

Impacto de la clarificación dinámica sobre el proceso de extracción y recuperación de aceite de palma crudo (estudio de caso)

Effect of Dynamic Clarification on Extraction and Recovery Processes in Crude Palm Oil (Case study)

CITACIÓN: Fernández, C. A., García, H., Ramírez, N., & Garcia-Nunez, J.A. (2016). Impacto de la clarificación dinámica sobre el proceso de extracción y recuperación de aceite de palma crudo (estudio de caso). *Palmas*, 37(3), 47-64.

PALABRAS CLAVE: clarificación estática, pérdida de aceite, efluentes, Tridecanter.

KEYWORDS: Static clarification, oil losses, POME, Tridecanter.

RECIBIDO: abril de 2016

APROBADO: junio de 2016

CARLOS A. FERNÁNDEZ

Auxiliar de Investigación. Programa de Procesamiento
cfernandez@cenipalma.org

HARBAY GARCÍA

Jefe de Planta Extractora y Refinadora Palmeras del Llano S.A.
jefedeplanta@palmar.com.co

NIDIA E. RAMÍREZ CONTRERAS

Asistente de Investigación. Programa de Procesamiento
nramirez@cenipalma.org

JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ

Coordinador Programa de Procesamiento
jgarcia@cenipalma.org

Resumen

A nivel nacional e internacional se adelantan trabajos enfocados en la mejora de las operaciones del proceso de extracción de aceite, a través del uso de tecnologías que permitan reducir las pérdidas de aceite y almendra, mejorar la eficiencia del proceso y disminuir el impacto ambiental. Dentro de las nuevas tecnologías se encuentra la clarificación dinámica, a través de la cual se reemplazan los clarificadores estáticos tradicionales, acompañados de centrífugas deslodadoras, por equipos dinámicos de tres fases en los cuales se obtiene una corriente aceitosa, una corriente acuosa y lodos pesados. Este artículo está dirigido a directores, jefes y personal técnico de plantas de beneficio y proporciona los resultados de un estudio de caso en el cual se compara el efecto de cambiar la clarificación tradicional por la clarificación dinámica en términos de producción, operatividad, eficiencias, servicios industriales y medio ambiente. La investigación fue desarrollada en la planta extractora de Palmeras del Llano S.A. ubicada en el municipio de Acacías, Meta.

En el estudio se evaluó el funcionamiento de un Tridecanter durante 6 meses y se compararon los resultados de calidad y pérdidas de aceite, consumo de servicios industriales, volumen de efluentes e indicadores de producción con los registros históricos con que cuenta la planta de su inicio o manejo anterior de clarificación (clarificación estática). Se identificó que la dilución requerida para el procesamiento del licor de prensa en equipos Tridecanter es de 1,8 aceite/agua, lo cual representa un ahorro del 30 % del agua utilizada en este proceso si se compara con la dilución de 1,4 aceite/agua que se usa en la clarificación estática. De igual forma, se encontró que el consumo global de agua en el proceso pasó de 1,22 m³/t RFF a 0,85 m³/t RFF (racimo de fruta fresca). El requerimiento de vapor se redujo en 14 %, pasando de 595 a 511 kg vapor/t RFF. Las pérdidas de aceite en la etapa de clarificación disminuyeron desde 0,65 % Ac/t RFF con clarificación estática a 0,45 % Ac/t RFF con clarificación dinámica. El volumen de efluentes se redujo de 0,75 a 0,45 m³/t RFF. De igual manera, disminuyó su carga orgánica debido a la remoción de sólidos que realiza el Tridecanter, que se ve reflejada en la disminución en la concentración de DQO (Demanda Química de Oxígeno) que pasó de 70.000 a 40.000 mg/l.

Abstract

The improvement of oil palm extraction process has been carried out in both national and international level. Works of this type have been addressed to reduce oil and kernel losses, as well as to improve the process efficiency and to diminish its environmental impact. Among the new technologies, dynamic clarification has been implemented recently. With this technology, the current settles tanks and sludge centrifuges are replaced by a new dynamic separator (called Tridecanter). With this Tridecanter, three streams are obtained: the oily stream, a watery stream, and the heavy sludge stream. This paper is addressed to the oil palm mill managers and technical staff to provide a case study when traditional clarification is replaced for new dynamic clarification. A comparison is carried out regarding production, operation, efficiency, industrial services, and environment issues. This work was conducted in the palm oil mill *Palmeras del Llano*, located in the municipality of Acacias, Meta in Colombia.

This study evaluated the operational conditions of a Tridecanter during 6 months, comparing the results with the palm oil mill (POM) historical indicators such as oil quality, oil losses, water consumption, and industrial services. It was identified that the dilution required for processing press liquor in the Tridecanter was 1.8 oil/water, which represents a savings of 30 % of the water used in this process when comparing with a dilution 1.4 oil/water utilized in the static clarification. It was also found that the overall water consumption in the process was reduced from 1.22 m³/t FFB (Fresh Fruit Bunches) to 0.85 m³/t FFB. The steam requirement was reduced by 14 %, from 595 to 511 kg steam/t FFB. Oil losses, during the clarification stage, decreased from 0.65 % Oil/t FFB with static clarification to 0.45 % Oil/t FFB with dynamic clarification. The effluent volume was reduced from 0.75 to 0.45 m³/t FFB. A reduction of the organic load due to solids removal performed by the Tridecanter was found. This decrement was seen in the change of COD (Chemical Oxygen Demand) from 70,000 to 40.000 mg/L when comparing static and dynamic clarification respectively.

Introducción

El proceso de extracción representa cerca de 15 % del valor total de una tonelada de aceite de palma (constituido por gastos en mano de obra, insumos de mantenimiento y consumo de servicios industriales) (Corredor, 2007; Guterman, 2014). Por esta razón es importante identificar metodologías, técnicas y tecnologías que permitan reducir las pérdidas de aceite en cada una de las operaciones del proceso e incrementar las eficiencias de trabajo dentro de las plantas de beneficio (Acero, 2004; García, Yáñez & Rodríguez, 2000).

Dentro de las operaciones que conforman el proceso de extracción de aceite de palma, la clarificación requiere mayor control debido a que las pérdidas de aceite, en este punto, representan más del 30 % de las pérdidas totales (Alvarado-Tobias, 2010; Urueta, 2007). Adicionalmente, esta etapa es responsable de gran parte de la calidad del aceite de palma crudo (en términos de humedad, impurezas, ácidos grasos libres e índice de la blanqueabilidad, DOBI) y del volumen de efluentes que se generaran en el proceso (García-Nunez, Nieto & Rincón, 2009; Nieto, Yáñez & García-Nunez, 2011; Sarjitsingh, 1995).

En las plantas de beneficio primario de Colombia el principio de clarificación más utilizado es el estático. Este aprovecha la diferencia de densidad de los componentes del licor de prensa (aceite, agua y lodos) para propiciar su separación. En los últimos años, se han desarrollado investigaciones en procura del incremento de la eficiencia de extracción y recuperación de aceite en la etapa de clarificación estática. En

tre los resultados se destaca haber logrado establecer el nivel óptimo de dilución del licor de prensa, que garantiza una mayor recuperación de aceite y el desarrollo de diseños y recomendaciones de operación de preclarificadores para la agroindustria de la palma (Nieto *et al.*, 2011; Yáñez, Díaz, García-Nunez & Castillo, 2009). No obstante, persisten en este principio algunas limitantes como el área que ocupa, el costo de mantenimiento, el consumo de servicios industriales, el prolongado tiempo de residencia y la salida de efluentes del proceso con alta carga orgánica que debe tratarse en las lagunas de estabilización (Sarjitsingh, 1995).

La clarificación dinámica funciona bajo el mismo principio de separación de las fases del licor de prensa (Sarjitsingh, 1995), y se ejecuta en un equipo centrífugo horizontal tipo Decanter o Tridecanter de funcionamiento continuo, equipado internamente con un transportador tipo tornillo sin fin (llamado espiral), una sección cilíndrica para la separación de los componentes líquidos inmiscibles entre sí; fase líquida liviana (aceite) y una fase líquida pesada (lodos-efluentes) y de una sección cónica para secar los sólidos separados (torta) según el orden de densidad (Wambeck, 1999) (Figuras 1 y 2).

Actualmente, los decantadores que aplican el principio de clarificación dinámica desempeñan un papel muy importante en el desarrollo de nuevos sistemas y esquemas en los módulos de aceite de palma crudo, APC, y recuperación de aceite de palma crudo, RAPC (Montero *et al.*, 2013). En efecto, el uso de este tipo de clarificadores permite reducir los espacios, equipos, estructuras y número de operarios que ne-

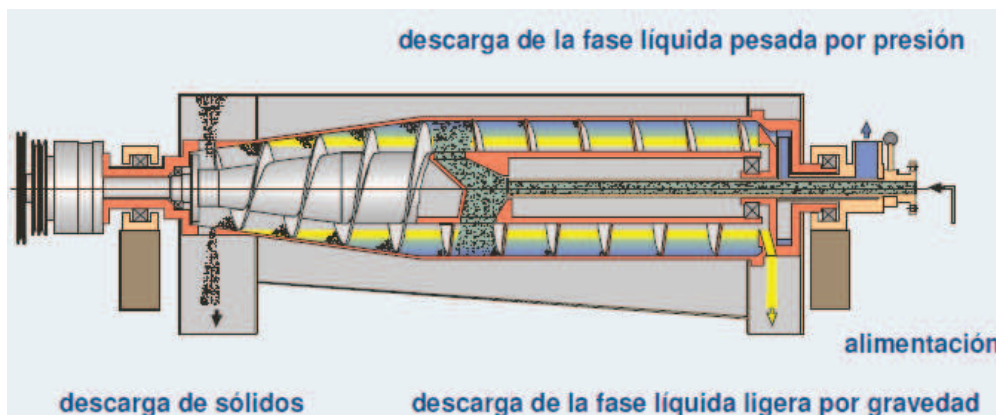
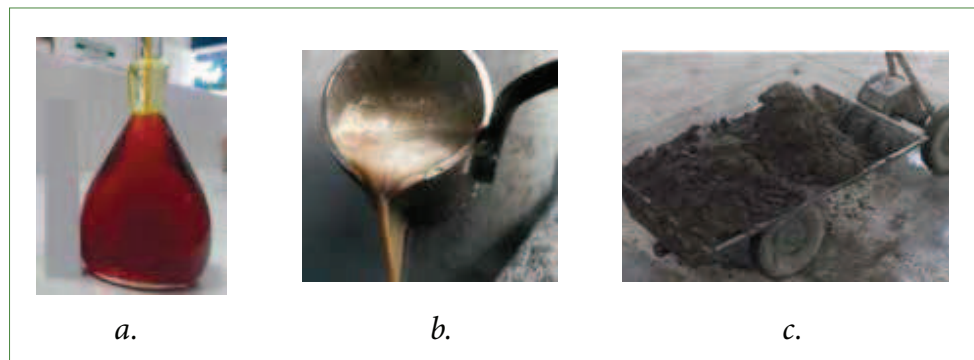


Figura 1. Equipo Tridecanter para separación sólido-líquido-líquido.

Figura 2. Fases que se obtienen en la clarificación dinámica del aceite de palma: a) fase líquida liviana (aceite); b) fase líquida pesada (efluentes); c) fase sólida (torta).



cesita esta sección si se compara con los requerimientos de la clarificación estática tradicional, al mismo tiempo que garantiza una operación continua y con tiempos de retención más cortos (Steiger & Rackerseder, 2007). Sin embargo, aunque esta tecnología lleva varios años en la agroindustria de la palma de aceite a nivel mundial, en el país es muy poca la experiencia debido a que pocas plantas cuentan con estos equipos y no se ha reportado una evaluación sistemática de este principio de clarificación. Es por esto que resulta importante desarrollar investigaciones enfocadas a la caracterización del principio de clarificación continua, en diferentes configuraciones dentro del proceso y determinar el impacto de esta tecnología sobre las operaciones, la producción, el consumo de servicios industriales y el medio ambiente.

Metodología

Este trabajo se realizó en la planta de beneficio Palmeras del Llano S.A., la cual cuenta con dos equipos de clarificación dinámica tipo Tridecanter de tres fases con capacidad de proceso de 20 m³ de licor de prensa diluido, LPD, por hora. En la Figura 3 se observa el diagrama del proceso de extracción de aceite de palma usando los equipos Tridecanter, con y sin reproceso de la fase líquida pesada (efluentes) del primer equipo.

La determinación del impacto del principio de clarificación dinámica se realizó a través de la medición de variables fijas relacionadas directamente con la operación evaluada. Se realizaron mediciones y seguimientos durante 6 meses en la planta de beneficio y se compararon los resultados con los registros históricos de clarificación estática con los que

contaba la planta. Las metodologías usadas se detallan a continuación:

- a. **Composición volumétrica en clarificación:** se determinó la composición volumétrica de los principales flujos con el fin de caracterizar el comportamiento de las corrientes y establecer su relación con parámetros operativos o del proceso. El procedimiento empleado es el reportado en el manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio de Cenipalma (Cala, Yáñez & Garcia-Nunez, 2011).
- b. **Balance de pérdidas:** el cálculo de las pérdidas en los diferentes flujos se realizó según los procedimientos y cálculos descritos en (Cala *et al.*, 2011; Yáñez & Garcia-Nunez, 2004). En la clarificación estática las pérdidas son medidas en los efluentes finales del proceso, mientras que en la clarificación dinámica las pérdidas de la operación se toman como la suma de la pérdida de aceite en la fase líquida pesada (efluentes) y en la fase sólida (torta). Los flujos de las corrientes de entrada y salida fueron medidos de manera volumétrica y másica en el tiempo.
- c. **Calidad del aceite:** se realizó análisis de Ácidos Grasos Libres, AGL, impurezas, humedad y DOBI según los procedimientos y cálculos descritos en el manual de laboratorio en plantas de beneficio de Cenipalma (Cala *et al.*, 2011).
- d. **Control del factor de dilución:** la evaluación del efecto del cambio del factor de dilución sobre la operación de los equipos y las pérdi-

das de aceite en las fases líquida, sólida y de aceite, fue realizada de acuerdo a lo reportado en el estudio *Determinación del nivel de dilución apropiado en el proceso de clarificación y diseño de un sistema de control automático*, al igual que en la metodología desarrollada en el Boletín Técnico N° 29, *Preclarificador de aceite crudo de palma: diseño y operación*. (Nieto *et al.*, 2011; Yáñez *et al.*, 2009).

- e. **Volumen y calidad de efluentes:** se cuantificó el volumen de efluentes con el uso de un medidor de caudal para corrientes con alta carga de sólidos dispersos. La caracterización de la DQO se cuantificó con la metodología presentada en el manual de análisis de aguas de HACH COMPANY, método 8000 (HACH, 2000).
- f. **Servicios industriales:** los consumos de agua, energía eléctrica y vapor se cuantificaron por medio de un seguimiento diario a los valores registrados en los medidores asociados a cada servicio. El consumo de agua se tomó como el consumo total de la planta para cada día de proceso. El vapor fue medido como vapor total producido o demandado por el proceso y registrado según los instrumentos instalados en la caldera VR-15 que alimenta a la planta de beneficio. La energía consumida se obtuvo de los registros hora a hora de la generación de energía en la turbina de vapor que alimenta a la planta y se realizaron las correcciones pertinentes para garantizar la comparación entre sistemas.
- g. **Indicadores de mantenimiento y eficiencia de producción:** la medición del desempeño de la operación de clarificación de aceite se realiza en función del cálculo del indicador de Eficiencia Real de Producción, ERP (*Overall Equipment Effectiveness, OEE*), constituido mediante la multiplicación porcentual de los elementos fundamentales en la producción industrial (disponibilidad de planta, rendimiento de equipos y calidad de proceso) de acuerdo a la metodología presentada en el Boletín Técnico N° 33, *Modelo para Medición de Eficiencia Real de Producción y Adminis-*

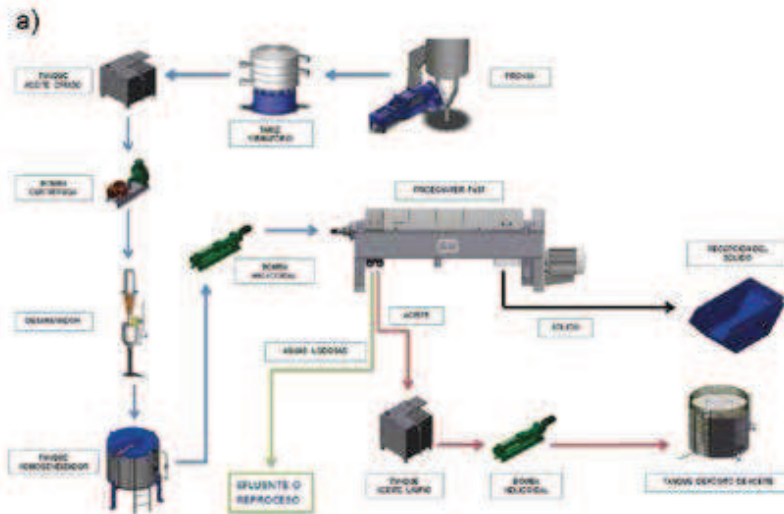
tración Integrada de Información en Planta de Beneficio (Montero *et al.*, 2013).

El análisis estadístico de los resultados se realizó usando la prueba *t-Student* (Steel & Torrie, 1980). Se consideró un margen de error del 5 % y en cada caso se verificó la homogeneidad de varianzas; en caso de no cumplirse dicha homogeneidad se utilizó la corrección de Satterthwaite (SAS Institute, 2012; Satterthwaite, 1946).

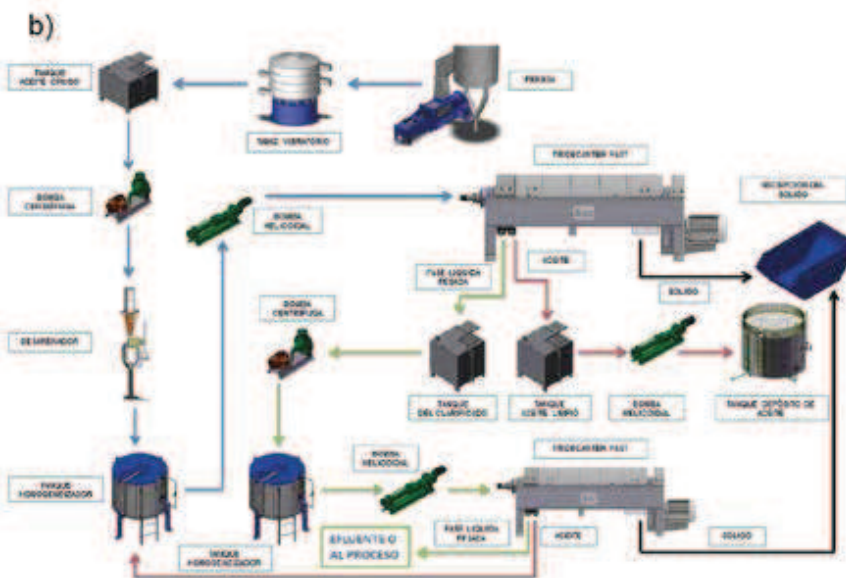
Resultados y discusión

A continuación se presentan algunas observaciones importantes sobre la clarificación dinámica y los resultados con respecto a recuperación de aceite, calidad del aceite obtenido, volumen de efluente, calidad del efluente, consumo de servicios industriales e indicadores de producción.

En la Figura 3 A se observa el proceso de clarificación dinámica utilizando un solo equipo Tridecanter, el cual recibe el LPD y lo procesa hasta obtener una corriente de aceite, una corriente de sólidos (torta) y una corriente líquida (efluentes). En esta configuración, la corriente líquida es enviada como efluente a las lagunas de estabilización sin que pase por otro Tridecanter. Por otro lado, la Figura 3 B muestra el proceso de clarificación dinámica con reproceso de la corriente líquida obtenida en el primer equipo Tridecanter. El reproceso consiste en pasar esta corriente por un segundo equipo Tridecanter con el fin de recuperar una mayor proporción de aceite y de torta y reducir el volumen y cantidad de sólidos del efluente antes de enviarlo a las lagunas. Durante la ejecución del proyecto se notó la importancia de contar con un tanque para homogenizar y mantener la temperatura del licor de prensa que alimentará a los equipos (temperaturas no inferiores a 90 °C). Ello reduce los factores que incrementan las pérdidas de aceite tanto en el efluente como en la torta. Este tanque debe contar con un serpentín para el calentamiento directo o indirecto del LPD y con un sistema de agitación de bajas revoluciones (entre 25 a 30 RPM) y puede ser adaptado de los tanques existentes del sistema tradicional de clarificación. Condiciones como tiempo, presión y temperatura en las operaciones anteriores a la clarificación dinámica permanecen iguales. Es de-



1. Digestor - Prensa
2. Tamiz vibratorio
3. Tanque LPD
4. Bomba centrífuga
5. Desarenador
6. Tanque homogeneizador
7. Bomba helicoidal
8. Tridecanter Fast
9. Salida de aceite crudo
10. Tanque de almacenamiento
11. Salida de torta de Tridecanter
12. Salida de efluentes



1. Digestor - Prensa
2. Tamiz vibratorio
3. Tanque LPD
4. Bomba centrífuga
5. Desarenador
6. Tanque homogeneizador
7. Bomba helicoidal
8. Tridecanter Fast
9. Salida de aceite crudo
10. Tanque de almacenamiento
11. Salida de torta de Tridecanter
12. Salida de efluentes para reproceso en Tridecanter 2
13. Tridecanter Fast 2: reproceso
14. Salida de aceite reprocesado
15. Salida de efluentes finales

Figura 3. Esquema del proceso de extracción de aceite con el principio de clarificación dinámica usando Tridecanter: a) Operación sin reproceso de fase líquida pesada; b) Operación con reproceso de fase líquida pesada.

cir, no es necesario realizar cambios al proceso para implementar este principio.

Diferentes estudios han establecido que es necesario garantizar que el LPD proveniente de las prensas tenga una relación de dilución de 1,4 aceite/agua con el fin de obtener la mejor eficiencia en la velocidad de separación y recuperación del aceite en la clarificación estática (Nieto *et al.*, 2011; Yáñez *et al.*, 2009). Sin embargo, no existen reportes sobre el factor de dilución que debe tener el LPD que será procesado en equipos Tridecanter. Por esta razón se realizaron ensayos con diferentes niveles de dilución para determinar la relación aceite/agua que mejore la eficiencia de recuperación de aceite. Se encontró que en rangos de 1,6 a 1,9 aceite/agua (donde 1,8 es la más adecuada), se obtienen los menores valores de pérdida de aceite en las corrientes de efluentes y torta y, por tanto, se incrementa la eficiencia de recuperación del aceite presente en el LPD. Los resultados que se sintetizan en la Figura 4

permiten concluir que hay un menor requerimiento de agua en la dilución del licor de prensa. En efecto, la reducción es de hasta 30 % con respecto al consumo actual de la planta en estudio, pasando de 140 a 90 litros de agua por tonelada de RFF que entra al proceso de extracción (Rackerseder, 2013).

Pérdidas de aceite

Las pérdidas de aceite en la clarificación estática se cuantifican en la corriente de efluentes a la salida del proceso; por su parte, en la clarificación dinámica a la pérdida en efluentes debe sumársele la pérdida de aceite en la torta (fase sólida), que se obtiene en los equipos Tridecanter. En la Figura 5 se compara la pérdida de aceite según principio de clarificación. Tras la implementación del principio de clarificación dinámica se obtuvo una reducción en la pérdida de aceite de 0,25 % Ac/t RFF (reprocesando los efluentes del primer Tridecanter).

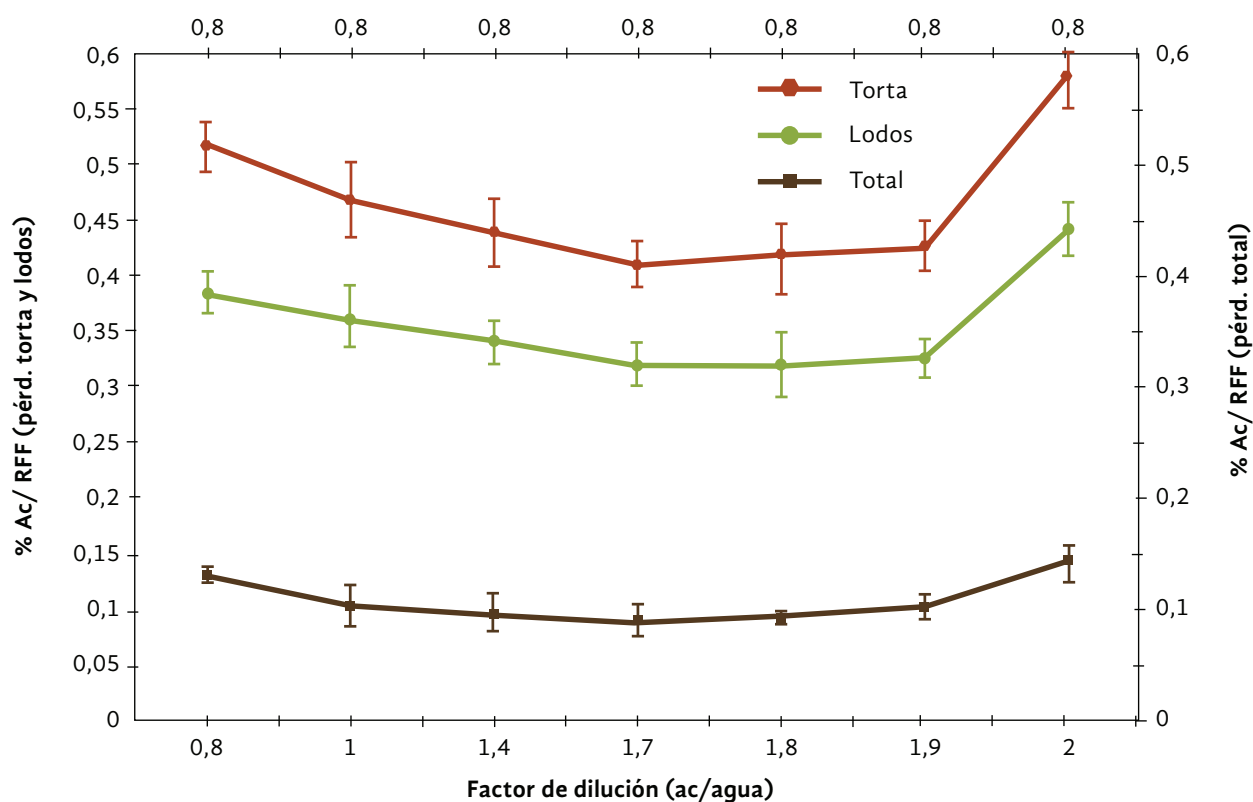
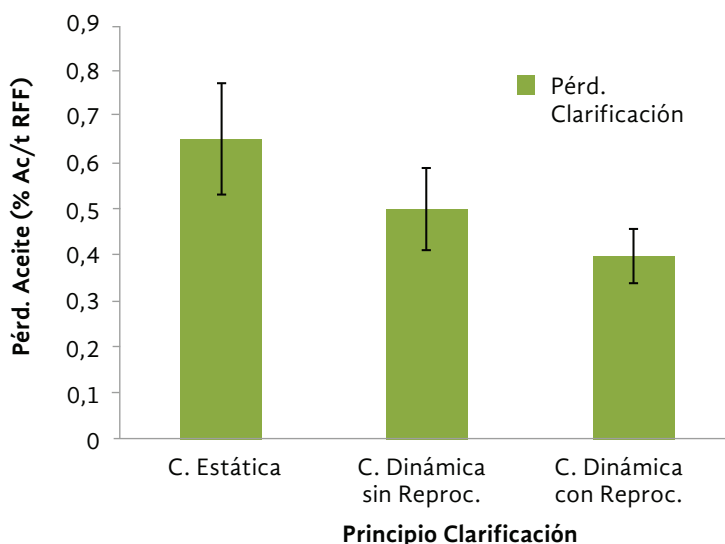


Figura 4. Relación entre el factor de dilución y la pérdida de aceite en torta y efluentes provenientes de los equipos Tridecanter en clarificación dinámica.

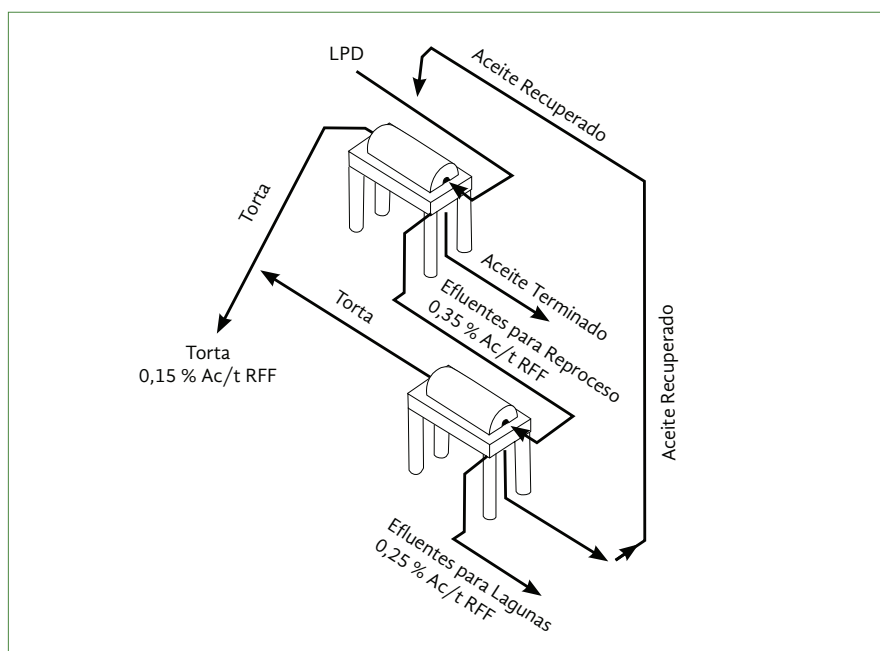
Figura 5. Comparación de pérdidas entre principios de clarificación estática y dinámica (con dos configuraciones para la dinámica).



En la Figura 6 se aprecian las corrientes que provienen de la clarificación dinámica y la pérdida de aceite asociada a cada una. Cuando se realiza una operación sin reproceso (con un solo equipo), la pérdida se compone por la suma de aceite en torta y efluentes sin reprocesar; 0,15 % Ac/t RFF y 0,35 % Ac/t RFF, respectivamente para este caso. Al implementar el reproceso (un equipo Tridecanter posterior al primero) la pérdida se compone de igual manera por el aceite en torta y el aceite en el efluente reprocesado, 0,15 % Ac/t RFF y 0,25 % Ac/t RFF. La pérdida

de aceite en torta con o sin reproceso del efluente en un segundo Tridecanter, no se reduce debido a que en esta nueva corriente de alimentación el aceite se encuentra en la fase líquida, la cual pasa de 0,35 % a 0,25 % Ac/t RFF. Al recuperar este 0,1 % se disminuye la pérdida total de la clarificación dinámica de 0,5 a 0,4 % como se puede apreciar en la Figura 7. Adicional a esto, implementar el reproceso permite incrementar el porcentaje de torta (7 % sin reproceso a 9 % torta/t RFF con reproceso) y reducir el volumen de los efluentes finales.

Figura 6. Composición de las pérdidas de aceite en las corrientes provenientes de clarificación dinámica.



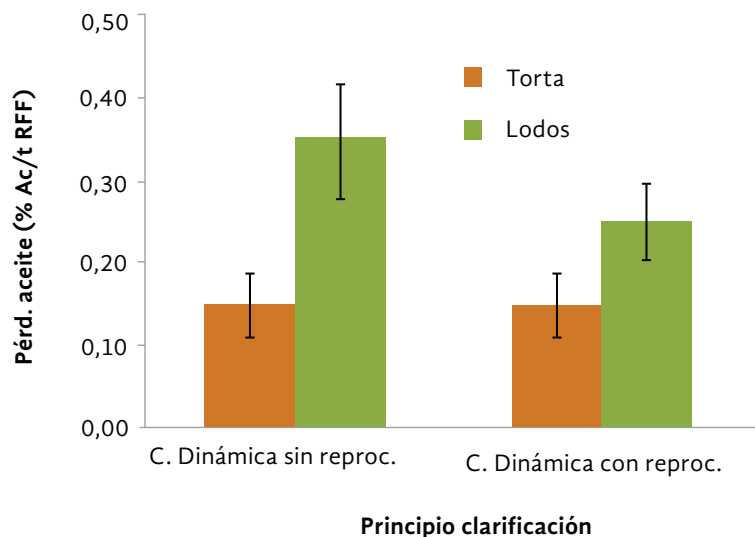


Figura 7. Distribución de las pérdidas obtenidas en la clarificación dinámica, con y sin reproceso, en las corrientes de torta y lodos.

Calidad del aceite: la calidad del aceite obtenido con la clarificación dinámica medida como humedad, AGL e impurezas, mejora al compararlo con los históricos reportados para la clarificación estática, siendo la evidencia estadísticamente significativa. En las Figuras 8, 9 y 10 se presentan los valores promedios de humedad, AGL e impurezas para cada sistema de clarificación.

Se encontró que en humedad y AGL, disminuye el rango de variación en comparación con los encontrados en la clarificación estática. Lo anterior se ha corroborado en los datos reportados por el laboratorio de calidad de la planta en su seguimiento realizado durante más de un año para las mismas variables. Tanto en picos de cosecha, como en épocas con menor cantidad de fruta, es posible manejar

rangos más estables: en humedad desde 0,2 a 0,5 % con clarificación estática y 0,1 a 0,25 % con dinámica, y en AGL de 2 a 4 % con clarificación estática y 2 a 3,3 % con dinámica. En cuanto a las impurezas, se encontró que aunque el promedio disminuye frente al obtenido en clarificación estática, el principio dinámico es más sensible al manejo inadecuado o falta de control en operaciones previas relacionadas especialmente al desarenador y al mantenimiento de parámetros como temperatura y porcentaje de alimentación, RPM de operación del Tridecanter, agitación del tanque homogenizador y factor de dilución en los valores adecuados para el correcto funcionamiento del equipo. Si se descuida alguno de estos parámetros se afecta de manera inmediata el porcentaje de impurezas en el aceite final.

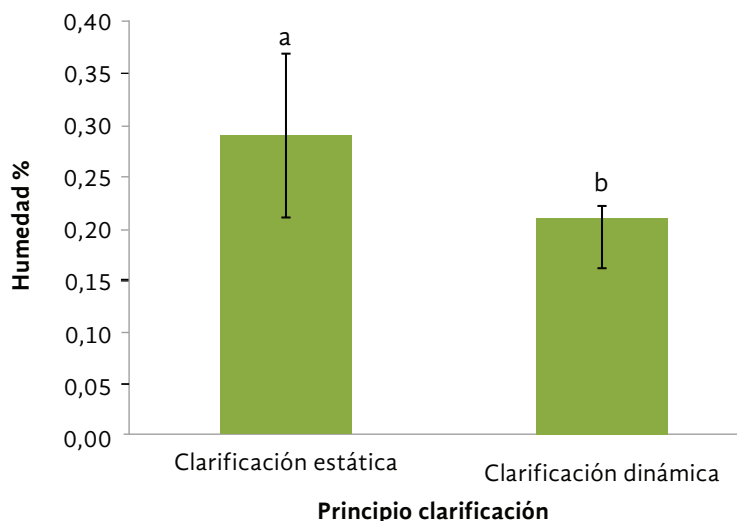


Figura 8. Humedad del aceite obtenido con cada uno de los principios de clarificación.

Las diferentes letras entre las barras representan diferencia significativa al 95 % de confianza.

Figura 9. Porcentaje AGL del aceite obtenido con cada uno de los principios de clarificación.

Las diferentes letras entre las barras representan diferencia significativa al 95 % de confianza.

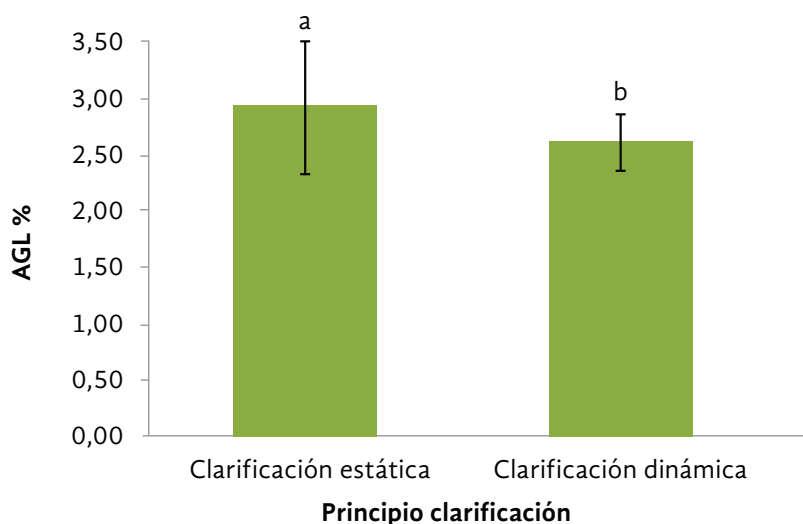
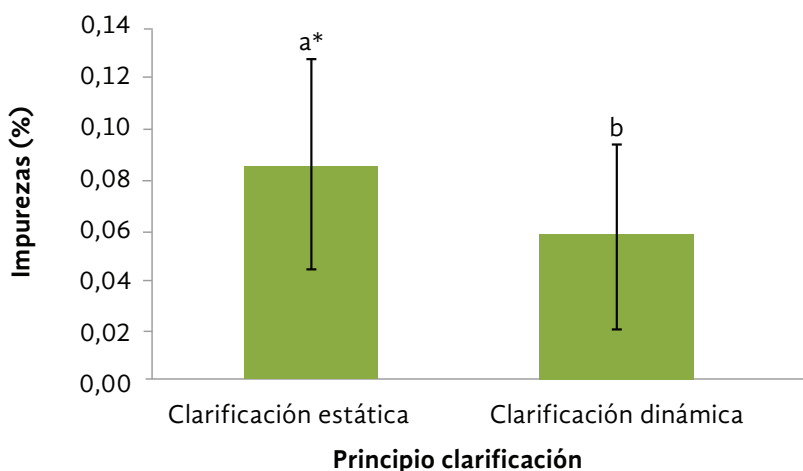


Figura 10. Impurezas en el aceite obtenido con cada uno de los principios de clarificación.

*Para CE solo se tuvieron en cuenta 10 repeticiones comparadas con 20 repeticiones para CD debido a pocos registros documentados.

Diferentes letras entre las barras representan diferencia significativa al 95 % de confianza.



En la Figura 11 se presenta el cambio que sufre el aceite en su paso por el equipo Tridecanter en función del DOBI. Una prueba de “t” para muestras pareadas, con nivel de significancia de 0,05 permite establecer que para el caso del DOBI, no hay evidencia suficiente para establecer diferencia significativa entre la entrada y la salida del equipo en función de las diferencias. Que no se determine diferencia significativa en el valor del DOBI entre la entrada y la salida puede ser un reflejo de la alta variabilidad en la evaluación (coeficiente de variación >50 %), variabilidad asociada a cambios repentinos en parámetros de operación del equipo, o a cambios en la composición del LPD durante el muestreo. No se realiza comparación del DOBI entre clarificación dinámica y estática debido a que la planta de beneficio no cuenta con este

análisis como rutina de su seguimiento diario a la clarificación estática.

Servicios industriales

Energía eléctrica: la Figura 12 compara en los mismos meses el consumo promedio de energía de la planta por sistema de clarificación; durante 2013 clarificación estática (CE) y durante 2014 clarificación dinámica (CD). A pesar que son años distintos debido a que los consumos están referidos a RFF son comparables.

Durante el seguimiento se obtuvo un consumo promedio de 17,54 kW/t RFF para toda la planta de beneficio con mínimos de 16,59 kW/t RFF y máxi-

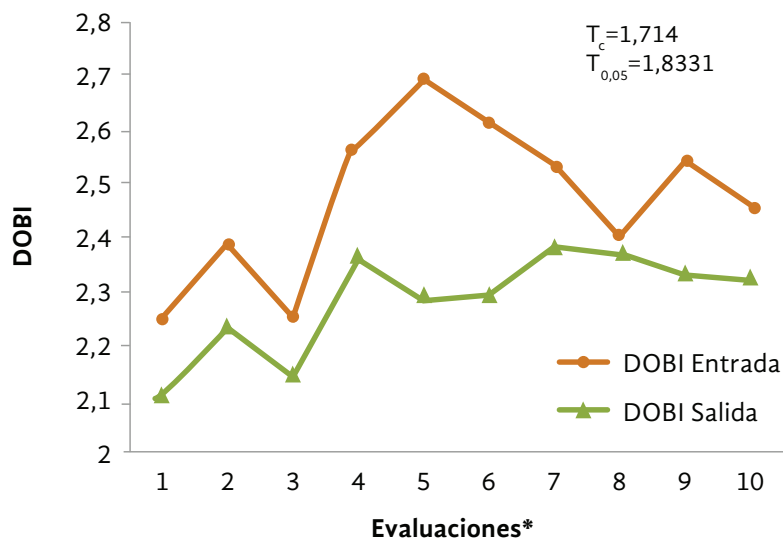


Figura 11. Cambio del DOBI en su paso por el equipo Tridecanter.

* Revisado con prueba de "t" para muestras pareadas, con nivel de significancia de 0,05 y grados de libertad de n-1. Evaluaciones realizadas cada hora durante un mismo periodo de proceso.

mos de 19,30 kW/t RFF. Esta disminución del consumo de energía eléctrica está respaldada por la disminución de la potencia instalada entre las dos tecnologías como se observa en la Figura 12, en la cual se presenta el resultado de realizar un cálculo teórico de la potencia instalada para cada principio según los equipos que tiene asociado (iniciando en el tamiz de licor de prensa y terminando en centrifugas). Se pasó de una potencia instalada de 100 a 45 kW debido a la eliminación de equipos como filtro, cepillos, centrifugas y motores de las bombas instaladas en los diferentes tanques requeridos en la clarificación estática (Figura 13). Esto representa una reducción del consumo de energía de 55 %, que justifica, entre otros, la reducción en los kW/t RFF requeridos en la planta.

Agua: la reducción de este consumo en el proceso está asociada principalmente a la disminución del agua usada en alcanzar el factor de dilución adecuado para la clarificación. Como se mencionó anteriormente, se pasa de consumir 140 a 90 l/t RFF para la dilución del licor de prensa, lo que representa el 30 % menos en el requerimiento (Figura 14). Adicional a la disminución del agua utilizada en la dilución, se eliminó el consumo asociado a centrifugas para el procesamiento de lodos y se redujo el agua (en forma de vapor), requerida por los distintos tanques usados en el principio estático. De esta manera se redujo el consumo promedio de la planta de 1,1 a 0,8 m³ agua/t RFF al implementar la clarificación dinámica (Figura 15).

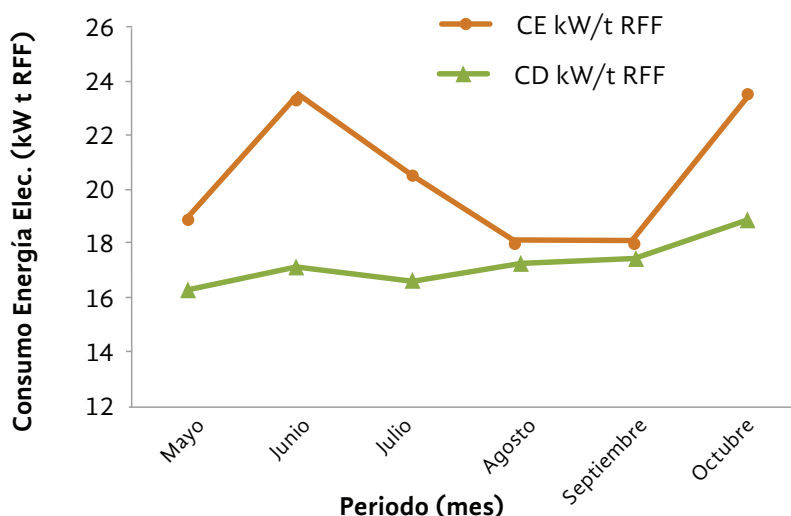


Figura 12. Comportamiento del consumo de energía eléctrica en iguales periodos. 2013 para clarificación estática (CE) y 2014 para clarificación dinámica (CD).

Figura 13. Potencia nominal instalada, calculada en cada principio de clarificación.

*No se presentan desviaciones estándar debido a que son datos reportados y no experimentales.

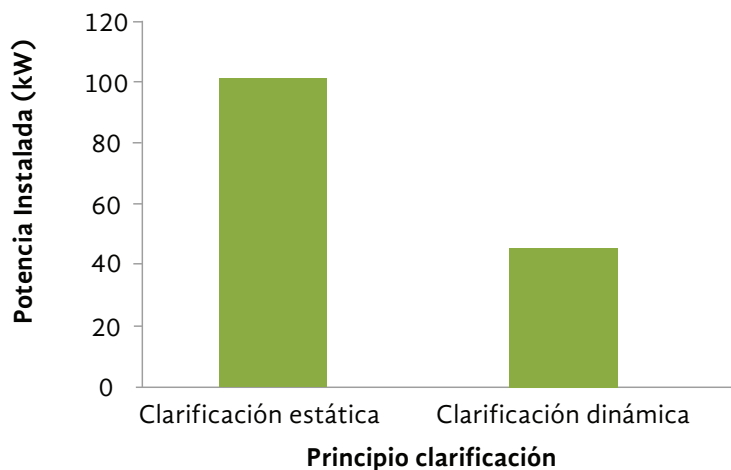


Figura 14. Consumo de agua en la planta de beneficio para cada principio de clarificación implementado medido.

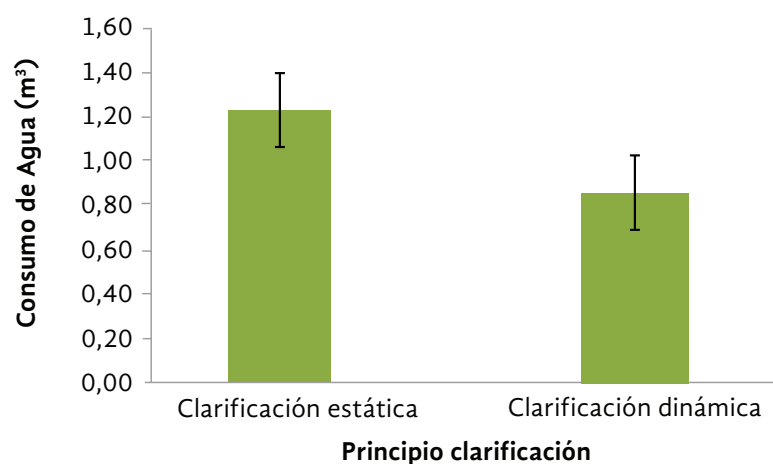
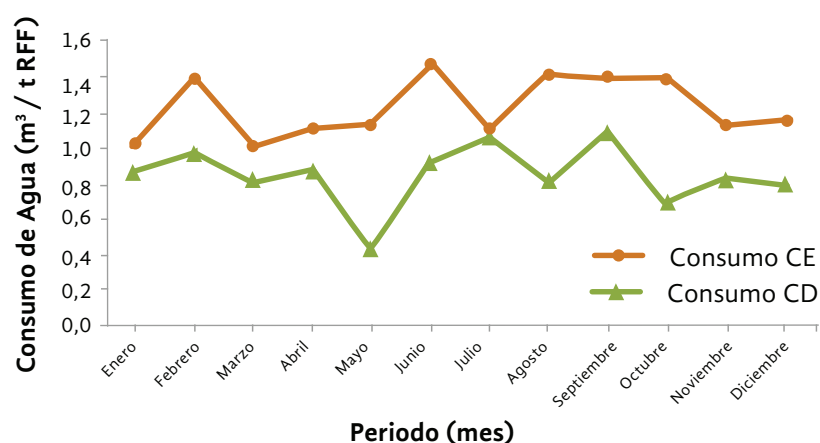


Figura 15. Comportamiento del consumo de agua en iguales periodos (2013 para clarificación estática y 2014 para clarificación dinámica).



Vapor: la clarificación estática requiere el uso de tanques como el clarificador, pulmón de lodos, sedimentador y el tanque para el secado del aceite, entre otros. Estos equipos requieren el uso de vapor para mantener altas temperaturas y así mejorar la eficiencia de separación del aceite y reducir las pérdidas en la operación (Garcia-Nunez *et al.*, 2009; Alvarado-To-

bias, 2010). En la clarificación dinámica estos tanques son eliminados y, por tanto, el consumo de vapor asociado a ellos se convierte en ahorro para el proceso.

La Figura 16 detalla el comportamiento en cuanto al consumo de vapor por tonelada de fruta procesada en la planta con cada principio de clarificación en los

misimos periodos de 2013 y 2014. Este consumo de vapor por tonelada de fruta procesada con el principio estático se mantuvo en el rango de 520 a 650 kg vapor/t RFF. Tras la implementación de la clarificación dinámica se redujo en promedio de 595 a 510 kg vapor/t RFF (Figura 17), lo que representa un ahorro de aproximadamente 15 % del consumo total de vapor de la planta, correspondiendo con reportes en los que se estima que el consumo de vapor para la clarificación estática es entre 10 y 15 % del consumo total por tonelada de fruta procesada (Román, 2006).

El análisis estadístico de los resultados obtenidos para el consumo de agua permite establecer una diferencia estadística significativa a favor de los promedios obtenidos con clarificación dinámica. Sin embargo, al aplicar el mismo análisis para los consumos

de vapor y energía eléctrica no se encontró evidencia que permita indicar una diferencia estadística a consecuencia del amplio rango en el cual se ubican los resultados.

Impacto ambiental: en la Tabla 1 se establece la comparación entre diferentes parámetros de calidad de los efluentes con clarificación dinámica y clarificación estática. Algunos de estos parámetros para el caso de clarificación estática son tomados a partir de registros en literatura sobre el tema debido a que la empresa no los había medido con anterioridad. (García, 1993; Igwe & Onyegbado, 2007; Lam & Lee, 2011; Miranda *et al.*, 2007; Wambeck, 1999).

La demanda química de oxígeno, los sólidos totales y los sólidos suspendidos se reducen en comparación con los valores registrados con clarificación estática.

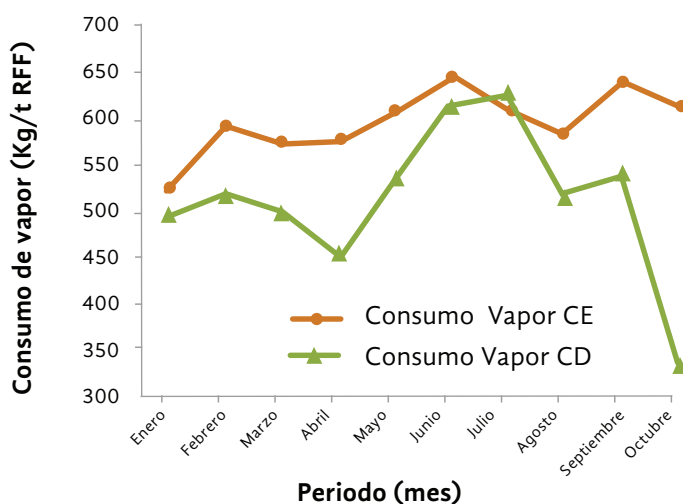


Figura 16. Comportamiento del consumo de vapor en iguales periodos (2013 para clarificación estática y 2014 para clarificación dinámica).

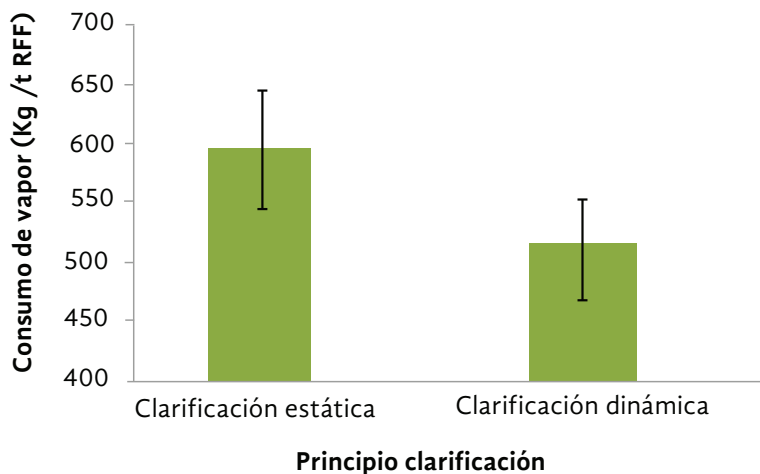


Figura 17. Consumo de vapor en la planta de beneficio para cada principio de clarificación implementado medido.

Esto se debe a la remoción de sólidos (torta) que el Tridecanter realiza sobre el efluente (la cual puede llegar a 10 % /t RFF con reproceso), y que evita que a las lagunas lleguen altas cargas de materia orgánica. La materia orgánica presente en los efluentes requiere de grandes cantidades de oxígeno para ser oxidada (por ruta biológica o química) (Ramalho, 2009), lo que afecta la flora y fauna de cuerpos de agua naturales y por lo cual no pueden ser vertidas en ellos de manera directa (Lam & Lee, 2011; Noel, 1999). Por ello deben ser tratados en lagunas de estabilización en donde por procesos anaeróbicos y aeróbicos se reducen los requerimientos de oxígeno hasta niveles establecidos por normatividad vigente (Igwe & Onyegbado, 2007).

Lo anterior resalta la importancia de los resultados obtenidos con la clarificación dinámica, pues al reducir el volumen (reducción que puede ser del 40 %

al pasar de 0,8 a 0,45 m³/t RFF) y eliminar una gran proporción de sólidos (torta que se convierte en un subproducto que puede ser utilizado en la alimentación para ganado) de los efluentes, se amplía la capacidad de residencia del líquido en las lagunas, y llegar a niveles más bajos de DBO y DQO sin tener que hacer cambios en los sistemas de tratamiento existentes (Rackerseder, 2013).

Indicadores y eficiencia real de producción: los equipos Tridecanter evaluados presentan un buen desempeño en cuanto a reducción de fallas y paradas no programadas en comparación con el conjunto de equipos que conforman a la clarificación estática. Esta reducción confluye en un incremento del indicador de confiabilidad; entendido como la probabilidad de que el sistema de clarificación no falle en servicio durante el proceso. Además de proporcionar mayores

Tabla 1. Características de los efluentes generados en cada principio de clarificación.

Parámetro	Unidad	Rango*	Clarificación estática	Desv. est. clarificación estática	Clarificación dinámica	Desv. est. clarificación estática
pH		3,87 - 5,25	4,5	0,3	4,6	0,3
DBO	mg/l	18.700 - 175.500	35.000	7.500	N.R.	-
Temperatura	°C	53 - 77	65	10	4,5	5
DQO	mg/l	45.000 - 230.000	70.000	10.000	41.000	5.300
Sólidos totales	mg/l	33.000 - 111.000	45.000*	++	10.000	1.500
Sólidos suspendidos	mg/l	19.000 - 88.000	35.000*	++	6.500	750
Grasas y aceites	mg/l	16.500 - 8.000	12.500	4.000	7.500	1.500

* Valores tomados de literatura (Garcia-Nunez, 1993; Igwe & Onyegbado, 2007; Lam & Lee, 2011; Miranda *et al.*, 2007; Wambeck, 1999).

+ No se cuenta con registros históricos de la empresa.

N.R. No se registraron datos durante la evaluación.

garantías de continuidad al proceso, los Tridecanter son equipos que permiten incorporar la automatización a la operación sin demasiadas exigencias de capacitación al personal encargado del sistema, que permite incorporar la automatización al proceso de

clarificación, incrementando el flujo de información en tiempo real para un mejor manejo del proceso. Es importante que el personal encargado del manejo diario de los equipos reciba capacitación sobre el manejo de revoluciones y alimentación del sistema.

La Figura 18 muestra el valor del indicador de Eficiencia Real de Producción, ERP, para cada uno de los principios de clarificación tanto para la planta de beneficio como para los módulos de Aceite de Palma Crudo, APC, y Recuperación de Aceite de Palma Crudo, RAPC. En cada módulo es el indicador de Disponibilidad el que más se incrementa debido a la reducción del tiempo requerido por fallas mecánicas y operativas asociadas a la clarificación. El indicador de Calidad (en función de las pérdidas de aceite) se ve más impactado en el módulo RAPC en donde los Tridecanter tienen su influencia directa al incrementar la recuperación de aceite. Finalmente, el indicador de Rendimiento no presenta un cambio relevante debido al uso de la capacidad de procesamiento de los equipos Tridecanter. Con estos resultados se observa cómo con la implementación de los equipos Tridecanter, la planta de beneficio logra pasar de un indicador ERP de 48,54 a 60,79 % lo que representa un mayor control sobre los tiempos programados y no programados para el mantenimiento, menor número de fallas y paradas del proceso, mayor tiempo efectivo de operación, mayor capacidad para procesar RFF y mayor tiempo disponible operativo en la sección de

clarificación. Lo que en últimas significa ahorros de dinero para la planta de beneficio.

Conclusiones

La reducción en la pérdida de aceite asociada a la clarificación, la disminución en el consumo de servicios industriales (agua, vapor y energía), la reducción del volumen de efluentes que incrementa la vida útil en las lagunas, reducción de materia orgánica en el efluente, entre otros aspectos, permiten concluir que el principio de clarificación dinámica impacta positivamente a la planta de beneficio de este estudio de caso. Igualmente, la recuperación de una corriente adicional de sólidos en la clarificación puede convertirse en una oportunidad para generar un ingreso a la planta de beneficio si se usa y/o comercializa como suplemento alimenticio para ganado.

Se observó que la calidad del aceite de palma obtenido con la clarificación dinámica, medido como humedad, AGL e impurezas, mejora al compararlo con los históricos reportados para la clarificación estática, sin embargo, queda a disposición de un nuevo

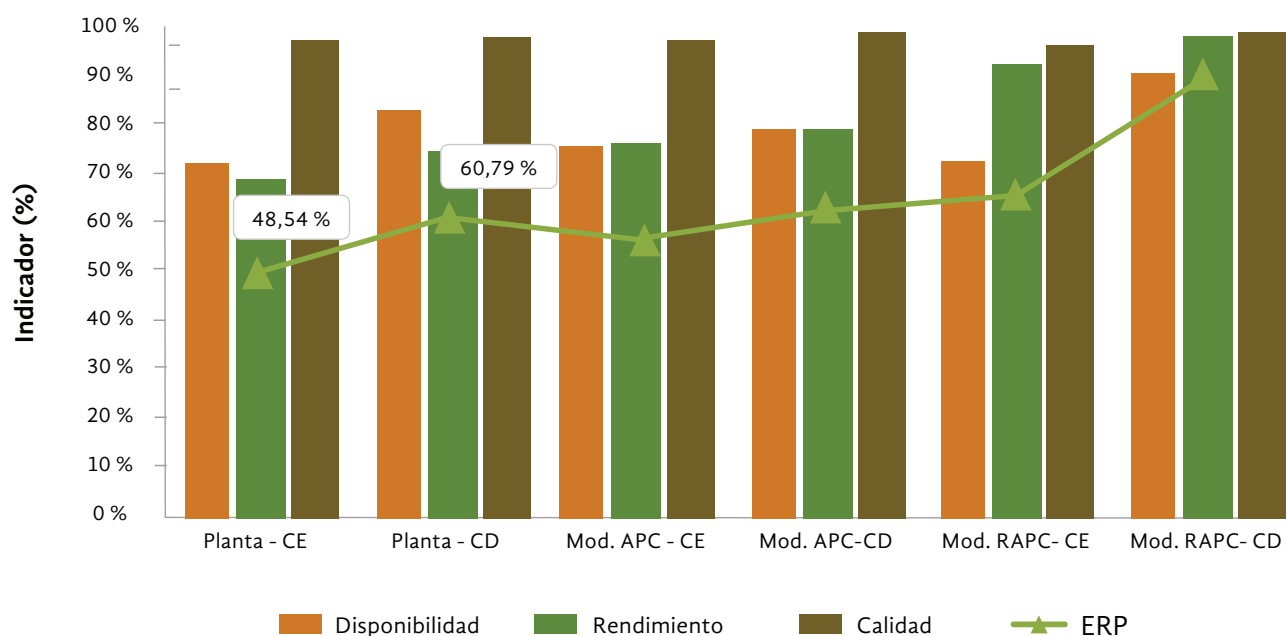


Figura 18. Indicador de Eficiencia Real de Producción, ERP, y sus componentes comparado entre secciones y principios de clarificación.

proyecto la evaluación exhaustiva de otros indicadores de calidad que actualmente empiezan a cobrar importancia a nivel industrial, y de los cuales no se cuenta con históricos en las plantas de beneficio, como el caso del DOBI, índice de peróxidos, contenido de metales, etc.

Aunque los costos de implementar un proyecto con clarificación dinámica pueden ser más elevados frente al sistema tradicional, es posible compensar esto en el corto plazo con un menor número de equipos (especialmente motores y bombas) que requieren mantenimiento (mano de obra, repuestos y tiempo) y en el mediano y largo plazo, con una reducción en el consumo de servicios industriales e incremento del aceite recuperado en clarificación. Es importante que para próximos estudios se realice una investigación sobre el costo-beneficio de la implementación de la clarificación dinámica, ya que este trabajo se enfocó principalmente en la obtención de resultados técnicos, que dejan valiosa información para un análisis de costos.

La implementación de equipos Tridecanter permite incrementar la eficiencia en la operación de clarificación, lo cual trae beneficios ambientales tales como reducción de la carga contaminante del agua residual, principalmente en las concentraciones de DQO, sólidos suspendidos totales, y grasas y aceites, favoreciendo de esta manera la eficiencia de remoción del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, STARI. Otro punto importante es la reducción de la cantidad de efluente a tratar, ya que se disminuye hasta en 60 %. Los beneficios am-

bientales adquiridos por la inversión en un equipo Tridecanter le permite a la planta de beneficio optar por beneficios e incentivos tributarios como deducción en renta y de exclusión del IVA del equipo, ya sea nacional o importado.

Finalmente, es importante resaltar que en un momento en que la agroindustria de la palma de aceite enfrenta un amplio marco de exigencias ambientales, es necesario que el proceso de extracción de aceite se convierta en un sistema moderno a través de la implementación de nuevas tecnologías que no solo incrementen la eficiencia sino que, además, disminuyan los consumos de servicios industriales, permitan la automatización de más operaciones y reduzcan los impactos medioambientales que puedan ser generados por los efluentes como lo ha logrado la implementación de la clarificación dinámica en este estudio de caso.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa Palmeras del Llano S.A. por permitir desarrollar y publicar los resultados de la investigación, por su hospitalidad e interés en todas y cada una de las etapas de trabajo. A Jeison Narváez, Julián Gutiérrez, Iván Rozo, David Arias, Mónica Andrea Ramírez, Juan Andrés Quintero y a todo el personal de laboratorio por su colaboración en la toma de datos. Al Fondo de Fomento Palmero por facilitar esta investigación y por la financiación de esta publicación.

Referencias bibliográficas

- Acero, J. (2004). Mitos y realidades de pérdidas de aceite de palma en Colombia. *Palmas*, 25(Especial, Tomo II), 443–447.
- Alvarado-Tobias, M. (2010). Evaluación del proceso de clarificación en la planta de beneficio Palmagro S.A. (*Tesis Postgrado*). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados - Especialización en Cultivos Perennes Industriales. Valledupar, Cesar.

- Cala, S. L., Yáñez, E. E., & Garcia-Nunez, J. A. (2011). Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio. Bogotá: Cenipalma.
- Corredor, A. (2007). Estudio de costos de producción de aceite de palma en Colombia en 2005. *Palmas*, 28(2), 51–63.
- Garcia-Nunez, J. A., Yáñez, E. E., & Rodríguez, N. (2000). Balance de pérdidas de aceite en plantas de beneficio de las zonas palmeras colombianas Norte y Central. *Palmas*, 21(1), 375–380.
- Garcia-Nunez, J. A. (1993). Estado actual del manejo de efluentes en Colombia. *Palmas*, 14, 141–148.
- Garcia-Nunez, J. A., Nieto, D. I., & Rincón, S. M. (2009). Eficiencia de recuperación del aceite en función de la configuración geométrica y del tiempo de residencia en equipos preclarificadores. *Palmas*, 30(1), 39–48.
- Guterman, L. (2014). Costos de producción e indicadores de productividad laboral en la agroindustria de la palma de aceite en Colombia 2011-2012. *Palmas*, 35(3), 23–40.
- HACH (2000). Manual de análisis de agua: Procedimientos fotométricos, de titulación y microbiológicos de HACH Company.
- Igwe, J. C., & Onyegbado, C. C. (2007). *A Review of Palm Oil Mill Effluent (POME) Water Treatment*. *Journal of Environmental Research*, 1(2), 54–62.
- Lam, M. K., & Lee, K. T. (2011). *Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): win-win strategies toward better environmental protection*. *Biotechnology Advances*, 29(1), 124–41. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.10.001>
- Miranda, H., Wulfert, K., Schuchardt, F., & Tjahjono, D. (2007). Manejo Sostenible de Efluentes y Tusas. *Palmas*, 28(2), 191–198.
- Montero, J. C., Díaz, C. A., Guevara, F. E., Cepeda, A. H., & Barrera, J. C. (2013). Modelo para medición de eficiencia real de producción y administración integrada de información en Planta de Beneficio. *Boletín Técnico N° 33* (pp. 1–72).
- Nieto, D. I., Yáñez, E. E., & Garcia-Nunez, J. A. (2011). Preclarificador de aceite crudo de palma: diseño y operación. *Boletín Técnico N° 29* (pp. 1–58).
- Rackerseder, K. (2013). Uso novedoso del Decanter/Tricanter ® en la industria del aceite de palma. *Palmas*, 34(Especial, Tomo II), 47–55.
- Román, F. A. (2006). Balance energético en plantas extractoras de aceite de palma (Tesis Pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá.
- Sarjitsingh. (1995). En busca de un proceso simplificado para la clarificación del aceite de palma. *Palmas*, 16(2), 51–64.

- SAS Institute (2012). *The SAS system for Windows*. Release 9.4. Cary, N.C., USA: SAS Inst.
- Satterthwaite, F. E. (1946). *An approximate distribution of estimates of variance components*. *Biometrics*, 2(6), 110-114. <http://doi.org/10.2307/3002019>
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1980). *Principles and procedures of statistics: A biometrical approach*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. Retrieved from: <http://www.philadelphia.edu.jo/newlibrary/english-books/165-mathematics/18823-806>
- Steiger, W., & Rackerseder, K. (2007). La centrifuga tipo Decanter aplicada en la clarificación directa del aceite de palma. *Palmas*, 28(2), 138–142.
- Urueta, J. C. (2007). Clarificación estática reducida. *Palmas*, 28(2), 131–137.
- Wambeck, N. (1999). *Oil Palm Process Synopsis* (Vol. I).
- Yáñez, E. E., Díaz, O. M., Garcia-Nunez, J. A., & Castillo, E. F. (2009). Determinación del nivel de dilución apropiado en el proceso de clarificación y diseño de un sistema de control automático. *Palmas*, 29(4), 21–30.
- Yáñez, E. E., & Garcia-Nunez, J. A. (2004). Reducción de pérdidas de aceite y almendra en plantas de beneficio en Colombia. *Palmas*, 25(Especial, Tomo II), 448–456.