Clarificación con agitación lenta: Experiencias y resultados

Clarification with slow stirring: Experiences and results

Jairo Jerez Jiménez 1: Dorángela Molina Landaeta 2: Jesús Alberto García Núnez 3

RESUMEN

Un flujo discontinuo, un alto contenido de aceite en lodos a la salida del clarificador y una ineficiente operación son los problemas más comunes en la etapa de clarificación del proceso de extracción de aceite de palma. Para resolver los puntos antes mencionados, la planta extractora de Unipalma de Los Llanos S.A. instaló un clarificador primario de sección circular con agitación lenta, para el cual se realizó un estudio donde se ensayaron diferentes velocidades de agitación y de dilución del licor de entrada para evaluar el efecto que tienen estas variables sobre el contenido de aceite en lodos a la salida del clarificador y en las pérdidas de aceite en lodos centrifugados, además se realizó una mejor distribución de los equipos existentes en esta etapa y un control en sus condiciones de operación. Como resultados importantes de este estudio se tienen: Contenidos de aceite en lodos a la salida del clarificador de 4 a 6% en volumen, disminución del caudal de lodos a centrifugar de 11 a 8 m³/h, menor tiempo de operación de la centrífugas y menores pérdidas de aceite en lodos centrifugados; se logró una operación óptima del equipo con una velocidad de agitación de 2,4 rpm y que dilución del crudo a clarificar de 1.2 :1 (Aceite : Aqua). Un clarificador con agitación lenta reduce considerablemente el contenido de aceite en lodos y conlleva a una operación estable del proceso, pero no influye significativamente en la pérdida de aceite en lodos centrifugados; esto se logra con una adecuada operación de los equipos posteriores al clarificador, manteniendo un flujo uniforme del sistema.

SUMMARY

A discontinuous flow, a high content of oil in sludge at the exit of the clarifier, and a non efficient operation are the most common problems in the clarification stage of the oil extraction process. To solve the previous problems, the mill Unipalma de Los Llanos S.A. installed a primary separator of circular section, with slow agitation, in which a study was performed to try different agitation speeds and levels of dilution of incoming liquor, in order to evaluate the effect that these variables have on the content of oil in the sludge at the exit of the separator and in the losses of oil in centrifuged sludges. A better distribution of the existing equipment was also performed at this stage. The following important results were obtained: oil content in sludges at the exit of the separator from 4 to 6% in volume, decrease of the sludges to be centrifuged from 11 to 8.5 m3/h, less operation time of the centrifuges and lower losses of oil in humid base in centrifuged sludges, an optimum equipment operation with 2.4 r.p.m. and dilution of the crude to be clarified of 1.2:1 (oil: water). A clarifier with slow agitation considerably reduces the content of oil in sludge and leads the process to a stable operation. Nevertheless, it does not significantly influence the loss of oil in centrifuged sludges; this is achieved with an adequate operation of the equipment subsequent to the clarifier, maintaining a uniform flow in the system.

Palabras claves: Plantas extractoras. Clarificación, Aguas residuales, Aceite de palma. Pérdidas, Equipo.

- 1 Superintendente Técnico. Unipalma de los Llanos. Villavicencio, Colombia.
- 2 Ing. de Producción Agroindustrial.
- 3 Invest. Asistente. Área de Procesos y Usos. Cenipalma. Apartado Aéreo 252171. Bogotá, D.C., Colombia.

INTRODUCCIÓN

Una de las etapas más importantes del proceso de extracción de aceite es la clarificación del aceite crudo, durante la cual se separa el aceite puro de las aguas lodosas y otro material celular que entra al proceso. Esta operación se ha venido realizando mediante dos métodos diferentes; inicialmente se clarificó por decantación estática, y últimamente se ha introducido un mecanismo de agitación lenta de la mezcla con el fin de aumentar la eficiencia en la separación.

La separación por decantación estática ocurre debido a la diferencia de densidades entre los componentes principales de la mezcla a separar (aceite - agua) a una temperatura dada. La separación con agitación lenta hace posible la disminución de la viscosidad por el incremento de las fuerzas cortantes, favoreciendo la coalescencia de las gotas de aceite para producir gotas de mayor tamaño, aumentando la velocidad de ascenso y disminuyendo el tiempo de separación del aceite del lodo.

El flujo variable en la sección de clarificación de la planta de beneficio primario de Unipalma S.A., sumado a una baja capacidad de los clarificadores estáticos, generaba altos volúmenes de aceite en lodos a la salida de los clarificadores y altas pérdidas de aceite en los lodos centrifugados. El trabajo que se realizó comprendió una adecuada distribución y operación de los equipos y la instalación y optimización de un clarificador con agitación lenta. Para esta optimización se realizaron ensayos, combinando diferentes niveles de agitación y de dilución del aceite crudo- para determinar al final la mejor combinación; la que presenta menores porcentajes de aceite en lodos a la salida del clarificador.

MATERIALES Y MÉTODOS

La planta de beneficio de fruto de palma de UNIPALMA S.A. se encuentra localizada a 350 msnm, con una humedad relativa de 85%, una temperatura media de 28°C y una precipitación anual de 3.161 mm.

Para la normalización del proceso en la etapa de clarificación se realizaron los siguientes cambios:

- Se instaló un tanque de agua caliente ubicado en la plataforma de los digestores con un rebose interno para mantener una cabeza estática constante en los puntos de dilución.
- En la línea de entrada a cada centrífuga se instaló un filtro de cepillos, consiguiéndose un mejor control sobre el funcionamiento de cada una independientemente.
- Se adecuó uno de los clarificadores horizontales (18 m³c/u) como tanque pulmón para alimentación de las centrifugas manteniendo constante su nivel y por lo tanto el flujo a las mismas.
- La velocidad de las bombas de transferencia de crudo al clarificador y de lodos al tanque pulmón de las centrífugas fue regulada de tal forma que se mantenga un flujo constante en cada línea del sistema.

Para la optimización del clarificador de sección circular con agitación lenta se realizó un experimento, en el cual se definió un volumen de control comprendido por el clarificador, el tanque de almacenamiento de lodos clarificados (pulmón de las centrífugas) y dos centrífugas deslodadoras. Se utilizó un clarificador cilindrico de 4.6 metros de diámetro y 4.2 metros de altura (69 m³), equipado con un sistema de paletas rectas horizontales agitadoras, móviles y estacionarias. Este sistema cuenta con un variador electrónico de velocidad que permite cambiar la magnitud de la velocidad de agitación (rpm) de la mezcla. Se utilizaron dos centrífugas de lodos grasos de 6.000 l/h, accionadas por correas trapezoidales con una velocidad de giro de 1.360 rpm.

Durante el estudio se definieron como constantes los siguientes parámetros:

- Temperatura columna de calentamiento 95-98 °C

- Temperatura lodos dentro del clarificador 94
 -95°C
- Espesor capa de aceite 60 70 cm
- Distancia entre los reboses de aceite y agua 12 cm
- Temperatura lodos a centrifugar 90 95 °C
- Diámetro de las boquillas centrífugas 1,9 mm
- Velocidad de las centrífugas 1.360 rpm

Como fuentes de variación se definieron la magnitud de la velocidad de agitación dentro del clarificador (rpm) y la dilución del crudo que entra al separador entendida como la relación aceite : agua.

La magnitud de la velocidad de agitación se probó dentro de un intervalo de 0 a 3,6 rpm con incrementos de 1,2 rpm; respecto a la dilución, se tuvieron tres relaciones diferentes: igual contenido de aceite y agua (1:1), más aceite que agua (1,2:1) y más agua que aceite (1:1,2). Los valores de las fuentes de variación se definieron de la siguiente manera:

Velocidad (rpm)	Dilución (Ace:Agua)
V1 = 0	D1 = 1 : 1
V2 = 1,2	D2= 1,2 : 1
V3 = 2,4	D3 = 1 : 1,2
V4 = 3.6	

Se evaluaron los siguientes tratamientos:

Tratamiento 1 :	Velocidad de agitación	0 y
	dilución 1:1 (V1 -D1)	
		_

Las variables de respuesta para el experimento fueron: El porcentaje de aceite en volumen en lodos clarificados (ACESCL) y la pérdida de aceite en base húmeda en lodos centrifugados (ACEBH).

Para el estudio de las variables definidas se tomaron muestras durante el proceso en las corrientes de entrada y salida del clarificador y de las dos centrífugas deslodadoras para cada uno de los tratamientos y repeticiones realizadas.

El experimento se desarrolló en dos fases. En la primera, se trabajó con un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4 x 3 (cuatro valores de agitación y tres de dilución) que corresponden a 12 tratamientos diferentes, realizando tres repeticiones por tratamiento. En esta fase se quiso comparar los tratamientos entre sí para escoger el mejor, según el que genere el menor contenido de aceite en volumen en los lodos clarificados y menores pérdidas de aceite en base húmeda en lodos centrifugados. Se tenía la hipótesis de que bajos contenidos de aceite en lodos clarificados conducían a bajas pérdidas en lodos centrifugados.

Como una repetición se consideraron los datos obtenidos todo un día de proceso, durante el cual se tomaron mínimo ocho muestras para el análisis volumétrico y mínimo 15 para el análisis de pérdidas por el método Soxlhet. En esta primera fase se evaluaron y analizaron las siguientes variables: Aceite en lodos a la salida del clarificador, en volumen. (ACESCL); aceite perdido en lodos de la centrifuga deslodadora 1, base húmeda (ACEBHD1) y aceite perdido en lodos de la centrífuga deslodadora 2. Base húmeda (ACEBHD2).

A los datos obtenidos durante esta primera fase se les realizó un análisis estadístico, calculando el análisis de varianza (ANAVA) a cada una de las variables medidas y la comparación de medias a todas las variables significativas por el método de los mínimos cuadrados (LSD). La segunda fase del proyecto fue la aplicación de los mejores tratamientos que resultaron en la primera fase evaluando el contenido de aceite en la corriente de lodos a la salida del clarificador, con el objetivo de determinar si las pérdidas de aceite en los lodos centrifugados tienen relación directa con este parámetro evaluado.

A estos datos se les realizó análisis de varianza para evaluar la significancia de la operación de cada centrífuga en la pérdida de aceite en los lodos centrifugados, también se evalúo el trabajo de las centrífugas en función de los tratamientos realizados. Se aplicó la prueba LSD (diferencia de mínimos cuadrados) para hallar las medias y poder escoger el mejor tratamiento en función de la mejor operación de centrífugas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera fase

En la Tabla 1 se muestran los promedios de las variables de respuesta analizadas durante la primera fase del experimento para cada tratamiento en las tres repeticiones realizadas; se presentan también los valores de dilución que definen el tratamiento.

En la Tabla 1 se ve que en los diferentes ensayos realizados se presentan valores de aceite a la salida del clarificador que van desde 3 hasta 12% en volumen y que las pérdidas de aceite en base húmeda para las dos centrífugas estuvieron entre 0,48 y 2,10% como valores puntuales. De estos valores iniciales del experimento, teniendo como variable de respuesta el aceite a la salida del clarificador, se puede decir que los mejores valores para la operación

Tabla 1. Promedios de los valores de las variables de respuesta para las tres repeticiones de los tratamientos aplicados en la primera fase

Ensayo (rpm) (dilución)	Aceite* entrada clarificación	Agua* entrada clarificación	Aceite* salida clarificiación	Aceite lodos c1** % BH	Aceite lodos c2** % BH
1 (0) 1 : 1 Promedio	33 28 31 31	32 27 31 30	12 8 9 10	1,02 0,72 0,87	1,20 0,95 1,1 1,08
2 (0) 1,2 : 1 Promedio	36 31 30 32	28 26 30 28	13 9 12	1,09 0,69 0,73 0,84	1,10 0,89
3 (0) 1 : 1,2 Promedio	28 28 28 28 28	34 32 32 32 33	12 9 7 9	0,93 0,72 1,32 0,99	1,03 0,98 1,11 1,04
4 (1,2) 1 : 1 Promedio	27 28 28 28	27 26 27 27	4 4 5 4	0,68 0,94 0,74 0,79	0,96 1,06 0,75 0,92
5 (1,2) 1,2 : 1 Promedio	31 30 30 30	26 25 25 25 25	4 4 4 4	0,50 0,99 0,55 0,68	0,8 1,05 0,49 0,78
6 (1,2) 1 : 1,2 Promedio	28 26 27 27	33 30 33 32	10 4 9 8	0,64 0,65 0,64	0,75 1,00 0,86 0,88
7 (2,4) 1 : 1 Promedio	29 27 30 29	27 28 31 28	8 4 5 6	1,95 1,08 0,72 1,25	2,10 1,56 0,75 1,47
8 (2,4) 1,2 : 1 Promedio	32 29 32 31	27 25 26 26	3 3 4 3	0,85 0,86 0,85	0,95 0,44 0,93 0,77
9 (2,4) 1 : 1,2 Promedio	31 28 27 28	35 33 32 33	11 6 7 8	1,25 0,80 0,65 0,9	1,34 1,05
10 (3,6) 1 : 1 Promedio	29 31 30 30	28 30 29 29	6 8 6 7	0,81 0,48 1,01 0,77	0,96 0,51 1,10 0,86
11 (3,6) 1,2 : 1 Promedio	31 37 33 34	27 25 25 25 26	8 6 8 7	0,85 0,71 0,70 0,75	1,06 0,85 1,13 1,01
12 (3,6) 1 : 1,2 Promedio	30 27 28 28	30 31 32 31	7 7 10 8	0,71 0,71 0,69 0,70	0,69 0,69 0,91 0,76

% en volumen ** Centrifugas 1 y centrífuga 2

del equipo son la combinación de 1,2 rpm y dilución 1:1, 1,2 rpm y dilución 1,2:1, y 2,4 rpm y dilución 1,2:1, que dan valores de esta variable de 4, 4 y 3% de aceite en volumen, respectivamente. Respecto a las pérdidas de aceite no se observa ninguna relación directa de ninguna de las combinaciones probadas.

A los datos obtenidos durante las tres repeticiones para las variables de respuesta, aceite en lodos a la salida del clarificador y pérdida de aceite en lodos centrifugados, se les realizó un análisis estadístico, dentro del cual para el análisis de varianza se definió un rango de aceptación para todas las variables estudiadas del 90% (error del 10%).

En la Tabla 2 se muestra el resultado de la influencia de la agitación en cada una de las variables evaluadas. Las variables presentadas tienen un valor de p < 0,10.

Los promedios que se presentan en la Tabla 2 son el resultado de la influencia de la agitación en las variables de respuesta después del análisis de varianza respectivo. Para el aceite a la salida del clarificador (ACESCL), p = 0,0011; esta variable tiene diferencias altamente significativas, y hay una gran variación en los valores de la media, dependiendo de la agitación aplicada; está influenciada en gran medida por la magnitud de la velocidad de agitación: a 0 rpm da el mayor valor, 10 %, y a 1,2 y 2,4 presenta el menor valor, 5%.

El aceite en Base Húmeda a la salida de la deslodadora 1 (ACBHSD1) es igual estadísticamente

Tabla 2. Comparación de medias de las variables analizadas para diferentes valores de agitación.

Variable	O rpm	1,2 rpm	2,4 rpm	3,6 rpm
ACESCL	9,4775 a*	5,3591 b*	5,3331 b	7,3587 ab*
ACBHSD1	0,8989 ab	0,70 b	0,999 b	0,749 ab
ACBHSD2	1,00 ab	0,8594 b	1,14 a	0,8778 ab

^{*} Los valores con letras diferentes en la misma fila tienen diferencias estadísticas significativas. En el análisis de varianza **arrojaron** valores de **p** menor a 0.10.

Donde:

ACESCL: Aceite en lodos a la salida del clarificador ACBHSD1: Aceite en base húmeda salida deslodadora 1 ACBHSD2: Aceite en base húmeda salida deslodadora 2 para 1,2 y 2,4 rpm, pero las cuatro agitaciones no tienen diferencias significativas entre sí. El menor valor de ACBHSD1 se da con 1,2 rpm, contrario a lo que se esperaba, que fuera con 2,4 rpm. Para la deslodadora 2, el ACBHSD2 presenta el mismo comportamiento que el ACBHSD1.

En la Tabla 3 se presenta la comparación de medias de las variables que analizadas con respecto a la dilución tuvieron un valor de p < 0,10; están influenciadas significativamente por la dilución del aceite crudo a la entrada del clarificador.

En el análisis de varianza realizado, el aceite a la salida del clarificador (ACESCL) dio un valor de p = 0,1008. Este valor se considera admisible dentro del rango de aceptación definido (error del 10%). El menor valor, de 6,0815, se tuvo con la dilución 1,2 : 1 (más aceite que agua), seguido por 6,56 con dilución 1 : 1. El mayor valor, de 8,00, lo dio la dilución 1: 1.2 (más agua que aceite); se considera mejor la que de el valor más bajo, en este caso se escogen las diluciones 1 : 1 y 1,2 : 1. El contenido de aceite en lodos centrifugados (ACBHSD1 y ACBHSD2) no está influenciado significativamente por la dilución. La variable de mayor importancia para el estudio es el aceite a la salida del clarificador (ACESCL); se encontró que varía significativamente con diferentes valores de agitación (p = 0.0011) y con menor significancia (p = 0,1008) para valores diferentes de dilución. Por esta razón se estudió la influencia de estas dos variables para saber manejarlas según los resultados que se quieran tener. En las Figuras 1 y 2 se observa cómo varía este parámetro respecto a la agitación y a la dilución.

Como se observó en la Figura 1, la velocidad de agitación tiene una gran influencia sobre el contenido de aceite en lodos clarificados, con

Tabla 3. Comparación de medias de las variables de respuesta para valores diferentes de dilución a la entrada del clarificador (Ac: H20).

Variable	1:1	1,2:1	1:1,2
ACSCL	6,56 ab*	6,0815 b	8,0048 a

* Variables con letras iguales no son estadisticamente diferentes entre sí, según prueba LSD al nivel del 10%.

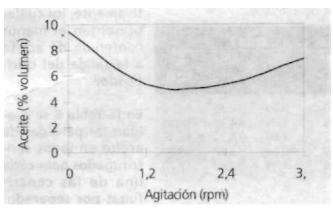


Figura 1.

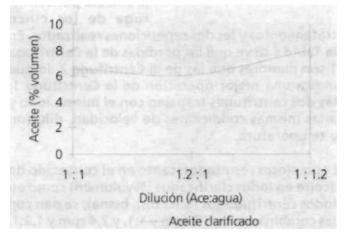


Figura 2. Fuente: el autor

pequeños incrementos de agitación (rpm), se ve una gran variación en el contenido de aceite en lodos a la salida del clarificador. En este experimento se tuvieron incrementos de velocidades de agitación de 1,2 rpm. Con 0 rpm se tiene un alto contenido de aceite en lodos, 10% en volumen aproximadamente, a medida que se incrementa la fuerza cortante va disminuvendo el contenido de aceite en los lodos; con 1,2 rpm se tiene 5% y con 2,4 rpm 6%, y a partir de este valor al incrementar la fuerza cortante nuevamente se incrementa el contenido de aceite en volumen, con 3.6 rpm, se tiene entre 7 y 8% de aceite en volumen en lodos a la salida del clarificador. Con estos valores se ve claramente que para el caso específico del tanque clarificador vertical con agitación de la planta extractora de Unipalma, se tiene un rango óptimo de agitación de 1,2 a 2,4 rpm, dentro del cual el contenido de aceite en lodos clarificados es menor al 6% en volumen.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de esta variable y se ve claramente que es insignificante su variación. Al tener un aceite crudo con igual proporción de aceite que agua (1 :1), el contenido de aceite en lodos clarificados es del 6,8%; si se tiene un aceite crudo con más agua que aceite (1: 1,2) el contenido de aceite es del 7,5%, si se tiene más aceite que agua (1,2 : 1), el aceite en lodos clarificados es del 6%. Como se aprecia, la variación no es grande y se concluye con esto que la dilución no afecta significativamente la operación del equipo. Y es muy similar trabajar con cualquiera de las tres diluciones probadas en cuanto al contenido de aceite en lodos clarificados; sin embargo, se debe tener en cuenta la dilución para evitar taponamiento en los equipos por falta de agua y sobre flujo en el proceso que pueda causar rebose de tanques por exceso de agua. Se concluye entonces que estadísticamente no es significativa la dilución, pero que prácticamente se debe tener control para evitar problemas de operación.

Segunda fase

En la segunda fase se realizó la aplicación de los cuatro mejores tratamientos (T4, T5, T7 Y T8) de los evaluados en la primera, además se aplicó como testigo un tratamiento malo, T10, para comparar la pérdida de aceite en lodos centrifugados y confirmar la relación entre el contenido de aceite a la salida del clarificador y la pérdida en las centrífugas. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

En la segunda fase, nuevamente el contenido de aceite a la salida del clarificador (ACESCL) para los tratamientos escogidos como los mejores en la primera fase dio bajo, y el promedio de las repeticiones fue de 5% en volumen. El tratamiento con velocidad de 3,6 rpm se tuvo como testigo, dio 7%; las menores pérdidas en lodos centrifugados se dieron con velocidad de 1,2 rpm y dilución 1 :1, 0,62 y 0,93 para cada centrífuga. El tratamiento con velocidad 1,2 y dilución 1,2 :1 con igual valor de ACESCL (5%) dio pérdidas de 0,85 y 1,06% b.h., el tratamiento testigo, de mayor contenido de aceite en lodos clarificados, tuvo pérdidas menores en las centrífugas, 0,73 y 1,05% b.h., para cada una, C1 y C2, respectivamente.

Tabla 4. Resultados de los parámetros evaluados en la segunda fase por centrífuga

Ensayo Ace. Salida			Centr	Centrifuga 1			Centrifuga 2			
Rpm diluci.	Clarifica.	ACEPKH	ACEBH	ACEBS BSSNA	ACE	ACEPKH	ACEBH	ACEBS	ACE BSSNA	
1,2 - 1:1	5	28,0	0,62	11,9	13,50	43,0	0,93	12,35	14,10	
1,2 - 1,2:1	5	37,5	0,85	12,75	14,65	46,5	1,06	14,10	16,45	
2,4 - 1:1	5	41,5	0,85	12,85	14,80	48,5	1,00	13,35	15,45	
2,4 - 1,2:1	5	33,0	0,76	11,9	13,50	37,0	0,86	12,20	13,90	
3,6 - 1:1	7	39,5	0,73	12,12	13,9	56,5	1,05	14,60	17,20	

ACEPKH: Aceite perdido en Kg/h

ACEBH: Aceite perdido en base húmeda

ACEBS: Aceite perdido en base seca

ACEBSSNA: Aceite perdido en base sólidos secos no aceitosos

Es importante anotar la diferencia de valores de pérdidas de aceite entre las dos centrífugas, para los cinco tratamientos evaluados. La Centrífuga 1 presenta pérdidas menores que la Centrífuga 2, siendo su máximo valor 0,85% b.h y el mínimo 0,62% b.h., mientras que la Centrífuga 2 tiene un valor máximo de 1,06% b.h y mínimo de 0,86% b.h.

Los datos presentados en la Tabla 4 se analizaron estadísticamente mediante un diseño de bloques completamente al azar, en el que cada centrífuga hace de bloque. El análisis de varianza se hizo por tratamientos y por centrífugas. En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados de estos análisis.

Según los valores de p para las variables analizadas en la Tabla 5, no hay diferencias significativas en las pérdidas de aceite para los diferentes tratamientos aplicados. El máximo valor de p aceptado es 0,10 y todos dieron superiores al 0,20. Los tratamientos 4 y 8 de manera general presentan las menores pérdidas de aceite en todas las bases. Estos tratamientos corresponden a valores de agitación de 1,2 y 2,4 rpm, respec-

Tabla 5. Medias de las pérdidas evaluadas en la segunda fase por tratamiento.

Tratamiento	ACEPERKH	ACEBH	ACEBS	ACEBSSNA
T4(1,2 - 1:1)	35,475	0,77	12,1	13,77
T5(1,2 - 1,2:1)	42,100	0,96	13,43	15,53
T7(2,4 - 1:1)	44,875	1,00	13,11	15,12
T8(2,4 - 1,2:1)	34,975	0,81	12,19	13,89
T10(3,6 - 1:1)	46,000	0,89	13,39	15,55
P	0,2	0,217	0,628	0,6093

tivamente, los cuales presentan el menor contenido de aceite a la salida del clarificador.

En la Tabla 6 se evalúan las pérdidas de aceite en lodos centrifugados para cada una de las centrífugas por separado; los valores son el promedio por centrífuga de los cinco

tratamientos y las dos repeticiones realizados. En la Tabla 6 se ve que las pérdidas de la Centrífuga 1 son menores que las de la Centrífuga 2, lo que indica una mejor operación de la Centrífuga 1; las dos centrífugas trabajan con el mismo lodo y a las mismas condiciones de velocidad, dilución y temperatura.

Los mejores resultados, tanto en el contenido de aceite en lodos clarificados (%volumen) como en lodos centrifugados (b.h., b.s., bssna), se dan con las combinaciones 1,2 rpm y 1:1, y 2,4 rpm y 1,2:1, por lo que se recomienda trabajar en el rango de velocidad de 1,2 a 2,4 rpm y tener una dilución 1:1, con tendencia a ser más espesa (1,2:1); con estos valores se tiene un 5% de aceite en lodos a la salida del clarificador y las pérdidas en lodos centrifugados en base húmeda son alrededor del 0,8%.

Efecto de la temperatura sobre el contenido de aceite a la salida del clarificador

En la Tabla 7 se observa que la temperatura de lodos a clarificar influye directamente en la separación del aceite crudo dentro del clarificador; a

Tabla 6. Medias de las pérdidas de aceite en lodos evaluadas por centrífugas.

Centríluga	ACEPERKH	ACEBH	ACEBS	* ACEBSSNA
C1	35,80	0,76	12,31	14,06
C2	45,57	1,01	13,38	15,48
P	0,015	0,02	0,1574	0,1574

Tabla 7. Contenido de aceite en lodos clarificados en función de la temperatura dentro del clarificador y de la agitación.

T (°C)	88	90	92	94	96	98	Prome
0 rpm	10	-11	12	10	9	10	10
1,2 rpm	4	5	5	5	7	10	6
2,4 rpm	5	6	7	8	10	12	8
3,6 rpm	7	6	8	8	10	12	9
Promedio	6	7	8	8	9	11	

medida que aumenta la temperatura, el contenido de aceite en lodos clarificados también aumenta. Este comportamiento se debe posiblemente a que con alta temperatura (94 -98°C) dentro del clarificador se produce ebullición del agua de la mezcla produciendo ascención de lodos y una mayor turbulencia dentro del clarificador, lo que facilita la salida de aceite en los lodos. También se cree que ahora con agitación no es necesario tener altas temperatura para producir coalescencia de las gotas de aceite y facilitar el desprendimiento y ascención de las mismas, pues la agitación lenta tiene esta finalidad y si se combinan las dos se producen los resultados mencionados anteriormente.

De este análisis se concluye que al trabajar con temperaturas entre 88 y 92°C se mantiene un bajo contenido de aceite en los lodos clarificados. Además de esto, una baja temperatura implica una notoria mejora en la calidad del aceite terminado (no oxidación, no fijación de color) y un ahorro o mejor utilización del vapor producido en la planta de beneficio. Se debe aclarar que el resultado de estos análisis sólo se confirman para la operación del clarificador vertical con agitación de Unipalma de Los Llanos S.A.

Resultados económicos

En la Tabla 8 se presentan las pérdidas de aceite en toneladas y la pérdida en dinero cuando se operaba con los clarificadores horizontales y con la operación del clarificador de sección circular con agitación lenta.

Tabla 8. Pérdidas en dinero por aceite perdido en efluente final.

Clarificación	Aceite perdida (t/h)	Aceite perdido (t/mes)	Pérdida en millones S/mes
Horizontal	0,0996	32,87	24'652.500
Vertical ensayos	0,0748	25,1	18'825.000
Vertical actual	0,0587	19,5	14'625.000

Fuente: el autor

En la Tabla 8 se observa una notable disminución en las pérdidas de aceite en t/h y en dinero después de instalado el clarificador vertical, y más aún, luego de implementar las condiciones de operación del mismo que mejores resultados dan según el estudio. Con el nuevo equipo se están ahorrando \$10 millones al mes.

CONCLUSIONES

Con una disposición y operación adecuada de los equipos se garantizan flujos continúos en las corrientes de clarificación

El menor valor de aceite en lodos a la salida del clarificador (4% volumen) con agitación lenta se consigue operando a 2,4 rpm y dilución 1,2 :1 (Aceite :agua)

El clarificador con agitación lenta operando a 0 rpm y 3,7 rpm con dilución de aceite crudo de 1:1,2 presenta valores de aceite a la salida del clarificador entre 10 y 12% en volumen, respectivamente.

La agitación lenta reduce considerablemente el contenido de aceite en lodos a la salida del clarificador, pero no influye significativamente en la pérdida de aceite en lodos centrifugados.

La disminución de la pérdida de aceite en base húmeda en los lodos centrifugados se logra con una adecuada operación de las centrifugas, manteniendo un flujo continuo en el sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MC.CABE, W. 1993. Agitación y mezcla de líquidos. En: Operaciones Básicas de Ingeniería Química. México, p.242 -289.
- GEANKOPOLIS, C. 1993. Principios de transferencia de momento. *En:* Proceso de transporte y operaciones unitarias. México, Cap. 2.
- MESA DISHINGTON, J. 1999. Comercialización del aceite de palma en Colombia. Palmas (Colombia) v.20 no. 1, p. 15-20.

- MESA DISHINGTON, J. 1998. Un modelo para el desarrollo competitivo de la palma de aceite en Colombia. Palmas (Colombia) v. 19. no. especial, p. 18-28.
- LIM KY. 1999. Perspectivas mundiales del aceite de palma. Palmas (Colombia) v.20 no. 1, p.37-47.
- URIBE M., L. D. 1994. Clarificación estática del aceite crudo de palma. En: Algunos aspectos del procesamiento de aceite de palma. Bucaramanga, Diciembre 2-3 de 1993, Memorias. Cenipalma, Santafé de Bogotá, p.63 - 68.