

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA

**INTENSIFICACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCION DE LA
SACAROSA DE LA CAÑA DE AZUCAR CON EL USO DE
SURFACTANTES ANIÓNICOS EN EL AGUA DE IMBIBICIÓN**

**Tesis presentada para optar por el grado científico
de Doctor en Ciencias Técnicas**

Autor: M Sc Ing. José Marcos Gil Ortiz

Tutor: Dr C Ing. William Suárez Santos

Santiago de Cuba

Año 2000

SINTESIS

Esta tesis recoge los resultados de un estudio, a escala de laboratorio e industrial, del efecto de la adición de surfactantes aniónicos al agua de imbibición en la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos. Se emplearon los diseños estadísticos de bloques al azar y factorial 2^k y las técnicas analíticas vigentes. Estos surfactantes adicionados en los molinos pueden aparecer a concentraciones bajas en el jugo mezclado, por lo que es necesario evaluar su efecto en el proceso de purificación.

Los principales resultados fueron:

Teóricos:

Descripción de los mecanismos de acción del surfactante, en la intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el molino y en el proceso de purificación de los jugos.

Prácticos:

1. Metodología para seleccionar el surfactante y la concentración adecuados a emplear, en el agua de imbibición, para intensificar el proceso de extracción en los molinos del central azucarero.
2. Mejoramiento del proceso de purificación de los jugos de la caña de azúcar mediante el empleo de surfactantes aniónicos.
3. Determinación aproximada de la presión efectiva del molino, a partir de la medición de la presión estática de saturación del bagazo en una prensa de laboratorio.

Se concluye que la adición de un surfactante aniónico, con propiedades como humectante, al agua de imbibición produce una intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos. La adición de éste (solo o en mezcla con floculantes) al jugo a clarificar, a concentraciones menores de 30 ppm en masa, mejora el proceso de purificación. Los beneficios económicos que aportan estos procedimientos justifican su introducción en centrales azucareros.

INTRODUCCIÓN

Desde finales de la década de los 80 la economía cubana, en particular en la industria azucarera, enfrenta serias dificultades. La producción de azúcar crudo ha descendido a niveles muy por debajo de la media histórica del período revolucionario. Debido a la desaparición del CAME, desapareció el principal mercado para nuestro azúcar y proveedor de insumos. En estas condiciones las exportaciones de azúcar tienen que enfrentar los bajos precios existentes en el mercado mundial, unido todo al recrudecimiento del bloqueo comercial que imponen los Estados Unidos de Norteamérica.

La Ley Helms - Burton causó la interrupción de financiamientos para la zafra azucarera, los combustibles y los alimentos. Así, en los meses previos a la zafra de 1996, Cuba dejó de recibir financiamientos por más de 200 millones de dólares, por lo que se dejaron de recibir casi las dos terceras partes de los aseguramientos imprescindibles para comenzar la cosecha azucarera. Esto ha provocado el pobre resultado de las zafas azucareras y a la vez constituye una causa de dificultades financieras adicionales. Esta situación se mantiene vigente aún en este año 2000.

Para superar esta crisis y lograr que la Agroindustria Azucarera ocupe su lugar estratégico en la economía cubana, es imprescindible optimizar la explotación de los recursos disponibles. Dentro de este proceso cobra aún mayor vigencia lo planteado en la Resolución Económica del V Congreso del PCC donde se afirma que: "La ciencia, la innovación y la asimilación de tecnologías son elementos esenciales en la elevación de la eficiencia económica y condición primordial para el desarrollo..." /1/.

El proceso industrial de producción de azúcar crudo de caña, implica una primera etapa tecnológica consistente en la preparación de la caña y posterior extracción de la sacarosa que ésta contiene. Este proceso puede realizarse mediante difusores con o sin molinos de pre - extracción o por el proceso combinado de imbibición y compresión, en prensas o en tándem de molinos. Cualesquiera que sea el método empleado, aún en condiciones mecánicas y disciplina tecnológica óptimas, siempre quedará un porciento de sacarosa como residuo en el bagazo final, el que representa del 30 al 40 % de la pérdida total en las condiciones técnicas existentes /94/. Esta situación causa la pérdida de miles de toneladas de azúcar cada zafra en nuestro país y en el mundo.

Dada la gran masa de bagazo que se produce diariamente en los centrales azucareros, cualquier disminución que se logre en el porciento de sacarosa en el bagazo residual durante el proceso de extracción, por pequeña que parezca, representa una cantidad apreciable de azúcar que se recupera, o lo que es lo mismo, mayor producción de azúcar con la misma cantidad de caña entrada en fábrica /5,120/.

Una de las vías para disminuir los costos del proceso de producción de azúcar crudo, consiste en disminuir las pérdidas de sacarosa en bagazo y lograr excedentes de éste último,

luego de cubrir las necesidades energéticas del proceso de producción. Mientras más humedad contenga el bagazo, mayor es la cantidad de éste que hay que quemar en la generación del vapor requerido por el proceso /27, 33, 36, 40, 41, 83, 84, 122, 127, 147/.

Una práctica común para tratar de disminuir las pérdidas de azúcar en el bagazo residual en el tándem de molinos, consiste en aumentar la cantidad de agua de imbibición durante el proceso de molienda de la caña de azúcar, aún violando la norma establecida /94/. Esto influye negativamente en la capacidad del molino, puede aumentar la extracción de no azúcares, la humedad del bagazo final y el costo operacional /76, 83, 87, 94, 121, 158/. Sin embargo, existen alternativas técnicas para disminuir económicamente las pérdidas de sacarosa en bagazo.

Un procedimiento propuesto y patentado por Ruiz en la década del 50 /5, 135, 136/ consiste en adicionar surfactantes, también denominados tensioactivos o tensoactivos, al agua de imbibición de los molinos para intensificar la operación. Ruiz se limita a plantear que la disminución de la tensión superficial del agua de imbibición, debido a la presencia del surfactante, provoca una mayor penetración del agua en el colchón de bagazo lo que permite una mayor extracción de la sacarosa. Según informes de pruebas industriales realizadas en esa época /137/ los resultados económicos fueron satisfactorios, pero no se generalizaron, debido probablemente a la escasez del surfactante y su alto precio, unido a la ausencia de una explicación acerca de los mecanismos de acción de estas sustancias dentro de este proceso. Estos trabajos muestran que los autores no disponían de una metodología efectiva para la selección del surfactante y el rango de concentraciones a emplear /52/.

Ramaiah /130/, retomó este tema y en 1983, presentó buenos resultados a escala industrial con un surfactante patentado con el nombre comercial "Sushira", el cual es capaz de disminuir el % Pol /94/ y además la humedad del bagazo. En los trabajos antes referidos los autores no toman como indicador la concentración del surfactante en el agua de imbibición y su efecto sobre la tensión superficial, sino que emplean la concentración sobre la base del peso de la caña. Los mecanismos que proponen Ramaiah y otros/130/ no explican totalmente el efecto del surfactante en el proceso, ya que atribuyen la disminución del % Pol y % Humedad en el bagazo a la disminución de las fuerzas de Van der Waals entre el jugo y la fibra provocado por el surfactante. La disminución de estas fuerzas no debe tener un efecto significativo sobre los procesos de transferencia de masa que ocurren dentro del lecho fibroso, ni en el de extracción del jugo del bagazo en el molino.

En 1992 Pérez /126/ señala que con la magnetización del agua de imbibición, se logra intensificar el proceso de extracción de la sacarosa. Este autor atribuye el efecto sólo a la disminución que experimenta la viscosidad del agua magnetizada, pero no menciona la tensión superficial. Tampoco señala efectos sobre la humedad del bagazo residual.

La tendencia general en las publicaciones científicas acerca del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos, salvo pocas excepciones, es tratar el

tema desde el punto de vista mecánico del equipamiento instalado. Sin embargo, generalmente, no consideran la influencia que ejercen sobre este proceso la estructura del colchón de bagazo y las propiedades físico - químicas del líquido de imbibición y del jugo retenido por la fibra, tales como la tensión superficial y la viscosidad. Estas variables son consideradas en otros campos de las Ciencias Técnicas al estudiar fenómenos similares /15, 26, 79, 80, 81, 104, 110, 115, 141, 144/.

Sigue constituyendo un problema para la Industria Azucarera, con la tecnología actual, las pérdidas de sacarosa en el bagazo residual del tándem de molinos y el alto contenido de humedad del bagazo para su empleo como combustible.

En la intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos, la tesis tiene como

Objetivos

Análisis de la influencia de la adición de surfactantes aniónicos y su concentración en el agua de imbibición.

Descripción de los mecanismos de acción del surfactante.

Elaboración de una metodología para la selección del surfactante y del rango de concentraciones más efectivo en el agua de imbibición.

Hipótesis

En la presente investigación se partió de la hipótesis de que con la adición al agua de imbibición de un surfactante aniónico, con propiedades como humectante, es posible intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos.

El autor defiende lo siguiente:

1. La compresibilidad del bagazo varía cuando a éste se le añade la disolución acuosa de un surfactante aniónico que modifique la tensión superficial del jugo retenido por el bagazo.
2. La adición al bagazo de un surfactante aniónico al agua de imbibición, provoca cambios físico-químicos en el sistema jugo - fibra que propician una intensificación del proceso de extracción de la sacarosa y del jugo del bagazo de la caña de azúcar y se manifiesta en una disminución del % Pol y del % Humedad del bagazo residual.
3. La disminución que experimenta el % Pol en el bagazo residual cuando se añade un surfactante aniónico al agua a niveles de imbibición normales, sólo es posible alcanzarla sin surfactante cuando se emplean altos niveles de imbibición. Esto último es técnica y económicamente no factible.
4. Los mecanismos de acción del surfactante que ocurren en el bagazo, en el conductor al

adicionar el agua de imbibición y en el proceso de extracción en el molino.

5. La hipótesis de que una disminución de la velocidad de la razón de compresión del bagazo, a medida que éste avanza hacia el plano axial entre las mazas del molino, provoca un gradiente de presión que contribuye al proceso de extrusión del bagazo y por tanto influye sobre el coeficiente de reabsorción.
6. Una metodología para seleccionar el surfactante y la concentración de éste en el agua de imbibición, para la intensificación del proceso de extracción en tándem de molinos.
7. La adición de surfactantes aniónicos (solos o en mezclas con floculantes) a bajas concentraciones en el jugo a purificar, mejora el proceso de purificación de los jugos de caña.
8. Los beneficios económicos que se derivan de la aplicación práctica de este trabajo.

Novedad científica del trabajo

1. Una metodología:
 - Para la selección del surfactante y el rango de concentraciones a emplear en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos, que tiene en cuenta:
 - a) Una comprobación previa del carácter humectante del surfactante, sobre la base de una estimación aproximada del número de equilibrio hidrófilo - lipófilo (EHL) a partir del aspecto óptico que presenta la disolución acuosa.
 - b) La determinación de las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas del surfactante, para la selección del rango de concentraciones a emplear en la evaluación industrial.
 - Para obtener la curva de operación de una bomba dosificadora, que permite determinar el flujo volumétrico real, bajo las condiciones de operación existentes.
2. La elaboración de un método para determinar la presión estática equivalente a la presión efectiva en el molino.
3. El descubrimiento de la influencia que ejerce el surfactante en el agua de imbibición sobre la compresibilidad del bagazo y la explicación teórica dada a este fenómeno.
4. La descripción de los mecanismos de los procesos de flujo y transferencia de masa que ocurren durante la penetración del agua de imbibición en el bagazo que transporta el conductor intermedio y en el proceso de extracción por compresión en el molino.
5. El empleo de surfactantes, obtenidos a partir de las fracciones de la cera cruda de caña, para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos.
6. La hipótesis de la existencia de un gradiente de presión originado por la variación que experimenta la velocidad de compresión del bagazo entre las mazas del molino.
7. El empleo de surfactante adicionado al jugo a purificar, solo o en mezclas con floculantes, y la descripción de los mecanismos mediante los cuales éste es capaz de mejorar el

proceso de purificación de los jugos por el método cal - calor.

Significación práctica del trabajo

En el orden práctico la metodología propuesta permite seleccionar, a partir de un grupo de surfactantes disponibles en el mercado o de producción local, el más adecuado técnica y económicamente, así como el rango de concentraciones a emplear para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos. Esta metodología permitirá además, en investigaciones futuras, evaluar diferentes combinaciones de surfactantes para obtener un producto de mejores características.

En el orden económico se demuestra el aumento de la rentabilidad a causa de la adición de surfactantes al agua de imbibición en la intensificación del proceso de extracción en tándem de molinos y el efecto negativo que tiene violar la norma de la cantidad de agua.

Para determinar el posible efecto en el proceso de purificación de los jugos de la caña de azúcar, de los surfactantes añadidos en el tándem de molinos, se realizaron pruebas a escala de laboratorio e industrial adicionándolos al jugo a purificar. Se demostró que los surfactantes a bajas concentraciones son capaces de mejorar el proceso de purificación y disminuir el consumo de floculantes de alto peso molecular.

Los resultados de esta investigación, en su carácter multifacético, permiten:

- Abordar la intensificación del proceso de extracción en tándem de molinos, a partir de modificaciones a las propiedades físico - químicas del agua de imbibición y del jugo retenido por el bagazo.
- El mejoramiento del proceso de purificación de los jugos, mediante la adición en esta etapa, de surfactantes en combinación o no con floculantes de alto peso molecular.

Estructura de la tesis

La tesis consta de cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPITULO 1 ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA

1.0.0 La extracción de la sacarosa en trenes de molinos

Desde sus inicios, la extracción del jugo de la caña se realizaba mediante prensado en molinos o trapiches. Los primeros molinos eran verticales, de dos mazas, de madera y movidos por tracción animal, fuerza hidráulica o por molinos de viento. Los molinos verticales de dos mazas comenzaron a ser reemplazados posteriormente por molinos verticales de tres mazas allá por el siglo XV. Los molinos verticales predominaron hasta finales del siglo XVIII cuando se impusieron los molinos con mazas horizontales /147/. La primera aplicación de la máquina de vapor a la molienda de caña ocurrió en Cuba en 1797. Se atribuye a Smeaton (finales del siglo XVIII), el haber aplicado los molinos horizontales de tres mazas en la forma triangular que se usan en la actualidad. En 1871 Rousselot presenta el modelo que ha servido de base al desarrollo de la mayor parte de los trenes de molinos contruidos desde entonces. Los tandemes compuestos de dos juegos de molinos de tres mazas, dispuestos en serie, se utilizaron por primera vez en Cuba en 1883. En el año 1892 se instalaron trenes de molinos de tres mazas simultáneamente en Louisiana y Australia /83, 87, 147/.

Independientemente del número de unidades de molienda, el bagazo resultante contenía alrededor de un 50% de jugo que no se podía extraer por compresión, para condiciones normales de funcionamiento del molino, con las consiguientes pérdidas de sacarosa en el bagazo residual /83, 87/. La molienda de la caña con imbibición en trenes de molinos es una innovación más reciente /147/.

1.1.0 El Proceso de extracción del jugo de la caña en tándem de molinos y su relación con las características del colchón de bagazo

Como resultado del proceso de preparación, el colchón de caña es transformado en una cama porosa polidispersa de partículas deformables, llamada comúnmente colchón de bagazo /52/. De este lecho poroso es extraído el jugo por compresión en los molinos de extracción en seco y por imbibición y compresión en los de extracción en húmedo /76/.

La compresión se define como la relación que existe entre el volumen que alcanza el bagazo al ser sometido a determinada presión y el que ocupaba suelto. Ésta generalmente se expresa como una fracción decimal o en porciento. En un molino, sería la fracción entre el volumen de bagazo que pasa por la abertura entre las mazas y el que le incorpora el conductor.

Hugot y Jenkins /83, 87/ reseñan estudios de compresibilidad en condiciones estáticas, realizados por Deerr en 1912, donde se muestra cómo inicialmente la compresión del bagazo disminuía rápidamente con el incremento de la presión y luego, a partir de una determinada compresión, ésta varía cada vez más lentamente hasta que prácticamente se

hacía constante. Estos estudios fueron repetidos por Gil y otros /42, 51, 52/ en 1997 con un mayor rango de presiones. La curva obtenida se superpone a la de Deerr. Shannon (citado por /87/) realizó estudios de compresión rápida en una prensa de laboratorio. Las presiones obtenidas, para una misma compresión, son considerablemente más altas que las obtenidas por Deerr (citado por /83, 87/). Atherton y Shannon (citados por /87/) estudiaron la influencia del tamaño de las partículas de la caña preparada sobre la compresión /87/. Estos autores determinaron que la presión de equilibrio aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Un resultado similar obtuvieron Gil y otros en 1997 /42, 52/. En todos los casos, tanto para compresión lenta como rápida, la forma de las curvas de compresión obtenidas como función de la presión, son similares a las de Deerr (citado por /87/).

Hugot /83/ varió simultáneamente las presiones en todos los molinos y verificó la hipótesis de que las altas presiones favorecen el proceso de extracción. No obstante, en experimentos realizados por Gil y otros /42,52/, tanto a escala de laboratorio como industrial, se obtuvo que existe una presión hidráulica, la que depende de las características técnicas y condiciones de molienda en el molino, a partir de la cual la extracción de jugo se incrementa muy poco. Al incrementar la presión hidráulica en el molino, aumenta el consumo de potencia así como el desgaste en chumaceras y engranajes /78, 83, 87,94, 147/. Además, se ha descubierto que la capacidad de drenaje del bagazo es una función inversa de la presión de las mazas, pero no inversamente proporcional /76/.

La composición del jugo que se extrae de la caña está influenciada por la magnitud de la presión con que éste es extraído /121/. Quincoses /136/ señala que el mayor porcentaje de extracción de proteínas y péptidos ocurre en la desmenuzadora y el primer molino, mientras que la extracción de aminoácidos aumenta hacia el sexto molino. A presiones moderadas las paredes celulares se rompen, dejando escapar el jugo puro de las celdas, pero a presiones mayores comienzan a ser extraídos jugos impuros del protoplasma y de la corteza /87,121,136,147/. En todo caso la presión hidráulica aplicada a cada molino, debe ser suficiente para lograr el nivel de extracción requerido a un costo conveniente /76/.

No obstante todos los inconvenientes señalados anteriormente, la tendencia general es el empleo de las altas presiones hidráulicas en los molinos, sin que aparezca un método científicamente fundamentado para la selección de las presiones a emplear.

1.2.0 La imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos

El proceso de adición de agua en tándem de molinos, se conoce como imbibición /76, 83, 87, 131, 147/. El agua de imbibición se añade al bagazo, el cual es un medio poroso. La capacidad de un medio poroso para retener un líquido, depende de la afinidad de éste con el sólido, de sus propiedades y de la estructura del sólido /153/. Las fuerzas que retienen a los líquidos que mojan a un sólido poroso, son de origen capilar y dependen de la tensión superficial y las dimensiones de los capilares /13, 153/. La retención de líquido por el me-

dio poroso está relacionada directamente con la presión capilar P /25, 26, 57, 100, 103, 123, 140, 145/:

$$P = (\sigma \cos \theta) / r \quad (1.1)$$

Donde:

σ ... tensión superficial del líquido

θ ... ángulo interfacial de humectación

r ... radio del capilar

De la ecuación anterior se puede deducir la relación que existe entre la altura a que asciende el líquido dentro de un capilar y la tensión superficial, la que se puede expresar de forma aproximada por la ecuación de Yuren (referida por Schukin /140/), en que:

$$h = (2 \sigma \cdot \cos \theta) / [(\rho' - \rho'') \cdot g \cdot r] \quad (1.2)$$

Donde:

h - altura a que asciende el líquido dentro del capilar σ - tensión superficial del líquido

ρ' - densidad del líquido ρ'' - densidad del vapor saturado en equilibrio con el líquido

g - aceleración de la gravedad θ - ángulo interfacial de humectación

La ecuación de Yuren para mojado total se puede escribir como:

$$h = (2\sigma) / (\Delta\rho \cdot g \cdot r) \quad (1.3)$$

Esta última expresión da una medida de la cantidad de líquido que puede retener un capilar y que es proporcional a la tensión superficial e inversa a la densidad del fluido (propiedades físicas) y al radio del capilar (factor geométrico).

En un lecho poroso, formado por multitud de redes capilares, es de interés conocer la capacidad de retención total de líquido (R_t) por unidad de volumen, en función de su estructura (factor geométrico) y las propiedades físicas del fluido. Treybal /153/, refiere que la capacidad total de retención de líquido por un medio poroso, por el que fluye un líquido, está conformada por una parte en movimiento (retención móvil, R_o) y una que se mantiene en forma de película alrededor de las partículas, sin participar del movimiento y que no drena del lecho al cesar el flujo (retención estática, R_s)

Treybal /153/, para el cálculo de la retención estática en rellenos de torres recomienda una ecuación de la forma:

$$R_s = G \cdot \frac{(\mu)^m \cdot (\sigma)^n}{(de)^u \cdot (\rho)^w} \quad (1.4)$$

G, m, n, u, w ...son constantes que dependen del sistema líquido- sólido.

(de) ...es el diámetro de la esfera que tenga igual superficie que la partícula que forma el relleno.

R_s ... retención de líquido en m^3 de líquido/ m^3 del medio poroso.

Esta ecuación muestra la influencia directamente proporcional de la tensión superficial y la viscosidad e inversamente de las dimensiones de los poros, sobre la capacidad de retención. No obstante, la tensión superficial y la viscosidad, están muy influenciadas por la temperatura /13, 25, 68, 69, 70, 71, 82, 92, 102, 103, 128, 140/. Estos fenómenos están presentes en el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos.

Para extraer la sacarosa contenida en el jugo retenido por el bagazo, éste debe ser reemplazado por agua, lo que sólo se logra parcialmente en la práctica. De la efectividad y magnitud de este reemplazo dependerá el porcentaje de recuperación que se logre, así como su influencia sobre el costo del proceso de producción de azúcar. En el caso del proceso de extracción por imbibición y compresión, la eficiencia total del sistema depende del rendimiento de cada una de las etapas de adición de agua o del jugo lixivante y la posterior separación del jugo diluido del bagazo/131/. Dado que el número de molinos en un tándem es fijo, para que la imbibición sea eficiente, cualesquiera que sea el esquema utilizado, se requiere que en las primeras unidades de extracción en seco se obtengan altas extracciones. De esta manera, la cantidad de jugo a diluir será menor y en cada unidad subsiguiente se logrará un nivel de extracción adecuado. Una alta compresión en el último molino reducirá la humedad del bagazo /76,83,87/.

Cuando se imbibie, puede apreciarse que solamente la capa superficial del colchón de bagazo es mojada por el jugo o agua añadida, mientras la parte restante no sufre ningún cambio apreciable /52,83,87/. De acuerdo con Treybal /153/, cuanto menor sea la tensión superficial del líquido de imbibición, mayor será la profundidad a que éste penetre en el colchón de bagazo y si además tiene baja viscosidad, lo hace en menor tiempo /13, 35, 38, 88, 102/. En esta etapa el mayor interés recae sobre la retención estática, ya que el movimiento del fluido de imbibición cesa rápidamente. El colchón de bagazo es un medio poroso formado por un elevado número de capilares que aportan una gran superficie específica, lo que explica su gran poder de retención estática de líquido /42, 76, 83, 87/, que puede llegar a 10 veces su peso en fibra, en dependencia del porcentaje de saturación inicial /42, 43, 83, 87, 147/. Es necesario señalar que la cantidad de agua que es capaz de absorber el bagazo para un mismo contenido de fibra depende además, del grado de compresión /42, 43, 52/.

En la literatura es frecuente el uso de la frase "mojado del bagazo por el agua de imbibición" para describir la penetración del líquido de imbibición (agua o jugo) en el colchón de bagazo que sale parcialmente saturado del molino. Sin embargo, la fibra del bagazo que sale no está seca, sino recubierta por una delgada película de jugo, que en el caso de la médula o meollo, llena parcialmente sus poros. Jenkins /87/, señala que la fibra puede tener asociada hasta un 25 % de agua que no se considera parte del jugo. Cuando se añade el

agua de imbibición, el efecto del choque es amortiguado rápidamente por la capa superficial del bagazo. Esta agua se distribuye de forma tal, que cada capa absorbe una cantidad de acuerdo con su capacidad de retención estática R_s .

A medida que el bagazo es comprimido r disminuye, por lo que para un valor de σ constante, la presión capilar aumenta hiperbólicamente. Para un grado de compresión determinado e iguales características del sólido, la presión capilar dependerá del valor de σ . Para los fines del proceso de extracción convienen las bajas tensiones superficiales. Este efecto se logra en la práctica con las altas temperaturas y se intensifica con la adición de un surfactante al agua de imbibición.

Algunos autores han dirigido sus investigaciones hacia el objetivo de mejorar la penetración del líquido de imbibición en el colchón de bagazo. En este sentido Riera /131/, menciona un procedimiento de imbibición al vacío propuesto por Riviere y uno recomendado por Doss para forzar la imbibición mediante aire comprimido.

Debido a las características del bagazo, por muchos esfuerzos que se realicen en cambiar la forma de los distribuidores de agua o de jugo, siempre quedará un porcentaje considerable del jugo sin diluir, pues incluso en el que se ha logrado saturar, permanece una mayor cantidad de sacarosa en la fibra que en el meollo /149/.

Una extracción ideal sería aquella en la que el jugo extraído por el molino, tiene el mismo °Brix que el que mantiene retenido el bagazo. Esto, tal vez se lograría con un cien por ciento de células rotas y un mezclado perfecto del líquido de imbibición y el jugo libre. En la literatura especializada acerca del proceso de extracción en los molinos, se hace referencia a un denominado coeficiente de imbibición I_c . Éste representa la efectividad del mezclado del líquido de imbibición y del jugo retenido por el bagazo y se define como $I_c = (°Bx \text{ del jugo extraído}) / (°Bx \text{ que se extraería si el mezclado fuera perfecto})$. Es un factor que ha sido obtenido empíricamente /109, 131, 142, 143/. Murry /109/, plantea que para un mismo °Bx del líquido de imbibición, este coeficiente disminuye a medida que el nivel de imbibición crece a partir de 2 y que el I_c es algunas veces complicado, por introducir anomalías en la simulación de los resultados. Sin embargo, los autores no consideraron en los modelos matemáticos obtenidos para este coeficiente, la tensión superficial y la viscosidad del líquido de imbibición y del jugo retenido por el bagazo, propiedades que dependen de sus características físico - químicas e influyen significativamente en el proceso de distribución, retención y flujo de líquidos en un medio poroso como el bagazo.

En un proceso de lixiviación la masa de disolvente aplicada no debe ser arbitraria, sino referirse a la masa de sólido que se alimenta, a la del sólido inerte o a la del material soluble a extraer /13, 35, 102, 153/. En el proceso de extracción de la sacarosa en los molinos, la masa de agua de imbibición se relaciona con la masa de caña o de fibra en caña y se denomina nivel de imbibición. Éste nivel hay que establecerlo de acuerdo con su influencia sobre la extracción, el posible gasto de combustible y el resultado económico, con el fin de

obtener un resultado óptimo. Al incrementar el nivel de imbibición, aumenta la extracción de impurezas de la caña que afectan negativamente el proceso de fabricación, aunque esto no está totalmente probado.

El nivel de imbibición está limitado, además, por su efecto sobre la capacidad del molino, la eficiencia y capacidad de los aparatos evaporadores y calderas de vapor /27, 83, 87, 122, 147, 158/. Con la imbibición, la extracción aumenta rápidamente al principio y lentamente después /83, 158/. Un aumento del 5 % de la cantidad de agua de imbibición en la relación agua/caña, significa un aumento del mismo orden en el consumo de vapor del proceso /27/. Según Spencer /147/, por regla general hace 50 años, el porcentaje de imbibición aplicado era de un 10 al 15 %, mientras que en la actualidad se emplea de un 25 a un 30, aunque en **Hawái** y Australia fluctúa entre un 25 y el 40 %. Según Hugot /83/ la cantidad de agua óptima está cercana al doble de la fibra en caña. Esto aproximadamente es equivalente a un 25 al 26 % del peso de la caña en las variedades actuales. Murry /109/, en estudios sobre el coeficiente de imbibición, obtuvo resultados que concuerdan con Hugot. No obstante, se recomienda que la cantidad de agua no sobrepase el 30% del peso de la caña, pues los costos y la extracción de impurezas aumentan rápidamente, pero no la extracción de sacarosa /83, 121, 129, 147, 158/.

Valdés /158/ muestra una gráfica de % Pol en bagazo vs % agua/caña. El % Pol en bagazo disminuye rápidamente con el aumento de la relación agua/caña desde 0 a aproximadamente 13 %, pero a partir de un 20 %, la disminución es menos acentuada. Cuando el nivel es de 30 a 35 %, no varía apreciablemente.

1.3.0 Influencia de la temperatura del agua de imbibición y el tiempo de contacto en el conductor de bagazo en el proceso de extracción en los molinos

Muchos autores reconocen los beneficios de las altas temperaturas en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Murry /109/, señala que ese efecto no ha sido observado en molinos de laboratorio pero sí en el proceso industrial. Hamill /76/, plantea que las paredes celulares se desintegran cuando la fibra es calentada hasta 82 °C, lo que facilita la dilución del jugo por el agua. Además, el proceso de transferencia de masa por difusión se intensifica. Hugot /83/, no observó influencias apreciables entre 60 y 70 °C, pero sí a valores más altos y junto a otros autores /87, 147/ considera que el agua caliente (80 a 85 °C) es más favorable para el proceso. Cuando se combinan niveles de imbibición por encima de 25 a 30 % del peso de la caña con temperaturas del agua mayores de 85 °C, en dependencia de las características del tándem, generalmente se atasca el molino, lo que obliga a disminuir la capacidad de molida. Estos resultados son confirmados por Hamill /76/, quien encontró que las características de alimentación de la caña se reducen cuando se emplea imbibición caliente. Por otra parte las pérdidas de sacarosa por la acción de los

microorganismos en el tándem, disminuyen notablemente al inhibirse el desarrollo de muchas especies a temperaturas mayores de 50 °C /82, 84, 147/.

Diversos autores difieren con relación a la influencia de las altas temperaturas en la extracción de los no azúcares. La extracción de cera es poco afectada por la temperatura del agua (Honig /82/ y Darias /25/). Aspectos no considerados en esta polémica, son la influencia de la temperatura y la calidad de la caña que se está moliendo en las pérdidas de sacarosa en el tándem por inversión.

1.4.0 Reabsorción del jugo en los molinos

Según refiere Jenkins /87/, Egeter (1928) señaló que el volumen de bagazo que sale del molino es mayor que el volumen descrito. Postuló que el jugo se mueve hacia delante a través de la abertura mínima entre las dos mazas, a una velocidad mayor que la de la fibra sobre la superficie de las mazas. Se plantea /87/, que el gradiente de presión necesario para lograr ese efecto, no existe en el molino. Bullock (1957) encontró que el coeficiente de fricción del bagazo sobre la superficie de hierro colado de las ranuras, disminuye a medida que aumenta la presión y sugiere que el bagazo se desliza hacia delante a través de la abertura mínima entre las mazas. Cullen(1965) demostró que en la región del plano axial, el coeficiente de cizallamiento interno del bagazo es del mismo orden que el coeficiente de fricción y que podría extruir a través de la abertura mínima. Solomón (1967) determinó las componentes radiales y tangenciales de las fuerzas sobre un segmento de cilindro. Concluye que parece imposible que el material se deslice sobre la superficie del cilindro y es más probable que la causa de la reabsorción sea la extrusión del material a través del espacio entre las puntas de las ranuras. Cuando las mazas están demasiado pulidas el factor de reabsorción es alto. Bajo estas condiciones el deslizamiento sobre la superficie y la extrusión podrían estar presentes. Murry (1996) sugiere que el flujo de jugo por el fondo de las ranuras de las mazas no es suficiente para justificar los niveles de reabsorción observados /109/.

Según estudios divulgados por la literatura, el grado de preparación influye en las pérdidas por reabsorción en bagazo. Estas pérdidas van disminuyendo con el aumento de la preparación hasta un grado determinado a partir del cual la relación de reabsorción a extracción aumenta rápidamente /87/. Se ha comprobado además, que hay un límite de presión a partir del cual, la relación (pérdidas de jugo en bagazo)/(extracción) aumenta /87/.

Una medida de la reabsorción en el molino, la da el coeficiente de reabsorción. En ninguno de los modelos para el coeficiente de reabsorción, que recoge la literatura consultada, aparecen como variables la tensión superficial del jugo y la viscosidad /83, 87, 93, 109, 131, 142, 143/.

1.5.0 Consideraciones acerca de algunos aspectos del proceso de extracción

El proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el tándem de molinos se puede considerar dividida en dos etapas: una de extracción en seco y otra en húmedo /76/, no obstante, en la de extracción en húmedo, en cada molino de tres mazas se encuentran estas dos etapas. La de extracción en seco, propiamente dicha, puede estar constituida por una desmenuzadora y un primer molino, o sólo por un primer molino o uno desmenuzador. La literatura menciona casos donde se imbibie también en el primer molino. Sin embargo, ese procedimiento sólo se justificaría parcialmente cuando a la caña con que se alimente a este molino, se le haya extraído parte del jugo. Esta etapa es la que entrega el alimento (fibra + jugo) a la etapa de molida en húmedo. Con la imbibición compuesta, el proceso de extracción en húmedo se acerca a uno de lixiviación a contracorriente /83, 87, 126, 131/, donde cada etapa está constituida por el molino y el tramo de conductor que lo alimenta. Respecto a las características del alimento, la relación masa de sólidos solubles/masa de jugo depende del tipo de caña que se muele, mientras que la relación masa de jugo/masa de fibra, de la preparación de la caña y de la efectividad de la etapa de extracción en seco. Ésta etapa influye notablemente sobre los resultados de la siguiente. En cualquier cálculo de lixiviación en la etapa de extracción en húmedo debe emplearse la relación masa de jugo/masa de fibra en caña y no masa de jugo/masa de caña.

El diseño del proceso de lixiviación es un hecho conocido /13, 35, 88, 102, 153/ y éste indica que el proceso de extracción de la sacarosa, en la etapa en húmedo en el tándem de molinos, aún requiere de un estudio teórico - experimental acerca del flujo de fluidos y la transferencia de masa. Debido a esta situación, el número de molinos del tándem se selecciona empíricamente sobre la base de la experiencia práctica. Prevalece el criterio mecánico, tanto en el diseño como en la operación para todos los molinos, aunque los procesos internos que ocurren en las etapas de extracción en seco y en húmedo son sustancialmente diferentes desde el punto de vista de la transferencia de masa. Además, aún se carece de conocimientos teóricos necesarios para establecer un criterio acerca de las presiones con que deben ser operados los molinos, aunque ya existen resultados preliminares /42/.

El rendimiento en el proceso de lixiviación, está relacionado frecuentemente con el tiempo de contacto entre el solvente y el sólido en cada etapa. Tal vez por esto con frecuencia en los tándemes, la estera conductora entre el penúltimo y el último molino es más larga que las demás. Con esto, se busca aumentar el tiempo de contacto. Según Jenkins /87/, todo parece indicar que no es relevante el tiempo de contacto del agua o jugo con el bagazo, en la forma en que se realiza el proceso de imbibición. Esto podría considerarse contradictorio por el hecho de que la transferencia de masa entre el agua de imbibición o jugo diluido (según sea el caso) y el jugo celular no es instantánea, ya que según Carbonel/17/ y Pérez /125, 126/, el término difusional tiene un valor definido. Sin embargo, si se considera que toda el agua de imbibición es absorbida por la capa superficial de bagazo, entonces ese

tiempo no debe influir prácticamente (Gil y otros /42, 52/), mientras que el costo del proceso aumenta con la longitud del conductor /83/.

En nuestros centrales no existe un criterio unificado acerca del tipo de distribuidor de agua a emplear, ya sea de chorros o por cajas de derrame. Esto se debe a que no se tienen en cuenta la capacidad de absorción de líquido por el bagazo y los mecanismos que gobiernan su distribución cuando el colchón es comprimido por el molino. Las cajas de derrame parecen ser las más eficaces, porque logran una distribución más uniforme del agua sobre el bagazo. No obstante, es pobre el mezclado entre el agua y el jugo retenido por la fibra del bagazo que está sobre el conductor. Esto se debe a que al aplicar la imbibición al bagazo suelto, sólo se satura una fracción de éste /42, 52, 83, 87, 147/.

1.6.0 Los Surfactantes

Es un hecho conocido que el efecto de diferentes sustancias en la tensión superficial de las disoluciones, depende de la naturaleza de la sustancia disuelta y del disolvente. Hay solutos que aumentan la tensión superficial, mientras que otros, aún en concentraciones muy pequeñas, provocan una caída brusca de ésta. Los solutos que provocan una disminución de la tensión superficial de la disolución son denominados surfactantes, tensoactivos, tensioactivos o agentes con actividad superficial. Estas sustancias se pueden clasificar en tres grandes grupos: iónicos; no iónicos y anfóteros /52, 97, 140, 159/.

1.6.1 Algunos usos de los surfactantes

- 1) Pinturas y recubrimientos /3, 140/.
- 2) Adhesivos /3/.
- 3) Tintas /3/.
- 4) Fabricación y procesamiento de tinturas /3/.
- 5) Recubrimientos de papel /3/.
- 6) Manufactura y dispersión de pigmentos /3/.
- 7) En fangos cementantes de perforación en campos petrolíferos /3, 140/.
- 8) Tratamiento de minerales por flotación /159/.
- 9) Agentes químicos agrícolas /3, 140/.
- 10) Inmersión en recubrimientos de látex y en fórmulas que lo contienen /3/.
- 11) Limpiadores industriales y hogareños /3, 97, 140, 159/.
- 12) Textiles /3, 140/.
- 13) Cementos, hormigón /3/.
- 14) Líquidos para metalurgia /3, 140/.
- 15) Auxiliar de molienda /3/.
- 16) Como controladores de las espumas y la viscosidad /3, 19, 22/.

- 17) En sistemas reaccionantes heterogéneos para facilitar el contacto de los reactivos que no son miscibles entre sí /74/.
- 18) Para mejorar la filtrabilidad en el proceso de la viscosa /118/.
- 19) En procesos de absorción de gases /91/.
- 20) Para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa del bagazo de la caña de azúcar en difusores y molinos /130, 135, 136, 137/.
- 21) Como auxiliares en la purificación de los jugos de la caña de azúcar /5, 32, 86, 114, 134, 162/, licores, meladura y mieles de la caña de azúcar /9, 24, 28, 29, 72, 90, 155/, en el proceso de cristalización de la sacarosa /5, 10, 11, 19, 22, 23, 37, 72, 96, 156/ y de centrifugación de las masas cocidas /19, 22, 23/.
- 22) Para incrementar el coeficiente de transferencia de calor en los procesos de calentamiento y evaporación de jugos /21, 63, 64, 65, 66, 67, 92/.

El efecto de los surfactantes sobre la viscosidad es un fenómeno aún insuficientemente estudiado desde el punto de vista de su fundamentación teórica, aunque cada vez es mayor el número de autores y firmas que aseguran que algunos surfactantes modifican la viscosidad. La firma Air Products /3/ en 1994 recomendó nueve productos como controladores de la viscosidad y mejoras a las propiedades reológicas en la molienda de pigmentos. Plantea que el Surfynol “82,82s” reduce la viscosidad en plastisoles vinílicos.

1.6.2 Tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes

En la etapa de los molinos, los surfactantes son adicionados al agua de imbibición donde alcanzan determinadas concentraciones. Acerca del comportamiento de la tensión superficial de las disoluciones acuosas de surfactantes, McBain /101/ muestra las curvas tensiométricas (o de tensión superficial) vs concentración para las disoluciones acuosas de jabones sódicos y otros surfactantes. Estas curvas presentan puntos de mínimos relativos a concentraciones cercanas a la micelar crítica. Según Glasstone /57/, estos puntos de mínimos son típicos de medidas hechas en disoluciones de electrólitos coloidales (surfactantes) y que está en aparente contradicción con la ecuación de Gibbs, ya que indica una desorción en el intervalo de concentraciones para el cual $d\sigma/dc$ es positivo. Por otro lado, Shaw /145/ atribuye esta anomalía a trazas de impurezas que se absorben en la interfase a concentraciones por debajo de la micelar crítica. Valea /159/ plantea que tales mínimos existen, pero son de difícil interpretación y parecen presentarlos los surfactantes más hidrofílicos (iónicos y los de elevada etoxilación).

Existen otros hechos que corroboran indirectamente la existencia de los puntos de extremos relativos en las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas de surfactantes. Al analizar los datos experimentales obtenidos por diferentes investigadores /10, 21, 22, 23, 63, 64, 65, 66, 67/ en otros procesos (transferencia de calor, agotamiento de mieles), se deduce la existencia de máximos y mínimos relativos para la tensión superficial, el ángulo

interfacial de contacto y la viscosidad en líquidos, donde se han adicionado surfactantes a diferentes concentraciones.

1.7.0 Los surfactantes en la industria azucarera

La operación industrial en el central azucarero se ve influenciada por una serie de factores que afectan la eficiencia industrial e incrementan los costos operacionales. Entre estos factores pueden mencionarse:

- Calidad de la materia prima.
- Infecciones por microorganismos a lo largo del proceso.
- Pérdidas de azúcar en bagazo, cachaza y mieles finales.
- Incrustaciones que aparecen en las superficies de intercambio de calor.
- Altas viscosidades que afectan los procesos de purificación, transferencia de calor, cristalización y centrifugación.

Debido a las grandes masas de materiales que se procesan en un central azucarero, es evidente que cualquier mejora o modificación que tienda a disminuir las dificultades operacionales y/o las pérdidas de azúcar, aún en cantidades que pudieran parecer insignificantes, en realidad representan ahorros considerables. Con ese fin se emplean en la industria azucarera un número elevado de productos químicos, entre los cuales adquieren cada vez mayor importancia los surfactantes. La presencia de surfactantes naturales en los productos azucarados, es conocida desde hace mucho tiempo. La aparición de espumas, adsorción de colorantes en la superficie de los cristales de azúcar, la floculación y otros fenómenos que forman parte del proceso azucarero, indican la presencia de este tipo de sustancias, que bien pueden ser parte de la caña de azúcar o formadas durante el proceso /10, 82, 140, 159/.

La aplicación de surfactantes comerciales a diferentes operaciones dentro del proceso de fabricación de azúcar crudo y refino, tuvo su auge allá por la década del 50 /5/.

1.7.1 Los surfactantes para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos

Un proceso introducido por Ruiz y otros /5, 135, 136, 137/ utilizaba surfactantes en el agua de imbibición en los molinos. Planteaban que al disminuir la tensión superficial, el agua penetra más en el bagazo con lo que aumenta la extracción. Además el paso de los surfactantes al jugo, producía masas cocidas de menor viscosidad. De esa época datan dos solicitudes de patente de Ruiz /135, 136/. En la memoria descriptiva se señala, que las dosis empleadas variaron de acuerdo con los productos empleados en las condiciones locales, pero que en general fueron de la magnitud de 40 a 200 partes por millón del peso de la caña molida (200 a 1000 ppm en el agua de imbibición, con una cantidad de agua de imbibición de un 20 % del peso de la caña). Según Ruiz y otros /137/, los trabajos no

continuaron debido a la escasez del surfactante, pero a partir de los resultados y experiencias anteriores, la Wyandotte Chemical Corporation realizó pruebas con el objetivo de determinar la influencia del surfactante en la extracción de sacarosa en bagazo. Demostró que la sacarosa aumentaba en el jugo residual, al mismo tiempo que disminuía en el bagazo y descartó la posibilidad de reacción del surfactante con la sacarosa. Los investigadores de la Wyandotte (citados por /137/), concluyeron que dosis tan bajas como 8 a 14 partes por millón sobre la base del peso en caña (40 a 70 ppm en el agua de imbibición), eran suficientes para obtener una reducción económica en las pérdidas de sacarosa en bagazo. Los resultados fueron publicados en 1954 /137/. Estos trabajos muestran que los autores no disponían de una metodología efectiva para la selección del surfactante y el rango de concentraciones a emplear /52/.

Ramaiah y otros en 1983 /130/, retomaron el tema de los surfactantes y presentaron buenos resultados a escala industrial con un surfactante patentado con el nombre comercial "Sushira", el cual es capaz de disminuir el % Pol y además la humedad del bagazo. Revelan que "Sushira" es una mezcla de surfactantes no iónicos y aniónicos, pero no informan su composición. Los resultados experimentales condujeron a desechar los surfactantes catiónicos. Este surfactante se adiciona al agua de imbibición, en el rango de 8 a 10 ppm peso en caña con un nivel de imbibición de 1,30 a 2,00 t agua / t fibra en caña. No mencionaron la fibra en caña. Antes de aplicar el surfactante, el % Pol en bagazo estaba en el rango de 2,33 a 3,5 y el % Humedad de 49 a 53,5. Obtuvieron una disminución del % Pol en bagazo de 0,5 a 0,87 unidades y de 2 unidades en el % Humedad al aplicar el surfactante. Se especifica que el "Sushira" es un surfactante que es sensible a las sales de calcio, lo que requiere agua procedente de condensados o agua de muy baja dureza.

En los trabajos antes referidos los autores no toman como indicador la concentración del surfactante en el agua de imbibición y su efecto en la tensión superficial, sino que emplean la concentración sobre la base del peso de la caña. Los mecanismos que propone Ramaiah /130/ no explican totalmente el efecto del surfactante en el proceso, ya que atribuye la disminución del % Pol y % Humedad en el bagazo a la disminución de las fuerzas de Van der Waals entre el jugo y la fibra provocado por el surfactante. La disminución de las fuerzas de Van der Waals entre la fibra y el jugo no debe tener un efecto significativo en los procesos de transferencia de masa que ocurren dentro del lecho fibroso, ni en el de extracción del jugo del bagazo en el molino.

Resulta interesante que, a pesar de haberse empleado sustancias diferentes y en distintas épocas, los rangos de concentraciones empleados prácticamente coinciden (8 a 14 ppm peso en caña, 1954 /135, 136, 137/ y 8 a 10 ppm peso en caña, 1983 /130/).

Pérez /126/, propone el empleo del agua magnetizada para disminuir el % Pol en bagazo pero no señala si existe alguna influencia sobre el % Humedad y atribuyó el efecto logrado a la disminución de la viscosidad, sin hacer referencia a la tensión superficial.

1.7.1.1 Efecto de los surfactantes en la tensión superficial y la viscosidad de jugos de caña

La presencia de un surfactante en el agua de imbibición que recibe el bagazo, modifica la tensión superficial y puede influir en la viscosidad del jugo retenido por éste /42, 52/. La concentración del surfactante en el agua de imbibición es conocida, sin embargo se desconoce la que se alcanza en el jugo retenido por el bagazo. Esta concentración está influenciada por la distribución no uniforme del líquido de imbibición dentro de la estructura porosa del colchón de bagazo, la profundidad a que éste logra penetrar y el porcentaje de mezclado que se alcanza entre éste líquido y el jugo libre. La medición de la concentración del surfactante en el jugo extraído, mediante la determinación de su tensión superficial se ve afectada además, por la presencia de sustancias naturales con actividad superficial que normalmente se encuentran presentes en los jugos de la caña de azúcar /82, 140/. La concentración de estas sustancias depende de un número indeterminado de factores, tales como la variedad de la caña, el ataque de plagas y enfermedades a los tallos, la actividad de la flora microbiana, la extracción de ceras en el tándem y las presiones en los molinos /52, 121, 129/. No obstante, la concentración promedio que alcanza el surfactante en el jugo y su efecto en la tensión superficial, dependen de la concentración de éste en el agua de imbibición.

Varios investigadores /10, 11, 19, 22, 23, 24, 37, 96, 156/ muestran resultados con la aplicación de surfactantes en los procesos de cristalización y corroboran que afectan la tensión superficial y la viscosidad de las mieles. Según Shang /144/, la presencia de un surfactante en compuestos de polímeros, modifica el trabajo de adhesión (el que ha sido definido por diversos autores /25, 57, 140, 145, 159/) y como consecuencia la viscosidad dinámica del compuesto. Shaw /145/ señala que la viscosidad puede ser influenciada fuertemente por la presencia de partículas cargadas. Davies /26/, muestra una ecuación para la viscosidad de líquidos que fluyen en capilares, la cual se ve afectada por los potenciales electrocinéticos de superficie que surgen. Galsstone /57/, refiere que la adición de una pequeña cantidad de un electrólito a un sol liófilo produce un notable descenso de la viscosidad, lo cual está asociado de alguna manera con una disminución del potencial de la doble capa.

1.7.2 Los surfactantes en la purificación de jugos, mieles y licores

El uso de surfactantes en los procesos de separación sólido - líquido por flotación es común e imprescindible. Éstos generalmente se aplican con el objetivo de formar espumas estables /13, 26, 57, 140, 145/. Sin embargo, su empleo en los procesos de separación sólido - líquido por sedimentación no está muy difundido. En la Industria del Azúcar de Caña estos productos tienen amplia aplicación en los procesos de purificación de jugos y licores por flotación, no así en los procesos por sedimentación /5, 9, 24, 28, 29, 72, 155, 156/

Desde la década del 50 se aplican productos tensoactivos en el proceso de purificación de jugos y licores, principalmente los polímeros de alto peso molecular empleados como flo-

culantes /5/.

No se conocen de aplicaciones en los procesos de purificación, donde los sólidos insolubles son separados del jugo por sedimentación, pero algunos resultados /16, 32, 114, 134, 162/ indican que los surfactantes, a bajas concentraciones, no interfieren negativamente estos procesos.

1.7.3 Los surfactantes en los procesos de transferencia de calor

Desde hace varios años se conoce de la influencia de las propiedades humectantes de las disoluciones y líquidos puros, en el coeficiente de transferencia de calor /63, 64, 65, 66, 67, 89/. Castellanos /21/ estudió el mojado de jugos de caña sobre superficies de cobre, aluminio y acero inoxidable en presencia de surfactantes. Empleó cuatro concentraciones para el surfactante y dos para los jugos, así como dos temperaturas diferentes. Los datos muestran un mínimo en el ángulo de contacto a 300 ppm y 60 °C, para dos de los tres surfactantes estudiados. A 100 °C se observan fluctuaciones del ángulo de contacto dentro del rango de concentraciones estudiado. Concluye que el surfactante mejoró la eficiencia del intercambio de calor, pero dependió de la concentración. González y Lodos /65, 66, 67/ estudiaron la humectación de superficies de intercambio de calor por soluciones de sacarosa con concentraciones de 30, 40, 50 y 60 °Bx a 60 y 100 °C, en presencia de dos surfactantes a las concentraciones de 0, 50, 100 y 150 ppm. Concluyeron que la presencia de surfactantes aumenta notablemente la humectación, aunque el efecto es menor a medida que aumenta el °Bx de los jugos. Estos autores señalan que el trabajo de adhesión para las soluciones de sacarosa sobre superficies metálicas, depende de la concentración de sólidos en la disolución de sacarosa, de la temperatura y de la concentración y tipo de surfactante. González y Herrera /63, 64/, a pesar de que señalan incrementos en el coeficiente de transferencia de calor en la ebullición nucleada de soluciones de sacarosa en presencia de surfactantes, advierten que las dosis elevadas de éstos no reportan beneficios adicionales.

1.7.4 Los surfactantes en el proceso de cristalización de la sacarosa

El proceso de cristalización de la sacarosa en tachos y en cristalizadores, tiene su limitante fundamental en la velocidad de cristalización. Ésta es influenciada por una serie de factores indirectos como la calidad de la caña, la contaminación por microorganismos en el área de extracción, así como la efectividad del proceso de purificación de los jugos, meladura y mieles. Su efecto luego se manifiesta en la composición de las mieles y sus propiedades físico – químicas.

La viscosidad tiene marcada influencia en la velocidad de cristalización. Se atribuye a los surfactantes comercializados para ser empleados en el área de cristalización, la propiedad de disminuir la tensión superficial e interfacial y la viscosidad, además de incrementar la velocidad de evaporación. Bordón /10/, señala un mínimo en la tensión superficial del licor madre para una concentración del surfactante de 200 ppm, en los tres niveles de sobresatu-

ración en que se efectuaron los experimentos. Los investigadores /10, 11, 19, 22, 23, 24, 37, 96, 155/ no manifiestan unanimidad de criterios en relación con la disminución de la viscosidad. Chen /22/ evalúa dos surfactantes y concluye que disminuyen el tiempo de cocción, mejoran las propiedades de purga, incrementan la pureza del azúcar centrifugado y la eficiencia del recobrado. Estos surfactantes disminuyeron la viscosidad del licor madre y facilitaron el crecimiento del cristal, pero no mostraron efecto cuando la calidad de la caña fue buena. Chou /23/, en investigaciones de laboratorio, obtuvo que con la adición de 0,05 % de éster de alfametilglucosa, la viscosidad μ del licor madre a 50 °C, se redujo en 18,5 % y la tensión superficial σ en un 45 %. Este autor, en otro estudio con cuatro surfactantes a 50, 100 y 150 ppm sobre la base del peso de las mieles y 40, 50, 60 y 70 °C, obtuvo que existe una dosis óptima que depende del tipo de surfactante y de la temperatura. Cuando aumentó la concentración del surfactante dentro de determinado rango a temperatura constante, se incrementó el porcentaje de reducción en la viscosidad. El mayor porcentaje de reducción, con los cuatro surfactantes estudiados, se obtuvo a 60 °C.

Casey /19/, señala que el Pan Aid, es un surfactante aniónico que reduce la viscosidad μ , la tensión interfacial gas-líquido σ y sólido-líquido σ_{sl} y reduce el espesor efectivo de la película de miel alrededor del cristal. El Pan Aid a 40 ppm en peso, en soluciones con 70% de sacarosa pura, reduce el valor absoluto de μ , σ y σ_{sl} en un 50%. Cuando la dosis es aumentada a 80 ppm, el efecto sólo aumenta aproximadamente al 60%, por lo que recomienda su uso entre 40 y 50 ppm respecto a la masa total. Este autor recomienda, en masas cocidas comerciales A y B, una dosis de Pan Aid entre 10 y 20 ppm para lograr masas menos pegajosas y cristales más uniformes. Plantea que en el proceso de centrifugación de masas cocidas de bajo grado, permite obtener cristales más uniformes y con menos miel adherida. Gil /52/, señala que la divergencia en los resultados de los diferentes investigadores acerca del efecto del surfactante en la viscosidad del licor madre, no es sorprendente si se tiene en cuenta la alta variabilidad en la calidad de la materia prima que procesan los centrales azucareros y las diferencias en las condiciones bajo las cuales se desarrollaron los experimentos, así como de los productos empleados y las concentraciones estudiadas.

1.8.0 El Bagazo de la caña de azúcar. Características

El bagazo es el material ligno-celulósico que se obtiene como residuo luego de la extracción del jugo de la caña de azúcar por los molinos. Por su carácter elástico, las células parenquimatosas siempre muestran tendencias a regresar a su estado original, una vez extraído el jugo, pero llenándose de aire /149/.

Como consecuencia del proceso de molienda de la caña, resulta un cambio estructural importante. Esta modificación se aprecia sobre todo en el tejido parenquimatoso. Cuando se observa el bagazo al microscopio, aparecen partículas finas, fibras desmenuzadas, cierta cantidad de médula desprendida y celdas con sus paredes rotas.

La composición granulométrica del bagazo depende de la variedad de la caña y en gran medida, del esquema de su preparación y molida e incluso del grado de desgaste que sufren los equipos de preparación y los rayados de las mazas de los molinos durante la zafra /76, 83, 87, 117/.

La composición del bagazo varía entre límites estrechos. En la práctica, aproximadamente la mitad es fibra y la otra mitad (jugo residual) está constituida por agua y sólidos solubles. Las proporciones de estos componentes varían según los procedimientos empleados en la molienda y de la calidad y variedad de la caña /147/. El bagazo que sale del último molino está suficientemente seco como para ser usado como combustible en los hornos /83/.

La producción actual de bagazo, con una humedad promedio del 50 %, logra la sustitución del petróleo para la generación de la energía necesaria en la producción de azúcar crudo. Sin embargo, todavía no se logran los excedentes necesarios para la sustitución total del petróleo en la producción de azúcar refinado y los derivados de la caña de azúcar. Además, su demanda como materia prima crece rápidamente en la industria de derivados (tableros, papel, furfural, etc.) /84/. Todos los esfuerzos que se realicen en el sentido del ahorro del bagazo como combustible, están totalmente justificados.

Tradicionalmente el uso más difundido del bagazo es como combustible, para la generación del vapor que demanda el proceso de producción de azúcar. Comparado con el petróleo y sus derivados, el bagazo posee un valor calórico relativamente bajo (aproximadamente 5,8 t de bagazo de 50 % Humedad equivalen energéticamente a una tonelada de petróleo /33/). Para los países que producen azúcar de caña y no poseen combustibles fósiles, éste resulta un valioso recurso energético. Sin embargo, los bajos precios del petróleo y la falta de incentivos económicos para desarrollar las producciones de derivados, en épocas anteriores, fueron las causas principales que no estimularon el ahorro de éste como combustible. Como resultados de esa tendencia, existe un elevado porcentaje de hornos y de calderas en los centrales azucareros con una eficiencia que no sobrepasa el 60 % /33, 36, 40/. Los estudios realizados, así como la práctica industrial en centrales donde ha sido modernizado el esquema energético y las calderas, han demostrado que es posible satisfacer la demanda energética y lograr un excedente de bagazo del 40 al 50 % del total producido. Esto depende de las instalaciones tecnológicas y de la eficiencia integral con que se haga la zafra. El uso de este bagazo sobrante para generar energía eléctrica en el propio central, es una perspectiva tentadora dados los precios actuales del petróleo /27, 122/.

Desde el punto de vista de la producción de vapor, la propiedad más importante del bagazo como combustible, es su contenido de humedad. En Cuba el promedio de humedad en bagazo es de alrededor del 50 % /94/, valor que indica, según Hugot /83/, deficiente trabajo de los molinos por que es posible alcanzar rangos entre 42 y 48 %, pero muy difícil reducirla a menos del 42 % con los molinos modernos. No obstante hay fábricas de Hawai y Formosa que han reportado valores excepcionales del orden de 38 a 40 %. Spencer /147/,

atribuye este fenómeno a una mayor eficiencia de los molinos, motivada por una menor velocidad de las mazas.

1.8.1 Valor Calórico del Bagazo

Según Spencer /147/, el valor calórico superior del bagazo de todas partes del mundo, muestra una uniformidad sorprendente con valores entre 19 075 kJ/kg (4 556 kcal/kg) y 19 540 kJ/kg (4 667 kcal / kg). El valor calórico neto del bagazo que se quema en los hornos depende, entre otras variables, de su contenido de humedad. Parte del calor generado en la combustión es consumido en la evaporación de esta agua y recalentamiento de su vapor. Otra variable importante es el exceso de aire que se suministra al horno. En el caso de los hornos que queman el bagazo en pila, por lo general no logran la combustión completa a menos que se suministre el 100 % o más de aire en exceso. Éste consume energía térmica para calentarse. En los hornos que queman el bagazo en suspensión se ha logrado reducir el exceso de aire, operando eficientemente en el rango de 15 a 30 % sobre la cantidad de aire estequiométrico requerido /27/. Ecuaciones y tablas sobre calor de combustión del bagazo aparecen con frecuencia en la literatura especializada /41, 83, 127,147/. Spencer /147/ proporciona una tabla de calor de combustión neto o inferior del bagazo, en función de un exceso de aire desde un 50 a un 200 % y el contenido de humedad en bagazo en el rango de 40 al 54 %. Perk /127/, muestra una tabla que relaciona el calor de combustión bajo o neto del bagazo (VCN) con el % Pol y el % Humedad del mismo. Gibert /41/, plantea que un incremento del % Humedad en bagazo de 45 a 52 % provoca una pérdida de un 4,5 % del bagazo disponible para compensar el aumento de humedad. Hugot /83/, reseña valores de calor de combustión superior promedio del bagazo de 19 289 kJ/kg (4 607 kcal/kg) en cinco países durante el período de 1935 a 1946.

El secado térmico del bagazo es la vía más efectiva para disminuir el contenido de humedad en un amplio rango, sin embargo requiere de costosas instalaciones y el costo operacional es elevado /36/. Una alternativa a considerar, es el uso de surfactantes para intensificar el proceso de extracción.

Conclusiones Parciales del Capítulo 1

1. En la bibliografía, los autores no profundizan en las implicaciones que tiene la estructura del colchón de bagazo y las características del líquido de imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el molino.
2. La mayoría de los investigadores coinciden en afirmar que el % Pol en bagazo no varía apreciablemente al incrementar el nivel de imbibición (t agua / t caña) por encima del 30 %.
3. Los surfactantes aniónicos y no - iónicos son ampliamente utilizados en las diferentes etapas del proceso de producción de azúcar, mientras que no aparecen referencias so-

bre los catiónicos (excepto en los molinos) y más aun, Ramaiah y otros /130/ no los recomiendan para intensificar el proceso de extracción.

4. Resultados de diferentes autores corroboran la influencia de los surfactantes sobre la viscosidad de diferentes líquidos e incluso son vendidos surfactantes en el mercado con ese propósito.
5. La existencia de puntos de extremos relativos en las curvas tensiométricas de surfactantes iónicos en disoluciones acuosas, ha sido observada por diferentes autores para concentraciones cercanas a la micelar crítica. Los efectos de surfactantes en jugos en procesos de humectación de superficies metálicas y de cristalización de la sacarosa, ponen de manifiesto la existencia de estos puntos para la tensión superficial y la viscosidad en determinadas concentraciones del surfactante. Sin embargo, ninguno de estos autores lo ha señalado.
6. En la literatura consultada no aparecen descritos los mecanismos mediante los cuales el surfactante incrementa la eficiencia del proceso de extracción en el molino.
7. Los investigadores /130, 137/ relacionan la concentración del surfactante utilizado para intensificar el proceso de extracción respecto al peso de la caña, pero no tienen en cuenta la modificación de la tensión superficial que experimenta el agua de imbibición, lo cual podría determinar su efecto en el proceso de extracción.
8. Los resultados acerca del empleo de los dos surfactantes ensayados para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos /130, 137/, indican que este procedimiento es adecuado desde el punto de vista técnico - económico. Sin embargo, no está esclarecido si la intensificación del proceso de extracción de la sacarosa se logra sólo con ciertos y determinados surfactantes o es una propiedad atribuible a cualquiera de ellos que sea capaz de disminuir la tensión superficial del agua de imbibición.
9. No existe una metodología que tenga en consideración el comportamiento de la tensión superficial de las disoluciones acuosas para la selección del surfactante y del rango de concentraciones, para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa y del jugo retenido por el bagazo de la caña de azúcar en tándem de molinos.
10. El bagazo de la caña de azúcar se valoriza cada vez más para su empleo como combustible y como materia prima en la industria de los derivados de la caña de azúcar.
11. Las ventajas económicas del uso de los surfactantes para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos, justifican la continuidad de las investigaciones encaminadas a determinar una metodología para la selección del surfactante y el rango de concentraciones a emplear en el agua de imbibición, así como llegar a describir los mecanismos que permitan interpretar como actúa el surfactante en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el tándem de molinos.

12. No aparecen publicados trabajos relacionados con el empleo de surfactantes, del tipo jabones o detergentes sintéticos, en el proceso de purificación de los jugos por sedimentación, pero su uso es generalizado en los procesos por flotación.

Tareas desarrolladas para verificar la hipótesis y dar cumplimiento a los objetivos planteados

1. Se realizó un análisis de la bibliografía sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, con énfasis en los procesos que se desarrollan en el sistema agua de imbibición - jugo - fibra sobre el conductor de bagazo y en el molino, así como el uso de surfactantes en el proceso de producción de azúcar crudo de caña.
2. Se determinaron las curvas tensiométricas a temperatura constante, de las disoluciones acuosas de los surfactantes Jabón A, Jabón B, Jabón C, Detergente, Pan Aid y el Sulker Floc, dentro del rango de concentraciones de 0 a 80 ppm a intervalos de 10 unidades.
3. Se estudiaron a escala de laboratorio:
 - El efecto de la concentración del surfactante, en el agua de imbibición, en la compresibilidad del bagazo.
 - Diferentes concentraciones de los surfactantes Jabón C, el detergente sintético, el Tensol y el Busperse 49 en el agua de imbibición, con relación al efecto que producen en los % Pol y % Humedad del bagazo residual.
4. Fueron evaluadas a escala industrial:
 - Diferentes concentraciones de los surfactantes Jabón A, Jabón B, Jabón C, Detergente Doméstico, Pan Aid, Sulker Floc, el jabón de Sulker Floc y el residuo jabonoso de la producción del PPG en el agua de imbibición, con relación al efecto que producen en los % Pol y % Humedad del bagazo residual, para determinar las concentraciones más efectivas.
 - El efecto del nivel de imbibición, la temperatura, la concentración del surfactante en el agua de imbibición y la presión en la desmenuzadora, en el % Pol y % Humedad del bagazo residual del proceso de extracción en tándem de molinos.
5. Se realizó la evaluación económica del efecto logrado con el empleo del surfactante como auxiliar del proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos.
6. Debido a la influencia que el surfactante añadido en el tándem, podría ejercer en el proceso de purificación de los jugos, este aspecto se incluyó en la investigación, aunque no se enmarca dentro de los objetivos.

CAPÍTULO 2 MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES A ESCALA DE LABORATORIO

2.1.0 Métodos del Análisis de Procesos

El Análisis de Sistemas de Procesos o simplemente Análisis de Procesos es la aplicación de métodos científicos de detección y definición de problemas, así como el establecimiento de procedimientos para su solución. Lo anterior puede desglosarse en:

- a) Planteamiento del problema.
- b) Análisis del sistema para obtener las hipótesis, modelos matemáticos, etc.
- c) Síntesis y presentación de resultados.

El Análisis de Procesos se puede realizar bajo un aspecto unilateral del proceso o con un enfoque multilateral más complejo. En los últimos años como resultado del desarrollo científico y su aplicación en la práctica, se ha incrementado la realización de un análisis con un enfoque multilateral de los procesos industriales, que se ha dado en llamar Análisis Complejo de Procesos. La adaptación de este método científico a las condiciones de un país en vías de desarrollo, ha sido elaborada por González /59/.

Basado en los métodos del Análisis Complejo de Procesos se planificó el desarrollo de esta investigación, siguiendo los pasos del diagrama heurístico.

Los surfactantes que son capaces de intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, deben tener propiedades humectantes (número de BHL > 6). Esto se puede determinar aproximadamente, a partir del aspecto óptico de sus disoluciones acuosas /97, 145/.

En esta etapa de la investigación, fue determinado el número de BHL de los surfactantes y además, se determinaron las curvas tensiométricas para las disoluciones acuosas. Se realizaron experimentos de extracción de la sacarosa del bagazo de la caña de azúcar, imbibiendo con las disoluciones del surfactante y con agua como testigo en cada bloque experimental. De los surfactantes disponibles se eligieron cuatro al azar, para determinar su influencia en el proceso de purificación de los jugos.

Se aplicó un diseño estadístico de experimentos en bloques al azar /154/ para conocer el efecto de los diferentes surfactantes y tratamientos en estudio, en el proceso de extracción de la sacarosa del bagazo y la purificación del jugo mezclado y de forma preliminar el de mayor efectividad.

2.2.0 Tensión Superficial

2.2.1 Tensiómetro empleado para las mediciones

Se empleó un tensiómetro de Rebinder. Este tipo de tensiómetro es muy sensible a los cambios de temperatura que puede experimentar el aire dentro de la burbuja que se forma

en el seno del líquido de ensayo. Esto requiere que el aire y la disolución a ensayar estén a la misma temperatura. Para garantizarlo, se corrigió la temperatura del aire haciéndolo pasar previamente por un conducto metálico sumergido en el mismo baño en que estaba la celda de burbujeo.

Se prefijó un goteo constante del líquido del frasco que hace las veces de bomba de vacío de forma que fuera el mismo para todos los casos: 1 gota cada 3 a 4 s y el mismo nivel del líquido en la celda de medición /14/. Con los valores de h obtenidos, la tensión superficial fue calculada conforme a la ecuación /14/:

$$\sigma = \sigma_0 h_0 / h \quad (2.1)$$

Donde:

h_0 ... es la lectura en la parte cóncava del menisco de la columna líquida del manómetro, para el agua con tensión superficial σ_0 /103, 119/, al romper la burbuja.

h ... es la lectura que se obtiene para el líquido que se ensaya.

En las lecturas para h , el error estándar de la media se mantuvo en el rango de 0,02 a 0,05%, con una desviación típica promedio de 0,14 y un coeficiente de variación de 0,2 a 0,5 % lo que indica muy poca variabilidad de los datos.

La desviación máxima ocurrió a 70°C con un 0,55 %. Glasstone /57/ señala que errores del 5 % pueden aparecer en mediciones de este tipo. Los datos obtenidos con el tensiómetro se ajustan a los normales que aparecen en la literatura, pues no hay diferencia estadística entre ellos (Anexo 1, Tabla 1). Los resultados aparecen en la Fig. 2.1. Cada punto representa el promedio de cinco mediciones. Se tomaron como referencia los datos de tensión superficial σ , en función de la temperatura, publicados en la literatura /103, 119/.

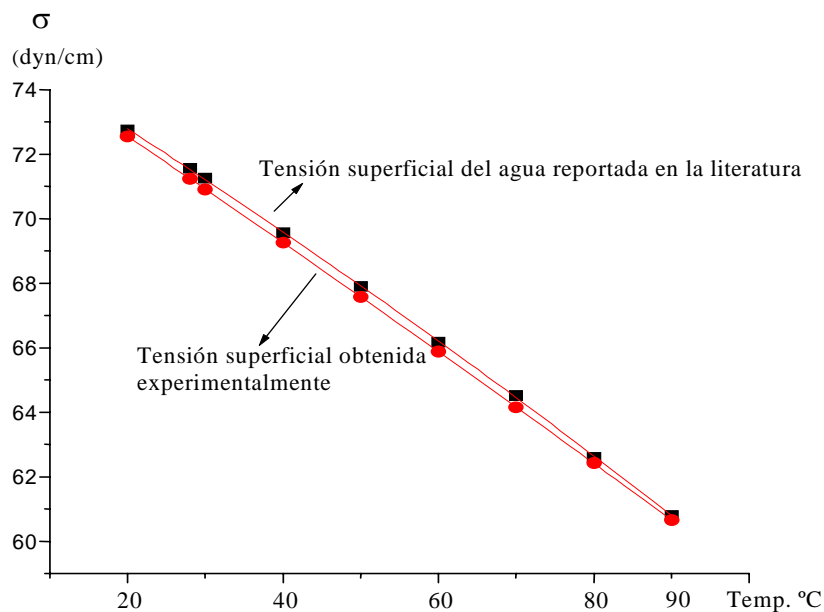


Fig. 2.1 Tensión superficial del agua.

2.2.2 Surfactantes empleados

En la investigación se emplearon surfactantes utilizados comúnmente como auxiliares en el proceso de cristalización del azúcar: Busperse, Tensol, detergente sintético, Pan Aid y el Sulker Floc. Además, se incluyeron tres jabones sódicos obtenidos a partir de fracciones de la cera cruda de la caña de azúcar, uno del Sulker Floc y un residuo jabonoso del proceso de producción del PPG. No se tiene información acerca de la composición del Pan Aid y el Sulker Floc, pero se comprobó que reaccionan con el hidróxido de sodio y forman jabones. Las materias primas de los jabones obtenidos a partir de las fracciones de la cera cruda de caña, garantizan que éstos no sean tóxicos a las concentraciones prefijadas y sean biodegradables /140/.

2.2.2.1 Preparación de las disoluciones de surfactantes

En todos los casos fue preparada una disolución inicial mezclando 1 g del surfactante a completar 1 kg de disolución con agua destilada (1 000 ppm). Luego se mantuvo en agitación durante 5 min. En el caso de los jabones y el detergente, la masa empleada para preparar la disolución inicial se determinó tomando en consideración su contenido de humedad. A partir de la disolución inicial se obtuvieron las ensayadas.

Las disoluciones acuosas iniciales del Pan Aid, el Busperse 49 y el detergente sintético son translúcidas lo que corresponde a un número de BHL en el rango de 10 a 13, característico de los detergentes, mientras que las demás presentan un aspecto lechoso inestable luego de agitación vigorosa. Esto indica que poseen aproximadamente un número de BHL en el rango de 6 a 8, por lo que se consideran como humectantes /97, 140, 145/.

2.3.0 Tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes en el rango de concentraciones de 0 a 80 ppm

Debido a la influencia negativa que ejerce la diferencia entre la temperatura del aire y la del líquido de ensayo, en la estabilidad de las lecturas en el tensiómetro y las dificultades en medir la tensión superficial de disoluciones diluidas de surfactantes /159/, se decidió medir la tensión superficial a la temperatura ambiente del local (como promedio 30 °C). Esto permitió rectificar con mayor precisión la temperatura del aire en el baño.

El valor de la tensión superficial en cada ensayo, fue calculado promediando veinte lecturas consecutivas de h , al romperse la burbuja /14/. Para disminuir el posible error que la constante del tensiómetro pudo introducir en los resultados, la relación $[\sigma_0/h_0]$ fue determinada antes de realizar las mediciones en las disoluciones. Se empleó como líquido patrón el agua destilada con la que fueron preparadas las disoluciones del surfactante. La tensión superficial de las disoluciones acuosas se determinó para el rango de concentraciones del surfactante de 0 a 80 ppm en masa, seleccionado sobre la base de los rangos de concentraciones empleadas por otros autores /130, 135, 136, 137/. Se comprobó que los surfactantes,

en el rango de concentraciones empleado en el agua de imbibición, no alteran la lectura polarimétrica de los jugos.

Las disoluciones fueron ensayadas de menor a mayor concentración. Entre una prueba y otra se evacuó el líquido de la celda de medición y del capilar. Posteriormente se enjuagaron varias veces con la disolución a medir. Al terminar con cada surfactante se lavaron con abundante agua destilada; luego tratados con ácido y finalmente, enjuagados varias veces con agua destilada.

En las mediciones de la tensión superficial de las disoluciones, la determinación de h en el aparato tuvo una desviación típica dentro del rango de 0,05 a 0,11, con un error estándar de la media de 0,011 a 0,025 y un coeficiente de variación de 0,24 % a 0,52 %. La magnitud de la variación de h , de una concentración a la siguiente, fue mayor que el mayor error estándar de la media.

Las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas de los surfactantes ensayados muestran una tendencia, en general, a decrecer conforme aumenta la concentración. Los datos experimentales para cada surfactante tuvieron un ajuste muy pobre a una línea recta, excepto para el Pan Aid (Fig. 2.2). No obstante, éstas se representan en la Fig. 2.2 para mostrar la tendencia de la tensión superficial al variar la concentración para cada surfactante.

Surfactante	Pendiente de la recta, m	Coeficiente de correlación, R	$R_{\text{crítico}}$ $\alpha = 0.05$	Coeficiente de determinación, R^2
Pan Aid	- 0.2277	0.936	0.6021	0.8760
Jabón A de aceite de caña	- 0.0048	0.069	0.6021	0.0048
Jabón B de aceite de caña	- 0.0038	0.051	0.6021	0.0026
Jabón C de aceite de caña	- 0.0066	0.211	0.6021	0.0450
Sulker Floc	- 0.0570	0.867	0.6021	0.7520
Detergente	- 0.0151	0.551	0.6021	0.3040

El mejor ajuste fue obtenido con curvas polinómicas, debido a la existencia de puntos de extremos relativos (Fig. 2.2.1). La tabla siguiente muestra las características de los polinomios cuyas curvas están graficadas en la Fig. 2.2.1.

Surfactante	Grado del polinomio	Coeficiente de correlación, R	$R_{\text{crítico}}$ $\alpha = 0.05$	Coeficiente de determinación, R^2	Desviación estándar,
Pan Aid	5	0.99894	0.6021	0.99787	0.50187
Jabón A de aceite de caña	5	0.94286	0.6021	0.88898	1.278
Jabón B de aceite de caña	5	0.96114	0.6021	0.92378	1.01301
Jabón C de aceite de caña	7	0.99323	0.6021	0.98651	0.31257
Sulker Floc	5	0.95588	0.6021	0.9137	1.05662
Detergente	7	0.99019	0.6021	0.98047	0.29653

2.3.1 Curvas tensiométricas de las disoluciones de los surfactantes

2.3.1.1 Ajuste de los datos a rectas de regresión

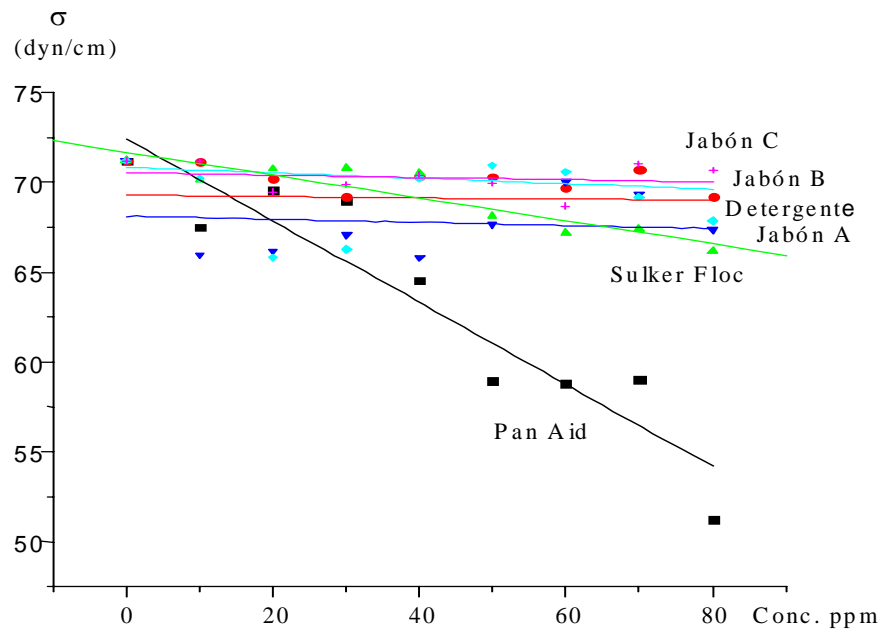


Fig. 2.2 Tendencias, según rectas de regresión, de la tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes.

2.3.1.2 Ajuste de los datos polinomios de regresión

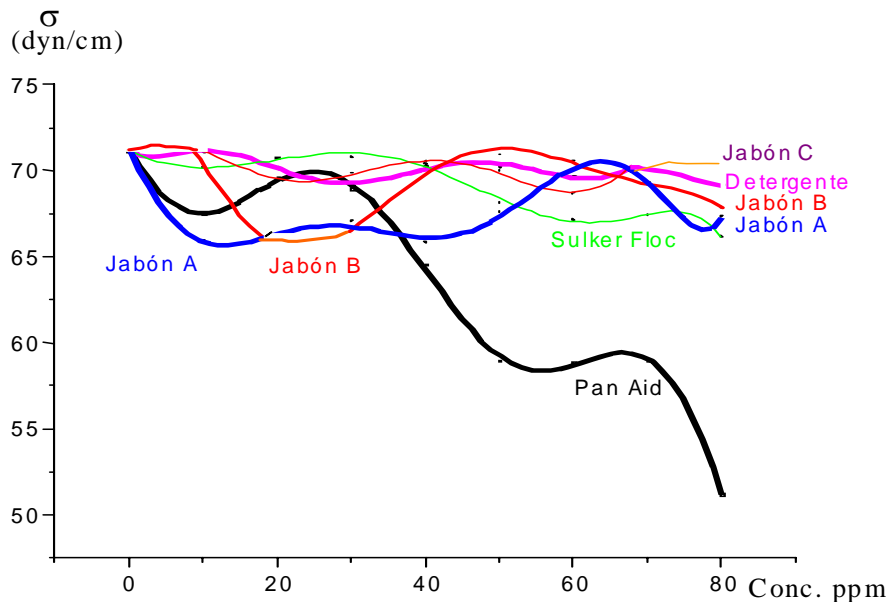


Fig. 2.2.1 Tendencias, según polinomios de regresión, de la tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes.

Las curvas tensiométricas de la Fig. 2.2.1, son las que mejor representaron el comporta-

miento de las tensiones superficiales de las disoluciones acuosas de los surfactantes estudiados, para los fines de esta investigación, debido a que se aprecian mejor los intervalos de concentraciones para los que son menores las tensiones superficiales.

Los datos de tensión superficial de las disoluciones acuosas del Pan Aid, presentan menor dispersión que los del Sulker Floc. Los correspondientes al Jabón A de aceite de caña, la tienen en mayor grado que los dos surfactantes anteriores, pero en menor medida que los correspondientes a los jabones B y C. Las menores tensiones superficiales se encontraron a concentraciones menores de 30 ppm en las disoluciones acuosas del Jabón A de aceite de caña, pero a valores mayores en las del Pan Aid (Figs. 2.2 y 2.2.1). Sin embargo, las del Jabón B prácticamente no se diferencian de las del Jabón A en el intervalo de concentraciones de 20 a 30 ppm, aunque estadísticamente en el intervalo de 0 a 80 ppm no existe diferencia significativa entre los datos de la tensión superficial, a partir del 85 % de confianza. Las disoluciones de Sulker presentan mayores tensiones superficiales que las respectivas disoluciones de los demás surfactantes hasta alrededor de 40 ppm. Las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas del Jabón C y el detergente sintético, en el rango de concentraciones estudiado, tienen un comportamiento muy parecido y no existe diferencia estadística entre los datos de la tensión superficial, incluso, al nivel de significación $\alpha = 0,50$ (Anexo 1, Tabla 2 A y B).

2.4.0 Efecto del surfactante Jabón B de aceite de caña sobre la compresibilidad del bagazo, la tensión superficial y la viscosidad del jugo extraído

2.4.1 Efecto de la presencia de un surfactante en el agua de imbibición en la compresibilidad del bagazo

Para el estudio fue empleada la prensa del laboratorio del central azucarero. Se ensayaron muestras de bagazo tomadas a la salida del penúltimo molino del tándem, antes de la región donde se aplica el agua de imbibición. Desde el punto de vista práctico este es el bagazo que resulta de interés, pues es el que se somete a compresión en el último molino y decide las pérdidas de sacarosa en bagazo final.

En cada corrida experimental, se tomó aleatoriamente una muestra de 5 kg a la salida del molino durante 10 min, a todo lo ancho del colchón de bagazo, en los extremos y centro de la estera. El bagazo fue imbibido posteriormente en el laboratorio.

El cilindro con perforaciones radiales (Fig. 2.3) donde se sometió a compresión el bagazo, tiene una altura útil (H) de 145 mm y un diámetro de 101,5 mm. El diámetro del pistón hidráulico de la prensa es de 116,5 mm. En todos los casos la masa de bagazo fue de 200 g y se consideró como espesor

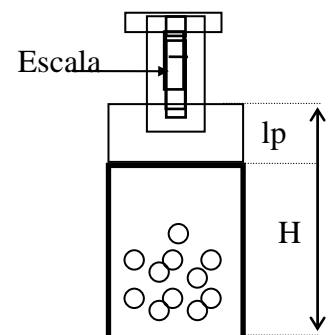


Fig. 2.3 El cilindro y el pistón

del bagazo suelto, H, la altura útil del cilindro. Para el bagazo comprimido, a la presión P, el espesor se calculó mediante la expresión:

$$h = H - l_p - l_e$$

Donde:

h... espesor del bagazo comprimido.

H... altura útil del cilindro.

l_p ... altura del pistón, 54 mm.

l_e ... lectura en la escala del pistón, para la presión P.

2.4.1.1 Preparación de las muestras

Se redujo el tamaño de cada muestra a 600 g aproximadamente y fueron separadas dos porciones de 200 g de cada una.

Se empleó el surfactante Jabón B de aceite de caña. Este fue el surfactante del que se dispuso en mayores cantidades y se empleó luego a escala industrial durante el mayor período de tiempo. Las concentraciones 0, 20, 40 y 80 ppm (mg de surfactante / kg de disolución) fueron seleccionadas a partir del comportamiento de la tensión superficial de las disoluciones acuosas (Fig. 2.2.1).

2.4.1.2 Procedimiento con el bagazo en la prensa

- Se introdujeron en el cilindro de la prensa 200 g de bagazo.
- Una muestra se imbibió con agua destilada y la otra con la disolución del surfactante.

Cálculo de la cantidad de agua necesaria

Balance de fibra:

Base de cálculo: 100 g caña

Según Pedrosa /120/, la masa de fibra en bagazo es igual a la masa de la fibra de la caña exprimida.

$$\text{Masa de fibra en caña} = \text{Masa de fibra en bagazo} = (\text{Masa Bagazo} \cdot \% \text{ fibra en bagazo})/100 \quad (2.3)$$

Se añadió una cantidad de agua o disolución equivalente al doble del peso de la fibra en caña, que correspondió a los 200 g de bagazo.

$$M_{\text{agua}} = 2 \text{ Masa de fibra en caña} \quad (2.4)$$

- La presión P en la prensa se varió desde 0 (de 100 en 100 lb/in²) hasta la presión máxima de 19,0834 MPa (2100 lb/in²).
- Se colectó el jugo extraído para los ensayos de tensión superficial y viscosidad.

2.4.1.3 Resultados

El muestreo garantizó que las muestras de bagazo ensayadas dentro del mismo bloque experimental provinieran de una misma población, pero de poblaciones diferentes entre los diferentes bloques debido a la variabilidad en las características de las cañas molidas. Los jugos extraídos tuvieron un °Bx de 4,6 a 5,52 y pH de 5,4 a 5,6. No se observaron diferencias entre el pH de los jugos procedentes de bagazos imbibidos con las disoluciones del surfactante y de los jugos obtenidos de bagazos imbibidos con agua. El análisis estadístico de los datos experimentales, por filas, mostró que el coeficiente de variación estuvo en el rango de 5,3 a 10,9 % y el error estándar de la media entre 0,09 y 0,24. La variación del espesor del bagazo comprimido, para una misma presión a diferentes concentraciones del surfactante, fue mayor que el nivel máximo del error. El efecto de los tratamientos con el surfactante comienza a influir sobre la compresibilidad del bagazo, a partir del espesor donde éste se satura de jugo. El bagazo fue más compresible a 20 ppm, al nivel de significación $\alpha = 0,001$. Hay diferencia estadística al nivel de significación $\alpha = 0,05$ entre los datos de las curvas correspondientes a los tratamientos 0, 40 y 80 ppm. Con este último, el bagazo fue menos compresible al nivel de significación $\alpha = 0,05$ (Tabla 4, Anexo 1). Para presiones mayores, estas tres curvas tienden a unirse (Fig. 2.4). El comportamiento de los resultados guarda relación con el de la curva tensiométrica (Fig. 2.2.1).

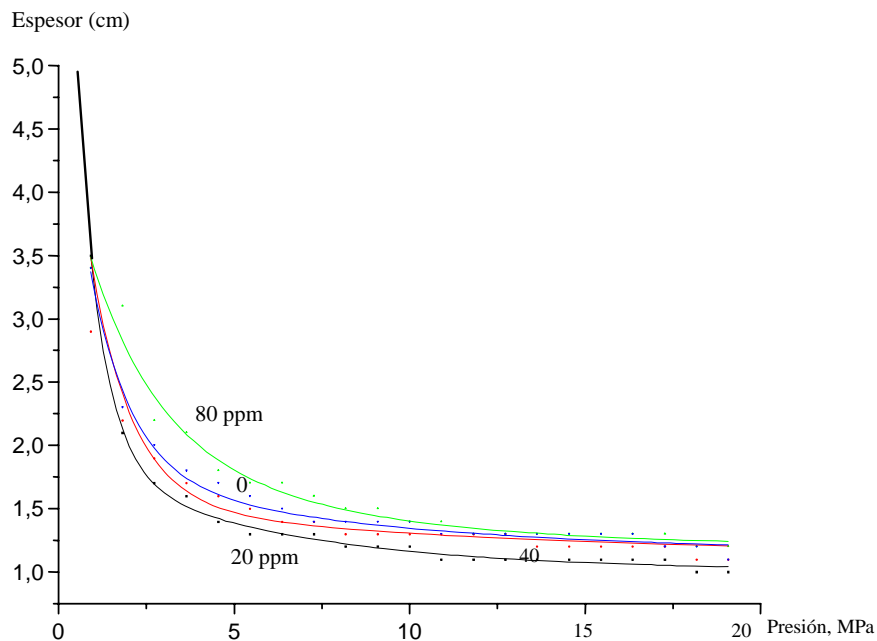


Fig. 2.4 Espesor del bagazo comprimido vs P, a diferentes concentraciones del Jabón B.

En la Fig. A2 Anexo 1, aparece una ampliación de la disposición de las curvas en la zona de presiones mayores de 10 MPa.

2.4.2 Tensión Superficial de los jugos extraídos de bagazos imbibidos con las disoluciones del surfactante

La variación de la tensión superficial de los jugos procedentes del bagazo imbibido con la disolución del surfactante mostró un comportamiento anómalo. A 40 y 80 ppm las tensiones superficiales de los jugos fueron mayores que a 0 ppm. La relación entre el comportamiento de las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas del surfactante y de la tensión superficial de los jugos fue tan estrecha que se mantuvo aun cuando se ensayaron bagazos diferentes (ver Figs. 2.2.1 y 2.5). Los resultados promedios aparecen en la Fig. 2.5.

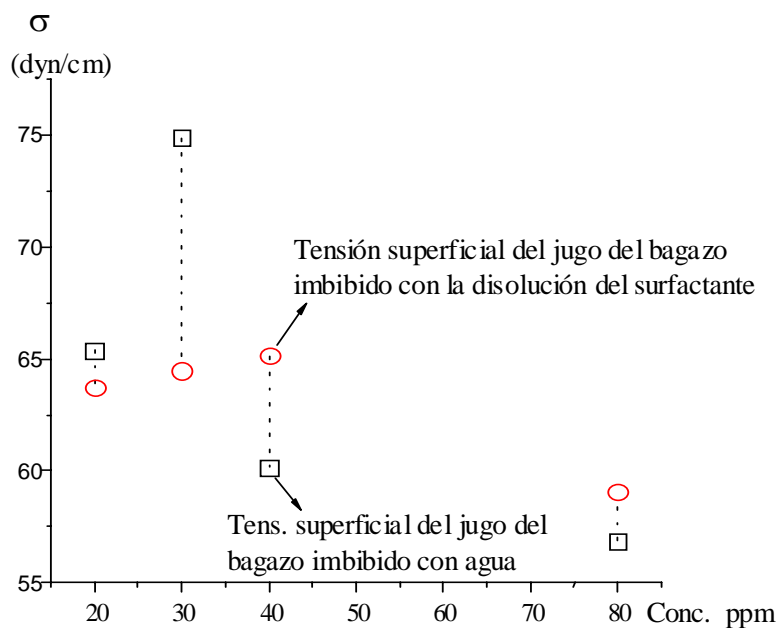


Fig. 2.5 Influencia de la adición de un surfactante al agua de imbibición, en la tensión superficial del jugo extraído del bagazo

2.4.3 Viscosidad de los jugos extraídos

La viscosidad de los jugos fue medida en un viscosímetro capilar modelo Cannon – Fenske. La constante del viscosímetro fue determinada para las condiciones experimentales a 30 °C, utilizando agua destilada como líquido patrón, $K = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Con cada muestra de líquido se realizaron diez mediciones del tiempo de descenso del jugo en el viscosímetro y se tomó el promedio de éstas. La medición del tiempo se realizó con un cronómetro de sensibilidad 0,2 segundos. La desviación típica en la medición del tiempo estuvo entre 0,14 a 0,31.

Entre una prueba y otra se evacuó el contenido del líquido, se lavó a fondo el viscosímetro, se trató con ácido y luego con agua destilada. Antes de los ensayos con el agua o el jugo, el viscosímetro se enjuagó previamente con porciones de la muestra a ensayo.

2.4.3.1 Resultados

Los jugos que contenían surfactante presentaron menores viscosidades que los jugos donde éste no estaba presente. Las mayores variaciones en la viscosidad del jugo ocurren con el mismo intervalo de concentraciones donde fue mayor la variación de la tensión superficial del jugo. Los promedios de los datos experimentales de la viscosidad de los jugos, aparecen en la Fig. 2.6.

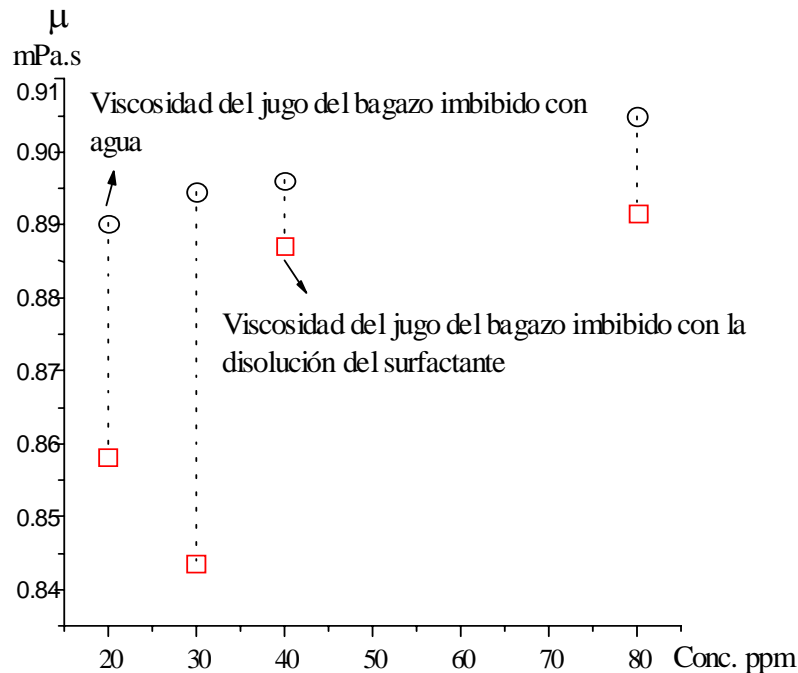


Fig. 2.6 Influencia de la adición del surfactante al agua de imbibición, en la viscosidad del jugo extraído del bagazo

2.5.0 Efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición en el % Pol y % Humedad del bagazo residual

Se estudió el efecto sobre los % Pol y % Humedad del bagazo, de la imbibición con diferentes disoluciones de los surfactantes Tensol, Busperse, detergente sintético, Pan Aid y Jabón C de aceite de caña. Los experimentos se realizaron en las instalaciones del laboratorio de control de la calidad del central azucarero.

2.5.1 Metodología experimental

Ejemplo para el Jabón C y el detergente sintético.

Las concentraciones de los surfactantes (0, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm), las que constituyeron los tratamientos, se seleccionaron de acuerdo con el comportamiento de las curvas tensio-métricas de sus disoluciones acuosas. Se emplearon ocho réplicas (bloques) con muestras representativas. Cada bloque correspondió a un día diferente y dentro de un turno de trabajo seleccionado al azar. El bagazo fue imbibido con agua o las disoluciones a 70 °C y un

nivel de imbibición (masa de agua/masa fibra en caña)= 2. En cada bloque se tomó como testigo la concentración 0 ppm.

2.5.1.1 Determinaciones previas en el tándem

1. Fue determinado experimentalmente:

- El tiempo de retención de la caña molida en el tren de molinos, para lo cual se marcó el colchón de bagazo con un colorante a la salida del primer molino y se midió el tiempo que demoró en salir el bagazo marcado por el último molino. El tiempo promedio fue de 3,5 min.
- El tiempo de retención del bagazo en el último molino. El tiempo promedio fue de 10 s.

2. Método para determinar la presión efectiva del molino

Previo a los ensayos de extracción, se tomaron muestras aleatorias de bagazo a la salida del último molino con el objetivo de determinar la presión estática correspondiente a la presión efectiva en el molino. Ésta es aquella para la cual se satura el bagazo y se determina cuando aparece la primera gota de jugo. Para cada muestra el tamaño fue reducido a 500 g y separadas dos porciones de 200 g. Cada masa de 200 g fue sometida a compresión lenta en la prensa hasta la saturación del bagazo. Ésta fue de 0,4 unidades en la escala de 10 t de la prensa lo que equivale a 0,76 MPa (110,23 lb/in²) /42, 52/. Este procedimiento no aparece referido en la bibliografía consultada.

2.5.1.2 Toma de la muestra

Bagazo a la salida del penúltimo molino.

Las muestras fueron tomadas a la salida del penúltimo molino del tándem, antes del punto donde se adiciona el agua de imbibición. Se muestreó a todo lo ancho del colchón de bagazo, de forma aleatoria, acumulando durante un tiempo de 10 min, aproximadamente 5 kg de bagazo. Cada muestra se guardó en una bolsa plástica.

2.5.1.3 Procedimiento en el laboratorio

7. Reducción del tamaño de la muestra en el laboratorio

La muestra de bagazo se homogeneizó, dividió en seis porciones aproximadamente iguales por el método de paladas alternas y se guardaron en bolsas plásticas en un lugar fresco, para disminuir en lo posible las pérdidas de humedad. La selección posterior para los ensayos fue al azar.

Procedimiento con el bagazo en la prensa

En cada prensada se introdujeron en el cilindro 200 g de bagazo. El bagazo fue imbibido

dentro del cilindro con agua o con la disolución del surfactante según correspondió. Luego de imbibir, se esperó un tiempo de aproximadamente 35 s, que es el tiempo de retención en la estera conductora entre el 5to. y 6to. molino, antes de iniciar la compresión. Fue prensado a la presión de 0,4 unidades en la escala de 10 de la prensa, durante aproximadamente 10 s en todos los casos.

Se eliminó el jugo extraído y se limpió el recipiente. La torta de bagazo se homogeneizó y se separó una porción para los análisis de humedad. El resto se prensó hasta la presión máxima de la prensa. Se recogió el jugo extraído para las determinaciones de Pol. Se repitió el procedimiento 3 veces para lograr las cantidades de jugo y de bagazo necesarias para los análisis de Pol y de humedad.

2.5.2 Resultados

Las pruebas de laboratorio indicaron que los surfactantes, no alteraron la lectura polarimétrica ni los porcentos de cenizas en los jugos extraídos. Con el detergente, en las determinaciones del % Pol en bagazo, existió un error estándar de la media en el rango de 0,02 a 0,05, mientras que para el Jabón C estuvo dentro del rango de 0,01 a 0,019. En las del % Humedad fue de 0,037 a 0,05 para el detergente y de 0,012 a 0,034 para el Jabón C. Todos los tratamientos con ambos surfactantes, mostraron efectividad para disminuir los % Pol y % Humedad del bagazo. El análisis de varianza dio diferencia altamente significativa entre los resultados de los tratamientos para ambos surfactantes (Tabla 5 A a D, Anexo 1). Los mejores resultados de % Pol en bagazo para el detergente se obtuvieron a concentraciones mayores de 10 ppm, mientras que para el Jabón C están entre 20 y 30 ppm. El tratamiento más efectivo para la disminución del % Pol en bagazo correspondió a 40 ppm para el detergente y 30 ppm para el Jabón C. No se obtuvo igual comportamiento respecto al % Humedad. El detergente fue más efectivo entre 20 y 40 ppm. A 50 ppm el Jabón C fue más efectivo que el detergente. El mejor tratamiento fue el de 30 ppm para el detergente y 50 ppm para el Jabón C. La comparación entre el efecto del detergente y el jabón se realizó por pruebas de hipótesis (Tabla 5 E a O, Anexo 1). En general, el detergente mostró mayor efectividad que el jabón C de aceite de caña.

En las Figs. 2.7 y 2.8 aparecen graficados los valores promedio de las disminuciones de los % Pol y % Humedad del bagazo, calculadas como: % Pol sin surfactante - % Pol con surfactante. Igual procedimiento con el % Humedad.

El Anexo 1 tabla 6, recoge los resultados de las pruebas iniciales de la investigación. Se emplearon el Tensol, Busperse, Pan Aid y detergente a concentraciones de 40 y 80 ppm. En todos los casos el tratamiento más efectivo fue a 80 ppm.

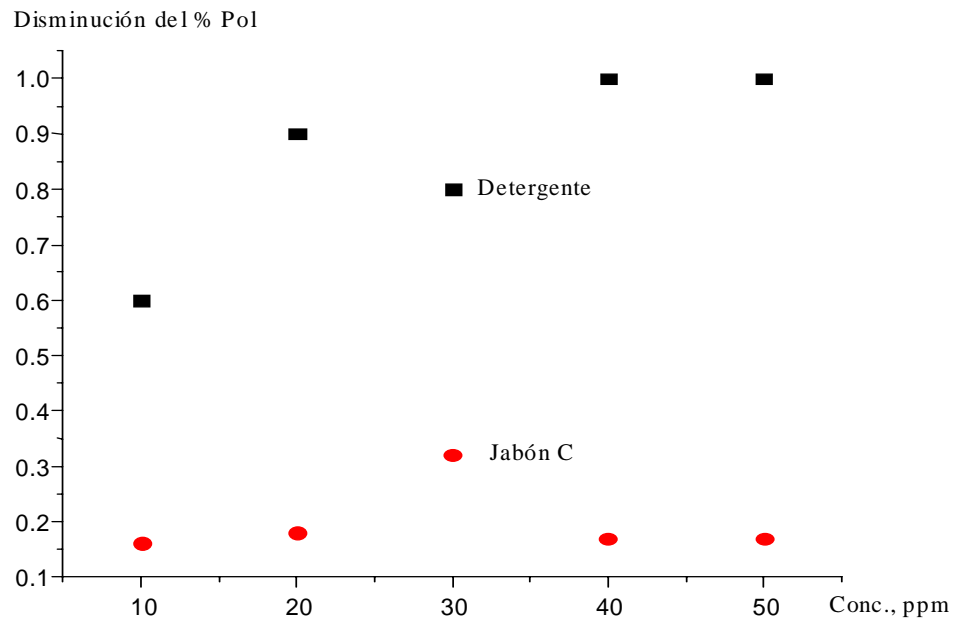


Fig. 2.7 Efecto del surfactante en el agua de imbibición sobre la disminución del % Pol en bagazo.

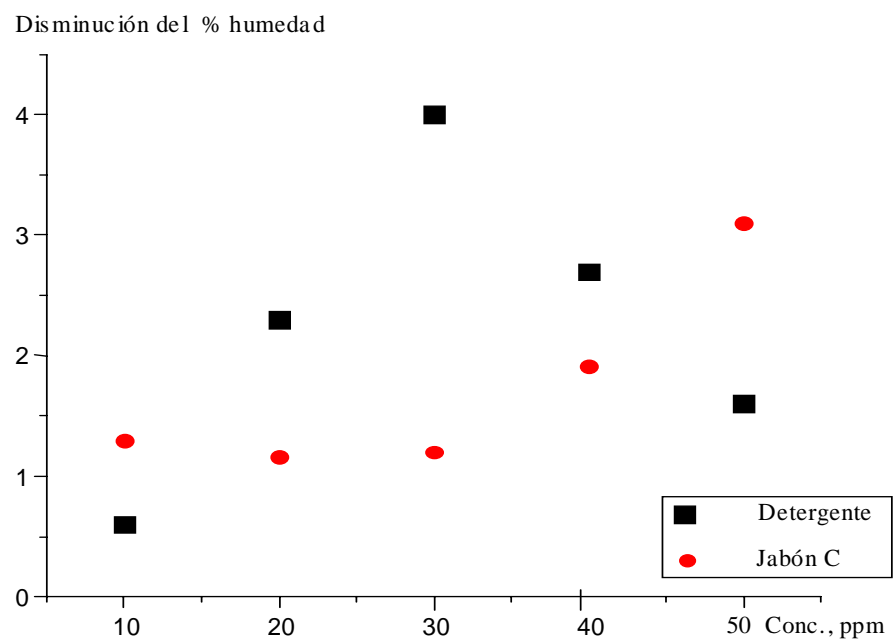


Fig. 2.8 Efecto del surfactante en el agua de imbibición sobre la disminución del % humedad en el bagazo.

2.6.0 Los surfactantes en el proceso de purificación de los jugos

El trabajo experimental se desarrolló sobre la base de un diseño de experimentos en bloques al azar para comparar el efecto, en el proceso de purificación, de diferentes tratamientos 0, 10, 15 y 20 ppm de los surfactantes Tensol, detergente sintético, Sulker Floc y el Jabón A de aceite de caña, en el jugo mezclado.

2.6.1 Metodología experimental

1. Se tomó una muestra de jugo mezclado (JM) de 6 L durante 30 min. El jugo se caracterizó en cuanto a: % Brix, % Pol, % Pureza, % de sólidos insolubles (% SI) y pH /95/.
2. Se alcalizó el jugo a un pH de 8 a 8,2, siempre con una lechada de cal de igual densidad (4 °Bé) mantenida en agitación. La preparación de las lechadas se realizó a partir de una masa de cal que se conservó en un recipiente de vidrio.
3. Se vertieron aleatoriamente masas iguales del jugo alcalizado, mantenido en agitación, en beakers de 1000 ml y puestos en la plancha eléctrica. Se sometieron a ebullición durante un minuto. Luego se dejaron sedimentar en probetas a las que previamente se les añadió la masa correspondiente de disolución del surfactante (solo o en mezcla con flocculante, para el caso del Tensol) o igual cantidad de agua.
4. Se tomaron datos de la altura de la interfase vs tiempo, así como el tiempo que demoró en separarse la cachaza del jugo claro y el tiempo que demoró ésta en compactarse.
5. El jugo clarificado (JC) fue extraído sin provocar revolturas en los lodos. A este jugo se le realizaron los mismos análisis que al jugo mezclado.

Esta metodología garantizó que en el experimento quedaran controladas, dentro de cada bloque, todas las variables inherentes a las características químicas y físicas de la lechada de cal y del jugo, a pesar de que de un bloque a otro existieran diferencias en la composición de los jugos al provenir de materias primas diferentes. De esta forma sólo influyó en los resultados, la concentración del surfactante.

Cálculos

- % de remoción de sólidos insolubles (%RSI)

$$\%RSI = [(\% SI \text{ en JM} - \% SI \text{ en JC}) / \% SI \text{ en JM}] \cdot 100$$

- % de remoción de gomas (%Rgom)

$$\%Rgom = [(\% Gom \text{ en JM} - \% Gom \text{ en JC}) / \% Gom \text{ en JM}] \cdot 100$$

- Disminución del tiempo total de sedimentación T_{ts} , respecto al tratamiento a 0 ppm: $(T_{ts} \text{ a } 0 \text{ ppm} - T_{ts} \text{ a } z \text{ ppm})$, donde z tomó los valores: 5, 10, 15 y 20 ppm.

2.6.2 Resultados

Los surfactantes no influyeron negativamente en el proceso de purificación de los jugos (Figs. 2.9 a 2.13), pero provocaron una disminución en el tiempo total de sedimentación, hicieron más efectiva la acción de los flocculantes e incrementaron la remoción de sólidos insolubles y gomas.

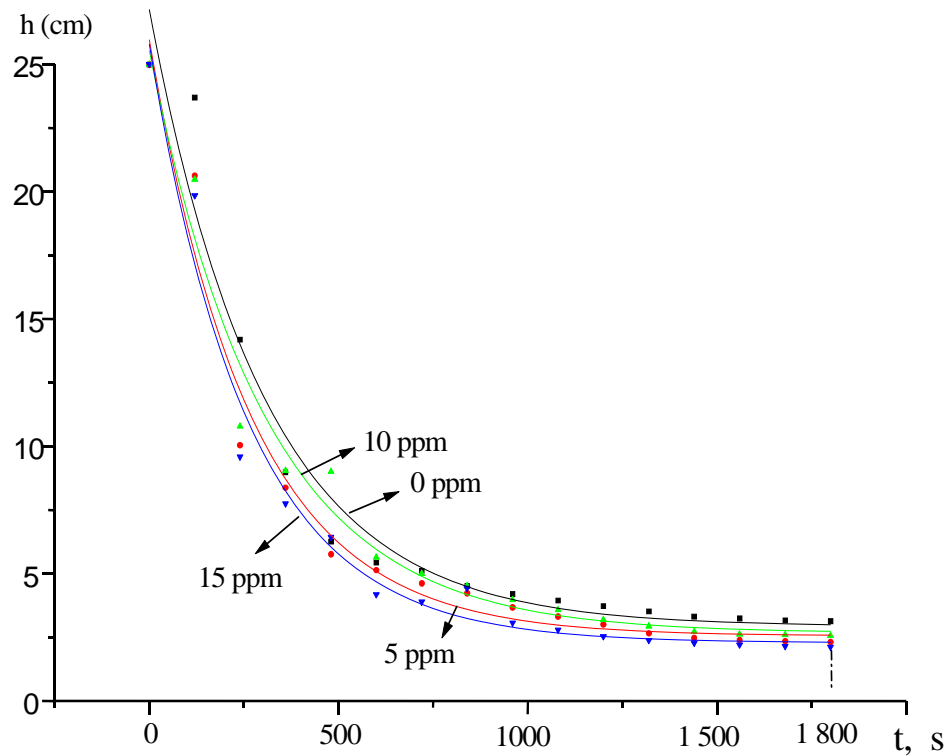


Fig. 2.9 Efecto del detergente en el proceso de sedimentación en probeta.

Los diferentes tratamientos con el detergente fueron más efectivos en la disminución del tiempo total de sedimentación que a 0 ppm. El mejor fue el de 15 ppm (Fig. 2.9). Con éste se obtuvo además, un aumento significativo del % de remoción de sólidos insolubles (Tabla 9, Anexo 1). No se observó efecto sobre el aumento de calcio del jugo mezclado al clarificado. Con el Tensol los tratamientos más efectivos fueron las mezclas al 75 y 50 % con el flocculante (Fig. 2.10). No existió diferencia estadística entre ambos tratamientos. El efecto de la mezcla al 50 % fue superior al del flocculante al 100 %, al nivel de significación $\alpha=0,1$ (Tabla 8, Anexo 1). Los resultados con el Tensol al 100 % fueron inferiores respecto a las mezclas.

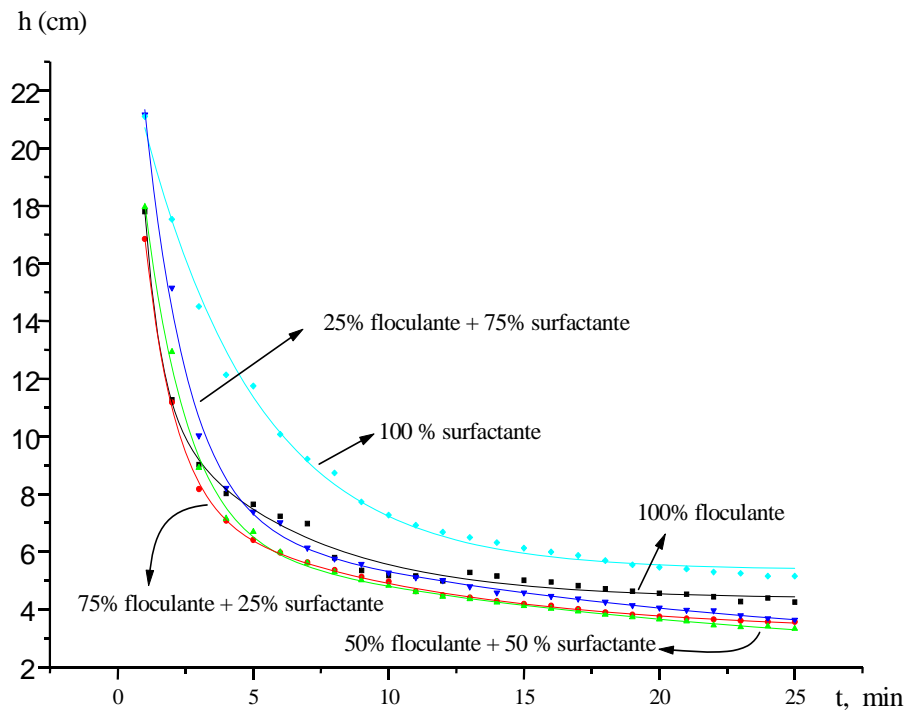


Fig. 2.10 Efecto de mezclas de Tensol y floculante en el proceso de sedimentación en probeta.

* t ... tiempo.

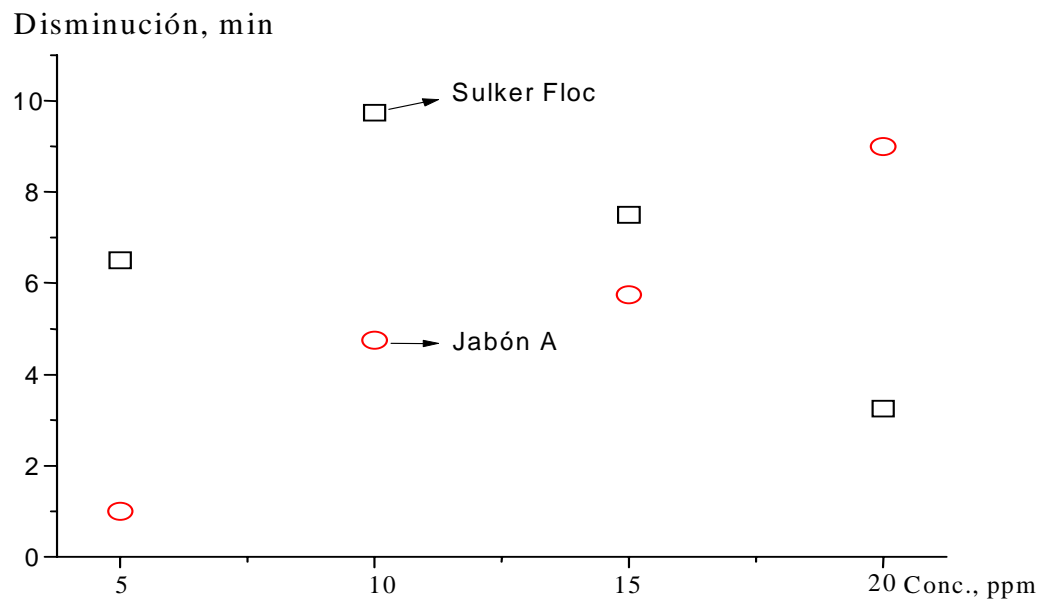


Fig. 2.11 Disminución del tiempo total de sedimentación en probeta, respecto al tratamiento 0 ppm de surfactante, con el Jabón A y el Sulker Floc.

* Conc. ... concentración, ppm (mg surfactante/kg disolución).

La efectividad del Jabón A para disminuir el tiempo total de sedimentación, respecto al tratamiento 0 ppm, aumentó con la concentración. El Sulker Floc fue más efectivo que el Jabón A hasta 15 ppm (Fig. 2.11).

Porcentaje de remoción de sólidos insolubles (% RSI) y gomas (%Rgom)

La presencia del surfactante en el proceso incrementó la remoción de sólidos insolubles de jugo mezclado (JM) a jugo clarificado (JC). Los mejores resultados del Jabón A y el Sulker Floc se presentaron a concentraciones mayores de 5 ppm, con un nivel de significación $\alpha=0,10$ (Anexo 1, Tabla 7 E a I). Los tratamientos más efectivos para el Jabón A fueron de 10 a 20 ppm, mientras que para el Sulker Floc de 10 a 15. El tratamiento más efectivo para el Jabón A fue el de 20 ppm y el de 15 ppm para el Sulker Floc. A 5 ppm los resultados fueron inferiores respecto al de 0 ppm (Fig. 2.12). En general el Jabón A fue más efectivo que el Sulker Floc. En las mezclas de Tensol + Flocculante el mejor resultado se obtuvo con 50 % de Tensol, con un nivel de significación $\alpha= 0,1$ (Anexo 1, Tabla 8). Con el detergente los mejores resultados se obtuvieron a 15 ppm (Tabla 9 B, Anexo 1).

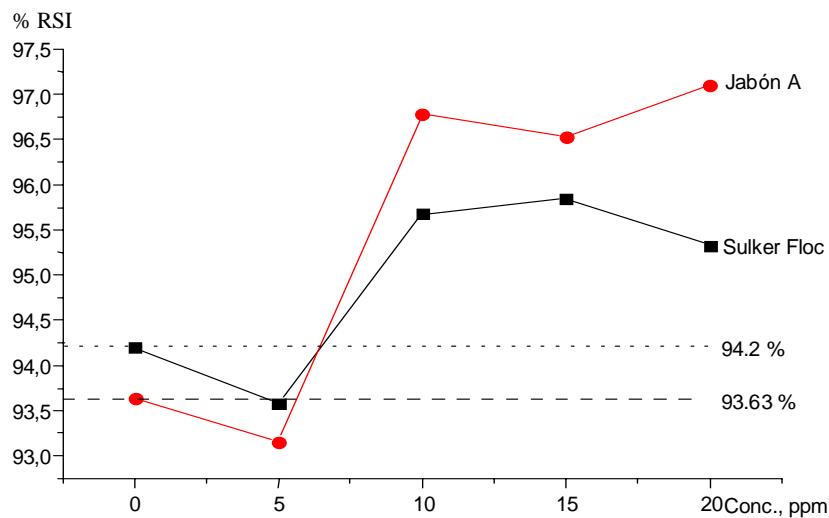


Fig. 2.12 Efecto del surfactante en el porcentaje remoción de sólidos insolubles de jugo mezclado a clarificado.

El nivel de significación α para el porcentaje de remoción de gomas fue de 0,3 para el Sulker Floc, mientras que para el Jabón A llega a 0,15. Ambos surfactantes mostraron la mayor efectividad con los tratamientos de 5 y 15 ppm. El Sulker Floc fue más efectivo que el Jabón A a 5 ppm, mientras que éste lo fue a 15 ppm (Tabla 7 A a D, Anexo 1). En general el Sulker Floc fue más efectivo (Fig. 2.13).

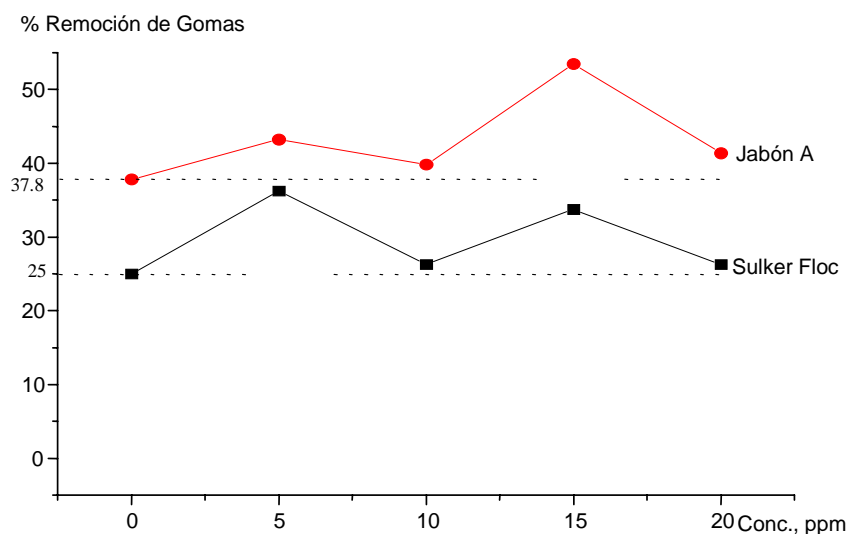


Fig. 2.13 Influencia del surfactante en el porciento de remoción de gomas de jugo mezclado a clarificado.

Conclusiones Parciales del Capítulo 2

1. El aparato de Rebínder empleado en la determinación de la tensión superficial reproduce adecuadamente.
2. En las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas de los surfactantes, aparecieron puntos anómalos de extremos relativos, no atribuibles al error experimental. Las correspondientes a las disoluciones acuosas del detergente y el jabón C no se diferencian significativamente. Igual comportamiento se observa en el intervalo de 20 a 30 ppm para los jabones A y B. A partir de 40 ppm las tensiones superficiales del Sulker Floc fueron menores que las del detergente y los jabones B y C. A partir de esa concentración las menores tensiones superficiales correspondieron al Pan Aid.
3. La variación de la tensión superficial de los jugos dependió de la concentración del surfactante y pudo estar influenciada por la presencia de sustancias naturales con actividad superficial.
4. La viscosidad de los jugos disminuyó en los tratamientos con el surfactante. Los rangos de concentraciones del surfactante en el agua de imbibición para los que se obtuvieron las mayores disminuciones de la viscosidad y de la tensión superficial en los jugos, prácticamente coincidieron.
5. El surfactante modificó la compresibilidad del bagazo. El bagazo fue más compresible a las concentraciones del surfactante en el agua de imbibición, donde el jugo extraído presentó menores tensiones superficiales y viscosidades.

6. En la prensa del laboratorio es posible determinar aproximadamente, la presión efectiva en el molino.
7. Los % Pol y % de Humedad del bagazo residual del proceso de extracción fueron menores cuando se imbibió con las disoluciones de los surfactantes.
8. La adición de un surfactante aniónico al jugo mezclado, intensifica el proceso de sedimentación.
9. La mezcla de surfactante con floculante fue más efectiva que el floculante solo, para intensificar el proceso de sedimentación en jugos de caña.
10. La adición de surfactantes aniónicos, al jugo a purificar, disminuyó el tiempo total de sedimentación y en el caso del porcentaje de insolubles en el jugo claro, el mejor resultado se obtuvo entre 10 y 15 ppm.
11. La metodología empleada en esta etapa permitió desarrollar con éxito la investigación, obtener los resultados y demostró ser aplicable en estos tipos de estudios.

CAPÍTULO 3 MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES A ESCALA INDUSTRIAL

Este capítulo recoge los métodos aplicados en la investigación, así como los resultados obtenidos. Para corroborar los resultados experimentales a escala de laboratorio y de pruebas exploratorias realizadas anteriormente acerca del efecto de los surfactantes en el proceso de purificación de los jugos /32, 114, 134/, fueron realizados los experimentos a escala industrial. Posteriormente se desarrollaron experimentos con los surfactantes en el agua de imbibición de los molinos. En una primera etapa, fueron aplicadas diferentes concentraciones del surfactante al agua de imbibición para determinar el rango de concentraciones más efectivo para cada surfactante. Luego en una segunda etapa, de mayor duración que la anterior, se evaluó el surfactante Jabón B en la intensificación del proceso de extracción. Las cantidades existentes de este surfactante fueron las que determinaron su selección. Posteriormente, se investigó acerca del efecto combinado de algunas variables en el proceso de extracción.

3.1.0 Efecto del surfactante en la purificación de los jugos

En esta fase las pruebas industriales se realizaron en el central “Grito de Yara” de la provincia Granma. Se disponía de los surfactantes Sulker Floc y el Jabón A de aceite de caña. Las concentraciones empleadas fueron 0, 5 y 20 ppm (mg de surfactante / kg de jugo). Fue aplicado un diseño estadístico de experimentos de “Bloques al Azar”.

3.1.1 Metodología de muestreo

- a) Se calculó el tiempo promedio de retención del jugo en el clarificador, considerando un flujo pistón, para la molienda promedio en el momento de realizar las corridas experimentales. Este fue de 2,35 h.
- b) Antes de comenzar a añadir el surfactante, en cada prueba, se tomó una muestra acumulativa de jugo mezclado, jugo clarificado y cachaza, las que fueron preservadas y tomadas como referencia del trabajo del clarificador antes de aplicar los tratamientos.
- c) Una vez que se comenzó a dosificar el surfactante, se tomaron muestras de jugo mezclado en el tándem: 8 muestras acumulativas de jugo durante intervalos de tiempo = (tiempo de retención en el clarificador) / 8. Las muestras fueron preservadas y conformaron una muestra final. La dosificación del surfactante al jugo se aplicó durante un tiempo = tiempo de retención en el clarificador + 20 min.
- d) Transcurrido el tiempo de retención, se inició la toma de las muestras de jugo clarificado y de cachaza, durante 2 h; una muestra acumulativa de jugo cada 15 min, para conformar una muestra final.

Las técnicas analíticas empleadas en los análisis de laboratorio son las establecidas en el MINAZ /95/, excepto en la determinación del porcentaje de gomas, el cual se realizó mediante una variante del método hidroalcohólico: se añadió al jugo, igual masa de alcohol absoluto. Luego de 30 min se realizó la separación mediante centrifugación. Secado en estufa a 105 °C, hasta masa constante.

El jugo mezclado (JM) y el jugo claro (JC) fueron caracterizados en cuanto a % Pol, % Brix, % azúcares reductores, % sólidos insolubles (%SI), % cenizas (%Cza), % gomas (%Gom) y pH. A los lodos se les determinó la relación sólido / líquido por centrifugación.

Cálculos

Los porcentos de remoción de sólidos insolubles de jugo mezclado a jugo clarificado, (% RSI) y de gomas (%Rgom), fueron calculados como se especificó en el Capítulo 2, pág. 30 epígrafe 2.6.0.

El porcentaje de aumento de cenizas (AuCza), se calculó a partir de la fórmula:

$$\% \text{ AuCza} = (\% \text{ Cza en JC} - \% \text{ Cza en JM} / \% \text{ Cza en JC}) \cdot 100$$

3.1.2 Resultados

No existió influencia de los tratamientos con surfactante sobre el aumento de pureza de jugo mezclado (JM) a clarificado (JC) al nivel $\alpha = 0,5$. En relación con la destrucción de azúcares reductores de JM a JC, hubo cierta disminución de hasta 0,115 unidades, aunque sin diferencia estadística respecto al tratamiento a 0 ppm.

Porcentaje de remoción de sólidos insolubles (%RSI) de jugo mezclado a clarificado

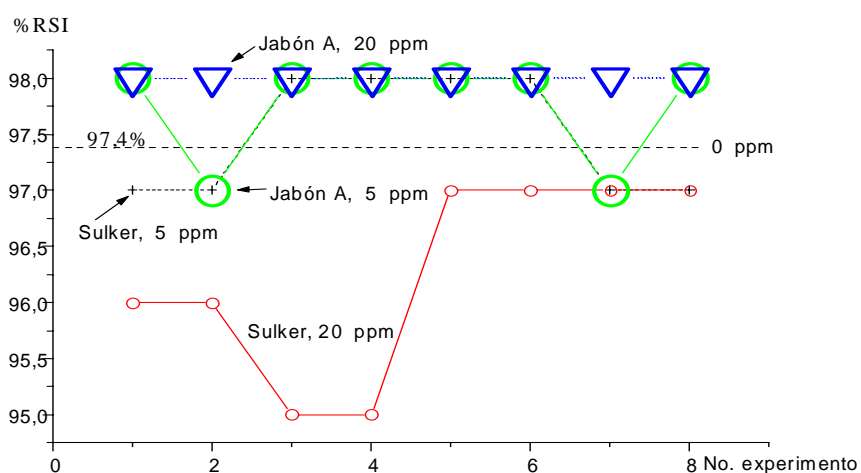


Fig. 3.1 % Remoción de insolubles del jugo mezclado a clarificado.

El mejor tratamiento fue el de 20 ppm con el Jabón A (Fig. 3.1), al nivel de significación

$\alpha=0,10$ (Tabla 1 D, Anexo 2). A 5 ppm se obtuvieron resultados similares con ambos surfactantes al nivel de significación $\alpha=0,30$ (Tabla 1 A y C). El jabón A a 20 ppm dio mejores resultados que a 5 ppm, al nivel de significación $\alpha=0,10$. El %RSI con el Sulker Floc a 20 ppm fue inferior al obtenido con el tratamiento a 0 ppm, al nivel de significación $\alpha=0,001$ (Tabla 1 B, Anexo 2). Los resultados concuerdan con los obtenidos a escala de laboratorio.

Porcentaje de remoción de gomas (%RGom) de jugo mezclado a jugo clarificado

El surfactante más efectivo fue el Sulker Floc a 20 ppm, de acuerdo con la disposición de los datos en la Fig. 3.2. Sin embargo, la diferencia estadística con el efecto de la concentración a 5 ppm, apareció al nivel de significación $\alpha=0,2$.

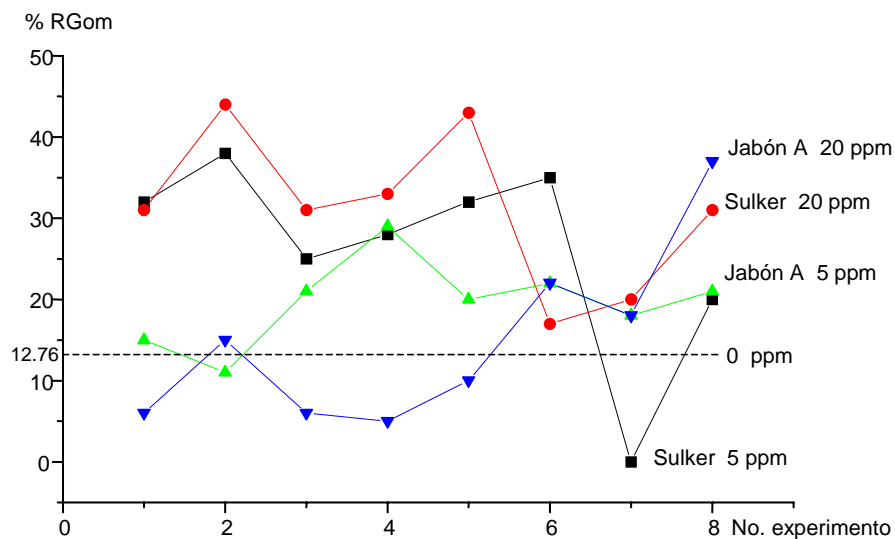


Fig. 3.2 Porcentaje de remoción de gomas de jugo mezclado a clarificado en presencia del surfactante.

La concentración más efectiva con el Jabón A fue la de 5 ppm (Fig. 3.2). Se obtuvo diferencia significativa, con los tratamientos con el Sulker Floc, en el %RGom al nivel de significación $\alpha=0,05$ respecto al tratamiento 0 ppm (Tabla 2 C y D, Anexo 2). Para el Jabón A el nivel de significación fue $\alpha=0,10$ con la concentración a 5 ppm. Pero con 20 ppm del Jabón A no arrojó diferencias estadísticas (Tabla 2 A y B, Anexo 2). Estos resultados muestran cierta relación con los obtenidos a escala de laboratorio en cuanto a las concentraciones más efectivas, aunque éstas no concuerdan totalmente.

Porciento de aumento de cenizas (%AuCza)

Con el tratamiento 5 ppm, para ambos surfactantes se obtuvo un menor aumento del porciento de cenizas de jugo mezclado a clarificado al nivel de significación $\alpha = 0,05$ respecto al tratamiento a 0 ppm (Tabla 3 A y C). El mejor fue el del Sulker Flocc (Fig. 3.3). El %AuCza para este surfactante a 20 ppm, fue significativamente mayor respecto al tratamiento 0 ppm (Tabla 3 B y D, Anexo 2).

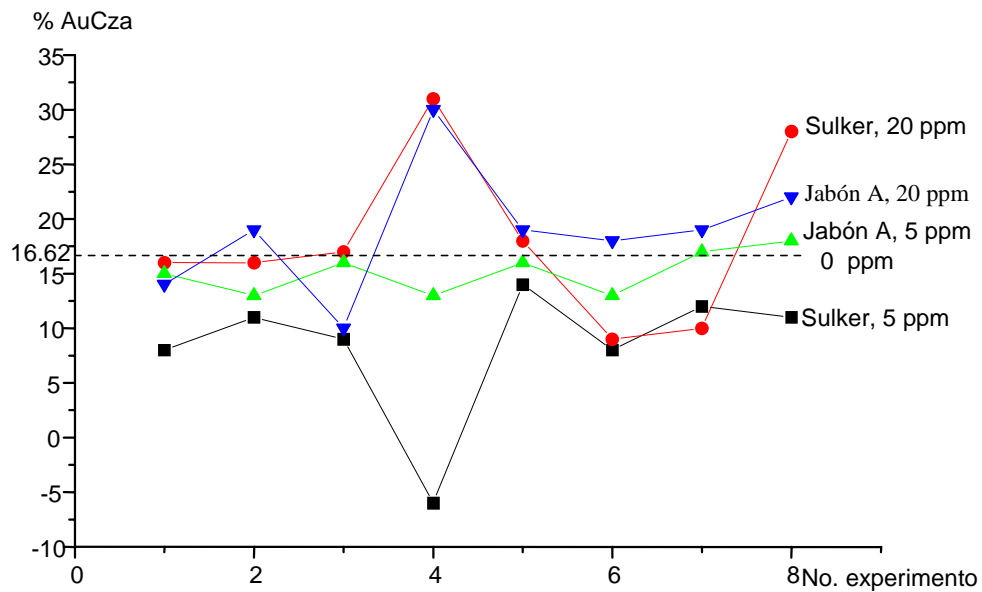


Fig. 3.3 Porciento de aumento del contenido de cenizas de jugo mezclado a clarificado.

Relación sólido / líquido en cachaza (S/L)

Las mediciones de la S/L (volumen de sólido / volumen de líquido) en cachaza se realizaron por centrifugación, despreciando el volumen de líquido que queda retenido por el sólido compactado.

La relación S/L en los lodos fue menor antes de aplicar los tratamientos con ambos surfactantes (Tabla 4, Anexo 2). Los mayores valores de la relación S/L se obtuvieron con el tratamiento a 5 ppm para ambos surfactantes (Fig. 3.4). No obstante, fue pequeña la diferencia en el incremento de esta relación entre ambos surfactantes, respecto al tratamiento a 0 ppm. El mayor incremento se logró con la concentración a 20 ppm del Jabón A (Tabla 4, Anexo 2). Estos resultados concuerdan con los obtenidos a escala de laboratorio con relación al %RSI.

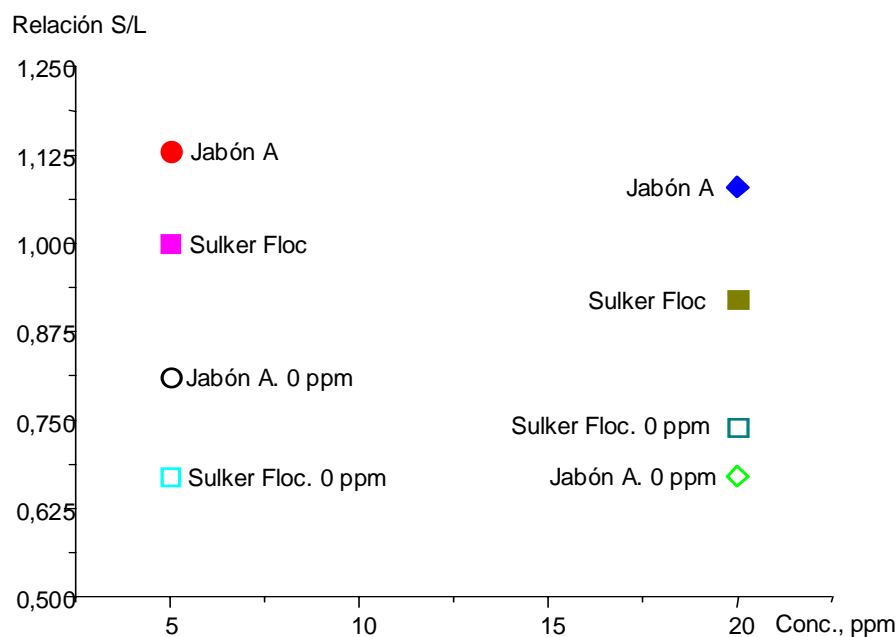


Fig. 3.4 Relación S/L en los lodos del clarificador.

3.2.0 Los surfactantes en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos

En los centrales azucareros Colombia, Majibacoa, Jesús Menéndez, López Peña y Bartolomé Masó fueron evaluados diferentes tratamientos con surfactante en el agua de imbibición de los molinos, para determinar el efecto sobre los % Pol y % Humedad del bagazo residual, a partir de un diseño estadístico de experimentos de Bloques al Azar /154/. Se empleó el o los surfactantes disponibles en cada central en la etapa experimental. Fueron ensayados los Jabones A, B y C de aceite de caña, el Pan Aid, Sulker Floc, detergente sintético y un residuo jabonoso de la producción del PPG.

En una segunda etapa, se evaluó el surfactante Jabón B en 52 corridas experimentales, en un período de 69 días, en el central "Jesús Menéndez". El rango de concentraciones del surfactante en el agua de imbibición fue de 20 a 30 ppm.

En una tercera etapa de la investigación, en el central "Bartolomé Masó", se realizó un experimento, según un diseño factorial completo 2^k , para conocer la influencia del nivel de imbibición, la temperatura, la concentración del surfactante en el agua de imbibición y la presión en el molino, en el % Pol y % Humedad del bagazo.

3.2.1 Metodología experimental para la primera etapa

3.2.1.1 Determinaciones previas

a) Tándem

Fue determinado experimentalmente el tiempo (t) de retención de la caña en la zona de

molida húmeda del tándem. En todas las pruebas el resultado promedio mayor fue de 3,5 min.

b) Bomba dosificadora

Se elaboró una metodología experimental original, para obtener la curva de operación de la bomba dosificadora, debido a que posibles desgastes en las válvulas de retención, podrían provocar desviaciones respecto a lo establecido por el fabricante. Para ello se midió el flujo de la bomba en la succión, con la descarga conectada a la tubería por donde fluye el agua de imbibición, en lugar de medirlo en la descarga, como es tradicional. Se obtuvo el flujo de la bomba para 10 posiciones diferentes del regulador de la bomba, con cinco réplicas por punto. La media del flujo volumétrico para cada posición, fue ajustada mediante el programa de ajuste de curvas "CURVEFIT". Con la ecuación de la curva de mejor ajuste, se logró un número suficiente de puntos. Esta curva luego fue validada experimentalmente.

3.2.1.2 Toma de la muestra

Antes de comenzar a bombear la disolución del surfactante, se verificó que la cantidad de agua de imbibición fuera la especificada, así como la temperatura.

Al inicio del trabajo de bloque, se hizo un muestreo de la caña de la manera siguiente:

a) Luego de comenzar a bombear la solución del surfactante, se esperó un tiempo igual a 7 min para comenzar a tomar las muestras.

b) Se tomó la muestra bagazo a todo lo ancho del colchón de bagazo de forma aleatoria, acumulando durante 5 min aproximadamente 5 kg de material. Para tomar la muestra correspondiente a la réplica del tratamiento, se llevó la lectura a cero y luego de restablecerla se esperó 4 min antes de comenzar el muestreo. Se tomó la muestra y se cambió la dosificación. Se repitió el procedimiento para todas las concentraciones, de acuerdo con el diseño en bloques al azar. Las muestras fueron guardadas en recipiente cerrado.

c) Reducción del tamaño de la muestra en el laboratorio. Luego de hacer homogénea la muestra de bagazo, se redujo su tamaño a 500 g por el método de paladas alternas. Luego se separaron 300 g para el análisis de Pol y 200 g para la determinación del % Humedad. La disminución del parámetro % Pol, % Humedad del bagazo y Pérdida de Molienda, se calcularon como:

Disminución = (Valor del parámetro obtenido con el tratamiento 0 ppm - Valor del parámetro cuando se dosifica el surfactante al agua de imbibición)

3.2.1.3 Masa de surfactante a disolver para preparar la solución a dosificar al agua de imbibición

Ejemplo con el Jabón A.

El jabón A tuvo un porcentaje de masa seca de 70,37. Se pesó una cantidad de jabón igual a: $1661 \cdot 1/0,7037 = 2360\text{g}$. A esta cantidad de surfactante se añadió agua hasta completar 400 L de disolución y se agitó como mínimo 30 min. La concentración fue de $1661/400 = 4,152\text{ g jabón seco/L disolución}$. A esta concentración ya existe formación de micelas /2, 52/.

La primera vez que se preparó la disolución se añadieron los 2360g del Jabón A. Las demás preparaciones sólo requirieron $2360 - 158,12 = 2201,88\text{ g}$ ya que existió una cantidad de disolución remanente en el fondo del tanque de 26,8 L.

Se realizó el tratamiento estadístico a los datos experimentales, mediante el paquete de programas estadísticos MICROSTA (Anexo 3).

3.2.2 Resultados

3.2.2.1 Central “Jesús Menéndez”. Provincia de Las Tunas. Zafra de 1996.

Los resultados corresponden a los surfactantes Jabones A y B de aceite de caña. Se aplicaron los tratamientos 0, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 ppm del surfactante en el agua de imbibición. La evaluación se realizó en un período de la zafra en el cual las condiciones técnicas del tándem eran satisfactorias y la molienda estable. Los % Pol y % Humedad en bagazo antes de aplicar el surfactante estuvieron en el rango de 1,52 a 2,2 y 47,2 a 50 respectivamente.

No existieron diferencias estadísticas significativas en cuanto a las características de la caña y del nivel de imbibición. Ambos surfactantes disminuyeron significativamente los % Pol y % humedad del bagazo. Al comparar los efectos de las diferentes concentraciones del Jabón A con relación a la disminución del % Pol en bagazo, se obtuvieron diferencias al nivel de significación $\alpha = 0,10$ (Tabla 2, Anexo 3). No obstante, gráficamente se aprecia que la concentración más efectiva pudo ser la de 30 ppm y la menos efectiva la de 15 ppm (Fig. 3.5). En el caso del jabón B no se pudo determinar la existencia de diferencia estadística entre los efectos de las concentraciones diferentes de 0 ppm. (Tablas 4, 5 y 6, Anexo 3). Se obtuvieron disminuciones del % Pol en el rango de 0,19 a 0,32 y de 0,05 a 2,8 para el % Humedad en el bagazo residual al aplicar el jabón B en el agua de imbibición, para las condiciones existentes en la etapa de la evaluación. Dentro de esos rangos están los resultados obtenidos con el Jabón A. En general no existieron diferencias estadísticas entre los efectos de los tratamientos con los Jabones A y B, en los % Pol y % Humedad del bagazo (Tabla 3, Anexo 3). Aunque respecto a esta última, en la Fig. 3.5 se observa que pudo existir algún mejor efecto para el Jabón B.

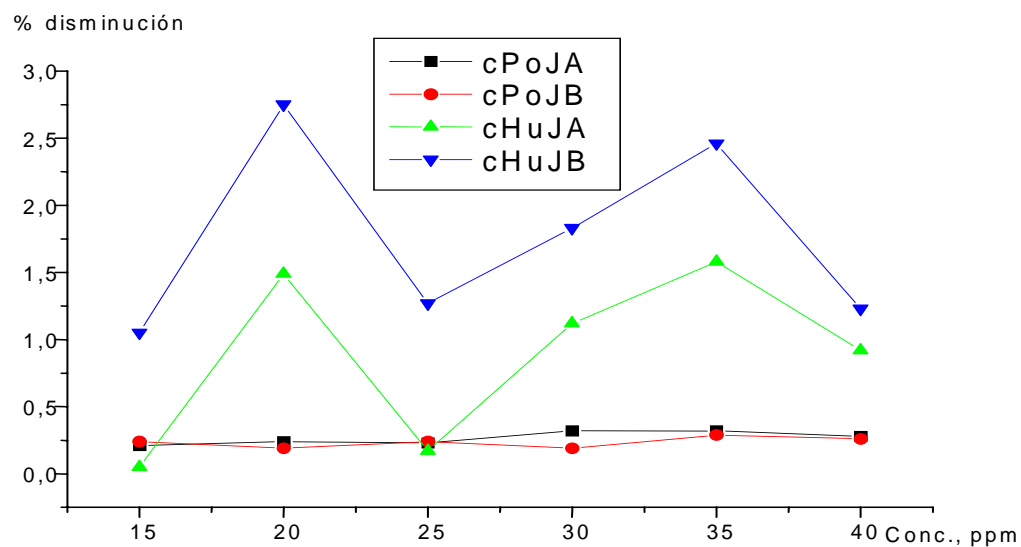


Fig. 3.5 Efecto de diferentes tratamientos con los Jabones A y B en los % Pol y % Humedad del bagazo residual.

3.2.2.2 Central “López Peña”. Provincia de Holguín. Zafra de 1995.

En este central azucarero los experimentos a escala industrial, se desarrollaron a finales de zafra, cuando ya no existían adecuadas condiciones técnicas del tándem y se producían paradas frecuentes por falta de caña. Los % Pol y % Humedad en bagazo estuvieron en el rango de 3 a 3,8 y 51 a 52 respectivamente. Se evaluaron tratamientos con los surfactantes Sulker Floc y Jabón A.

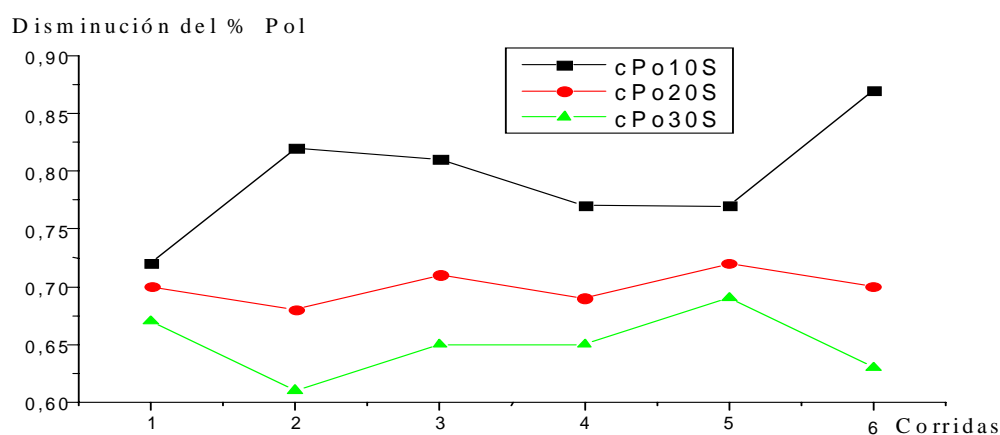


Fig. 3.6 Efecto del Sulker Floc sobre el % Pol en bagazo.

Los % Pol en bagazo cuando se adicionó el surfactante al agua de imbibición, fueron significativamente menores respecto al tratamiento a 0 ppm. Existió diferencia altamente

significativa entre los efectos de la concentración sobre la disminución del % Pol en bagazo (Tabla 7 B, Anexo 3). La mejor concentración 10 ppm (Fig. 3.6).

El efecto de los tratamientos sobre el % Humedad fue bajo (Fig. 3.7), no obstante existir diferencia altamente significativa entre ellos (Tabla 7 C, Anexo 3). En este indicador, la concentración de 10 ppm fue también la más efectiva, lo que coincide con lo obtenido para la disminución del % Pol.

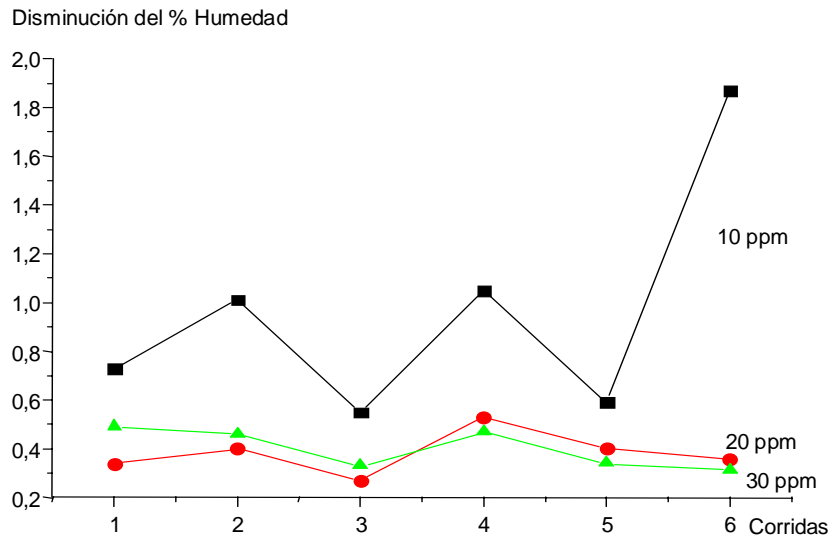


Fig. 3.7 Efecto del Sulker Floc sobre el %Humedad en bagazo.

Los tratamientos con el Jabón A fueron menos efectivos que los del Sulker Floc.

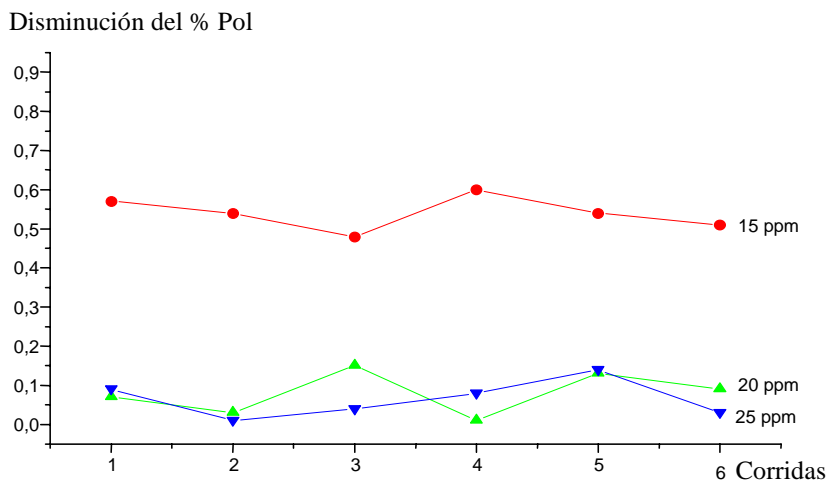


Fig. 3.8 Efecto del Jabón A sobre la disminución del % Pol en bagazo.

Se encontró diferencia altamente significativa entre los efectos de los diferentes tratamien-

tos sobre el % Pol en bagazo. Los efectos de las concentraciones de 20 y 25 ppm difieren al nivel $\alpha=0,15$ (Tablas 7 D y E, Anexo 3), pero la concentración más efectiva para disminuir el % Pol fue el de 15 ppm (Fig. 3.8). No obstante, el efecto sobre el % Humedad en bagazo fue muy pobre (Fig. 3.9), pues sólo existió diferencia estadística al nivel $\alpha=0,10$ (Tabla 7 A y F).

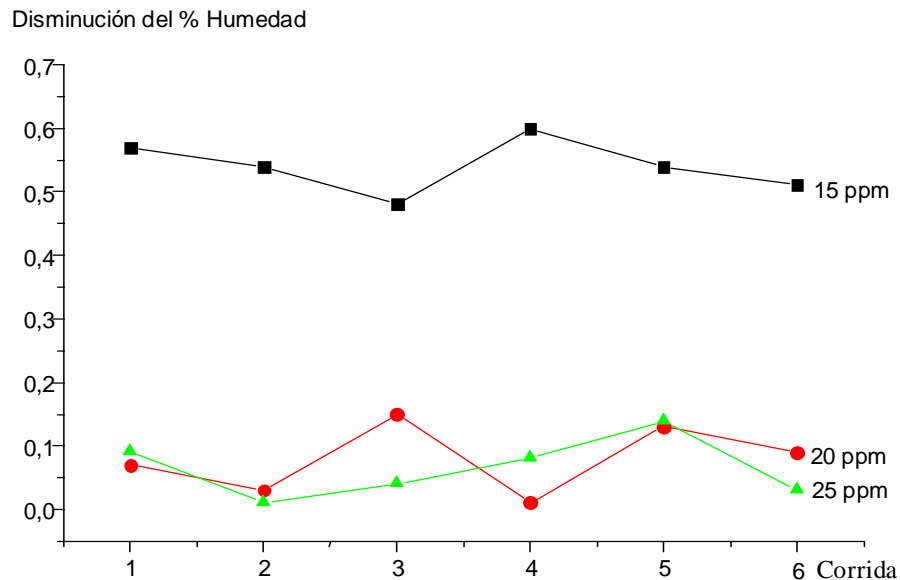


Fig. 3.9 Efecto del Jabón A sobre la disminución del % Humedad en bagazo.

3.2.2.3 Central “Majibacoa”. Provincia de Las Tunas. Zafra de 1995.

En este central se realizó la evaluación durante el período final de zafra, cuando las condiciones técnicas del tándem ya eran deficientes, con % Pol en bagazo residual de 2,6 a 3,0 y % Humedad de 51 a 53. Se evaluaron tratamientos con los surfactantes Sulker Floc, Jabón B Jabón C y el residuo de la producción del PPG. Cuando se aplicaron los tratamientos de Sulker Floc y el Jabón B se obtuvieron resultados similares, con disminuciones del % Pol de hasta 0,33 unidades y de hasta 3,13 unidades en el % Humedad en el bagazo residual, al nivel de significación $\alpha=0,10$ para el Sulker Floc. La mejor concentración para este surfactante fue la de 20 ppm para la disminución del % Humedad y de 10 a 20 ppm para el % Pol (Figs. 3.10 y 3.11). En el Jabón B las más efectivas fueron a 10 y 20 ppm, las que difieren al nivel de significación $\alpha=0,01$. Con el residuo de la producción del PPG la disminución del % Pol fue de 0,11 a 0,18 al nivel de significación $\alpha=0,05$, pero no mostró un efecto satisfactorio sobre el % Humedad (Tabla 8, Anexo 3).

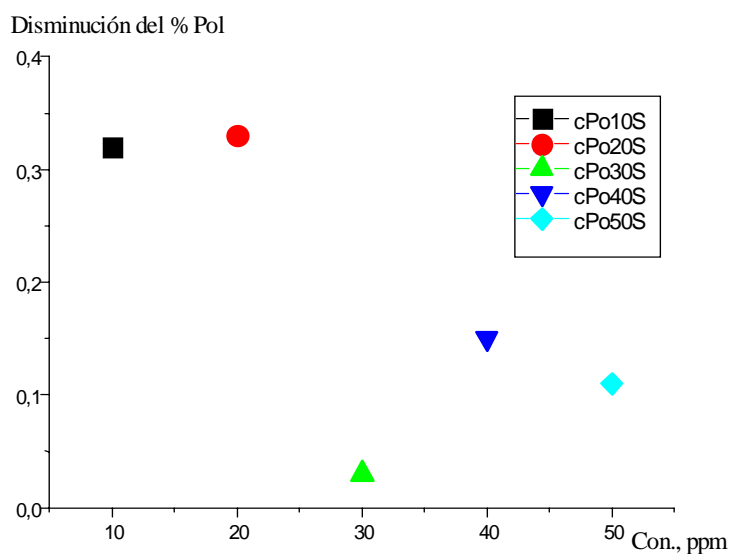


Fig. 3.10 Efecto del Sulker Floc sobre la disminución del % Pol en bagazo.

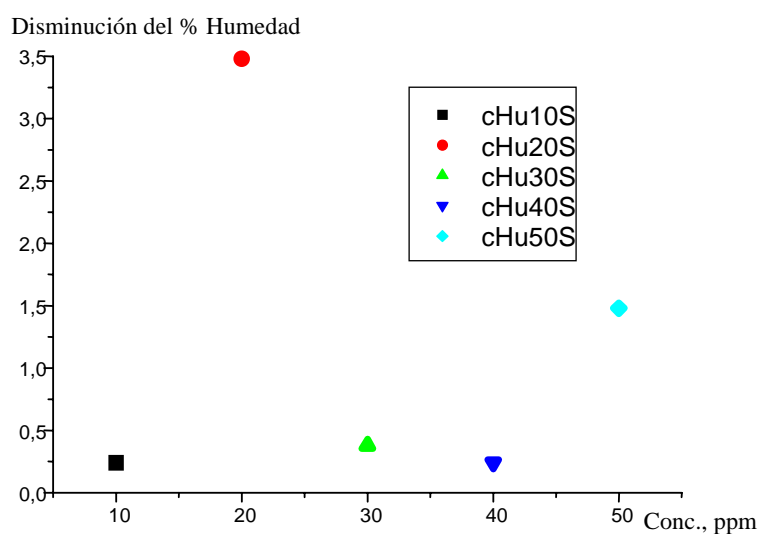


Fig. 3.11 Efecto del Sulker Floc sobre la disminución del % Humedad en bagazo.

3.2.2.4 Central "Bartolomé Masó". Provincia Granma. Zafra de 1995.

En este central las condiciones técnicas del tándem eran satisfactorias, con % Pol en bagazo residual de 1,86 a 1,89 y % Humedad de 48 a 49. Se evaluaron los tratamientos 0, 15, 20 25, 30, 35 y 40 ppm de un jabón sódico obtenido a partir de Sulker Floc.

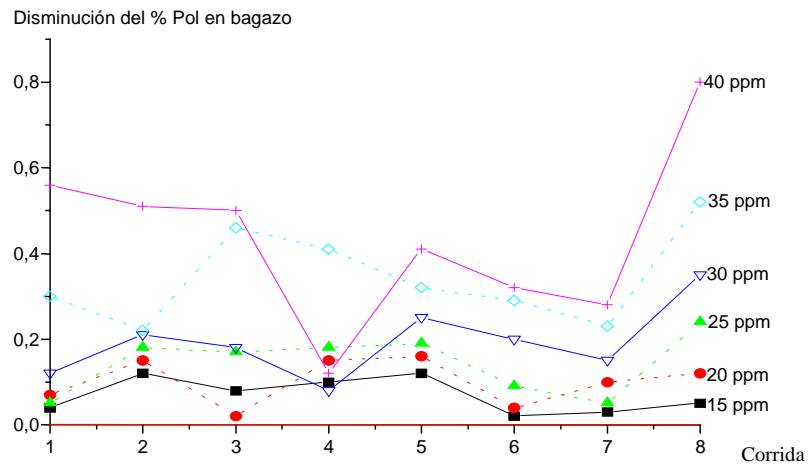


Fig. 3.12 Efecto del Jabón de Sulker Floc en la disminución el % Pol en bagazo.

Se comprobó que no existieron diferencias estadísticas entre los % Pol del bagazo antes del experimento con los correspondientes a los tratamientos 0 ppm con cada concentración y (Tabla 9 D). Existió diferencia altamente significativa entre el efecto de los diferentes tratamientos, al nivel de significación $\alpha = 0,001$ (Tabla 9 B, Anexo 3). Las mayores disminuciones en los parámetros se obtuvieron con las concentraciones de 35 y 40 ppm del jabón en el agua de imbibición (Figs. 3.12 y 3.13), con valores de 0,34 a 0,44 unidades para el % Pol y de 1,26 a 1,29 para el % Humedad en bagazo. Ambos tratamientos difirieron significativamente en la disminución de % Pol, mientras que respecto al % Humedad sólo aparece diferencia estadística para $\alpha = 0,3$ (Tabla 9 H e I, Anexo 3).

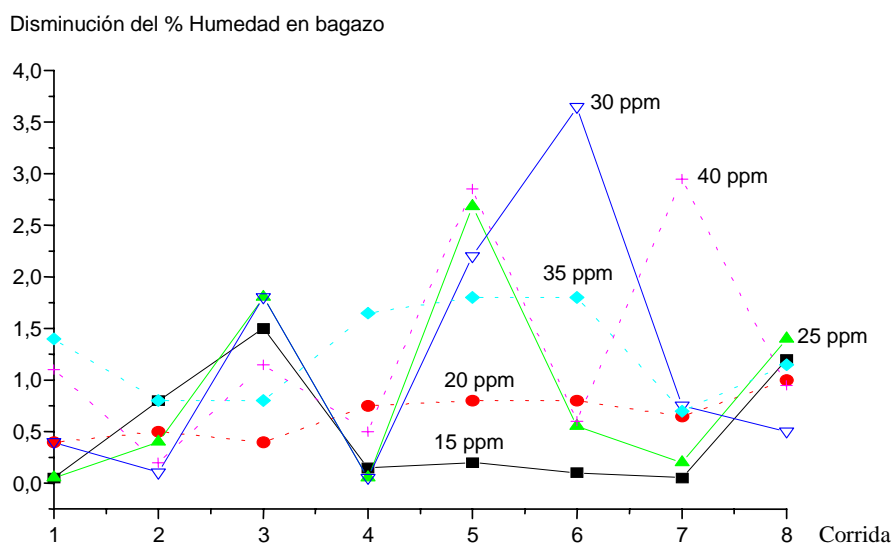


Fig. 3.13 Efecto del Jabón de Sulker Floc en la disminución del % Humedad en bagazo.

3.2.2.5 Central "Colombia". Provincia de Las Tunas. Zafras de 1992 y 1993.

A finales de la zafra de 1992 se realizaron pruebas preliminares con los surfactantes Pan Aid y un detergente sintético. El % Pol en bagazo antes de aplicar el surfactante estuvo en el rango de 1,8 a 3,57 y el de % Humedad en bagazo de 48 a 50. Las concentraciones aplicadas fueron 40, 80 y 100 ppm.

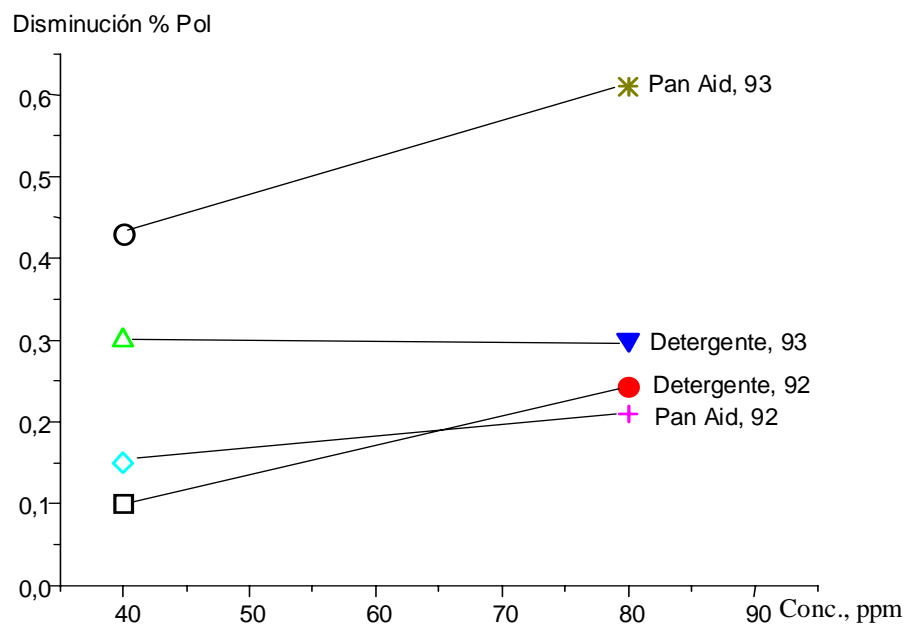


Fig. 3.14 Efecto del Pan Aid y el detergente sintético en la disminución del %Pol en bagazo. Zafras de 1992 y 1993.

Los % Pol y % Humedad en el bagazo, disminuyeron cuando se adicionó el surfactante al agua de imbibición (Fig. 3.14 y 3.15).

No se determinó diferencia estadística entre los efectos de los tratamientos con el Pan Aid (Tabla 10 B y C, Anexo 3). Igual resultado se obtuvo con los tratamientos con Detergente respecto a la disminución del % Humedad en bagazo (Tabla 10 E). Sin embargo, hubo diferencias altamente significativas en la disminución del % Pol en bagazo (Tabla 10 D). Los mejores resultados se obtuvieron con ambos surfactantes a 80 y 100 ppm, con una disminución del % Pol en bagazo en el rango de 0,1 a 0,25 y de 0,22 a 2.2 en el % Humedad. Entre el efecto de ambas concentraciones no se apreciaron diferencias (Anexo 3, Tabla 10). El experimento se repitió en la zafra de 1993 con los tratamientos 40 y 80 ppm. Las características del bagazo en cuanto a % Pol y % Humedad fueron similares a las de la zafra anterior, antes de aplicar el surfactante. El comportamiento del efecto de los tratamientos con el Pan Aid, fue muy parecido al de la zafra anterior (Figs. 3.14 y 3.15), pero con resultados superiores (Tabla 11, Anexo 3), mientras que con el detergente sintético los mejores

resultados fueron a 40 ppm en la disminución del % Pol y a 80 ppm respecto a la disminución del % Humedad en el bagazo.

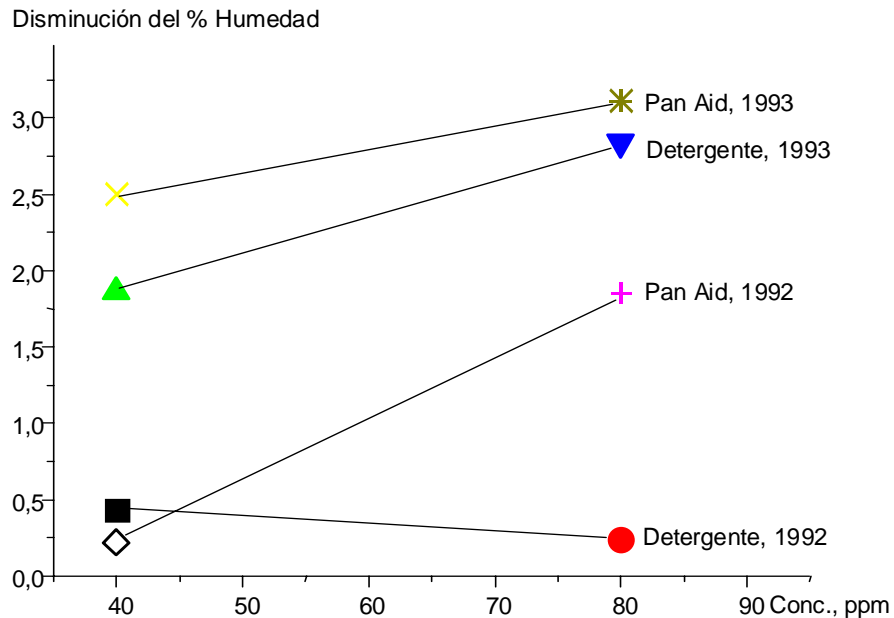


Fig. 3.15 Efecto del Pan Aid y el detergente sintético en la disminución del % Humedad en bagazo. Zafra de 1992 y 1993.

3.3.0 El surfactante Jabón B de aceite de caña en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos. Etapa Industrial II.

A partir de los resultados experimentales obtenidos en la primera etapa de la evaluación a escala industrial y teniendo en consideración las cantidades disponibles de los surfactantes, se decidió evaluar durante un mayor período de tiempo, el surfactante Jabón B de aceite de caña en el central “Jesús Menéndez” de la provincia de Las Tunas. Durante las corridas experimentales se determinaron % Brix, % Pol y pH, al jugo primario, jugo mezclado, a la caña y al bagazo. A éste último se le determinó, además, el % Humedad. Se controló las presiones en los molinos y la temperatura del agua de imbibición.

Para conocer la influencia del nivel de imbibición (t de agua/ t de fibra en caña) sobre los % Pol y % Humedad en el bagazo, éste fue variado dentro de un amplio rango, que incluyó valores económicamente no permisibles. A partir del nivel de imbibición límite permisible por el funcionamiento del molino, fue necesario variar el sistema de imbibición compuesta, desviando el exceso de agua hacia los molinos intermedios. El rango de concentraciones del surfactante en el agua de imbibición se mantuvo entre 20 y 30 ppm, con la concentración 0 ppm como testigo.

Se empleó el parámetro “Pérdida de Molienda” como criterio para conocer la eficiencia del proceso de extracción durante el experimento. La Pérdida de Molienda, definida como la razón en por ciento entre el % Pol en bagazo y el % fibra en bagazo, es uno de los seis criterios que según la ISSCT /95, 147/, se deben usar para juzgar la eficiencia de la molienda. Se considera adecuada la eficiencia del proceso de extracción cuando este parámetro esté dentro del rango de 3,5 a 6 % /94/.

3.3.1 Muestreo

Durante cada turno de trabajo del laboratorio, los obreros encargados del muestreo, tomaron muestras del bagazo que sale del sexto molino cada 1 h, se acumularon durante dos horas y realizaron los análisis, o sea, 4 análisis de humedad en bagazo/turno y 8 de % Pol. Estos resultados del laboratorio fueron parte del proceso de evaluación, para lo cual se procedió de forma tal que el laboratorio tomó dos muestras consecutivas de bagazo aplicando el surfactante al agua de imbibición y las dos muestras siguientes sin surfactante y así sucesivamente. En los intervalos de toma de muestra por el personal del laboratorio, los investigadores tomaron muestras acumulativas de bagazo durante 40 min aplicando surfactante y 40 min sin aplicarlo. El cambio de tratamiento ocupó diez min en todos los casos.

La toma de la muestra por el investigador siguió el procedimiento indicado en la Etapa Industrial I pero durante el tiempo especificado para esta segunda etapa.

Se realizaron 26 corridas experimentales por los investigadores y 26 por el personal del Laboratorio de Control de la Calidad, para un total de 52. En todos los casos se tomó la muestra patrón como se indicó en la etapa I.

Se realizó el análisis estadístico con el empleo del paquete de programas MICROSTA.

Los datos experimentales se ordenaron tomando como base el nivel de imbibición. La disminución o caída del % Pol en bagazo se calculó como % Pol en bagazo a 0 ppm - % Pol en bagazo cuando se imbebe con la disolución del Jabón B de aceite de caña en el rango de concentraciones de 25 a 30 ppm. De igual forma se procedió para calcular las disminuciones del % Humedad en bagazo y la Pérdida de Molienda.

Las equivalencias entre los niveles de imbibición empleados en los experimentos, expresados como: t agua / t fibra en caña ← y los correspondientes a t agua de imbibición / t caña molida ↑, para un % de fibra en caña de 13,0, se muestran a continuación:

←	2,07	2,22	2,25	2,32	2,49	2,5 - 2,56	2,65	2,67	3,7	4,16	5,03	5,11	5,14
↑	26,9	28,9	29,3	30,2	32,4	32,5 - 33,3	34,5	34,7	48,1	54,08	65,4	66,43	66,82

3.3.2 Resultados

Comportamiento del % Pol en bagazo cuando éste es imbibido con la disolución del Jabón B de aceite de caña a diferentes niveles de imbibición

En todas la corridas experimentales cuando se dosificó el surfactante al agua de imbibición, el % Pol en el bagazo residual fue menor respecto al testigo, al nivel de significación $\alpha= 0.01$ (Tabla 1 B, Anexo 4), independientemente del nivel de imbibición aplicado y del efecto de las variables no controladas que actuaron en el proceso de extracción (Fig. 3.16A y B).

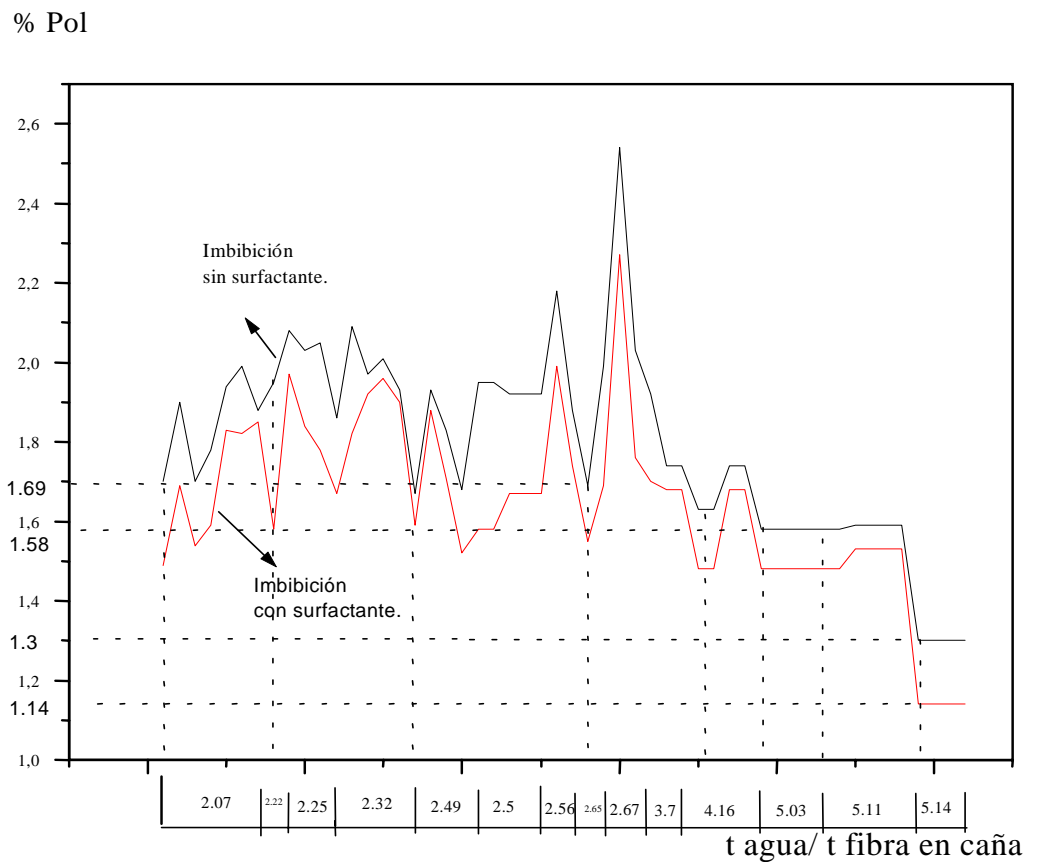


Fig. 3.16A Comportamiento del % Pol en bagazo para todo el rango de niveles de imbibición.

Los menores % Pol en bagazo se obtuvieron con la aplicación del surfactante del surfactante para los niveles de imbibición de 2,07, 2,49 y 2,5 (Fig. 2.16A y B). Sin embargo la diferencia entre los resultados al nivel de 2,07 t agua/t fibra caña, prácticamente no se diferencian de los alcanzados con estos dos últimos. El nivel 2,07 está muy cercano al óptimo económico recomendado en la literatura /8, 76, 83, 87, 94, 109, 158/.

Los niveles de % Pol en bagazo alcanzados cuando se adicionó el surfactante al agua de imbibición, con un nivel de imbibición de 2,07 sólo fueron posibles de alcanzar, sin aplicar el surfactante, a niveles de imbibición prohibitivos técnica y económicamente (Fig. 2.16A).

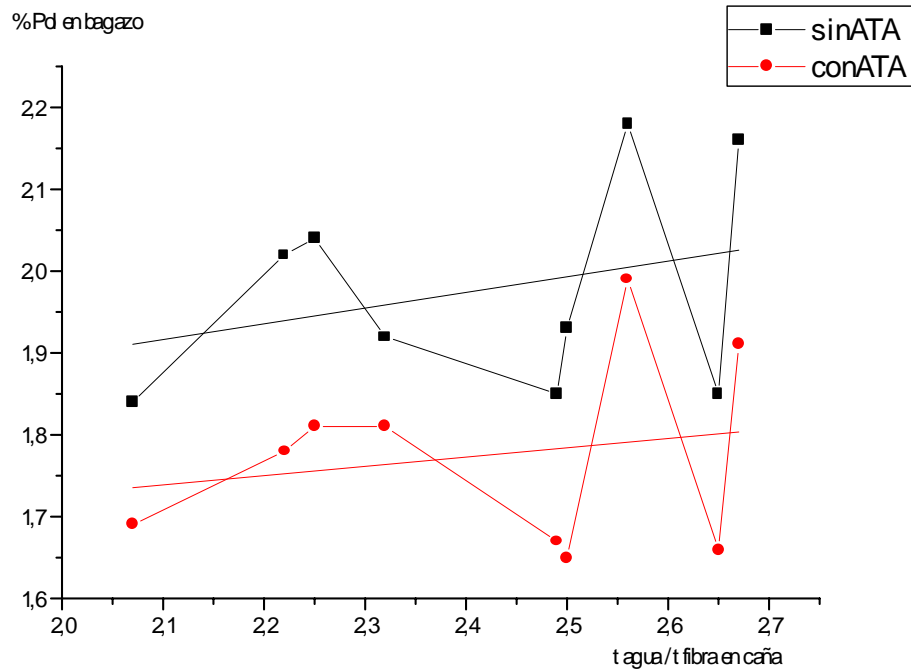


Fig. 3.16B Comportamiento del % Pol promedio en bagazo, en el rango de niveles de imbibición de 2,07 a 2,67 t agua/ t fibra en caña.

A partir del nivel de imbibición 2,07 y hasta 2,67 t agua / t fibra en caña, se observó cierta tendencia al incremento del %Pol en bagazo (Fig. 3.16B), aunque entre los niveles de imbibición de 2,32 y 2,67 t agua / t fibra en caña, el comportamiento del % Pol en bagazo fue más bien errático.

Las mayores disminuciones del % Pol en bagazo se obtuvieron con los niveles de imbibición de 2,5 y 2,67 (masa de agua/masa de caña = 32,5 a 34,7 %), aunque existieron pequeñas diferencias respecto a la obtenidas en el rango de 2,07 a 2,25 t agua/t fibra en caña. La disminución promedio del % Pol en bagazo (Fig. 3.17), fue de 0.155 con un error de 0.0126 (Tabla 1 A, Anexo 3). A partir de un nivel de imbibición de 2,67 los valores de la disminución del % Pol en bagazo que se obtienen con la aplicación del surfactante, fueron menores que el promedio.

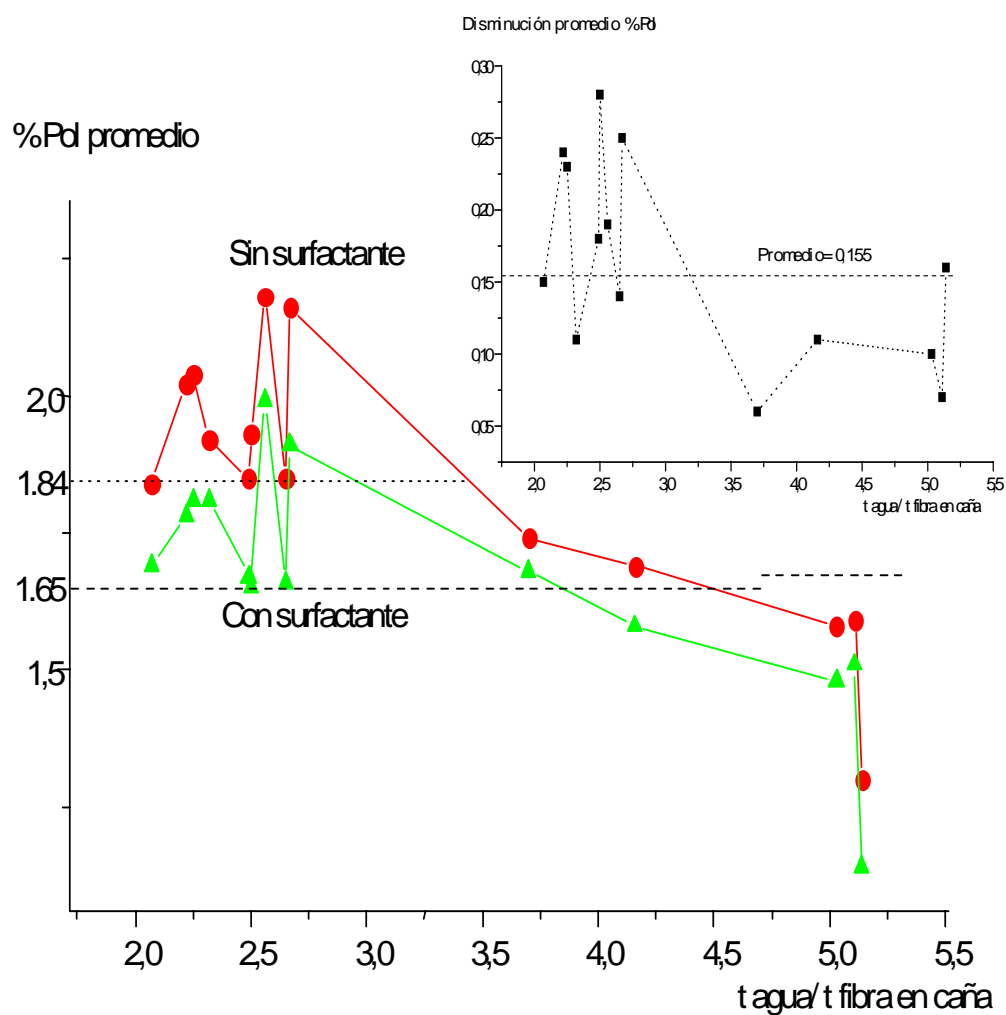


Fig. 3.17 Comportamiento del % Pol promedio en bagazo y su disminución, producto de la acción del surfactante.

Dentro de los niveles prácticos de imbibición con el incremento del nivel de imbibición, a partir de 2,22, ocurrió un aumento de la Pérdida de Molienda (Fig. 3.18A). La Pérdida de Molienda en todas las corridas, tanto cuando se imbibió con agua como con la disolución del surfactante, se mantuvo por debajo del 6 %, con valores máximos de 5,59 y 4,99 %, así como promedios de 3,95 y 3,61 respectivamente (Tabla 2 A, Anexo 4). Se observa variabilidad en los resultados experimentales (coeficiente de variación CV= 13,8 a 14, ver Anexo 4, Tabla 2 A y B) lo que indica que dentro del período de zafra evaluado, en la pérdida de molienda influyeron además variables no controladas en el experimento. La prueba de hipótesis para una cola demostró, que la media de la Pérdida de Molienda fue mayor cuando sólo se imbibió con agua, al nivel de significación $\alpha= 0.01$ (Tabla 2 B, Anexo 4). Las mayores disminuciones aparecieron dentro del rango de niveles de imbibición de 2,22 a

2,5 (28,9 a 2,5 % agua/caña). En la Fig. 3.18B están representados los promedios de la disminución de la Pérdida de Molienda por cada nivel de imbibición. Los altos valores del nivel de imbibición no influyeron significativamente en la disminución de este parámetro.

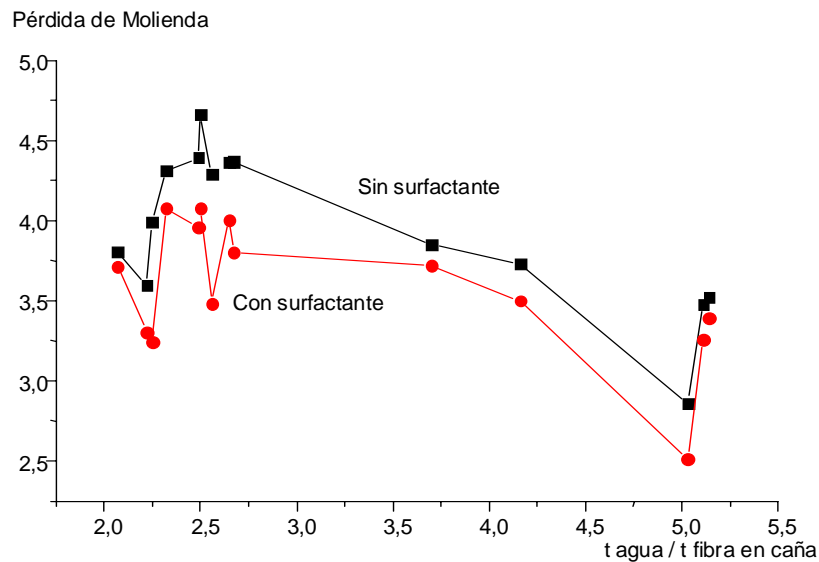


Fig. 3.18A Pérdida de molienda vs nivel de imbibición.

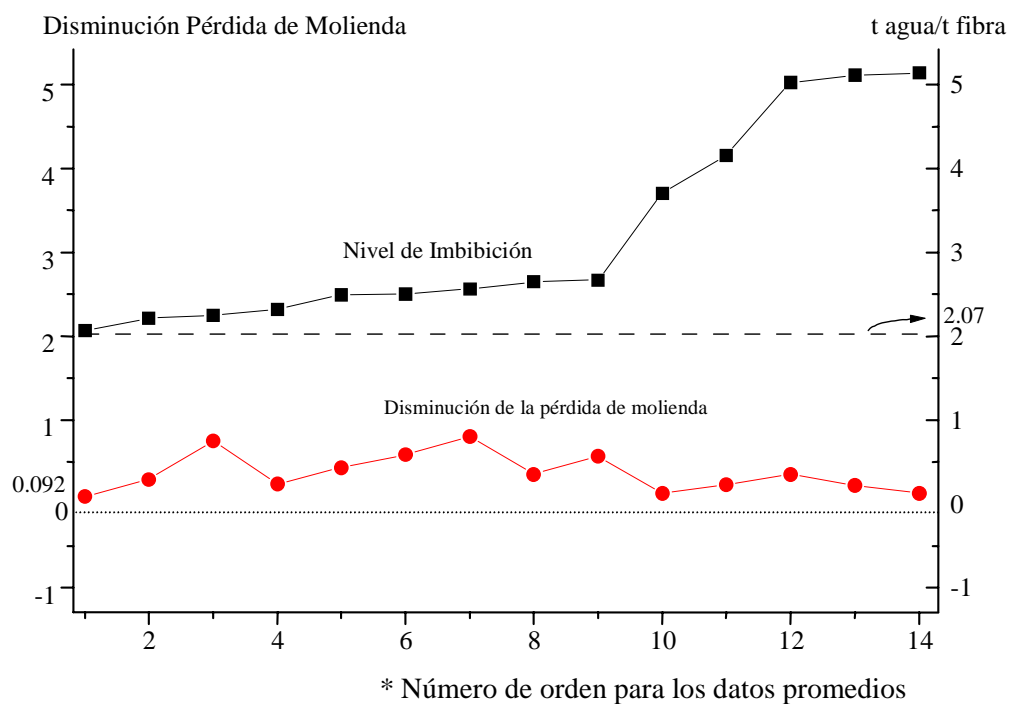
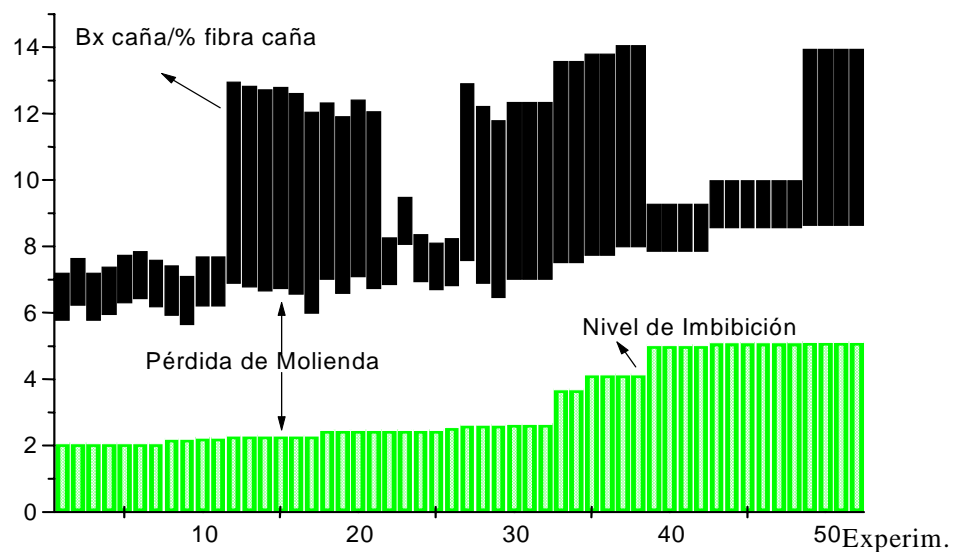


Fig. 3.18B Disminución de la Pérdida de Molienda cuando se añadió el surfactante al agua de imbibición vs nivel de imbibición.

La pérdida de molienda en dependencia del nivel de imbibición y la relación °Bx en caña / % Fibra en caña.

La Fig. 3.19 representa la Pérdida de Molienda en función de las variables Nivel de imbibición y °Bx del jugo de la caña / % fibra de la caña), en las corridas donde se imbibió con agua. Los datos experimentales fueron organizados en orden creciente del nivel de imbibición. La región superior representa la relación °Bx en caña/ % fibra en caña; la región central, las pérdidas de molienda; la región inferior el nivel de imbibición.

En las primeras veinte corridas experimentales y en las últimas diez, Fig. 3.19, parece que no existió una correlación definida entre la Pérdida de Molienda y las variables °Bx en caña / % fibra en caña y nivel de imbibición. Para valores significativamente diferentes de la relación °Bx en caña / % fibra en caña, se obtienen valores de pérdida de molienda que no varían significativamente, Fig. 3.19. No se pudo determinar una correlación entre la Pérdida de Molienda y las variables °Brix en caña / % fibra en caña), nivel de imbibición.



Experimentos ordenados en orden creciente del nivel de imbibición.

Fig. 3.19 Pérdida de Molienda vs (t agua/t fibraCaña , °Bx/ % fibra en Caña).

% Pol en jugo mezclado

El % Pol en jugo mezclado fue mayor en las corridas experimentales donde fue imbibido el bagazo con la disolución del surfactante respecto al tratamiento a 0 ppm, al nivel de significación $\alpha=0,01$, para una prueba de una cola (Tabla 3, Anexo 4). Los mayores aumentos en el % Pol aparecieron en el nivel de imbibición de 2,07. El aumento más estable apareció en los niveles de imbibición de 2,25 a 2,5 t agua/ t fibra en caña.

Aumento del % Pol en JM

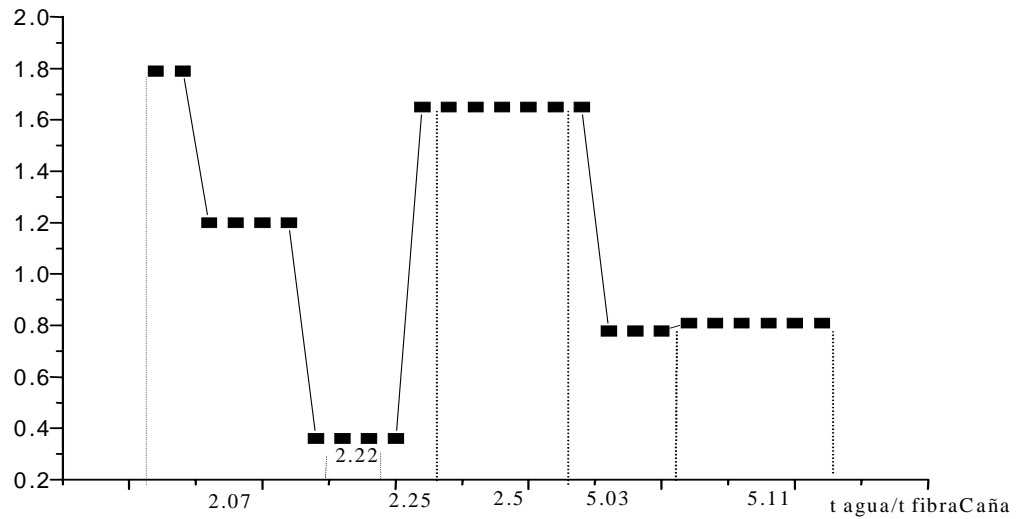


Fig. 3.20 Aumento del % Pol en jugo mezclado al imbibir el bagazo con la disolución del surfactante.

% Humedad en el bagazo residual

El % Humedad en el bagazo residual fue significativamente menor cuando se imbibió con la disolución del surfactante, al nivel de significación $\alpha=0,01$.

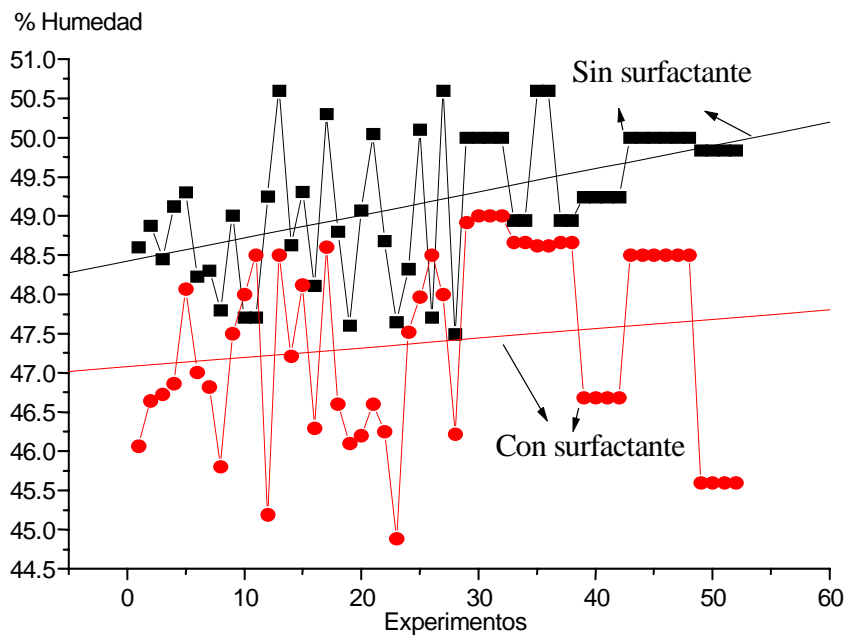


Fig. 3.21 % Humedad en el bagazo residual

Las rectas en la Fig. 3.21 representan las líneas de tendencia. La recta superior corresponde a los tratamientos a 0 ppm y tiene mayor pendiente, ($m= 0,0295$ con $R= 0,497$, $R^2= 0,247$, $SD= 0,787$ y $R_{\text{crítico}}= 0,443$ al nivel $\alpha= 0.001$), que la recta de tendencia que representa los tratamientos con surfactante ($m= 0,0122$ con $R= 0,153$, $R^2= 0,0233$, $SD= 1,20641$ y $R_{\text{crítico}} > R$ al nivel $\alpha= 0.3$). Aunque el coeficiente de regresión de ésta última no fue significativo, se representó con fines ilustrativos. En ambos existió una tendencia, según las rectas representadas, al aumento del % Humedad en bagazo con el incremento del nivel de imbibición. En la Fig. 3.22 se muestran los promedios de la disminución del % Humedad en bagazo para cada nivel de imbibición. La recta horizontal para el nivel de imbibición 2,07 indica que con el aumento del nivel de imbibición, existió cierta tendencia al decremento del efecto del surfactante en la disminución del % Humedad en bagazo. A partir del nivel de imbibición 3,7, tomado como referencia en la zona de altos niveles de imbibición, apareció cierta tendencia al aumento de la efectividad del surfactante, pero inferior a las alcanzadas por debajo de 2,5 t agua/ t fibra en caña. A partir del nivel de imbibición 5, el comportamiento fue muy errático.

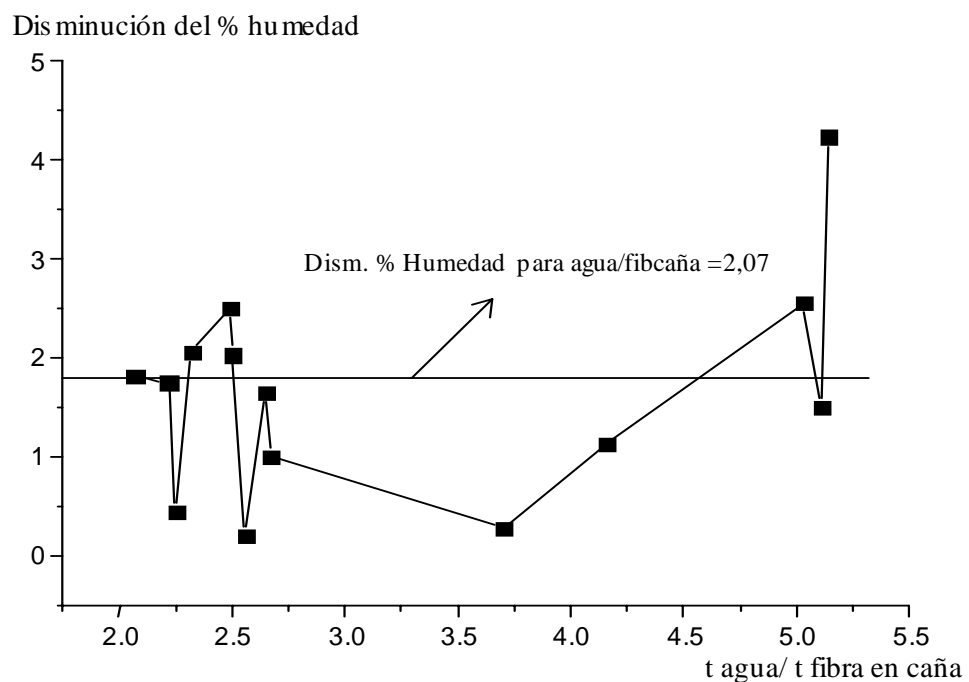


Fig. 3.22 Disminución del % humedad en bagazo al aplicar el surfactante vs nivel de imbibición.

Relación entre el % Humedad y el % Pol en el bagazo residual

La Fig. 3.11 ofrece los datos experimentales de % Humedad en bagazo cuando no se aplica el surfactante, en relación con el % Pol y el nivel de imbibición. Los resultados están ordenados en la Fig. 3.23 por el orden creciente del % Pol en el bagazo residual. No se pudieron representar las tendencias por una línea recta, ya que el coeficiente de regresión no fue significativo inclusive al nivel $\alpha=0,5$. No fue posible establecer una relación entre los % Humedad y % Pol en el bagazo residual, dentro del rango de niveles de imbibición empleados.

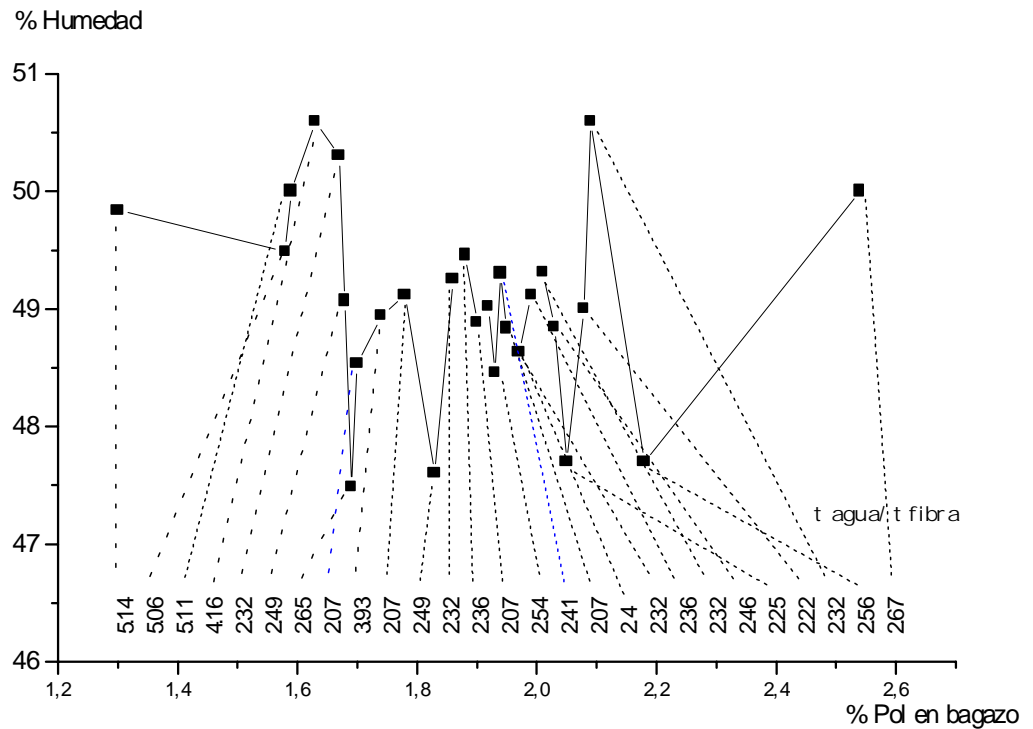


Fig. 3.23 Relación entre el % Humedad y el % Pol en bagazo.

3.4.0 Experimento de tamizado. Etapa Industrial III

En esta tercera etapa de la evaluación industrial de los surfactantes en el proceso de extracción, se realizó un experimento complementario a los de las etapas anteriores, para ampliar la información obtenida acerca de la influencia que ejercen el nivel de imbibición, la tem-

peratura y la concentración del surfactante en el proceso de extracción en tándem de molinos. Se incluyó además la presión en la desmenuzadora.

Se empleó un diseño factorial de experimentos $2^4/60, 154/$ para estudiar el efecto de estas variables y sus interacciones en los % Pol y % Humedad del bagazo, bajo las condiciones existentes durante los experimentos. El diseño experimental se ajustó a las condiciones materiales en el central azucarero y a las facilidades otorgadas por sus directivos (Tabla 1, Anexo 5). Durante el experimento se controló la presión en los molinos.

Los datos experimentales fueron procesados mediante el paquete de programas de estadística STATGRAPHICS versión 7.0. Los resultados del procesamiento estadístico aparecen en el Anexo 5. (Tablas 2 y 3, Anexo 5).

En el modelo para el % Pol en el bagazo residual, se tomó el nivel de significación $\alpha=0,05$ para la entrada de las variables. La variable PrDesm no tuvo un efecto significativo (Tablas 2 y 5, Anexo 5). Para las condiciones en que se desarrolló el experimento, las variables de mayor influencia fueron la temperatura y la concentración del surfactante (Figs. 3.24 y A5a del Anexo 5). Las interacciones Agua-ppm, ppm-Temp y Agua-Temp fueron significativas al nivel $\alpha=0,05$. La interacción Agua-Temp influyó en mayor grado que el nivel de imbibición (Fig. 3.24). Según el comportamiento de la superficie de respuesta (Fig. 3.25), respecto a las variables agua-Temp, los mejores resultados en la disminución del % Pol en bagazo, se obtuvieron con los valores bajos del nivel de imbibición y de la temperatura. El efecto combinado de las variables Agua-ppm aunque significativo, fue pequeño. El mayor efecto de esta interacción en la disminución del % Pol se produjo en los valores altos de ambas variables (Fig. 3.26).

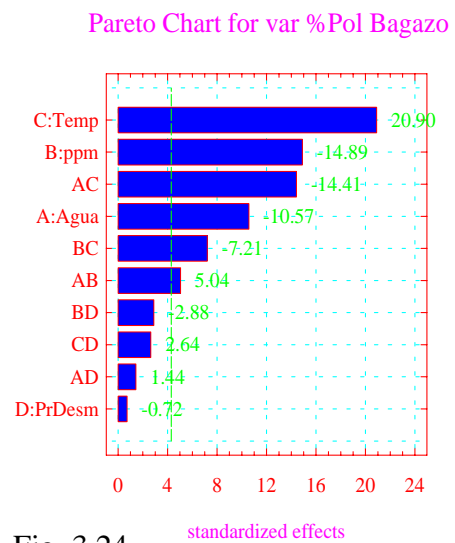


Fig. 3.24

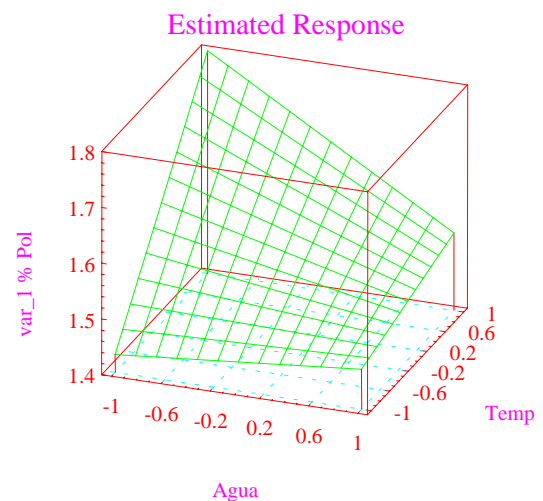


Fig. 3.25

Respecto al efecto de la interacción ppm-Temp, los menores % Pol en bagazo se obtuvieron cuando la concentración del surfactante fue alta y baja la temperatura (Fig. 3.27). El análisis de varianza indicó que no existió efecto de curvatura para las variables en el modelo $P >> 0,05$ (Tablas 2 y 5, Anexo 5).

Modelo codificado:

$$\% \text{ Pol} = 1.560526 - 0.055 X_1 - 0.0775 X_2 + 0.10875 X_3 + 0.02625 X_1 X_2 - 0.075 X_1 X_3 - 0.0375 X_2 X_3$$

Donde:

Agua .. (λ) nivel de imbibición; rango: 1,49 - 2,24
t agua/ t fibra caña. Variable codificada, X_1

ppm ...concentración del surfactante en el agua de imbibición; rango: 20 – 40 kg surfactante/t agua. Variable codificada, X_2

Temp..temperatura del agua de imbibición; rango: 70 – 80 °C. Variable codificada, X_3

.PrDesm ... (P) presión hidráulica en la desmenuzadora; rango: 2 000 - 2 500 lb / in². Variable codificada, X_4

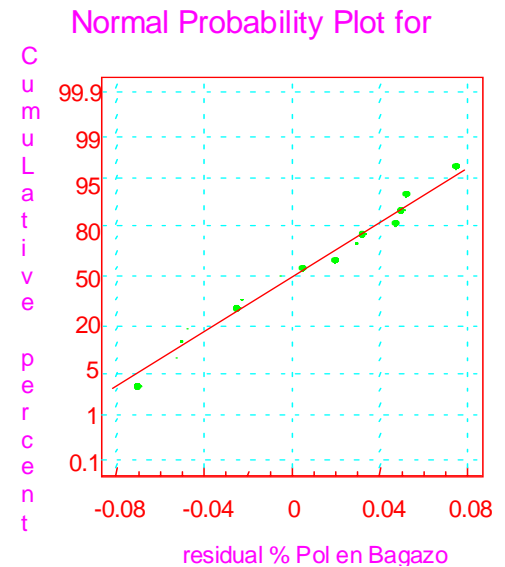


Fig. 3.28

El modelo es adecuado. $P_{\text{Falta de ajuste}} > 0,05$ (Tabla 2, Anexo 5). Además, el análisis de residuos del modelo mostró que éstos siguieron una distribución normal con media prácticamente cero (Fig. 3.28), lo que corroboró la adecuación del modelo (Tabla 4 A y B, Anexo 5).

El análisis de varianza permitió simplificar aún más este modelo (Tabla 5 A, Anexo 5). Se tomó el nivel de significación $\alpha=0,0002$ para la entrada de las variables. Se excluyeron las interacciones $X_1 X_2$ y $X_2 X_3$.

$$\% \text{ Pol} = 1,560\ 526 - 0.055 X_1 - 0,077\ 5 X_2 + 0.108\ 75 X_3 - 0.075 X_1 X_3$$

La $P_{\text{Pérdida de ajuste}} > 0,000\ 2$, por lo que no fue significativa (Tabla 5 A y B, Anexo 5). Este hecho lo corroboró la distribución de los residuos en el diagrama normal de probabilidades (Fig. A5a., Anexo 5).

Modelo decodificado:

$$\% \text{ Pol} = - 5,196\ 209 + 2,866\ 77 \lambda - 0,00775 \text{ ppm} + 0,096\ 811 \text{ Temp} - 0,040\ 161 \lambda. \text{Temp}$$

En el modelo para el % Humedad en bagazo, para la entrada de las variables se eligió el nivel de significación $\alpha = 0,10$ (Tabla 6 A, Anexo 5). No resultó significativa la variable Temp, pero sí su interacción con el nivel de imbibición. Esta interacción es la única que resultó significativa en el modelo para ese nivel de significación (Fig. 3.29).

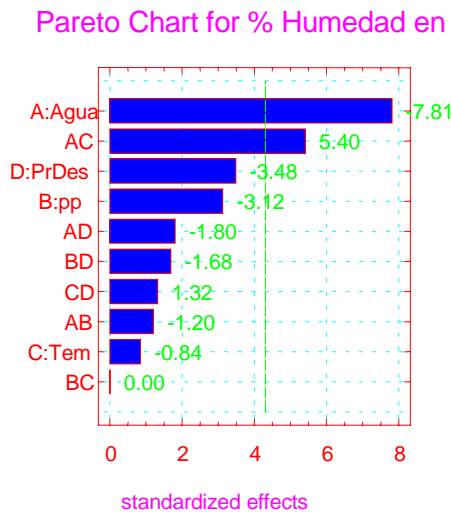


Fig. 3.29

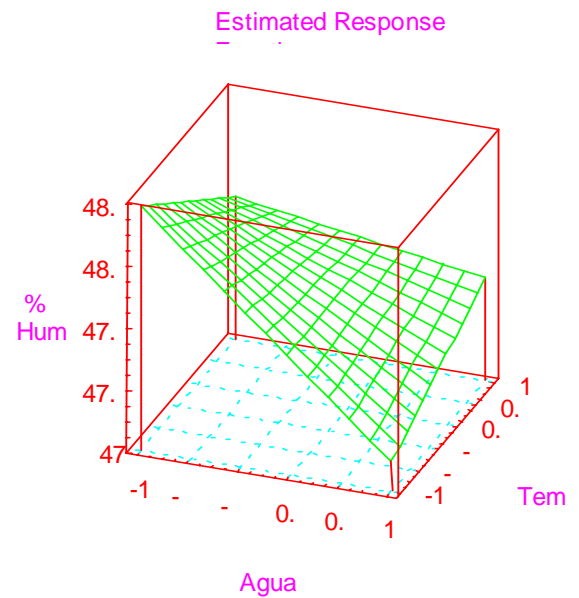


Fig.

El mayor efecto de las variables y su interacción, en la disminución del % Humedad en el bagazo según la superficie de respuesta, se produjo hacia los valores altos del nivel de imbibición y los bajos de la temperatura (Fig. 3.30). Los menores valores del % Humedad se obtuvieron también con los valores altos de la concentración del surfactante y de la presión en la desmenuzadora.

Modelo codificado:

$$\% \text{ Humedad} = 47,831579 - 0,404625 X_1 - 0,1625 X_2 - 0,18125 X_4 + 0,28125 X_1 X_3$$

La pérdida de ajuste no fue significativa $P_{\text{Falta de ajuste}} \gg 0,10$ (Tabla 6 A, Anexo 5). No existió efecto de curvatura $P > 0,10$ (Tabla 6 B, Anexo 5). El análisis de residuos mostró que siguieron una distribución normal (Fig. A5b., Anexo 5), con media prácticamente cero (Tabla 6, Anexo 5), por lo que se aceptó que el modelo es adecuado.

Modelo decodificado:

$$\% \text{ Humedad} = 68,861322 - 12,37848 \lambda - 0,01625 \text{ ppm} - 0,22515 \text{ Temp} - 0,000725 P + 0,150602 \lambda \cdot \text{Temp}$$

Conclusiones Parciales del Capítulo 3

1. La curva de operación obtenida para la bomba dosificadora permitió utilizarla adecuadamente.
2. Todos los surfactantes evaluados fueron capaces de disminuir económicamente el % Pol y el % Humedad en el bagazo residual y mostraron la mayor efectividad, en el rango de concentraciones donde las tensiones superficiales de sus disoluciones acuosas fueron menores.
3. Entre los efectos de los surfactante jabones A y B, en cuanto a disminución de los % Pol y % Humedad en el bagazo residual, no se encontraron diferencias estadísticas dentro del rango de concentraciones en el agua de imbibición de 20 a 30 ppm, pero sí respecto a 0 ppm. Esto concuerda con el comportamiento de las curvas tensiométricas.
4. El % Pol, % Humedad en el bagazo residual y la Pérdida de Molienda, disminuyeron significativamente al aplicar el surfactante Jabón B, independientemente del nivel de imbibición empleado.
5. No se observó una relación definida de la Pérdida de Molienda con el nivel de imbibición y la relación Brix del jugo en caña/ %fibra en caña.
6. La disminución del % Pol en bagazo producto de la aplicación del surfactante Jabón B al agua de imbibición, provocó un aumento del % Pol en el jugo mezclado.
7. Los modelos obtenidos son adecuados. Los % Pol y % Humedad en el bagazo, calculados mediante el modelo, no difirieron significativamente de los datos experimentales. El efecto del comportamiento de las variables en los modelos, sobre los % Pol y % Humedad en el bagazo, coincide con los resultados de la práctica industrial.
8. Se confirma la hipótesis planteada de que: un surfactante aniónico, con propiedades como humectante, que disminuya la tensión superficial del agua de imbibición intensifica el proceso de extracción de la sacarosa de la caña en el tándem de molinos.
9. La metodología de investigación empleada permitió conducir con éxito la investigación en la etapa industrial y determinar el rango de concentraciones en el agua de imbibición más efectivo de cada surfactante. En todos los casos, a este rango de concentraciones correspondieron las menores tensiones superficiales de sus disoluciones acuosas.
10. La adición de surfactantes a dosis menores de 30 ppm al jugo mezclado, incrementó la calidad del jugo clarificado y de los lodos.

CAPITULO 4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Comportamiento de las curvas de tensión superficial de las disoluciones acuosas en función de la concentración de los surfactantes, a temperatura constante.

Las curvas tensiométricas de las disoluciones acuosas de los surfactantes mostraron un comportamiento que puede ser considerado anómalo por muchos investigadores en la actualidad. Sin embargo, este fenómeno ha sido señalado por diversos investigadores, Davies /26/, McBain /101/, Glasstone /57/, Shaw /145/, Valea /159/, para las disoluciones acuosas de jabones sódicos y otros surfactantes. Según estos autores los puntos de extremos relativos son típicos en disoluciones de surfactantes a concentraciones cercanas a la micelar crítica. Sin embargo este fenómeno se observó en esta investigación a bajas concentraciones, condición que no ha sido publicada. Según Valea /159/, tal comportamiento es de difícil interpretación.

Las curvas más sinuosas correspondieron a los jabones A, B y C. Shaw /145/, atribuye esta anomalía a trazas de impurezas que se absorben en la interfase a concentraciones por debajo de la micelar crítica. La afirmación anterior se confirmó en el comportamiento de las curvas tensiométricas de los jabones de aceite de caña empleados en esta investigación. Éstos fueron los que presentaron mayores cantidades de impurezas en su composición, debido a las características de las materias primas empleadas en su elaboración. No obstante, este fenómeno no se presentó cuando Adán y Gil /2/, Gil /52/ estudiaron intervalos más amplios que los aquí empleados y con ello se redujeron las probabilidades de que estos puntos se presentaran.

El efecto de la concentración del surfactante en la existencia de puntos anómalos, en la curva tensiométrica, pudo también estar relacionada con un posible efecto sobre el potencial electrocinético y la estructura de la doble capa en la interfase gas – líquido. Valea /159/, planteó que se han detectado hasta dos concentraciones micelares críticas. Entonces, no se descarta la posibilidad de la formación de micelas a concentraciones por debajo de la micelar crítica, que es la concentración según nuestro criterio, en la que ya existe un número suficiente de micelas como para manifestarse el fenómeno a escala macroscópica.

Todos los factores antes mencionados pudieron influir de una forma u otra en la aparición de los puntos anómalos en las curvas tensiométricas de los surfactantes empleados en esta investigación. Se considera que este fenómeno aún no ha sido suficientemente estudiado. Sin embargo, puede tener una repercusión económica considerable desde el punto de vista de la racionalización del consumo del surfactante, en los diferentes procesos donde se aplican para modificar la tensión superficial, la viscosidad, o ambas.

4.2 Efecto en la tensión superficial y viscosidad del jugo al imbibir el bagazo con soluciones acuosas del surfactante

La acción del surfactante Jabón B a concentraciones de 20 y 30 ppm se reflejó en una clara disminución de la tensión superficial del jugo respecto al testigo, comportamiento inverso al que ocurre a las concentraciones de 40 y 80 ppm. Esta contradicción no tiene explicación en la literatura. En ésta no aparecen estudios acerca de la influencia de los surfactantes en la tensión superficial de los jugos de la caña de azúcar, a concentraciones menores de 100 ppm. No obstante, pudiera pensarse que la curva tensiométrica del surfactante en el jugo también pudo presentar puntos anómalos, los que no se determinaron.

La determinación de la viscosidad no fue considerada como un objetivo de la investigación. No obstante, se realizaron determinaciones con fines cualitativos. La finalidad de las mediciones estuvo dirigida a observar de manera preliminar, alguna posible influencia del surfactante sobre este parámetro, ya que se conoce por la literatura, /10, 11, 19, 22, 23, 24, 37, 96, 155, 156/, la influencia de los surfactantes en las propiedades reológicas de mieles y licores en el proceso de producción de azúcar de caña.

El efecto del surfactante en la disminución de la viscosidad del jugo fue más acentuado en el intervalo de 20 a 30 ppm, lo que parece indicar que existe una relación entre el efecto del surfactante en las tensiones interfaciales (líquido - sólido y líquido - gas) y la viscosidad del jugo de la caña. Ésto no tiene antecedentes en la literatura consultada.

4.3 Efecto de la presencia de un surfactante en el agua de imbibición en la compresibilidad del bagazo

El efecto del surfactante sobre la compresibilidad del bagazo, se atribuyó a la disminución de la presión capilar, a causa de la disminución de la tensión superficial en el jugo. Este resultado guardó correspondencia con el efecto encontrado para la tensión superficial y la viscosidad de los jugos. No obstante, los valores de estas variables en los jugos están fuertemente influenciados por las sustancias que se originan por la acción de los microorganismos sobre diversos constituyentes del jugo de la caña, por la variedad y la calidad de la caña a procesar, así como por las presiones ejercidas para extraer el jugo. Diversos autores han señalado que la composición del jugo extraído depende de la presión aplicada para exprimir la caña /82, 121, 129/.

4.4 Efecto de los surfactantes en la purificación de los jugos de la caña de azúcar

Existe la posibilidad de que los surfactantes que se adicionan al agua de imbibición, para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos, pasen al jugo que es enviado al proceso de purificación. En la literatura consultada sólo Ramaiah y otros /130/ hacen referencia a este aspecto. Plantean que el Sushira precipita completamente en

el proceso de purificación. No obstante, existe la creencia general de que sólo son beneficiosos en los procesos por flotación. Esto motivó que fuera investigada esta situación. Los resultados de la investigación, tanto a escala de laboratorio como industrial indicaron que la presencia de un surfactante en el jugo a purificar no afectó el proceso, sino que provocó mejoras.

Efecto de los surfactantes en la remoción de sólidos insolubles durante el proceso de purificación

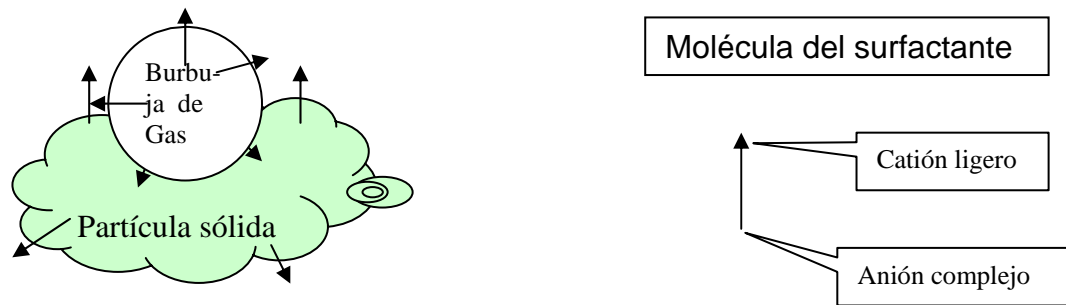
La presencia de los surfactantes en el proceso de purificación, dio como resultados jugos clarificados con menor contenido de sólidos insolubles en suspensión. Cuando se analizó la remoción de sólidos insolubles, que se logró por los diferentes tratamientos, se apreciaron mejores resultados cuando estuvo presente el surfactante. El efecto dependió del tipo de surfactante y de la concentración inicial en el jugo a purificar. Aunque los porcentajes de remoción de insolubles son pequeños, su repercusión en el resto del proceso puede ser notable. La concentración de sólidos insolubles no removidos del jugo a 16 °Bx, puede alcanzar valores de concentración 47 veces mayores cuando la concentración de la miel en el tacho llega a 90 °Bx.

El efecto beneficioso de los surfactantes a determinada concentración, en el proceso de sedimentación de las partículas, puede ser explicado mediante el fenómeno de la humectación. Así, el surfactante aumenta el trabajo de adhesión entre el líquido y la superficie sólida de las partículas y disminuye el de cohesión del líquido con lo que reduce el ángulo interfacial de humectación [25, 26, 57, 140, 145, 151].

Como los sólidos en suspensión que contiene el jugo de caña que entra al clarificador, tienen ocluidas o pegadas a su superficie burbujas de aire o de gases incondensables, las que provocan que la densidad media ρ_m de la partícula en suspensión sea muy diferente de la del material sólido y si la $\rho_m < \rho_{\text{jugo}}$ la partícula tiende a flotar; si $\rho_m \cong \rho_{\text{jugo}}$ no sedimenta, pero si $\rho_m - \rho_{\text{jugo}} > 0$ entonces sedimenta con una velocidad que depende, entre otras variables, de la magnitud de la diferencia $\rho_m - \rho_{\text{jugo}}$ [35, 102, 133]. La presencia del surfactante en la interfase sólido - líquido - gas de las burbujas retenidas por el sólido, provoca un incremento en la humectación del sólido por el jugo. Como consecuencia, parte de la interfase sólido - gas es reemplazada por la interfase sólido - líquido, con lo que las burbujas adquieren una forma más esférica. Esta condición facilita que éstas se desprendan de la superficie de las partículas. En dependencia de la magnitud de la disminución del ángulo interfacial de humectación que logre el surfactante, será menor el volumen de las burbujas que logran desprenderse, ya que la fuerza de flotación que ejerce el líquido sobre la burbuja es directamente proporcional al volumen de ésta, de acuerdo con la ley de Arquímedes [16] para la flotación de los cuerpos. Cuando la fuerza de flotación supera la fuerza con que es retenida la burbuja por el sólido, ésta se desprende. Al desprenderse la burbuja de gas la

densidad promedio de la partícula en suspensión aumenta, lo que provoca un incremento de su velocidad de sedimentación.

Jugo



Las diferencias de efecto de los dos surfactante, pudiera explicarse si se asume que el comportamiento de la tensión superficial del jugo se afecta de forma similar a la del agua por la concentración del surfactante.

Estos resultados demostraron que no tenía una fundamentación científica, la creencia acerca de que los surfactantes sólo son beneficiosos en los procesos de separación por flotación, de las partículas en suspensión en líquidos.

Efecto de los surfactantes en la remoción de gomas durante el proceso de purificación

Los constituyentes del jugo de la caña de azúcar denominados “gomas”, son generalmente compuestos mucilaginosos de alto peso molecular que se presentan en estado coloidal. Son coloides hidrofílicos que por su estabilidad son difíciles de eliminar durante el proceso de purificación. Estos coloides, debido a su afinidad por el agua, no se alteran por la adición de pequeñas cantidades de electrólito, que pueden hacer flocular a los coloides hidrofóbicos, pero pueden hacerlos precipitar cuando la concentración de electrólito es alta. En ese caso los iones del electrólito añadido deshidratan el coloide por competencia por su agua de hidratación [25, 140, 145]. En el proceso normal de purificación mediante la combinación cal – calor, no se alcanza la concentración del catión Ca^{2+} necesaria para la precipitación de estos compuestos. Estos materiales mucilaginosos son responsables en gran medida de las altas viscosidades en jugos, meladura y mieles, de ahí la importancia de su eliminación durante el proceso de purificación.

La adición de surfactantes al jugo a purificar provocó un aumento en la remoción de gomas tanto con el Sulker Floc como con el jabón A. Sin embargo, este efecto dependió del tipo de surfactante y de la concentración de éste en el jugo. Este hecho no aparece publicado en la literatura.

Shaw [145] plantea que a concentraciones bajas los aditivos con actividad superficial pue-

den formar una primera capa adsorbida sobre las partículas coloidales con la parte hidrofóbica orientada hacia el líquido. De este modo se sensibiliza el coloide, mientras que a concentraciones mayores se forma una segunda capa orientada en sentido contrario, que actúa como protectora. Este mecanismo es el que se considera fue responsable de los resultados obtenidos en la remoción de gomas de jugo mezclado a clarificado en presencia del surfactante.

Efecto de los surfactantes en el aumento de cenizas de jugo mezclado a jugo claro durante el proceso de purificación

El proceso de purificación del jugo de la caña más difundido es el proceso cal – calor. El proceso de purificación tradicional no es capaz de eliminar todo el calcio, el magnesio, la sílice y otros componentes inorgánicos presentes en forma de dispersión coloidal muy estable en el jugo alcalizado y que en mayor cuantía ingresan al jugo con la lechada de cal. La precipitación del calcio pudiera ser mucho mayor si se balanceara previamente la relación calcio/fosfato en el jugo a purificar /73, 139/, sin embargo, esto generalmente no se hace. Esta situación provoca que en el jugo claro el contenido de cenizas sea mayor que en el jugo mezclado. Estos componentes siguen el curso del proceso y son responsables de incrustaciones en los equipos de transferencia de calor y otros trastornos tecnológicos del proceso de fabricación de azúcar crudo.

La purificación de los jugos, tanto en presencia del Jabón A como del Sulker Flocc, dio jugos claros con menor contenido de cenizas respecto a los jugos donde no se añadió el surfactante. El efecto dependió del tipo de surfactante y de la concentración en el jugo. El mecanismo de acción del surfactante para sensibilizar estos coloides, pudo ser el mismo que el que actuó en la remoción de gomas. Además, es conocido que los jabones forman precipitados insolubles con los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} /30, 32, 60, 61, 104, 110, 146, 151/, lo que indica que parte del exceso de estos iones que no precipitaron producto de las reacciones con el fosfato del jugo /73, 139/ pudieron reaccionar con el surfactante y precipitar en forma de jabones insolubles.

Efecto de los surfactantes en la compactación de la cachaza durante el proceso de purificación

En todos los casos donde se aplicó el surfactante la relación sólido – líquido en la cachaza fue mayor que la existente cuando en el proceso no se aplicó el surfactante. Este comportamiento se corresponde con el efecto del surfactante en los sólidos insolubles. Al disminuir el contenido de gases en las partículas que sedimentan, su densidad es mayor lo que provoca un mayor empaquetamiento de éstas en el sedimento. Shaw /145/, plantea que una agitación suave contribuye a aumentar la densidad del empaquetamiento de las partículas.

4.5 Los surfactantes en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar

En general los resultados experimentales obtenidos, a escala de laboratorio, con los surfactante ensayados, corroboraron la hipótesis inicial planteada en la investigación. La adición de estos surfactantes aniónicos, con propiedades como humectantes, al agua de imbibición, disminuyeron los % de Pol y de Humedad en el bagazo residual. La magnitud de la disminución estuvo influenciada por el tipo de surfactante y la concentración de éste en el agua de imbibición. Se observó que la magnitud de la disminución de ambos parámetros, para determinadas concentraciones del surfactante en el agua de imbibición, estuvo estrechamente relacionada con el comportamiento de la curva tensiométrica. No existió el mismo efecto de la concentración del surfactante, en el agua de imbibición, en la disminución de los % de Pol y de Humedad en el bagazo residual. Este hecho indicó que los mecanismos de acción del surfactante pueden ser diferentes en la modificación de estos parámetros, aunque la variable tensión superficial influye fuertemente en ambos fenómenos.

Los experimentos de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar a escala industrial. Etapa Industrial I

La evaluación del comportamiento de diferentes surfactantes para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos, se realizó en diferentes centrales azucareros y en diferentes etapas de la o las zafras. No existió una uniformidad entre los diferentes centrales, en prácticamente todas las variables que influyeron en los resultados del proceso de extracción. Entre ellas se pueden mencionar el factor humano, las características y estado técnico de los equipos que intervinieron, directa o indirectamente, en el proceso de extracción, el agua de imbibición, la materia prima, etc.

Los jabones A, B y C de aceite de caña en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos a escala industrial

Estos jabones cuando estuvieron presentes en el agua de imbibición, fueron capaces de disminuir los % Pol y % Humedad del bagazo residual. El Jabón C fue menos efectivo que los jabones A y B, lo que era de esperar debido al diferente comportamiento de sus curvas tensiométricas. No obstante, en el central “Jesús Menéndez” (zafra de 1996), los efectos de los jabones A y B en la disminución de % Pol en bagazo a las mismas concentraciones en el agua de imbibición, prácticamente no se diferenciaron entre sí (Fig. 3.5), debido a que en el rango de concentraciones estudiado, sus curvas tensiométricas no se diferenciaron estadísticamente al nivel de significación $\alpha = 0,15$.

Las tendencias del comportamiento del efecto de las concentraciones del Jabón A en el agua de imbibición, en el central “López Peña”, zafra de 1995, fueron muy parecidas a las

obtenidas en el central “Jesús Menéndez” aunque de diferentes magnitudes (Fig. 3.8 y 3.9). Las concentraciones más efectivas del Jabón B, en el central “Majibacoa” (zafra de 1995), cayeron dentro del rango obtenido en el “Jesús Menéndez” y coincidieron además con la concentración más efectiva del surfactante para modificar la compresibilidad del bagazo (Fig. 2.4), obtenida en este central en 1997. En la zafra de 1995 los resultados obtenidos con el Jabón C, en el central “Amancio Rodríguez” a escala de laboratorio (Fig. 2.7 y 2.8) y en el “Majibacoa” a escala industrial, fueron coincidentes.

El efecto de la concentración del Sulker Floc en el agua de imbibición sobre los % Pol y % Humedad del bagazo, tuvo un comportamiento similar en los centrales “Majibacoa” (Fig. 3.6 y 3.7) y “López Peña” (Fig. 3.8 y 3.9), zafra de 1995. En ambos, aunque de diferentes magnitudes, el menor efecto se obtuvo en el rango de concentraciones de 20 a 30 ppm, donde la curva tensiométrica de las disoluciones acuosas de este surfactante presentó un máximo (Fig. 2.2.1). Sin embargo, los resultados fueron mejores a las concentraciones de 10 y 15 ppm, lo que coincidió con la región del mínimo que aparece en la curva tensiométrica a esas concentraciones.

El jabón sódico obtenido a partir del Sulker Floc, dio resultados que se pueden considerar superiores en magnitud a los obtenidos con éste, ya que los % Pol y % Humedad en el bagazo, antes de iniciar el experimento, eran mucho menores que los correspondientes a los centrales “Majibacoa” y “López Peña”. Como era de esperar, las concentraciones más efectivas también fueron diferentes. Sin embargo, el jabón de Sulker Floc aunque es rentable su empleo, puede ser económicamente menos efectivo que este último, por que requiere mayores concentraciones.

El Pan Aid y el detergente sintético para intensificar del proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos a escala industrial

En el Central “Colombia”, en la zafra del 92 respecto a la del 93 (Figs. 3.14 y 3.15), existieron diferencias en el efecto de las concentraciones de los surfactantes Pan Aid y detergente sintético en las disminuciones de los % Pol y % Humedad del bagazo. En la zafra del 92, en los efectos sobre la disminución del % Pol en bagazo, no se observaron diferencias apreciables en el comportamiento de los dos surfactantes. El efecto de las menores tensiones superficiales del Pan Aid sobre el % Pol en bagazo, se pusieron de manifiesto a 40 ppm. A 80 ppm el resultado fue contradictorio, desde el punto de vista de la tensión superficial, ya que ésta fue mucho menor que en el detergente a esa concentración. Sin embargo, el efecto de la tensión superficial del agua de imbibición sobre el % Humedad del bagazo, se mostró con fuerza. A la concentración de 80 ppm existió una diferencia notable en la disminución del % Humedad, mientras que a 40 ppm fue pequeña, lo que coincidió casi totalmente con el comportamiento de las curvas tensiométricas de ambos surfactantes.

En la zafra del 93, el efecto de la tensión superficial del agua de imbibición sobre la disminución de los % Pol y % Humedad del bagazo fue más apreciable. Esto pudo estar dado, por una mejor operación del sistema de dosificación del surfactante al agua de imbibición, debido a la experiencia adquirida en la zafra anterior.

Las menores tensiones superficiales del agua de imbibición cuando se adicionó el Pan Aid, provocaron mayores disminuciones de los parámetros analizados respecto al efecto del detergente a la misma concentración. En relación con la disminución del % Pol, el Pan Aid mantuvo la misma tendencia al aumento del efecto con el aumento de la concentración, mientras que el detergente no. Ésto se explica por el comportamiento de sus respectivas curvas tensiométricas, aunque parcialmente, ya que la viscosidad debió influir en el proceso. Pero, no se obtuvieron datos acerca del efecto de estos surfactantes sobre la viscosidad del jugo. Respecto al efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición sobre el % Humedad del bagazo, el comportamiento se corresponde con el de sus respectivas curvas tensiométricas.

El comportamiento del efecto del tipo de surfactante y de la concentración en el agua de imbibición sobre los % Pol y % Humedad del bagazo en los diferentes centrales indicaron, que estuvieron influenciados por otras variables que actuaron sobre el proceso de extracción. No obstante, el comportamiento de los datos experimentales en relación con la concentración del surfactante en el agua de imbibición, guardó estrecha correspondencia con el de la curva tensiométrica de sus disoluciones acuosas. Esto dio un indicador de que es totalmente factible, iniciar las evaluaciones de las concentraciones de un surfactante en el agua de imbibición, para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos, a partir del comportamiento de la curva tensiométrica de sus disoluciones acuosas, sin necesidad de realizar ensayos previos a escala de laboratorio. Pero en todos los casos, es necesario tener en cuenta los resultados económicos.

4.6.0 El Jabón B de aceite de caña para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos. Etapa Industrial II

4.6.1 % Pol en el bagazo residual

El comportamiento del % Pol en bagazo cuando se añadió el surfactante al agua de imbibición, indicó que la tensión superficial del agua de imbibición jugó un importante papel en los resultados que se obtuvieron en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos. Ese comportamiento confirmó la hipótesis de que la presencia en el agua de imbibición de un surfactante aniónico, con propiedades como humectante, a la concentración adecuada, intensifica el proceso.

El surfactante en el rango de concentraciones empleado, disminuyó sensiblemente la tensión superficial del agua de imbibición (Fig. 2.2.1). Esta disminución provocó una mayor

penetración del agua dentro del colchón de bagazo. Según Treybal /153/, la retención estática de líquido por un medio poroso es menor cuando es baja la tensión superficial. Este planteamiento es válido para la retención estática de jugo por el bagazo. Al ser menor ésta, unida a la disminución que experimentó la viscosidad por efecto del surfactante (Fig. 2.6), se obtuvo un mejor mezclado con el jugo libre en el molino y como consecuencia, una mayor extracción de la sacarosa.

La tendencia al incremento del % Pol en bagazo en el rango de niveles de imbibición de 2,07 a 2,67 t agua / t fibra en caña, pudo ser causado por la influencia negativa que pudo tener el incremento de la masa de líquido retenida por el material fibroso, sobre la eficiencia del trabajo del molino. Valdés /158/, no encontró ese comportamiento al variar el nivel de imbibición hasta 35 t agua / t caña. Sin embargo, a partir de 2,67 t agua / t fibra en caña, existió una tendencia a la disminución, debido a la fuerte influencia que ejercieron sobre los % Pol en bagazo las grandes masas de agua añadidas, independientemente de que el trabajo del molino se vio fuertemente afectado, al igual que el trabajo del área de evaporadores.

Cuando se incrementó el nivel de imbibición sin el surfactante hasta 2,32 (30,22 % t agua/t de caña), pudo existir un aumento en el consumo de vapor cercano al 5% /27/ respecto al nivel 2,07 t agua / t fibra en caña, sin embargo no existió una mejoría en la disminución del %Pol. Existe consenso entre los investigadores /83, 109, 121, 147, 158/ acerca de que la disminución del % Pol en bagazo es notable, cuando el nivel de imbibición aumenta desde valores bajos hasta el 20 ó el 25 % del peso de la caña, pero a partir de ese nivel lo hace lentamente y se puede afectar la capacidad del molino. Esto último debe de haber influido en los resultados de esta etapa de la investigación. En general, en las corridas donde no se aplicó el surfactante, los % Pol obtenidos al nivel de imbibición de 2,07, no se diferencian apreciablemente de los obtenidos a mayores niveles prácticos de imbibición, donde se encontraron valores del % Pol incluso algo mayores (Figs. 3.16B y 3.17). Estos resultados y los publicados en la literatura, refutan el criterio que tiene la mayoría de los operadores de molinos, de que es conveniente aumentar el nivel de imbibición por encima de la norma establecida, para disminuir más el %Pol en bagazo. Esta práctica puede ocasionar efectos económicos negativos, en dependencia del precio del azúcar en el mercado y el costo del combustible adicional que es necesario consumir para evaporar el exceso de agua.

Una alternativa ventajosa para disminuir el % Pol en bagazo, demostrada en esta investigación, es la adición de surfactantes aniónicos para intensificar la operación de extracción. No obstante, el comportamiento de los resultados dentro de un mismo nivel de imbibición y para todo el intervalo, indicaron que el %Pol en el bagazo residual y la disminución provocada por el surfactante (Figs. 3.16A y 3.17), estuvieron influenciados, por otras variables no controladas que intervinieron en el proceso de extracción tales como las características

de la caña, las condiciones asépticas del tándem y el factor humano que se desempeña en el área de extracción del central.

Estos resultados indicaron que no se puede afirmar categóricamente, como lo hicieron otros investigadores /130, 137/, acerca de un rango de valores para la disminución del % Pol en bagazo al aplicar determinado surfactante para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Esto concuerda totalmente con los resultados de la Etapa Industrial I (Anexo 3). El efecto del surfactante, al estar influenciado por gran número de variables, necesariamente tiene que variar de acuerdo con las condiciones en que se desarrolle el proceso de extracción, el cuidado en la preparación de la disolución acuosa del surfactante, la calidad técnica y el nivel de automatización del sistema de dosificación de la disolución, así como la disciplina tecnológica. Los aspectos antes mencionados, no aparecen reportados en la literatura consultada.

4.6.2 Pérdida de Molienda

Cuando se trató de reducir la Pérdida de Molienda incrementando el nivel de imbibición, los datos experimentales no tuvieron una tendencia definida. No obstante, en los valores promedio se observó una tendencia al incremento, más definida que en el caso del % Pol en bagazo. Este parámetro reflejó, con mayor precisión que el % Pol, el comportamiento de las pérdidas de sacarosa en el bagazo residual, por estar relacionado directamente con el valor del porcentaje de fibra de éste en cada corrida. La Fig. 3.18A muestra la fuerte influencia que ejerció la presencia del surfactante en el agua de imbibición sobre la Pérdida de Molienda, debido a las disminuciones de las tensiones superficiales del agua y del jugo, de la viscosidad y otros efectos beneficiosos que pudo provocar durante el flujo del jugo a través de los capilares del bagazo, inclusive a niveles de imbibición no permisibles técnica y económicamente. La disminución de la pérdida de molienda producto de la aplicación del surfactante se vio poco influenciada por el nivel de imbibición (Fig. 3.18B), ya que el efecto que logró el surfactante dependió fundamentalmente de la concentración de éste en el agua de imbibición.

En general la Pérdida de Molienda en el proceso, tanto con el agua como con la disolución del surfactante, no sólo dependió del nivel de imbibición sino que estuvo fuertemente influenciada además, por otras variables no controladas en el experimento y que actuaron en el proceso de extracción. Esto concuerda con lo obtenido por otros investigadores /83, 87, 109, 131/.

% Pol en jugo mezclado

Se pudo comprobar mediante análisis al jugo mezclado, que según disminuyeron las pérdidas de azúcar en el bagazo residual del tándem, aumentó el contenido de sacarosa en el jugo mezclado, Fig. 3.20. Este hecho aparece reportado en la literatura consultada /137/.

4.6.3 Influencia del nivel de imbibición y la relación °Bx en caña/fibra en caña en la pérdida de molienda

Los datos experimentales indicaron, Fig. 3.19, que durante el proceso de extracción actuaron otras variables no controladas que ejercieron mayor influencia en la pérdida de molienda, que la relación °Bx en caña / % fibra en caña. No se pudo establecer una correlación entre la Pérdida de Molienda y la relación °Bx en caña / % fibra en caña, ya que para niveles de imbibición estables, la primera se vio muy poco afectada cuando la segunda varió significativamente.

El proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos es básicamente un proceso de lixiviación. Cada molino de extracción húmeda puede considerarse una etapa real de lixiviación. Al ser el número de etapas reales fijo, las características del proceso de lixiviación (eficiencia de etapa, la concentración de la sacarosa en el bagazo a lixiviar, la relación agua/fibra para obtener un porcentaje de sacarosa dado en el bagazo residual, etc.) estarán fuertemente influenciadas por el proceso a que fue sometida la caña en las etapas anteriores de preparación y de extracción en seco. Esta situación provoca que de la extracción que logre el primer molino, dependa la relación °Bx en bagazo / % fibra en el bagazo que entra a las etapas de extracción húmeda. Es conocido que en un proceso de lixiviación /13, 35, 88, 102, 119, 131, 153/ con una eficiencia de etapa aproximadamente constante, si no varía la relación solvente/sólido, la temperatura y otras características del proceso, entonces la concentración de soluto en el residuo dependerá de la concentración del soluto en el alimento. Del análisis anterior y de los resultados experimentales se puede deducir que realmente la relación (°Bx en caña/% fibra en caña) no es la variable que debe ser empleada en el análisis del proceso de extracción en tándem, sino la relación (°Bx en bagazo/% fibra en bagazo) en el bagazo a la salida del primer molino, aunque entre ambas variables debe existir algún grado de correlación.

4.6.4 Porcentaje de humedad en el bagazo residual

El % Humedad del bagazo estuvo influenciado fuertemente por el nivel de imbibición y por otras variables no controladas en el experimento. Una de las variables de mayor influencia fue la tensión superficial del jugo retenido por el bagazo a comprimir en el molino, Fig. 3.21. Sobre esta variable influyó directamente el surfactante que se añadió al agua de imbibición. La tensión superficial del jugo residual en el bagazo, además del efec-

to del surfactante, estuvo influenciada por un número indeterminado de variables. Ésta además, no fue uniforme en toda la región del colchón de bagazo comprimido, ya que dependió del grado de mezclado del agua de imbibición y con el jugo libre.

A pesar del indeterminado número de variables que influyeron en el % Humedad del bagazo, la acción del surfactante en el agua de imbibición y en el jugo, fue capaz de provocar una mayor extracción de jugo del bagazo por el molino, lo que dio como resultado un menor contenido de humedad y de sacarosa en el bagazo, aunque sobre este último parámetro influyeron además otras variables.

La tendencia al incremento del % Humedad en bagazo al aumentar el nivel de imbibición, fue mayor en el bagazo imbibido sólo con agua. Esto se explica teniendo en cuenta que fue mayor la tensión superficial del jugo retenido por el bagazo, respecto al del bagazo imbibido con la disolución del surfactante. Este resultado tuvo total correspondencia con el efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición, en la compresibilidad del bagazo. La disminución de la presión capilar, provocada por la acción del surfactante en la tensión superficial del jugo, dio lugar a una mayor extracción por el molino, del jugo retenido por la fibra del bagazo.

Es de esperar que incluso para una misma concentración de un surfactante en el agua de imbibición, igual nivel de imbibición y la misma materia prima (caña) para dos centrales diferentes, el efecto que se logra en el % Humedad del bagazo residual, sea diferente. Inclusive en un mismo tándem, los resultados deben variar con las características de la materia prima, las variaciones que experimenta el estado técnico de los molinos durante el período de zafra, el factor humano, etc.

4.6.5 Relación entre el % Humedad del bagazo, el nivel de imbibición y el % Pol en bagazo

La relación que existió entre el % Humedad y el % Pol en bagazo fue muy compleja, Fig. 3.23. No se pudo determinar una correlación entre el % Humedad y el % Pol en bagazo al variar el nivel de imbibición, ya que ambos parámetros fueron el resultado del efecto de un gran número de variables no controladas en el experimento, que intervinieron en el proceso de extracción y que actuaron sobre estos parámetros por mecanismos diferentes.

4.7 Experimento de Tamizado. Etapa Industrial III

La variable presión no tuvo un efecto significativo en el % Pol en el bagazo residual dentro del rango de presiones aplicadas en la desmenuzadora. Este comportamiento pudo estar dado por la baja influencia que pudo tener la presión en la preparación de la caña, aunque no se realizaron determinaciones al respecto.

Para las condiciones en que se desarrolló el experimento, las variables de mayor influencia sobre el % Pol en bagazo fueron la temperatura y la concentración del surfactante. Los mejores resultados fueron obtenidos con los valores bajos del nivel de imbibición y de la temperatura (Fig. 3.25). El efecto obtenido para el nivel de imbibición, prácticamente concuerda con los resultados experimentales con el Jabón B en el central “Jesús Menéndez”, donde se observó cierta influencia negativa de los valores del nivel de imbibición por encima de 2,07.

La temperatura tuvo una influencia negativa sobre la disminución del %Pol y el % Humedad del bagazo para el nivel de 80 °C. Esto pudo estar motivado por afectaciones en la alimentación del molino y en el coeficiente de reabsorción, debido a la posible disminución del coeficiente de fricción interno del bagazo, el que no fue medido. Sin embargo, varios autores /83, 87, 147/ señalan que 80 °C da mejores resultados que 70°C. Murry /109/, plantea que esto no fue observado en molinos de laboratorio, mientras que Hamill /76/, plantea que con el aumento de la temperatura se incrementan las dificultades de alimentación al molino.

El efecto combinado de las variables nivel de imbibición - concentración del surfactante aunque es significativo fue pequeño, no obstante el mayor efecto de la interacción se produjo para los valores altos de ambas variables (Fig. 3.26). Esto parece contradictorio con el efecto observado en la Fig. 3.25. No obstante, en el modelo, el efecto de la interacción Agua - Temperatura es 2,86 veces superior al de la interacción agua - concentración, por lo que prevalece el efecto de la primera. Los valores altos de los niveles de imbibición, aparte de su efecto negativo en el consumo de combustible, sólo estarían parcialmente justificados en el caso de altos °Bx en el jugo mezclado, que pudieran afectar en parte el proceso en el clarificador.

La Fig. 3.27 muestra como interactúan las variables temperatura y concentración del surfactante en el % Pol en bagazo. Los mejores resultados se obtienen con los valores altos de la concentración del surfactante y los bajos de la temperatura.

El procesamiento estadístico de los resultados experimentales con relación al % Humedad en el bagazo, muestra que la temperatura no influyó significativamente al nivel $\alpha=0,15$ pero sí su interacción con el nivel de imbibición (Fig. 3.30). La superficie de respuesta indica que el % Humedad disminuye hacia los valores altos del nivel de imbibición y los bajos de la temperatura. El efecto del nivel de imbibición es consecuencia probablemente de la acción del surfactante, el cual se manifiesta con mayor intensidad en la disminución del % Humedad en bagazo cuando aumenta el nivel de imbibición, lo que coincide con lo obtenido para este nivel de imbibición en la etapa anterior (Fig. 3.21 y 3.22). La Fig. 3.30 muestra el efecto negativo que tuvieron las altas temperaturas en el % Humedad, al igual que en el caso del % Pol en bagazo.

Se considera que la utilidad de los modelos consiste en que fueron capaces de revelar como influyeron las variables estudiadas en la eficiencia del proceso de extracción en los molinos. Revela que el efecto de la temperatura del agua de imbibición sobre la eficiencia del proceso de extracción, puede ser variable y debe investigarse en cada central en particular.

4.8 Los mecanismos del proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos

El análisis del proceso de distribución del líquido de imbibición en el colchón de bagazo y su incidencia en el proceso de transferencia de masa hay que dividirlo en dos partes: el proceso en el conductor de bagazo y el proceso en el molino, ya que ambos son diferentes. La profundidad a la que penetra el agua de imbibición que rocía una caja de derrame, en el colchón de bagazo parcialmente saturado, depende de la tensión superficial del líquido de imbibición y de las características del bagazo como medio poroso. La masa de agua aplicada sólo es capaz de saturar una capa superficial del colchón de bagazo suelto /43/; sin embargo, en el molino la masa total de bagazo se satura cuando el volumen de éste es reducido por compresión hasta un valor definido a la entrada del molino /52/. Al continuar la compresión, el líquido es forzado a fluir a través del medio poroso, lo que provoca su mezcla forzada con el jugo retenido por la fibra del bagazo.

Se puede conocer la influencia que ejerce el surfactante en la retención (R) del bagazo al modificar la tensión superficial del agua de imbibición y del jugo, partiendo de una ecuación que de forma general expresa:

$$R = G \cdot f_1(\sigma, \rho, \mu) \cdot f_2(\Phi) \quad (4.1)$$

Donde:

G ... constante de proporcionalidad

σ ... tensión superficial del jugo

ρ ... densidad del jugo

μ ... viscosidad del jugo

Φ ... características del colchón de bagazo

El coeficiente G y la función f_2 , son difíciles de determinar debido a la variabilidad de las características del colchón de bagazo, ocasionadas por el tipo de caña y los resultados de la preparación.

Luego que la capa superior del colchón de bagazo ha absorbido la masa de líquido que es capaz de retener de acuerdo con su saturación inicial, las propiedades del líquido y las características geométricas de las partículas, el exceso de líquido drena hacia el interior del colchón bajo la acción de la gravedad. El líquido se mueve en régimen laminar sobre la película de jugo que recubre al sólido, quedando retenido en parte en las cavidades de las partículas y sus uniones, al tiempo que penetra por capilaridad en el interior de los poros de las partículas de meollo parcialmente saturadas por el jugo residual. La tensión superficial contribuye a la penetración del agua en los poros del meollo como una fuerza impulsora.

Sin embargo, se oponen las fuerzas de fricción debido a la viscosidad y la resistencia que ofrece el aire al salir del capilar en sentido contrario. Simultáneamente, con el movimiento del líquido se produce el proceso de transferencia de masa por difusión de los sólidos solubles del jugo libre hacia el agua, por lo que se alcanza el equilibrio de concentraciones rápidamente /126/. El gradiente de concentraciones que se establece entre la película de jugo y el seno del líquido dependerá del Brix del líquido de imbibición y del Brix del jugo retenido. La viscosidad del líquido de imbibición siempre será menor que la del jugo retenido /82, 119/. El resultado global de este proceso es un incremento en la saturación parcial de una capa de la superficie del colchón de bagazo. El tiempo que demora el proceso de penetración es pequeño, en comparación con el que demora el bagazo imbibido en el conductor antes de entrar al próximo molino. La presencia de sustancias con actividad superficial en el líquido de imbibición reducen su tensión superficial, lo que provoca una disminución de la retención estática del medio poroso, dando lugar a su distribución en un mayor volumen del colchón de bagazo.

En el caso de las células que no fueron rotas durante el proceso de preparación, o bajo la acción de las fuerzas de cizallamiento entre las mazas de los molinos de extracción en seco, el agua penetra a través de las paredes celulares por ósmosis, lo que aumenta su turgencia y facilita que sean desintegradas entre las mazas de los molinos de extracción en húmedo.

La temperatura del agua de imbibición influye en el proceso descrito, ya que al aumentar ésta disminuyen su viscosidad y la tensión superficial, lo que unido al efecto del surfactante provoca una menor capacidad de retención del medio y, como consecuencia, una mayor penetración de ésta en el colchón de bagazo, al tiempo que aumenta el coeficiente de difusión de los sólidos solubles. El resultado es un mejor mezclado.

El proceso de extracción en el molino

La descripción del proceso de extracción en el molino y los mecanismos del proceso de flujo y transferencia de masa, se realiza partiendo del modelo de Murry y Loughran /93, 109, 116/ (Fig. 4.1)

Según este modelo el bagazo que llega a la región comprendida entre los planos A y B está parcialmente saturado. A partir de B comienza el proceso de compresión. La razón de compresión C_0 se define como:

$$C_0 = [V_o / V_c] .$$

V_o ... volumen inicial de la caña preparada saturada (bagazo).

V_c ... volumen ocupado por la caña comprimida

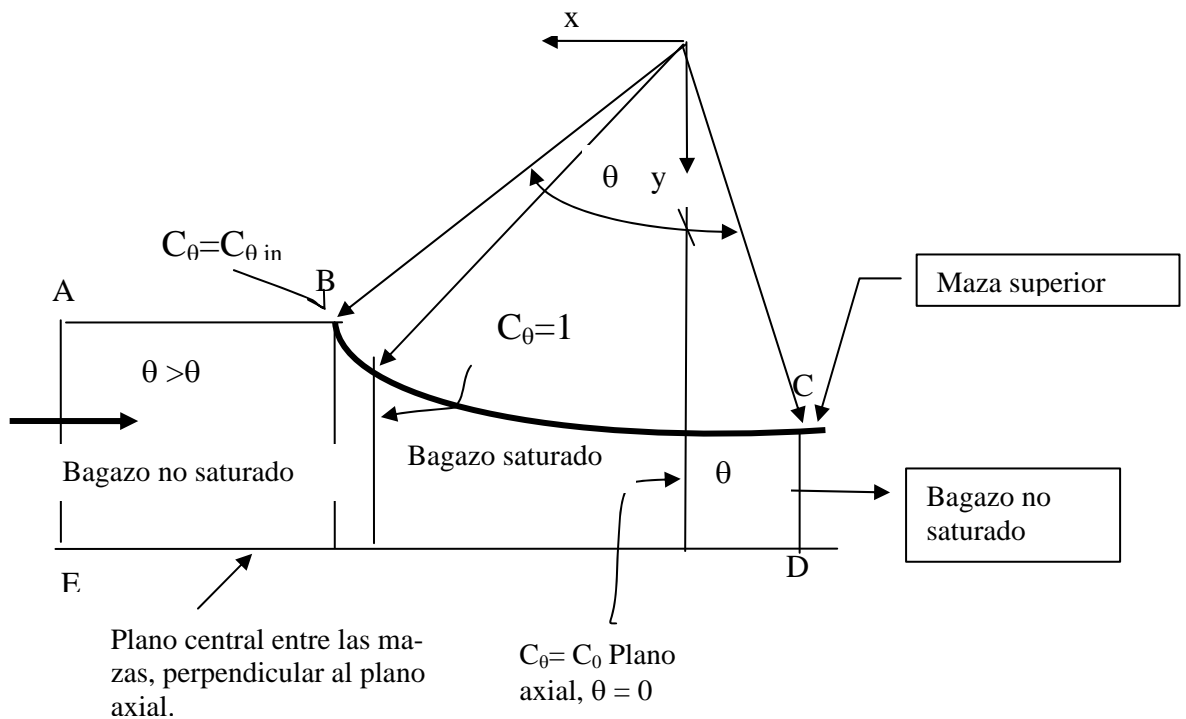


Fig. 4.1 Modelo del proceso en el molino

La razón de compresión C_θ se toma como constante en cualquier plano vertical y se calcula mediante la ecuación:

$$C_\theta = (C_0 W_0 / D) / [(1 + W_0 / D - \cos \theta) \cos \theta] \quad (4.2)$$

θ ... ángulo que define la posición del plano vertical

W_0 .. abertura de trabajo del molino

D ... diámetro de la maza

C_0 ... razón de compresión del molino, medida en $\theta = 0$

A partir del plano $C_\theta = C_{\theta \text{ in}}$ el bagazo comienza a ser comprimido expulsando el aire ocluido a medida que disminuye la porosidad. Bajo estas condiciones las capas superiores del colchón se saturan primero que las capas interiores y el exceso de jugo dreña hacia el interior del colchón de bagazo, mezclándose con el jugo libre en el espacio entre las partículas y penetra por capilaridad en los poros de las partículas de meollo, a medida que el bagazo avanza hacia el plano $C_\theta = 1$. El grado de mezclado que ocurre en esta región depende de las fuerzas viscosas y capilares, así como de la permeabilidad K del lecho. Las primeras dependen de la temperatura, de las características del jugo y de la presencia de sustancias con actividad superficial [13, 25, 42, 52, 57, 82, 100, 103, 123, 140, 145], mientras que la permeabilidad K ($K = A \cdot C_\theta^{-B}$, donde A y B son constantes que dependen de la preparación de

la caña) depende de la razón de compresión y de la preparación de la caña /76, 93, 109, 116/.

El bagazo que alcanza el plano $C_0=1$, desde el punto de vista macroscópico, se puede considerar que está saturado. No obstante, aún queda aire ocluido entre las partículas y principalmente en los capilares del meollo. Ya en estas condiciones el proceso de dilución del jugo del interior de las partículas sólo es posible mediante el movimiento del líquido por capilaridad hacia el interior de los poros, donde se establece el equilibrio de concentraciones de los sólidos solubles por difusión y posteriormente, por este mismo mecanismo, desde el interior hacia la película inmóvil de jugo que rodea la partícula (retención estática). El grueso de la capa límite que rodea a las partículas y, por lo tanto, su resistencia a la transferencia de masa, depende en proporción directa de la viscosidad y de la tensión superficial del jugo que la forma /153/. Las altas temperaturas y la presencia de sustancias con actividad superficial disminuyen la retención estática; o sea, el espesor de la película de líquido que no participa en el flujo, lo que incrementa el proceso de transferencia de masa /52, 153/. Acerca de la temperatura Murry /109/ señala que en molinos de laboratorio no se ha encontrado el efecto pero la experiencia de fábrica indica que hay un mejor mezclado a altas temperaturas.

La posición del plano $C_0=1$ se puede determinar por la ecuación /93, 109, 116/:

$$\theta = \cos^{-1} \{ [(1+W_0/D) + ((1+W_0/D)^2 - 4C_0 W_0/D)^{0.5}] / 2 \} \quad (4.3)$$

W_0 ... abertura de trabajo entre las mazas

D ... diámetro de las mazas

C_0 ... razón de compresión en el plano $\theta=0$

El mezclado del jugo diluido de las capas superiores del colchón, con el jugo libre retenido en las capas interiores comienza en la primera fase de la compresión (en la región que contiene los planos correspondientes a las razones de compresión $C_0=C_{0\text{ in}}$ y $C_0=1$). A partir del plano $C_0=1$ comienza el proceso visible de extracción del jugo por el molino. Entre los planos $C_0=1$ y $\theta=0$ el bagazo está saturado (todo el volumen de huecos entre las partículas está lleno de jugo, aunque no así en el interior de todas las partículas). A medida que disminuye la porosidad del bagazo bajo la acción de la presión que ejercen las mazas, el exceso de jugo es forzado a fluir, en sentido contrario al movimiento del bagazo, por los espacios entre las partículas deformadas hacia las zonas de baja presión (superficie de las mazas y hacia el exterior por el plano central). El movimiento del jugo en el bagazo, cumple las leyes que gobiernan del flujo de fluidos a través de medios porosos /80, 81, 109, 116, 141, 146, 160/. Durante este proceso de flujo, continúa la transferencia de masa entre el jugo en movimiento de menor concentración y la película de la retención estática de mayor concentración. Las sustancias con actividad superficial, al disminuir la tensión superficial y la viscosidad del jugo, provocan la disminución del espesor de la película de la

retención estática, lo que intensifica el proceso de transferencia de masa. La resistencia al drenaje del jugo depende además, en proporción directa, de la preparación de la caña /76, 93, 109, 116/ y de la velocidad de compresión /87/. A partir del plano $C_0=1$ el jugo que ocupa los espacios entre las partículas comienza a ser desplazado por el de su interior, de mayor concentración. En condiciones ideales, si todo este jugo fuera desplazado, el jugo de la retención estática tendría la misma concentración que la del que fluye y cesaría por lo tanto el proceso de transferencia de masa.

A medida que disminuye la porosidad, las fuerzas capilares que retienen el jugo en los poros de las partículas, aumentan rápidamente en razón inversa al radio de los capilares y son directamente proporcionales a la tensión superficial del jugo retenido /52/. Según algunos autores /26, 57, 145/ los electrolitos en líquidos que se mueven en capilares, influyen en la viscosidad de éstos. Por lo tanto, cabe esperar que al disminuir las dimensiones de los capilares del colchón de bagazo debe incrementarse la acción sobre la viscosidad, de los efectos electrocinéticos de los electrolitos en el jugo. Cuando se alcanza el equilibrio entre la presión capilar y la presión exterior, cesa la extracción del jugo. De esta forma, el jugo que retiene el bagazo tiene mayor concentración que el que es extraído del colchón de bagazo.

La compresibilidad de las partículas aumenta cuando en el jugo está presente un surfactante debido a la disminución de la presión capilar /42, 52/. Este efecto, unido al de la disminución de la viscosidad, permite explicar la disminución que se observa en el contenido de humedad del bagazo residual cuando se adiciona el surfactante al agua de imbibición. El efecto combinado del surfactante, en los procesos de transferencia de masa que ocurren en el colchón de bagazo sobre el conductor y en el molino, descritos anteriormente, y el incremento de la compresibilidad del bagazo que permite mayor extracción de jugo para las mismas condiciones de operación, dan por resultado menores pérdidas de sacarosa en el bagazo residual, menor contenido de humedad y la extracción de un jugo más rico en sacarosa.

El proceso de extrusión en el molino

Según Jenkins /87/, desde la entrada del molino y en determinada región, la velocidad promedio S_s del material sólido (bagazo) es diferente de la componente horizontal de la velocidad superficial de la maza S_h , hasta un plano $\theta = \phi$, donde se igualan. Este plano recibe el nombre de plano neutral. Jenkins /87/ señala que a partir de ese plano, $S_s > S_h$ y este incremento de velocidad desde $\theta = \phi$ hacia el plano axial, tiene que ser causado por un “gradiente de presión” de alguna especie. La posición $\theta=\phi$ de este plano se determina a partir de la ecuación /87, 109/:

$$\phi = \cos^{-1} \{ [(1+W_0/D) + ((1+W_0/D)^2 - 4k W_0/D)^{0.5}] / 2 \} \quad (4.4)$$

k ... factor de reabsorción

A la explicación del origen del “gradiente de presión” sugerido por Jenkins, se puede llegar a partir de los razonamientos que se exponen a continuación.

Los experimentos realizados por Shannon, Murry y Holt (referidos por Jenkins /87/) mostraron que la presión necesaria para someter el bagazo a determinada compresión, aumentó al incrementar la velocidad de compresión. Sin embargo, no se ha obtenido una ecuación que relacione esta presión con la velocidad de compresión.

A partir de la ecuación 4.2 es posible calcular la variación de la razón de compresión a partir de $C_0=1$ hacia el plano axial, derivando respecto a la variable θ :

$$dC_0/d\theta = - (C_0 W_0/D) * [\sin 2\theta - (1 + W_0/D)\sin\theta] * [(1 + W_0/D - \cos\theta) \cos\theta]^2 \quad (4.5)$$

De acuerdo con esta ecuación, la razón de compresión disminuye a medida que el bagazo avanza hacia el plano axial ($\theta = 0$) de las mazas. La componente vertical de la velocidad tangencial S de la superficie de la maza, se calcula a partir de:

$$S_y = S \sin \theta \quad (4.6)$$

Donde:

S_y ... es la velocidad con que la superficie de la maza comprime al bagazo en el plano θ o sea, la velocidad de compresión respecto al plano central entre las mazas.

$$S = \omega.D/2 \quad (4.7)$$

ω ... velocidad angular, rad/s

Basado en estas ecuaciones y en los experimentos referidos anteriormente por Jenkins /87/, se deduce que la presión necesaria para la compresión debe ir disminuyendo de un plano a otro, a medida que el bagazo avanza hacia el plano axial. A la derecha de este plano, la presión que ejercen las mazas sobre el bagazo disminuye continuamente hasta cero. Por lo tanto, el efecto de la diferencia de presiones debida a la disminución de la velocidad de compresión y a la descompresión del bagazo a la derecha del plano axial, debe crear el gradiente de presiones (a que hace referencia Jenkins /87/) y que origina un esfuerzo de cizallamiento en la región, en el sentido del movimiento del bagazo. A este esfuerzo se oponen los originados por el flujo de jugo y la fricción interna del bagazo. En determinado plano estos esfuerzos deben compensarse y a partir de ahí el bagazo podría extruir, arrastrando el jugo en el mismo sentido. Este plano debe coincidir con el denominado "Plano Neutral".

De las ecuaciones 4.4 a 4.7 se deduce que, a medida que aumenta el diámetro de las mazas del molino, si se mantiene la misma velocidad angular, la posición del plano neutral se aleja del plano axial. La velocidad de compresión y su variación de un plano vertical a otro serán mayores, por lo que el coeficiente de reabsorción debe aumentar. Este razonamiento coincide con lo planteado por Spencer /147/ acerca de una mayor eficiencia de los molinos cuando es menor la velocidad de las mazas.

La mayor extracción de jugo en el molino, cuando se adiciona un surfactante en el proceso, provoca que la fricción interna en el bagazo sea mayor, por lo que se espera que el plano neutral se desplace en dirección al axial y sea menor el coeficiente de reabsorción en el molino.

4.9.0 Metodología para la selección del surfactante para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos y el rango de concentraciones adecuado

4.9.1 Selección del Surfactante

En el mercado actual son comercializados una amplia variedad de agentes tensoactivos o surfactantes aniónicos, catiónicos, anfólitos y no ionógenos en estado sólido o líquido. Los productores les atribuyen diversas propiedades. Para su empleo en la industria azucarera deben ser, en primer lugar, inocuos o de una toxicidad muy baja. En segundo lugar que sean un producto biodegradable, previendo posibles derrames. Cuando se dispone de varios surfactantes que cumplan con los dos requisitos anteriores es conveniente, para mayor seguridad y a pesar de las especificaciones del fabricante o del proveedor, comprobar que no sea un antiespumante o un emulsivo de agua en aceite (**número de EHL** < 6).

Equilibrio Hidrófilo - Lipófilo (EHL)

En la molécula de un tensioactivo ciertos grupos o porciones de esta tienden a orientarse o afiliarse al agua, mientras que las porciones de cadena larga se orientan hacia la fase de vapor u otra coexistente. Una medida de la tendencia a orientarse hacia una u otra fase la da el número de equilibrio hidrófilo - lipófilo (EHL). Estos números se eligen en una escala arbitraria y cuanto más elevado es, más hidrófilo es el agente /104, 151/. Algunos autores han desarrollado métodos y fórmulas para el cálculo de este número y han relacionado exitosamente el **número de EHL** con el uso del surfactante /97,145/. El surfactante a emplear debe ser un buen humectante (**número de EHL** > 6), lo que se considera como el tercer requisito y cuya estimación se puede realizar a partir del aspecto óptico de sus disoluciones acuosas /97, 145/.

EHL	Uso:
1,5 - 3	Antiespumante
3 - 6	Emulsivo de agua en aceite
7 - 9	Humectante
8 - 18	Emulsivo para aceite en agua
13 - 15	Detergente
15 - 18	Solubilizante

Una estimación aproximada del número EHL se puede realizar apreciando el comportamiento en agua del surfactante /104, 151/.

Dispersión en agua**EHL**

No se dispersa en agua	1 - 4
Mala dispersión	3 - 6
Dispersión lechosa después de agitación vigorosa	6 - 8
Dispersión lechosa estable (parte superior clara)	10 - 13
Solución transparente	>13

Los resultados técnico - económicos de la aplicación del producto, constituyen el cuarto y último requisito que decide el empleo del surfactante.

4.9.2 Determinación del rango de concentraciones más efectivo.**1. Escala de laboratorio**

Los surfactantes se comercializan sólidos o líquidos. En el caso de los sólidos, la masa de surfactante a emplear para preparar la disolución se calcula en base seca. En los líquidos hay que verificar la densidad que indica el fabricante por posibles alteraciones. A partir de aquí se siguen los siguientes pasos:

- Preparar una disolución inicial de 1 g del surfactante en 1 kg de disolución (1000 ppm del surfactante en la disolución), la que debe ser preparada poco tiempo antes de las mediciones para evitar cualquier alteración en los resultados por algún posible proceso de envejecimiento.
- A partir de la disolución anterior, agitando previamente, preparar las disoluciones a ensayar en un rango de concentraciones de 5 a 80 ppm. Ej. 5 g de la disolución inicial + 995 g de agua dan 1 kg de disolución con una concentración de 5 ppm del surfactante.
- Medir la tensión superficial (σ) de la disolución para cada concentración, a temperatura constante. Si se emplea el aparato de Rebínder, se recomienda que la temperatura de las disoluciones sea próxima a la temperatura ambiente del local donde se realizarán las mediciones. Esto disminuye la influencia que ejerce la diferencia de temperatura entre el aire que burbujea y la disolución sobre la estabilidad de las lecturas dadas por el aparato. El aparato de Rebinder es muy sensible a los cambios de temperatura que puede experimentar el aire dentro de la burbuja que se forma en el seno de la disolución. El aire y la disolución a ensayar deben estar a la misma temperatura. Para garantizar la condición anterior se corrige la temperatura del aire haciéndolo pasar previamente por un conducto metálico sumergido en el mismo baño que está la celda de burbujeo, antes de entrar en ésta. Las disoluciones deben ser ensayadas de menor a mayor concentración.
- Representar la curva tensiométrica en coordenadas cartesianas. Seleccionar el rango de concentraciones donde aparecen las menores tensiones superficiales, para la evaluación industrial.

2. Escala industrial

En esta etapa los tres elementos básicos a tener en cuenta son:

- a) Determinación del tiempo (t) de retención de la caña molida en el tren de molinos, para establecer el muestreo del bagazo. Este indicador se mide en el tándem.
- b) Obtención de la curva de operación de la bomba dosificadora. Esto se realiza debido a alteraciones que pueden existir en el funcionamiento, respecto a las especificaciones del fabricante, debido al posible desgaste en las válvulas de retención de la bomba. El conjunto de datos el flujo volumétrico que es capaz de dar la bomba para cada posición de la escala, conforma la llamada curva de "operación" de la bomba dosificadora.

Las mediciones de flujo se realizan en la succión de la bomba manteniendo la descarga conectada a la tubería por donde está fluyendo el agua de imbibición. Esta curva debe ser verificada antes de iniciar la zafra y en las paradas planificadas por mantenimiento.

- c) Verificar el flujómetro del agua de imbibición, antes del inicio de la zafra y en las paradas planificadas por mantenimiento, para garantizar la concentración del surfactante con el flujo de disolución que aporta la bomba dosificadora.

3. Método de evaluación

Se recomienda hacer la evaluación experimental en el tándem, mediante el empleo del diseño estadístico de experimentos en bloques al azar / 154/, en el cual los tratamientos serán las concentraciones del surfactante en el agua de imbibición en ppm y el número de bloques igual al número de tratamientos, como mínimo. Los rendimientos % Pol y % Humedad del bagazo residual para un mismo nivel de imbibición. Las variables a controlar son: nivel de imbibición, temperatura del agua y las presiones en los molinos.

- a) Cantidad de surfactante a disolver para preparar la solución.

Este aspecto requiere de la máxima atención y cuidado por parte del investigador. El recipiente donde se prepara la disolución debe tener un volumen suficiente para poder operar durante ocho horas (un turno de trabajo). El volumen de agua tiene que ser medido con la máxima exactitud. La disolución debe tener la menor concentración posible que garantice, para el flujo de la bomba, la concentración deseada en el agua de imbibición durante el turno de trabajo.

Ejemplo

Para jabón sólido y un volumen de disolución de 400 L. El tanque tiene un volumen por debajo del nivel de la toma de succión de 26,8 L

Determinar experimentalmente por secado el contenido de masa seca del jabón: 70,37 %. Se pesa una cantidad de jabón igual a: $1661 \times 1/0,7037 = 2360\text{g}$. A esta cantidad de surfactante se añade agua hasta completar 400 L de disolución y se agita como mínimo 30 min con agitador mecánico. La concentración de la disolución patrón será de $1661/400 = 4,152$

g jabón seco/L disolución.

- b) La primera vez que se prepare la disolución se añadirán los 2360g del Jabón A pero las demás preparaciones sólo requieren $2360 - 158,12 = 2202$ g ya que existe una cantidad disolución remanente en el fondo del tanque de 26,8 L.
- c) El indicador de escala en la bomba se ajusta para dar un flujo en L/min de acuerdo con la curva de operación, correspondiente a la concentración del surfactante en el agua de imbibición, indicada por el diseño experimental.

Antes de comenzar a bombear la disolución del surfactante, se verifica que el flujo de agua de imbibición en el flujómetro, corresponda al nivel de imbibición establecido, con la correspondiente corrección de la temperatura.

Muestreo

Antes de iniciar las corridas experimentales se realizó el muestreo de la caña, para la determinación del % fibra promedio.

Para cada bloque se toma una muestra acumulativa de aproximadamente 5 kg de bagazo durante un tiempo 5 min antes de comenzar a bombear la disolución del surfactante y guardar en recipiente hermético. Al finalizar, después de interrumpir el bombeo de la disolución, esperar un tiempo de 10 min para comenzar a tomar la muestra acumulativa final de bagazo de 5 kg durante un tiempo de 5 min y conformar una sola muestra con los dos bagazos.

- a) Comenzar a bombear la solución del surfactante y esperar, antes de comenzar a tomar las muestras, un tiempo en min igual al tiempo de retención de la caña en el tándem.
- b) Bagazo: la muestra se toma a todo lo ancho del colchón de bagazo de forma aleatoria, acumulando aproximadamente 5 kg de bagazo, durante un tiempo en min igual al doble tiempo de retención de la caña en el tándem. Para tomar la muestra correspondiente a la réplica, se lleva la lectura de la escala de la bomba dosificadora a cero y luego de restablecerla, se espera un tiempo igual al del inciso b, antes de comenzar el muestreo. Se toma la muestra y se cambia la dosificación. Se repite el procedimiento para todas las concentraciones, de acuerdo con el diseño. Las muestras serán guardadas en recipiente cerrado para minimizar las pérdidas de humedad.
- d) Reducción del tamaño de la muestra en el laboratorio.

Luego de hacer homogénea la muestra de bagazo, se reduce su tamaño a aproximadamente 500 g por el método de paladas alternas, empleando dos recipientes en lugar fresco, para disminuir en lo posible las pérdidas de humedad. Luego se separaran 300 g para el análisis de Pol y 50 g (25 g para cada medición, con dos mediciones) para la determinación de la humedad.

4.9.3 Evaluación económica

La evaluación económica de los datos experimentales, decide realmente cual es el rango de concentraciones más efectivo a emplear durante la zafra.

4.10.0 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico y el de rentabilidad se partió de los resultados obtenidos con el surfactante Jabón B (\$ 1 850.00/ t) , un nivel de imbibición de 2,07 y una molida promedio de 334 000 @/ día. En el período de la evaluación cuando no se aplicó el surfactante, los % Pol en bagazo estuvieron dentro en el rango de 1,98 a 1,56 y los % Humedad de 48,6 a 49,2. Con la aplicación del surfactante, en las condiciones técnico - materiales y de recursos humanos existentes, producto de la disminución del % Pol y el % Humedad en el bagazo residual, se logró una recuperación de azúcar base 96° de 2,26 t / día y 5 t / día de bagazo, lo que reportó una ganancia neta de \$ 33,73/ h (Tablas 1 y 2, Anexo 6).

Para niveles de imbibición mayores, la ganancia comenzó a disminuir rápidamente, aumentó el consumo de surfactante y el exceso de agua que ingresó al proceso (Fig. 4.2), mientras que la recuperación de sacarosa del bagazo prácticamente no varió. Además, los posibles excedentes de bagazo disminuyeron rápidamente al incrementarse la demanda en el consumo de vapor en evaporadores (Fig. 4.2). Cuando el nivel de imbibición creció hasta 3,1t agua / t fibra en caña, el costo en el consumo de surfactante y de bagazo combustible por el incremento de la demanda de vapor para evaporar el exceso de agua compensó la ganancia (Fig. 4.3). No se consideraron los demás gastos en que se incurrieron en el proceso de producción de azúcar, cuando aumentó el nivel de imbibición.

4.10.1 Análisis de Rentabilidad

El método estático /30/ indica que el porcentaje de retorno de la inversión fue mayor del 25 %, con un período de recuperación de 14 días. El método dinámico dio por resultado un flujo de caja positivo de \$ 52 240,23 en la primera zafra con un VAN >>0, lo que indica que la inversión es altamente rentable /30/ (Tabla 4, Anexo 6).

El cálculo económico para los niveles de imbibición de 2,07 a 2,22 (Tabla 3, Anexo 6) con los resultados de disminución del % Pol y del % Humedad en bagazo obtenidos con el Jabón B, pero considerando un precio mínimo del azúcar de 0,06 USD/lb, indica que el procedimiento es rentable incluso para niveles de imbibición tan altos como 2,22 t agua / t de fibra en caña y un precio hipotético exagerado para un surfactante de 15 000 USD / t.

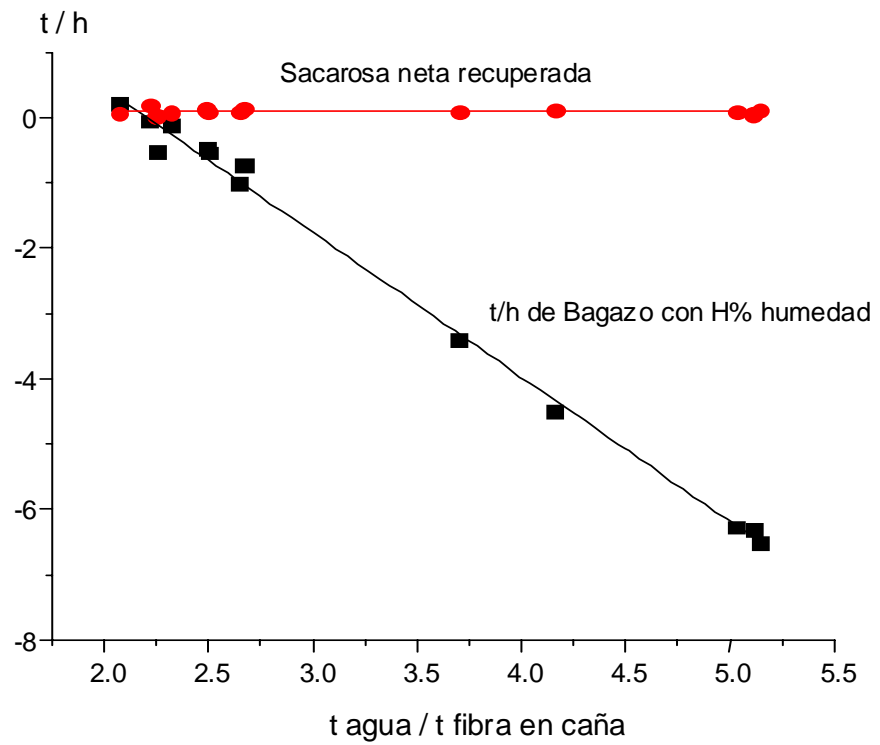


Fig. 4.2 Recuperación de sacarosa y ahorro de bagazo vs nivel de imbibición

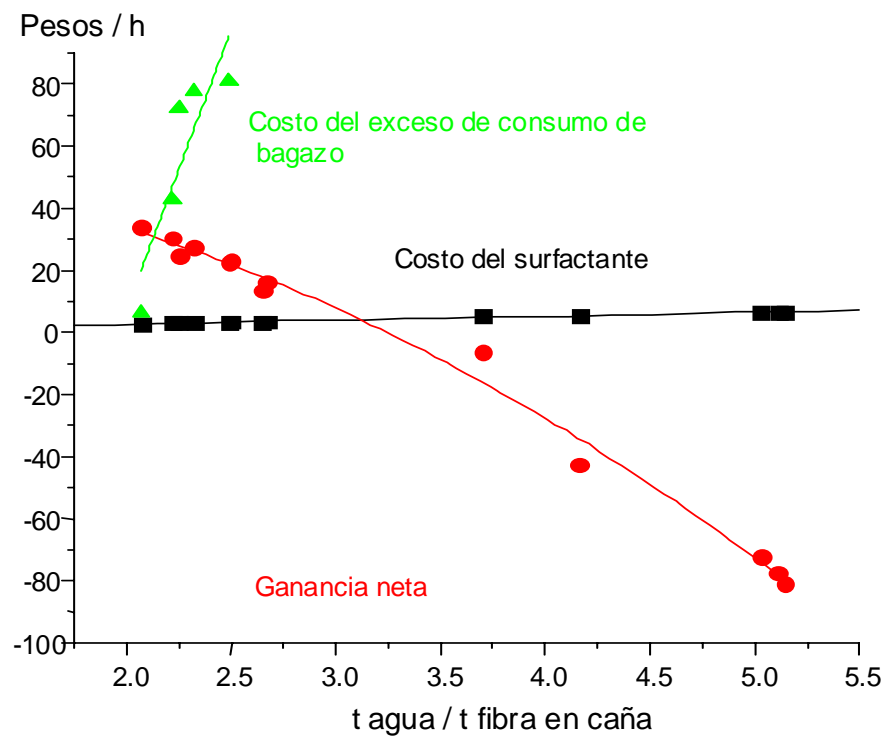


Fig. 4.3 Ganancia neta y Costos

Conclusiones Parciales del Capítulo 4

1. Las tensiones superficiales de las disoluciones acuosas de los surfactantes estudiados, mostraron una tendencia a disminuir con el aumento de la concentración. Aparecieron puntos anómalos de extremos relativos en las curvas tensiométricas para determinadas concentraciones. La influencia de este comportamiento fue observada, luego de imbibir el bagazo con las disoluciones del surfactante, en la tensión superficial de los jugos extraídos, la compresibilidad del bagazo y en el comportamiento de los % Pol y % Humedad del bagazo, en el proceso de extracción de la sacarosa, tanto a escala de laboratorio como industrial.
2. El efecto del surfactante en la tensión superficial de jugos extraídos de bagazos imbibidos con sus disoluciones acuosas, dependió de la concentración de la disolución y de la presencia en el jugo de sustancias naturales que tienen actividad superficial, principalmente los aminoácidos y las proteínas.
3. La disminución observada en la viscosidad de los jugos deben tener su origen en los efectos electrocinéticos que provoca el surfactante en la disolución.
4. La adición de surfactante al agua de imbibición influyó en la compresibilidad del bagazo, debido a que provoca una variación de la tensión superficial del jugo que modifica la presión capilar, conque éste es retenido en el bagazo.
5. Los valores máximos de las disminuciones de los % Pol y % Humedad en los bagazos residuales, aparecieron dentro del rango de concentraciones del surfactante donde se observaron los menores valores de las tensiones superficiales del agua de imbibición.
6. Los resultados experimentales indican que los mecanismos mediante los cuales los surfactantes disminuyen el % Pol en bagazo, son diferentes de los que provocan la disminución del % Humedad. Las variables tensión superficial y viscosidad influyen en ambos fenómenos.
7. El efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición, en el % Pol y el % Humedad en el bagazo residual, estuvo influenciado por un número indeterminado de variables que influyeron sobre el proceso de extracción en los molinos. Para eliminar su efecto sobre los resultados del análisis de los datos experimentales, fue necesario en cada tratamiento con surfactante, tomar como referencia el tratamiento sin surfactante.
8. La Pérdida de Molienda correspondiente a las concentraciones de 25 a 30 ppm del surfactante Jabón B en el agua de imbibición, con niveles de imbibición de 2,07 a 2,25 t agua / t fibra en caña siempre fue menor, que cuando no se adicionó el surfactante, inclusive a niveles de imbibición tan altos como 5,11.
9. Los modelos matemáticos empíricos obtenidos describen adecuadamente el efecto, en

los % Pol y % Humedad en el bagazo residual, de las variables estudiadas.

10. Los mecanismos de acción del surfactante descritos para los procesos de flujo y transferencia de masa que ocurren en bagazo, tanto sobre el conductor intermedio como en el molino durante el proceso de extracción de la sacarosa en el tándem, permiten conocer por qué disminuyen los % Pol y % Humedad del bagazo residual, cuando se adiciona el surfactante al agua de imbibición.
11. La metodología propuesta permite seleccionar el surfactante y la concentración a emplear en el agua de imbibición, para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos.
12. El incremento en la remoción de sólidos insolubles del jugo durante el proceso de purificación cuando se adicionan surfactantes, tiene su origen en el aumento en la humectación de las partículas sólidas por el jugo y el efecto del surfactante en la viscosidad.
13. Los surfactantes en concentraciones menores de 30 ppm en el jugo a purificar, incrementaron la remoción de sustancias en estado coloidal.
14. Los lodos obtenidos en el proceso de purificación de los jugos cuando se adicionó el surfactante, presentaron mayores densidades que los correspondientes al proceso sin surfactante debido al menor contenido de gases incondensables ocluidos por las partículas.
15. Los mecanismos descritos para la acción del surfactante en el proceso de purificación, permiten interpretar adecuadamente los resultados.
16. Las tensiones superficiales de las disoluciones acuosas de los surfactantes estudiados, mostraron una tendencia a disminuir con el aumento de la concentración. Aparecieron puntos anómalos de extremos relativos en las curvas tensiométricas para determinadas concentraciones. La influencia de este comportamiento fue observada, luego de imbibir el bagazo con las disoluciones del surfactante, en la tensión superficial de los jugos extraídos, la compresibilidad del bagazo y en el comportamiento de los % Pol y % Humedad del bagazo, en el proceso de extracción de la sacarosa, tanto a escala de laboratorio como industrial.
17. El efecto del surfactante sobre la tensión superficial de jugos extraídos de bagazos imbibidos con sus disoluciones acuosas, dependió de la concentración de la disolución y de la presencia en el jugo de sustancias naturales que tienen actividad superficial, principalmente los aminoácidos y las proteínas.
18. La disminución observada en la viscosidad de los jugos debe tener su origen en los efectos electrocinéticos que provoca el surfactante en la disolución.
19. La adición de surfactante al agua de imbibición influyó en la compresibilidad del bagazo, debido a que provoca una variación de la tensión superficial del jugo que modifica la presión capilar conque éste es retenido en el bagazo.

20. Los valores máximos de las disminuciones de los % Pol y % Humedad en los bagazos residuales, aparecieron dentro del rango de concentraciones del surfactante donde se observaron los menores valores de las tensiones superficiales del agua de imbibición.
21. Los resultados experimentales indican que los mecanismos mediante los cuales los surfactantes disminuyen el % Pol en bagazo, son diferentes de los que provocan la disminución del % Humedad. Las variables tensión superficial y viscosidad influyen sobre ambos fenómenos.
22. El efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición, en los % Pol y % Humedad en el bagazo residual, estuvo influenciado por un número indeterminado de variables que influyeron sobre el proceso de extracción en los molinos. Para eliminar su efecto en el análisis estadístico de los datos experimentales, resultó necesario en cada tratamiento con surfactante, tomar como referencia el tratamiento sin surfactante.
23. La Pérdida de Molienda correspondiente a las concentraciones de 25 a 30 ppm del surfactante Jabón B en el agua de imbibición, con niveles de imbibición de 2.07 a 2.25 t agua / t fibra en caña siempre fue menor, que cuando no se adicionó el surfactante, inclusive a niveles de imbibición tan altos como 5.11.
24. Los modelos matemáticos empíricos obtenidos describen adecuadamente el efecto, en los % Pol y % Humedad en el bagazo residual, de las variables estudiadas.
25. Los mecanismos de acción del surfactante, descritos para los procesos de flujo y transferencia de masa que ocurren en bagazo, tanto sobre el conductor intermedio como en el molino durante el proceso de extracción de la sacarosa en el tándem, permiten conocer por qué disminuyen los % Pol y % Humedad del bagazo residual, cuando se adiciona el surfactante al agua de imbibición.
26. La metodología propuesta permite seleccionar el surfactante y la concentración a emplear en el agua de imbibición, para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos.
27. El incremento en la remoción de sólidos insolubles del jugo durante el proceso de purificación cuando se adicionan surfactantes, tiene su origen en el aumento en la humectación de las partículas sólidas por el jugo y el efecto del surfactante sobre la viscosidad.
28. Los surfactantes en concentraciones menores de 30 ppm en el jugo a purificar, incrementaron la remoción de sustancias en estado coloidal.
29. Los lodos obtenidos en el proceso de purificación de los jugos cuando se adicionó el surfactante, presentaron mayores densidades que los correspondientes al proceso sin surfactante debido al menor contenido de gases incondensables ocluidos por las partículas.
30. Los mecanismos descritos para la acción del surfactante en el proceso de purificación, permiten interpretar adecuadamente los resultados.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La metodología, basada en la determinación de las curvas tensiométricas, permite la selección del surfactante y el rango de concentraciones más efectivos en que deben emplearse para la intensificación del proceso de extracción de la sacarosa en los molinos.
2. La intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña es posible con la adición de cualquier surfactante aniónico, con propiedades como humectante, que disminuya la tensión superficial del agua como mínimo en un 1,36 %, cuyo efecto es mayor cuando los % Pol y % Humedad en el bagazo residual son altos.
3. La adición de surfactantes aniónicos, con propiedades como humectante, al agua de imbibición, facilita un mejor mezclado del agua y el jugo retenido por el bagazo, intensifica los procesos de transferencia de masa e incrementa la extracción del jugo del bagazo de la caña en los molinos, todo lo cual provoca una disminución del % Pol, el % de Humedad del bagazo residual y de la Pérdida de Molienda, cualesquiera que fuera el nivel de imbibición empleado, respecto al proceso sin surfactantes.
4. Los modelos matemáticos empíricos obtenidos describen adecuadamente el efecto del nivel de imbibición, la concentración del surfactante en el agua de imbibición, la temperatura del agua y la presión en la desmenuzadora, en los % Pol y de Humedad en el bagazo residual
5. Los mecanismos de acción del surfactante, descritos para la distribución del líquido de imbibición y del flujo de fluidos con transferencia de masa en el bagazo, tanto en el conductor intermedio como en el molino, permiten conocer cómo el surfactante es capaz de intensificar el proceso de extracción de la sacarosa y disminuir la humedad del bagazo residual en el tándem de molinos.
6. La presión efectiva del molino es aquella que se obtiene en el momento de la saturación del bagazo cuando éste se somete a una compresión lenta en la prensa del laboratorio.
7. La aplicación de surfactantes aniónicos al agua de imbibición en los molinos, permite ventajas económicas en la extracción de sacarosa. La inversión se recupera dentro del primer mes de molienda estable del central, debido a una ganancia neta de \$ 33,73 / h, cuando muele en las condiciones especificadas en el análisis económico. En los casos en que las pérdidas en Pol y que la humedad del bagazo sean altas, es mayor el efecto económico que se logra con este procedimiento.
8. La adición de surfactantes aniónicos, solos o en mezclas con floculantes, a concentraciones menores de 30 ppm al jugo de la caña a clarificar, provocó una intensificación del proceso de purificación y los mecanismos descritos explican la acción del surfactante.

RECOMENDACIONES

1. Emplear los surfactantes aniónicos para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos y en la purificación de los jugos en los centrales azucareros.
2. Aplicar la metodología desarrollada en este trabajo para evaluar diferentes combinaciones de surfactantes, a fin de obtener un producto con mejores características para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos.
3. Emplear el método de la prensa de laboratorio para estudiar la relación entre las presiones hidráulicas y la presión efectiva en el molino, los ajustes del molino y el fenómeno de la reabsorción.
4. Estudiar el comportamiento de la tensión superficial de las disoluciones de surfactantes que se empleen en el país y determinar las concentraciones donde aparecen sus puntos de extremos relativos para racionalizar su empleo.
5. Emplear como referencia las concentraciones del surfactante, para intensificar el proceso de extracción en los molinos, según la tabla siguiente:

Surfactante	Concentraciones más efectivas, (mg surfactante/kg disolución), ppm
Jabón A	15 a 30
Jabón B	20 a 30
Jabón C	20 a 30 y 50 a 70
Residuo PPG	10 a 20
Sulker Floc	10 a 20 y > 40
Jabón Sulker Floc	35 a 40
Detergente	20 a 30 y 40 a 80
Pan Aid	10 y 40 a 80
Tensol	40 a 80
Busperse	40 a 80

7. El efecto de la temperatura del agua de imbibición, sobre la eficiencia del proceso de extracción, puede ser variable y debe investigarse en cada central en particular.

BIBLIOGRAFIA

1. **Resolución Económica V Congreso del Partido Comunista de Cuba.** Ed. Política, La Habana, 1997.
2. Acosta, P., "Estudio preliminar sobre el comportamiento de surfactantes en soluciones acuosas"/ Pedro Acosta, Uishno Hernández; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma.** Centro Universitario de Las Tunas, 1995.
3. **Aditivos especiales de Air Products.** Desempeño versátil para diversas aplicaciones. Air Products and Chemicals, Inc. U.S.A., 1994. Pp 2 - 7.
4. Agüero M. C., "Estudio preliminar sobre la etapa de extracción de la sacarosa de la caña en el CAI "Amancio Rodríguez"/Caridad Agüero, Raúl Prades, José L. Donald; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma.** Centro Universitario de Las Tunas, 1995.
5. Argudín, L. O., "Productos, equipos y procesos no convencionales utilizados en la Industria Azucarera de Cuba, en las décadas de 1940 y 1950". **Rev. ATAC**, Ene./Feb., 1985.
6. Avila. L. M., "Perspectivas del empleo del bagazo como combustible para la generación de energía eléctrica y como materia prima en la producción de madera artificial". **Reunión de la Comisión de Energía del MINAZ Nacional.** La Habana, 22 de enero del 2000,
7. Báez, D., "Efecto del Tensol en el agua de imbibición sobre la Pol y Humedad en Bagazo"/Darmis Báez, Edith Peña; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma.** Universidad de Camagüey. Filial Las Tunas, 1986.
8. Banerji, L.: Influence of imbibition on recovery as observed in M/S New Horizon Sugar Mill Private Ltd, during the Season 1970-71. **Proc. Fourth Join Conv. Sugar Technol Assoc. India**, 1971. p M7-M9.
9. Barreto, B. M. y otros, "Influencia de la sustancia tensoactiva TENSOL en la clarificación de licores". **Rev. Centro Azúcar**, pp 3 - 8, Julio-Septiembre, Cuba, 1987.
10. Bordón, J., "Los agentes tensoactivos y los procesos de cristalización en la industria azucarera". Monografía, Fac. Ing. Química, Universidad de Camagüey, Junio de 1986.
11. Bordón, J. A.; Carrazana, L., "Utilización de agentes tensoactivos en la cristalización de azúcar refino". **Rev. Centro Azúcar**, pp 64 - 72, Julio-Septiembre, 1986.
12. Brewster, R. y W. McEwen, **Química Orgánica.** Versión al español de la 4ta. edición norteamericana. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1974. pp 231-247, 280-288, 403.
13. Brown, G. y otros, **Operaciones Básicas de Ingeniería Química.** Ed. Revolucionaria, La Habana, 1969. Pp 222-230, 232-240,

14. Burmistrova, O. A. y otros, **Prácticas de Química Física**. Ed. MIR, Moscú, 1977.
15. Bussing, W. et al., "Isothermal liquid transport in porous media: capillary hysteresis effects". **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol 39, No. 9, pp 1925-1934, Great Britain, 1996.
16. Cabrales A. M. y Bárzaga A. R.: "Efecto de los agentes tensoactivos sobre la clarificación de los jugos en el CAI "Grito de Yara"/Martha Cabrales, Raúl Bárzaga; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1995.
17. Carbonel, J.; Pérez, R., "Metodología para el cálculo del coeficiente de difusión de azúcar de caña". **Rev. Tecnología Química**, no. 4, pp 3 - 8, ISJAM, Cuba, 1989.
18. Carrazana, L., **Análisis Agroindustrial Azucarero**, teoría y práctica. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1987. Pp 29, 30-35, 271-274, 306.
19. Casey, J. A., "Reducing Final Molasses Purity With Pan Aid". **Sugars News**, March 1967, pp 142-146.
20. Castellanos Estupiñán, J. E., "Utilización del campo eléctrico en la purificación azucarera. Purificación del jugo de los filtros". **Tesis para el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas**. UCLV. Cuba, 1990,
21. Castellanos, M. E. y otros, "Mojado de jugos de caña sobre las superficies metálicas usuales en equipos de transferencia térmica". **Rev. ATAC**. Mar./Abr., pp 27 - 32, Cuba, 1987.
22. Chen, J. C. P., "Surface Active Chemicals In Low Grade Boiling". **Rev. The Sugar Journal**, November, 1968, pp 27-31.
23. Chou, J. C., "Reduction of molasses viscosity by surface-active chemicals". **Rev. International Sugar Journal**, Julio 1974, pp 195-198.
24. Cordovés, M.; Chopik, V., "Evaluación técnico-económica de la aplicación de agentes tensoactivos en el proceso de refinación de azúcar crudo en Cuba". **Rev. ATAC**. Mar-Abril, pp 48-53, Cuba, 1989.
25. Darias, M., **Introducción a la Química Coloidal**. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1987. Pp 43-69, 90-103, 182.
26. Davies, J. T. et al., **Interfacial Phenomena**. Second Edition. Ed. Academic Press, pp 1-52, 125, 217-251, 418-435, New York, 1963.
27. De Armas, C. M.; López G., P., "Suministro de bagazo a las fábricas de derivados y eficiencia térmica de las fábricas de azúcar". **Rev. Cuba Azúcar**, pp 42 - 48, Abril/Junio, 1978.
28. Díaz, E. y otros, **Flotación y diseño de flotadores**. 4to. Seminario de Procesos de la Industria Azucarera, Dirección de refino y Blanco directo, MINAZ, La Habana, Oct. 1984.
29. Díaz, E. y G. Ocampo, **Mejoras en la clarificación de meladuras**. 4to. Seminario de Procesos de la Industria Azucarera, Dirección de refino y Blanco directo, MINAZ,

- La Habana, Oct. 1984.
30. Domínguez, R., "Análisis de Inversiones". **Curso de Maestría**. UCLV, 1997.
 31. Enrique, M., "Efecto de los agentes tensoactivos aplicados en el agua de imbibición sobre la Pol y Humedad del bagazo"/Marisol Enrique, Raúl Santana; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Facultad Universitaria Independiente de Las Tunas, 1993.
 32. Escobar, N. "Estudio del comportamiento de mezclas de agentes flocculantes y tensoactivos en la clarificación de los jugos de caña"/ Norberto Escobar, A. Pintado; Godeardo Mayo, Tutor; José M. Gil Ortiz, Consultante. **Trabajo de Diploma**. Universidad de Camagüey. Filial Las Tunas, 1986.
 33. Espinosa, R. y otros: **Sistemas de Utilización del Calor**. Ed. Pueblo y Educación, Primera reimpresión, La Habana, 1987. Pp 1-14.
 34. Fonseca, M., "Efecto del jabón de Sulker Flocc en el agua de imbibición sobre el proceso de extracción en los molinos"/Marisbel Fonseca, Julia M. Martínez; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1996.
 35. Foust, A. et al., **Principles of Unit Operations**. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1962. Pp 197, 323-324, 472—476.
 36. Friedman, P.; Arrascaeta, A., "Por qué secar el bagazo?". **Rev. Cuba Azúcar**, pp 27 - 36, Julio Septiembre, 1984.
 37. Galeno, J. y otros, "Evaluación de un agente tensoactivo en el proceso de cristalización de azúcar por agotamiento a escala industrial". **Rev. Centro Azúcar**, pp 91-96, Sept-Diciembre, 1984.
 38. Garcell, L. y J. Rosabal, **Transferencia de Cantidad de Movimiento, Calor y Masa**. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1988.
 39. García R., A. y otros, "Cinética de degradación del bagazo almacenado". **Rev. Centro Azúcar**, No. 1, pp 41 - 46, Cuba, 1994.
 40. García R., A.; Rubio G., A., "Consideraciones teóricas sobre la combustión del bagazo integral". **Rev. Centro Azúcar**, No. 1, pp 49 a 57, Cuba, 1994.
 41. Gibert, A.: Costos Extras en combustible auxiliar motivados por la humedad en el bagazo. **Boletín Azucarero Mexicano**. No. 245. 1970, p 44-47.
 42. Gil, J. A., "Estudio preliminar del proceso de extracción en el CAI Jesús Menéndez"/José A. Gil Ceballo; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Universidad de Camagüey, 1997.
 43. Gil, J. A. y J. M. Gil, "Capacidad de retención del jugo por el bagazo". **Rev. Tecnología Química**, 19(1): 63-66, Ed. ISPIAM, UO, 1999.
 44. Gil, J. M. y otros, "Uso del Detergente Industrial Cubano en el Agua de Imbibición". **Solicitud de Certificado de Autor de Invención**. Registro de Entrada No. 214/85.
 45. Gil, J. M. y otros, "Efecto energético y económico del empleo del Tensol en el agua

- de imbibición de los molinos del Central Azucarero". **Revista Electrónica Innovación Tecnológica** del CITMA, 1995.
46. Gil, J. M. y otros, "El uso del surfactante Busperse 49 en el agua de imbibición para reducir el Pol y la Humedad del bagazo en el Central Azucarero". **Rev. Electrónica Innovación Tecnológica** del CITMA, 1995.
 47. Gil, J. M. y otros, "El surfactante Pan Aid en el agua de imbibición para reducir el Pol y la Humedad del bagazo en los molinos del Central Azucarero". **Rev. Electrónica Innovación Tecnológica** del CITMA, 1995.
 48. Gil, J. M. y otros, "El detergente industrial en el agua de imbibición para disminuir el Pol y la Humedad del bagazo en el Central Azucarero". **Rev. Electrónica Innovación Tecnológica** del CITMA, 1995.
 49. Gil, J. M. y otros, "El surfactante Pan Aid en el agua de imbibición para reducir el Pol y la Humedad del bagazo en los molinos del Central Azucarero". **Rev. Tecnología Química**, 17(1): 92-96, Ed. ISPJAM, UO, 1997.
 50. Gil, J. M. y otros, "Efecto de un surfactante en el jugo residual sobre la compresibilidad del bagazo". **Rev. Tecnología Química**, 18(3): 87-93, Ed. ISPJAM, UO, 1998.
 51. Gil, J. M. y otros, "Estudio de la compresibilidad del bagazo a escala de Laboratorio". **Rev. Tecnología Química**, 18(1 y 2): 69-74, Ed. ISPJAM, UO, 1998.
 52. Gil, J. M., "Estudio del efecto de los surfactantes en el agua de imbibición de los molinos sobre el %Pol y % Humedad del bagazo"/ José Marcos Gil Ortiz; Dr C William Suárez Santos, Tutor. **Tesis de Maestría**. UCLV, 1998.
 53. Gil, J. M. y otros, "Efecto de la adición de un Jabón de Aceite de Caña al agua de imbibición y el nivel de imbibición sobre el porciento de Pol en bagazo". **Rev. Electrónica Innovación Tecnológica** del CITMA, 1999.
 54. Gil, J. M. y otros, "Efecto de la adición del Jabón B al agua de imbibición y el nivel de imbibición sobre el porciento de Pol en bagazo". **Rev. Tecnología Química**, 2000,
 55. Gil, J. M. y otros, "Efecto del surfactante Sulker Floc en el agua de imbibición sobre la extracción del jugo en una prensa de laboratorio". **Rev. Tecnología Química**, Vol XX No (2) 2000,
 56. Gil, J. M. y otros, "Mejoras en el proceso de purificación de los jugos de la caña de azúcar mediante la adición de sustancias con actividad superficial". **Solicitud de Certificado de Autor de Invención** No. 175/99. OCPI. Cuba, 1999.
 57. Glasstone, S., **Tratado de Química Física**. Ed. Ciencia y Técnica, La Habana, 1972, Pp 434-472.
 58. González, E. y A. Cárdenas, "Aplicación del diseño estadístico de experimentos en el análisis económico de un proceso". **Rev. Centro Azúcar**. Enero-Abril, 1995. Cuba. pp 52-56.

59. González, E. y otros, "Análisis Complejo de Procesos". **Curso de Maestría**. UCLV, 1997.
60. González, E. y otros, "Planificación de los experimentos en los problemas de ingeniería". **Curso de Maestría**. UCLV, 1996.
61. González, F. y otros, "Revalidación de modelos del tren de molinos de caña". **Rev. ATAC**. Julio-Agosto, 1985. Cuba. PP 29 - 32.
62. González, J. y E. Peña, "Efecto del "Busperse 49" en el agua de imbibición". **Trabajo de Diploma**. Universidad de Camagüey. Filial Universitaria Las Tunas. Cuba, 1986.
63. González Q., R. y Herrera M., O., "Efecto de los surfactantes en la ebullición nucleada del agua". **Rev. Centro Azúcar**. Octubre-Diciembre, 1989. Cuba. PP 44 - 52.
64. González Q., R. y Herrera M., O., "Efecto de los surfactantes en la ebullición nucleada de soluciones de sacarosa y jugos de caña a altas concentraciones". **Rev. Centro Azúcar**. Julio - Septiembre, 1989. Cuba. Pp 33 - 41.
65. González Q., R. y Lodos F., J., "La influencia de los agentes tensoactivos sobre la velocidad de evaporación de soluciones de sacarosa puras e impuras". **Rev. Cuba y Azúcar**. Enero/Marzo, 1982. Cuba. PP 3 - 10,
66. González Q., R. y Lodos F., J., "Propiedades humectantes de las soluciones de sacarosa sobre las superficies de transferencia de calor". **Rev. Cuba Azúcar**. Julio-Septiembre, 1983. pp 13.
67. González Q., R. y Lodos F., J., "El trabajo de adherencia y el coeficiente de extensión de soluciones de sacarosa sobre superficies de cobre, acero inoxidable y aluminio. Efecto de la temperatura y los surfactantes". **Rev. ATAC**. Ene./Feb., 1984. Pp 18 - 24. Cuba.
68. González Q., R. y Lodos F., J., "Tensión superficial crítica y concentraciones interfaciales relativas de soluciones de sacarosa tratadas con agentes tensoactivos. Efecto de la temperatura". **Rev. ATAC**. Julio/Agosto, 1987. Cuba. PP 35 - 45.
69. González Q., R. y J. Delgado, "La Tensión Superficial de Soluciones de Sacarosa". **Rev. ATAC** No. 5. Cuba 1982.P 45.
70. González Q.,R. y M. Derivet, "La Tensión Superficial en Soluciones de Sacarosa II". **Rev. ATAC** No.4. Cuba 1984. Pp 15 - 20,
71. González Q.,R. y M. Derivet, "La Tensión Superficial en Soluciones de Sacarosa". **Rev. ATAC** No.1.Cuba 1985.P 15.
72. González R. y otros, "**TENSOL**". Monografía. DICT. Universidad de Camagüey. Mayo 1985.
73. Guerra, J., "The Chemistry of calcium phosphate precipitation in cane juice clarification". **Inter. Sugar. Journal**, Vol. 78, 3-7 (35-39), 1976.
74. Gutiérrez, P. y otros, "Influencia de la adición de un agente tensoactivo en la síntesis

- de un sucroglicérido sin utilizar solvente". **Rev. ATAC**. Septiembre/Octubre, 1986. Pp 40-43.
75. Guzmán C., J. F., Fernández F., G., "**Método para evaluar la eficiencia del Tándem**". Bases para el desarrollo de equipos de las industrias azucarera, del plástico y otras. Colectivo de autores. Ed. ISJAM. Stgo. de Cuba, 1987. pp 5-8.
 76. Hamill, T. M., "Wet Milling Extraction Process and Apparatus Therefor". **Patente** 36 695 931 United States Patent Office. 1972.
 77. Hernández, O., "Efecto de la adición de un jabón de aceite de caña al agua de imbibición sobre el % Pol y Humedad del bagazo en el CAI "Jesús Menéndez""/Osiris Hernández Avila, Raciél Bermúdez, Damaris Olivera Ramírez, Marbelis Batista Peña; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1996.
 78. Herrera, E. y otros, "**Criterios actuales de la Industria Azucarera Cubana sobre: preparación de la caña; consumo de potencia; capacidades, rayados de mazas; ajuste de molinos**". 2do. Encuentro Nacional de Jefes de Maquinaria. MINAZ. La Habana, 1995.
 79. Hijnen, H. and Smith J., "The effect of the pH on electrolyte transport through microporous membranes bearing either weakly or strongly dissociating acid groups. A theoretical analysis using the space-charge model for a cylindrical capillary". **Journal of Membrane Science**. Vol. 99. Ed. Elsevier Science B. V., 1995.
 80. Hilfer, R., "Transport and relaxation phenomena in porous media". **Advances in Chemical Physic**, Volume XCII. Ed. John Wiley & Sons, 1996.
 81. Hilfer, R. and P. Oren, "Dimensional analysis of pore scale and field scale immiscible displacement". **Transport in Porous Media**. Vol. 22. Ed. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1996. pp 53-72.
 82. Honig, P., **Principios de Tecnología Azucarera**. Tomo I. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1979. Pp 69-71, 192-195.
 83. Hugot, E., **Manual para Ingenieros Azucareros**. Compañía Ed. Continental S. A., 1974. PP 617-636.
 84. ICIDCA, **La Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar**. Ed. Ciencia y Técnica, La Habana, 1986. PP 13,26,60-64,127-128, 556 - 559, 573.
 85. Información sobre el producto Busperse 49. B. Laboratories. **Boletín** No. D 16, España, 1977.
 86. "Información sobre el producto Pan Aid". B. Laboratories. **Revista Sugar y Azúcar**, Vol. 73, No. 2., 1978.
 87. Jenkins, G., **Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña**. Ed. Ciencia y Técnica, La Habana, 1971. pp 23-24, 54-56, 77-79, 83-89, 127-141, 143-152, 156-157, 173-192, 195-202.

88. Kasatkin, A., **Operaciones Básicas y Aparatos en la Tecnología Química**. Tomo I y II. Impreso por V/O Vueshtorgisdats para Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1987.
89. Kern, D., **Procesos de Transferencia de Calor**. 2da. Edición. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1975. Pp 437-439.
90. Leavin, N., **Manual del Operador. Proceso Talodura**. Tate and Lyle. Process Technology. Traducción MINAZ. La Habana, 1986.
91. Llorens, J. y otros, "Los Tensoactivos en la absorción de Gases". **AFINIDAD**, Tomo XLII. Septiembre - Octubre, 1985. Pp 463 - 477.
92. Lodos, J. y otros, "Estudio de la influencia de los agentes tensoactivos sobre la tensión superficial, el ángulo de contacto y la velocidad de evaporación de soluciones de sacarosa y miel final". **Memorias de la XLII Conferencia ATAC**. 1979.
93. Loughran, J. G., "Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane". **PhD Thesis**. University of Queensland. Australia, 1990,
94. **Manual de Operaciones**. Planta Moledora. Dirección de Maquinaria Industrial. MINAZ. La Habana, 1996.
95. **Manual para la Producción de Azúcar Crudo de Caña**. Dirección de Tecnología del Ministerio del Azúcar. La Habana, 1995. Tomo I y II.
96. Marrero A., S. y otros, "Influencia de los agentes tensoactivos Pan Aid y Visc Aid en el agotamiento de masas cocidas". **Rev. Centro Azúcar** No. 3, Sept-Dic 1984. pp 13-16.
97. Martin y otros, **Farmacia Práctica de Reminton**. Traducción de la 12ma. Edición, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1965. pp230-244.
98. Martínez, A., N., "Equipo y Esquema de Tratamiento del Jugo o Licor en la Industria Azucarera Cubana". **Tesis presentada para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas**. UCLV, 1990,
99. Martínez, R., J., "Efecto del jabón de Sulker Flocc en el agua de imbibición sobre el proceso de extracción en los molinos del CAI "Bartolomé Masó Marquez"/Julia Martínez Rodríguez, Maribel Fonseca Fonseca; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1996.
100. Matos, R. y R. Hing, **Aspectos Fundamentales de la Química Física**. Tomo II, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1988. Pp 257-262, 274-277.
101. McBain, J. W., **Properties of soaps and their aqueous solutions. International Critical Tables of Numerical Data Physics, Chemistry and Technology**. Volume V, First Edition, Fourth Impression, National Research Council, McGraw - Hill Book Company, Inc. New York and London, 1929. pp 446-460,
102. McCabe, W. y J. Smith, **Operaciones Básicas de Ingeniería Química**. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1977.

103. Medvedev, P. I., **Química - Física y Coloidal**. Ed. Pedagógica, La Habana, 1965. PP 193-218.
104. Meeten, G. and J. Smeulders, "Comments on Specific cake resistance determination with a new capillary suction time apparatus". **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol 35, No. 12, 1996. 4810-4812.
105. Morales, G., "Tensión superficial y viscosidad de disoluciones acuosas de surfactantes"/Griselda Morales Ramírez; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1997.
106. Morell, I., **Tecnología Azucarera**. Ed. UCLV, Santa Clara, Cuba, 1984.
107. Morera, R., "Tendencias actuales en la industria azucarera". ICINAZ. **Conferencia dictada en Reunión de análisis y tendencias C-T en la agroindustria azucarera**, (18.4.97). MES. La Habana, 1997.
108. Muñoz, G. Y otros, "Analysis of the operation of a cane mill". **Proceedings of the International Conference, American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**; St Joseph; USA Guanajuato, Mexico, 20-24 February 1995, 370-379; 9 ref.
109. Murry, C. R., **A short course in crushing sugar cane**. Australia, 1996.
110. Nakayama, A. and M. Hossain, "An integral treatment for combined heat and mass transfer by natural convection in a porous medium". **Int. J. Heat Mass Transfer**. Vol 38, No. 4. Ed. Elsevier Science Ltd. Great Britain, 1995. pp 761-765.
111. NC 90-00-06-1, **Aseguramiento Metrológico**. SI de Unidades. Unidades Básicas y Suplementarias. Comité Estatal de Normalización. La Habana, 1983.
112. _____, **SI de Unidades. Factores y Tablas**. La Habana, 1983.
113. Nimbalkar, S. et al., **Views on biocides used for mill sanitation in sugar factories**. India Seminar on Process improvement in sugar and allied industry by use of various chemicals. National Sugar Institute; Kanpur; India, 1994. Pp 58-63
114. Ochoa, F., "Evaluación del Tensol en la Clarificación de los Jugos"/Freddy Ochoa y Jesús Gandoll; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Universidad de Camagüey. Filial Las Tunas, 1985.
115. Olbricht, W., "Pore-scale prototypes of multiphase flow in porous media". **Ann. Rev. Fluid Mech.** 28: 187-213. New York, 1996.
116. Owen, D. and Loughran, J., "Application of porous media mechanics to the numerical simulation of the rolling of the sugar cane". **Engineering Computations**, Vol 12, 281 - 302 (1995).
117. Pacheco, P., "Ecuaciones para el Diseño de Instalaciones a Transporte Neumático por Tuberías Verticales de Materiales Polvorientos, Granulosos, Polimorfos y Polidispersos"/Pedro Pacheco Bertot. **Tesis para la obtención del grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas**. Santiago de Cuba, 1984.
118. Paul, D. y otros, "Agentes tensoactivos en el proceso de viscosa". **Rev. ATAC**. Mar-

- zo/Abril, 1984. Pp 44-50
119. Pávlov, K. y otros, **Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química**. Editorial MIR, Moscú, 1981.
 120. Pedrosa P., R., **Manual para el Laboratorio Azucarero**. Ed. Pueblo y Educación, 1974.
 121. _____, **Fabricación de Azúcar Crudo de Caña**. Ed. Científico Técnica, La Habana, 1975. Pp 42-50,
 122. Pérez, F., "Resultados y Perspectivas del Ahorro de Energía en la Industria Azucarrera de Villa Clara". **Rev. Energía** No. 3 Cuba 1986. PP 20,21 y 34.
 123. Pérez, R. et al, **Introducción a la Química de Superficies y Coloides**. Ed. Alambra, 2da. edición española, Madrid, 1977.
 124. Pérez, R. y L. Hechavarría, "Cuchillas oscilantes en la preparación de la caña". **Memorias de la 44 Conferencia de la ATAC**. La Habana, 1985.
 125. Pérez, R. y A. Ortiz, "Cálculo del coeficiente de difusión y transferencia de masa para la difusión de azúcar". **Rev. Tecnología Química**, 1992.
 126. Pérez S., R., "Intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar con el empleo de agua magnetizada". **Tesis para el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas**. UO. Cuba, 1992.
 127. Perk, M., "Tabla útil para el cálculo del valor calórico del bagazo". **South African Sugar Journal**, 1983, Vol 53, no. 8. p 593.
 128. Perry, R. and C. Chilton, **Chemicals Engineers' Handbook**. Ed. Revolucionaria, La Habana, 1977. Pp 3-238, 17-3 a 17-8, 18-78 a 18-79, 19-41 a 19-43, 21-18 a 21-20,
 129. Quincoces, M., "Propiedades físico - químicas y comportamiento tecnológico de las sustancias nitrogenadas en el proceso de fabricación de azúcar crudo de caña". **Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas**. UCLV, 1989.
 130. Ramaiah, N. A. y S. K. Rivastav, "El Uso de Sustancias Activas Superficiales en el Agua de Imbibición para Reducir el Pol y la Humedad del Bagazo en los Centrales Azucareros". **Preprint Memorias del XVIII Congreso de la ISSCT**. Cuba, 1983. Factory Commission. Tomo II. P 3.
 131. Riera, G., "La extracción en un tren de molinos". **Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas**. ISJAE, 1996.
 132. Rodríguez R. J., "Efecto de los agentes tensoactivos en el agua de imbibición sobre la Pol y Humedad del bagazo en el CAI "Majibacoa""/Juan E. Rodríguez, Bartolo Díaz de la Torre, Enrique Andino, Carlos Escobar; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas . 1995.
 133. Rosabal, J. y L. Garcell, **Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas**. Tomo I y II. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1988.
 134. Rueda, L., "Evaluación del Tensol en la clarificación de los jugos". **Trabajo de Di-**

- ploma/** Leonardo Rueda y Hugo Pupo; Godeardo Mayo, Tutor; José M. Gil, Consultante. Universidad de Camagüey. Filial Las Tunas. 1986.
135. Ruiz, A. R., "Procedimiento para mejorar la Extracción de Azúcares en los Molinos". **Solicitud de Registro de Patente** No. 140 808-1952.
 136. Ruiz, A. R., "Procedimiento para Mojar más el Bagazo de la Caña de Azúcar". **Solicitud de Registro de Patente** No. 140 809-1952.
 137. Ruiz, A. y A. Arroyo, "La Recuperación Económica de la Sacarosa en Bagazo, con el proceso Físico - Químico de Agentes Humectantes y Penetrantes". **Memorias 28 Conferencia de la ATAC**. Cuba. 1954. PP 143-139.
 138. Rusavin, G., **Métodos de la investigación científica**. Ed. Ciencias Sociales, La Habana, 1990,
 139. Santana Machado, R. J., "Purificación de jugos de caña por métodos químicos". **Tesis de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas**. ISPJAE, 1983.
 140. Schukin, E. y otros, **Química Coloidal**. Ed. MIR, Moscú, 1988. Pp 56-125, 237-252.
 141. Scott, B and L. Feike, "Predicting two- and three-fluid capillary pressure-saturation relationships of porous media with fractional wettability". **Water Resources Research**, vol 32, No. 2. Pp 251-259. U.S., February 1996.
 142. Sevilla, E. y P. Friedman, "Simol, un modelo matemático para predecir la extracción de un tren de molinos". **Rev. Cuba Azúcar**. Julio/Sept., 1976. Cuba. Pp 46 - 52.
 143. Sevilla, E. y P. Friedman, "Un método teórico para determinar los coeficientes de reabsorción e imbibición en un tren de molinos de caña". **Rev. Cuba Azúcar**. Abril/Junio, 1977. Cuba. PP 52 - 60,
 144. Shang, S. W. et al., "Work of adhesion influence on the reological properties of silica filled polymer composites". **Journal of Materials Science** 30(1995) 4 323-4 334.
 145. Shaw, D., "**Química de Superficie y Coloides**". Ed. ALHAMBRA, S.A. Madrid, 1977. Cap. 4, 7 al 10,
 146. Sommer, J. and A. Mortensen, "Forced unidirectional infiltration of deformable porous media". **J. Fluid Mechanic** (Cambridge University Press) (vol. 311): pp 193-217. USA, 1996.
 147. Spencer, E. y G. Meade, **Manual del Azúcar de Caña**. 2da. Edición, Ed. Revolucionaria, La Habana, 1974. Pp 50-77, 80-86.
 148. Starrett, B., "La prensa continua para bagazo aumenta la eficiencia de la molienda". **Rev. ATAC**. Ene./Mar., 1969. Cuba. PP 63 - 68.
 149. Suárez R., R. y otros, **El almacenamiento de bagazo para la industria de derivados**. Ed. Científico-Técnica, La Habana, 1982. ICIDCA. Pp 6-14, 32.
 150. "Técnica revolucionaria para extraer sacarosa". **Boletín Azucarero Mexicano**. No. 212. Pp 24. México, 1967.
 151. Torres, M. , "Evaluación del efecto de los agentes tensoactivos en la Pol y Humedad

- del bagazo en el CAI López Peña"/Mayra Torres Rodríguez, María Rodríguez Laguna; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Centro Universitario de Las Tunas, 1995.
152. Torres, N., "Efecto de los agentes tensoactivos en el agua de imbibición sobre la Pol y la Humedad del bagazo"/Noema Torres, Belkis García; José M. Gil Ortiz, Tutor. **Trabajo de Diploma**. Facultad Universitaria Independiente de Las Tunas. 1992.
 153. Treybal, R., **Operaciones con Transferencia de Masa**. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1977. Pp 19-23, 44-63, 73-82, 96-100, 191-194, 482-484, 721-770,
 154. Troconiz, Fz. A., **Modelos Lineales**. Servicio Ed. de la Universidad del País Vasco, Bilbao, 1987. pp.
 155. Ugarte, M. y otros, "Estudio de la clarificación de meladura a nivel de laboratorio". **Rev. Centro Azúcar**. Julio-Septiembre, 1987. pp 9 - 12.
 156. Ugarte, M. y otros, "Evaluación del agente tensoactivo jaboncillo en la cristalización por agotamiento a nivel de laboratorio". **Rev. Centro Azúcar** No. 3, Sept-Dic 1984. pp33-38.
 157. Vafai, K. and S. Kim, "On the limitations of the Brinkman-Forchheimer-extended Darcy equation". **Int J. Heat and Fluid Flow**. Vol 16. Ed. Elsevier Science Inc. N.Y. 1995. pp 11-15.
 158. Valdés C., A., "Existe un límite económico para la aplicación del agua de imbibición y del agua de lavado de los filtros". **Rev. ATAC**. Mayo/Junio, 1986. pp 20 -26.
 159. Valea, A. y otros, **Comportamiento de los Tensoactivos en Disolución**. Servicio Ed. de la Universidad del País Vasco, Pp 7-51. Bilbao, 1990,
 160. Van Duijn, C. et al., "The effect of capillary forces on immiscible two-phase flow in heterogeneous porous media". **Transport in Porous Media** 21: 71-93. Kluwer Academic Publisher. Netherlands, 1995.
 161. Walter, K., "Deterioration of bulk stored bagasse and its preservation by chemical treatment". **Proc. of XVII Congress of ISSCT**, 3:2473. Manila, 1980,
 162. Yody, J. C. y O. Rodríguez, "Efecto del Detergente Industrial sobre la clarificación de los jugos"/Juan Carlos Yody, Odalis Rodríguez; Enrique Marañón Rodríguez, Tutor. José M. Gil Ortiz, Consultante. **Trabajo de Diploma**. Universidad de Camagüey. Filial Las Tunas, 1986.

Eventos nacionales donde han sido presentados resultados relacionados con la Tesis:

- Conferencia Científica Internacional “50 Aniversario de la Universidad de Oriente”. UO, 1997.
- V Simposio de Análisis y Diseño de Plantas Químicas SIADIP’98 en la UCLV, 1998.
- QF’99. Universidad de Camagüey, 1999.

Publicaciones científicas de resultados relacionados con la Tesis:

1. Efecto energético y económico del empleo del Tensol en el agua de imbibición de los molinos del Central Azucarero. Rev. electrónica Innovación Tecnológica del CITMA, 1995.
2. El uso del surfactante Busperse 49 en el agua de imbibición para reducir el Pol y la Humedad del bagazo en el Central Azucarero. Rev. electrónica Innovación Tecnológica del CITMA, 1995.
3. El surfactante Pan Aid en el agua de imbibición para reducir el Pol y la Humedad del bagazo en los molinos del Central Azucarero. Rev. electrónica Innovación Tecnológica del CITMA, 1995.
4. El detergente industrial en el agua de imbibición para disminuir el Pol y la Humedad del bagazo en el Central Azucarero. Rev. electrónica Innovación Tecnológica del CITMA, 1995.
5. Efecto de la adición del surfactante Pan Aid al agua de imbibición de los molinos del central azucarero sobre el Pol y la Humedad del bagazo a escala de laboratorio. Rev. Tecnología Química, 17(1): 92-96, Ed. ISPJAM, UO, 1997.
6. Efecto de un surfactante en el jugo residual sobre la compresibilidad del bagazo. Rev. Tecnología Química, 18(3): 87-93, Ed. ISPJAM, UO, 1998.
7. Estudio de la compresibilidad del bagazo a escala de Laboratorio. Rev. Tecnología Química, 18(1 y 2): 69-74, Ed. ISPJAM, UO, 1998.
8. Capacidad de retención del jugo por el bagazo. Rev. Tecnología Química, 19(1): 63-66, Ed. ISPJAM, UO, 1999.
9. Efecto de la adición de un Jabón de Aceite de Caña al agua de imbibición y el nivel de imbibición sobre el porcentaje de Pol en bagazo. Rev. electrónica Innovación Tecnológica del CITMA, 1999.
10. Efecto de la adición del Jabón B al agua de imbibición y el nivel de imbibición sobre el porcentaje de Pol en bagazo. Rev. Tecnología Química, Ed. ISPJAM, UO, 1999.
11. Efecto del surfactante Sulker Flocc en el agua de imbibición sobre la extracción del jugo en una prensa de laboratorio. Rev. Tecnología Química, XX (2), Ed. ISPJAM, UO, 2000-02-24.

Tesis de Maestría:

"Estudio del efecto de los surfactantes en el agua de imbibición de los molinos sobre el

%Pol y % Humedad del bagazo"/ José Marcos Gil Ortiz; Dr C William Suárez Santos, Tutor. Tesis de Maestría. UCLV, 1998.

Registro de solicitud de Certificado de Autor de Invención.

"Mejoras en el proceso de purificación de los jugos de la caña de azúcar mediante la adición de sustancias con actividad superficial". Solicitud de Certificado de Autor de Invención No. 175/99. OCPI. Cuba, 1999.

Trabajos de diploma tutorados y vinculados al tema: 14

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN _____	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
Objetivos _____	¡Error! Marcador no definido.
Hipótesis _____	¡Error! Marcador no definido.
El autor defiende lo siguiente: _____	¡Error! Marcador no definido.
Novedad científica del trabajo _____	¡Error! Marcador no definido.
Significación práctica del trabajo _____	¡Error! Marcador no definido.
Estructura de la tesis _____	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 1 ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA _____	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.0.0 La extracción de la sacarosa en trenes de molinos	¡Error! Marcador no definido.
1.1.0 El Proceso de extracción del jugo de la caña en tándem de molinos y su relación con las características del colchón de bagazo	¡Error! Marcador no definido.
1.2.0 La imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos _____	¡Error! Marcador no definido.
1.3.0 Influencia de la temperatura del agua de imbibición y el tiempo de contacto en el conductor de bagazo en el proceso de extracción en los molinos	¡Error! Marcador no definido.
1.4.0 Reabsorción del jugo en los molinos _____	¡Error! Marcador no definido.
1.6.0 Los Surfactantes _____	¡Error! Marcador no definido.
1.6.1 Algunos usos de los surfactantes _____	¡Error! Marcador no definido.
1.6.2 Tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes ____	¡Error! Marcador no definido.
1.7.0 Los surfactantes en la industria azucarera ____	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1 Los surfactantes para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos _____	¡Error! Marcador no definido.
1.7.1.1 Efecto de los surfactantes en la tensión superficial y la viscosidad de jugos de caña _____	¡Error! Marcador no definido.
1.7.2 Los surfactantes en la purificación de jugos, mieles y licores _____	¡Error! Marcador no definido.
1.7.3 Los surfactantes en los procesos de transferencia de calor	¡Error! Marcador no definido.
1.7.4 Los surfactantes en el proceso de cristalización de la sacarosa _____	¡Error! Marcador no definido.
1.8.0 El Bagazo de la caña de azúcar. Características _____	¡Error! Marcador no definido.
1.8.1 Valor Calórico del Bagazo _____	¡Error! Marcador no definido.
Conclusiones Parciales del Capítulo 1 _____	¡Error! Marcador no definido.
Tareas desarrolladas para verificar la hipótesis y dar cumplimiento a los objetivos planteados _____	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 2 MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES A ESCALA DE LABORATORIO _____	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.0 Métodos del Análisis de Procesos _____	¡Error! Marcador no definido.
2.2.0 Tensión Superficial _____	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1 Tensiómetro empleado para las mediciones _____	¡Error! Marcador no definido.
2.2.2 Surfactantes empleados _____	¡Error! Marcador no definido.

- 2.2.2.1 Preparación de las disoluciones de surfactantes ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.3.0 Tensión superficial de las disoluciones acuosas de los surfactantes en el rango de concentraciones de 0 a 80 ppm ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.3.1 Curvas tensiométricas de las disoluciones de los surfactantes ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.3.1.1 Ajuste de los datos a rectas de regresión **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.3.1.2 Ajuste de los datos polinomios de regresión ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.0 Efecto del surfactante Jabón B de aceite de caña sobre la compresibilidad del bagazo, la tensión superficial y la viscosidad del jugo extraído **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.1 Efecto de la presencia de un surfactante en el agua de imbibición en la compresibilidad del bagazo ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.1.1 Preparación de las muestras ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.1.2 Procedimiento con el bagazo en la prensa ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.1.3 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.2 Tensión Superficial de los jugos extraídos de bagazos imbibidos con las disoluciones del surfactante ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.3 Viscosidad de los jugos extraídos ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.4.3.1 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.0 Efecto de la concentración del surfactante en el agua de imbibición en el % Pol y % Humedad del bagazo residual ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.1 Metodología experimental ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.1.1 Determinaciones previas en el tándem ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.1.2 Toma de la muestra ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.1.3 Procedimiento en el laboratorio ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.5.2 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.6.0 Los surfactantes en el proceso de purificación de los jugos **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.6.1 Metodología experimental ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.6.2 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- Conclusiones Parciales del Capítulo 2 ____ **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 3 MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES A ESCALA

INDUSTRIAL ____ **¡Error! Marcador no definido.**

- 3.1.0 Efecto del surfactante en la purificación de los jugos **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.1.1 Metodología de muestreo ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.1.2 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.0 Los surfactantes en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.1 Metodología experimental para la primera etapa ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.1.1 Determinaciones previas ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.1.2 Toma de la muestra ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.1.3 Masa de surfactante a disolver para preparar la solución a dosificar al agua de imbibición ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.2 Resultados ____ **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.2.2.1 Central “Jesús Menéndez”. Provincia de Las Tunas. Zafra de 1996.
____ **¡Error! Marcador no definido.**

3.2.2.2 Central “López Peña”. Provincia de Holguín. Zafra de 1995. ____	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2.3 Central “Majibacoa”. Provincia de Las Tunas. Zafra de 1995. ____	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2.4 Central "Bartolomé Masó". Provincia Granma. Zafra de 1995. ____	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2.5 Central "Colombia". Provincia de Las Tunas. Zafras de 1992 y 1993. _____	¡Error! Marcador no definido.
3.3.0 El surfactante Jabón B de aceite de caña en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en tándem de molinos. Etapa Industrial II.	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1 Muestreo _____	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2 Resultados _____	¡Error! Marcador no definido.
3.4.0 Experimento de tamizado. Etapa Industrial III	¡Error! Marcador no definido.
Conclusiones Parciales del Capítulo 3 _____	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS ____	¡Error! Marcador no definido.
4.1 Comportamiento de las curvas de tensión superficial de las disoluciones acuosas en función de la concentración de los surfactantes, a temperatura constante.	¡Error! Marcador no definido.
4.2 Efecto en la tensión superficial y viscosidad del jugo al imbibir el bagazo con disoluciones acuosas del surfactante _____	¡Error! Marcador no definido.
4.3 Efecto de la presencia de un surfactante en el agua de imbibición en la compresibilidad del bagazo _____	¡Error! Marcador no definido.
4.4 Efecto de los surfactantes en la purificación de los jugos de la caña de azúcar.	¡Error! Marcador no definido.
4.5 Los surfactantes en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar	¡Error! Marcador no definido.
4.6.0 El Jabón B de aceite de caña para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos. Etapa Industrial II.	¡Error! Marcador no definido.
4.6.1 % Pol en el bagazo residual _____	¡Error! Marcador no definido.
4.6.2 Pérdida de Molienda _____	¡Error! Marcador no definido.
4.6.3 Influencia del nivel de imbibición y la relación °Bx en caña/fibra en caña en la pérdida de molienda _____	¡Error! Marcador no definido.
4.6.4 Porcentaje de humedad en el bagazo residual	¡Error! Marcador no definido.
4.6.5 Relación entre el % Humedad del bagazo, el nivel de imbibición y el % Pol en bagazo _____	¡Error! Marcador no definido.
4.7 Experimento de Tamizado. Etapa Industrial III	¡Error! Marcador no definido.
4.8 Los mecanismos del proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos.	¡Error! Marcador no definido.
4.9.0 Metodología para la selección del surfactante para intensificar el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos y el rango de concentraciones adecuado _____	¡Error! Marcador no definido.
4.9.1 Selección del Surfactante _____	¡Error! Marcador no definido.
4.9.2 Determinación del rango de concentraciones más efectivo. _____	¡Error! Marcador no definido.
4.9.3 Evaluación económica _____	¡Error! Marcador no definido.
4.9.3.1 Análisis de Rentabilidad _____	¡Error! Marcador no definido.
Conclusiones Parciales del Capítulo 4 _____	¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES GENERALES _____	1
RECOMENDACIONES _____	2
BIBLIOGRAFIA _____	3

Eventos nacionales donde han sido presentados resultados relacionados con la Tesis:	14
Publicaciones científicas de resultados relacionados con la Tesis:	14
INDICE	1