo de 2014). Colometric fundamentals part II. Recuperado de <http://industrial.datacolor.com/>

EL COLOMBIANO. (6 de agosto de 2012). Especiales. Hay que reciclar más. Recuperado de http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/C/colombianos_almaverde_hay_que_reciclar_mas/colombianos_almaverde_hay_que_reciclar_mas.asp

Ferguson, Loreen. (1992). Deinking chemistry: part 1. En: TAPPI journal. 75-83.

García, J. y Torres, A. (1991). Aspectos fisicoquímicos del destintado del papel. En: Ingeniería Química. Vol. 23. No. 265.

García, J.A. (2001). Fundamentos del destintado por flotación: procesos de destintado. En: Ingeniería Química. Vol. 33. No 379. 265-272.

Gómez, Beatriz y Mejía, César. (2007). Laboratorio de ingeniería ambiental: Manual. Medellín. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

González, Margarita. (2010). Nuevos procesos de transferencia mediante tóner y su aplicación al grabado calcográfico. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

González, Norberto. (2007). La transferencia de la imagen de mediotono impresa: Posibilidades plásticas y creativas. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Holmberg, K., Jonsson, B., Kronberg, B. y Lindman, B. (2003). Surfactantes y polímeros en solución acuosa. Inglaterra: Jhon Wiley & Sons, LTD. Segunda edición.

International Flora Technologies, Ltd. (2009). Hydrophile-Lipophile Balance System. Technical Work Instruction. August.

Jiao, Jim. (2008). Polyoxyethylated nonionic surfactants and their applications in tropical ocular drug delivery. En: Advanced drug delivery reviews. No. 60, 1663-1673.

Jiménez A, Rubén. (2010). Estudio del efecto de complejos biopoliméricos en la estabilización y propiedades funcionales de emulsiones múltiples conteniendo hierro biglicinado. Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico DF.

Johansson, Ingegard y Svensson, Martin. (2001). Surfactants based on fatty acids and other natural hydrophobes. Current Opinion in Colloid & Interface Science 6 Ž. 178-188

Kerekes, Richard. Et al. (2011). Column flotation deinking: state of the art and opportunities. Resources, Conservation and Recycling 55. 1154– 1177.

Levine, Ira. (2004). Fisicoquímica: volumen 1. España: McGraw-Hill. Quinta edición.

Mishra, B., Patel, S., Dash, S., Padhan, S. y Mukherjee, P. (2011). Clouding behaviour in surfactant systems. En: Advances in colloid and interface science. No. 162, 59 – 79.

Panek, Joel. (1999). Fragmentation of a brittle polymeric toner line caused by swelling of a paper substrate during immersion in water. Tesis doctoral. Institute of Paper Science and Technology.

Pauck, Jimmy y Marsh, Jeremy. (2002). The role of sodium silicate in the flotation deinking of newsprint at Mondi Merebank. En: TAPPSA Journal. 20-25.

Pauck, Jimmy. (2004). The role of sodium silicate in newsprint deinking. En: TAPPSA Journal. 17-22.

Pugh, Robert y Theander, Katarina. (2004). Surface chemicals concepts of flotation deinking. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 240. 111–130

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (24 de mayo de 2014). Diccionario de la lengua española. Recuperado de <http://lema.rae.es/drae/?val=tinta>

Rodríguez-Rojo, S. et al. (2012). Characterization of rosemary essential oil for biodegradable emulsions. En: Industrial Crops and Products. No. 37, 137– 140.

Rosner, Hans. Et al. (2000). Artes Gráficas: Transferencia e Impresión de Informaciones. México: Procoelsa.

Salager, J. L. (1993). Surfactantes en solución acuosa: cuaderno FIRP S201- A. Venezuela. Universidad de los Andes.

Salager, J. L. y Fernandez, A. (2004). Surfactantes: cuaderno FIRP S301. Venezuela: Ministerio de ciencia y tecnología. Universidad de los Andes.

SAMSUNG Electronics Co. Ltd. (2012). Samsung polymerized toner: Advanced, eco-friendly toner that produces superior quality prints. Korea: Autor.

Santacruz, Liliana. (2011). Análisis químico de antocianinas en frutos silvestres colombianos. Tesis para optar al título de maestría en ciencias químicas. Universidad Nacional de Colombia.

SESA. (24 de mayo de 2014). Silicatos especiales S.A. de C.V.: Silicato de Sodio. Recuperado de <http://www.silicatosespeciales.com.mx/sub.php?s=2&sm=8&lang=es>

Singh, Dhananjay. (2011). Effect of different additives on cloud point of non-ionic surfactant. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. National Institute of Technology: Rourkela. India.

SISO. (24 de mayo de 2014). Silicatos solubles de monterrey S.A. Recuperado de <http://www.silicatossolublesdemonterrey.com/silicato-de-sodio.html>

TAPPI. (15 de febrero de 2014). How is paper recycled? Recuperado de <http://www.tappi.org/Bookstore/Public-Outreach/Earth-Answers/How-Is-Paper-Recycled.aspx>

Turrado, J., Castillo, L., Saucedo, R., Delgado, E., Alzate, H. y Ramos Q. J. (2008). Aspectos físicos y químicos del destintado por flotación. Trabajo presentado en el V Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel: CIADICYP 2008. Guadalajara - Méjico.

Wang, Z., Xu, J., Zhang, W., Zhuang, B. y Qi, H. (2008). Cloud point of nonionic surfactant Triton X-45 in aqueous solution. En: Colloids and surfaces biointerfaces. No. 61, 118 – 122.

Yuan, Y. y Lee, R. (20 de marzo de 2014). Contact angle and wetting properties. Recuperado de <http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CFMQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcontent%2Fdocument%2Fdocument%2Fdownloadaddocument%2F9783642342424-c1.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-1368817-p174704744&ei=FqmsU6-gGKqksQTN54DIDQ&usg=AFQjCNF04rNqldcpPs7RoWv0mKhdak0stQ>

Zanuttini, Miguel A. (24 de noviembre de 2012). Reciclado celulósico. Recuperado de http://www.riadicyp.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=117

