



Estudio del nivel de dilución apropiado para la etapa de preclarificación en la extracción de aceite de palma mediante curvas de sedimentación en la planta de beneficio Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A.

Julio Cesar Garavito Miranda

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Agroindustrial

Modalidad de Práctica
Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Mauricio Esteban Sánchez, Magíster (MSc) en Ingeniería Química
Osneider Guzmán Salas, Ingeniero Industrial

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Agroindustrial
Carepa, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Garavito Miranda [1]
Referencia	[1] Garavito Miranda, “Estudio del nivel de dilución apropiado para la etapa de preclarificación en la extracción de aceite de palma mediante curvas de sedimentación en la planta de beneficio Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A.” Informe de práctica, Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Antioquia Carepa, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Biblioteca Sede Estudios Ecológicos y Agroambientales Tulenapa (Carepa)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

DEDICATORIA

A mi madre, cuyo amor y dedicación han sido mi guía y fortaleza en cada paso de este viaje. A mi familia, por ser el refugio donde siempre encuentro apoyo y motivación incondicional. Gracias por creer en mí incluso cuando dudé, por celebrar mis logros y sostenerme en mis caídas. Dedico este trabajo también a mis amigos y seres queridos, quienes con su compañía y palabras de aliento me han inspirado a alcanzar este sueño. Finalmente, dedico esta tesis a cada persona que, de una u otra manera, ha dejado una huella en mi camino hacia el conocimiento y me ha ayudado a convertirme en la persona que soy hoy.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre y a mi familia, quienes con su amor incondicional y constante aliento han sido mi fuerza y mi inspiración. Agradezco también a cada uno de los profesores, coordinadores y a todas las personas que generosamente compartieron su conocimiento conmigo, dejándome huellas de sabiduría. A la Universidad de Antioquia, mi sincero reconocimiento, por ser faro de transformación y progreso en esta región. Finalmente, a la empresa Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A., gracias por brindarme la oportunidad de consolidar mis aprendizajes y forjar mi experiencia en el entorno industrial.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	9
Abstract	10
I. Introducción	11
II. Objetivos.....	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos.....	13
III. Marco teórico	14
IV. Metodología	18
V. Análisis de resultados.....	21
VI. Conclusiones y recomendaciones	34
Referencias	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tratamiento 1.3 a 80°C, velocidad de separación	25
Gráfico 2 – Tratamiento 1.3 a 85°C, velocidad de separación	25
Gráfico 3 – Tratamiento 1.3 a 90°C, velocidad de separación	25
Gráfico 4 – Tratamiento 1.4 a 80°C, velocidad de separación	25
Gráfico 5 – Tratamiento 1.4 a 85°C, velocidad de separación	25
Gráfico 6 – Tratamiento 1.4 a 90°C, velocidad de separación	25
Gráfico 7 – Tratamiento 1.5 a 80°C, velocidad de separación	26
Gráfico 8 – Tratamiento 1.5 a 85°C, velocidad de separación	26
Gráfico 9 – Tratamiento 1.5 a 90°C, velocidad de separación	26
Gráfico 10 – Tratamiento 1.3 a 80°C, eficiencia de separación	27
Gráfico 11 – Tratamiento 1.3 a 85°C, eficiencia de separación	27
Gráfico 12 – Tratamiento 1.3 a 90°C, eficiencia de separación	27
Gráfico 13 – Tratamiento 1.4 a 80°C, eficiencia de separación	27
Gráfico 14 – Tratamiento 1.4 a 85°C, eficiencia de separación	28
Gráfico 15 – Tratamiento 1.4 a 90°C, eficiencia de separación	28
Gráfico 16 – Tratamiento 1.5 a 80°C, eficiencia de separación	28
Gráfico 17 – Tratamiento 1.5 a 85°C, eficiencia de separación	28
Gráfico 18 – Tratamiento 1.5 a 90°C, eficiencia de separación	28

LISTA DE ILUSTRACIONES

Imagen 1 - Curva de sedimentación de lodos	17
Imagen 2 - Curvas de eficiencia de separación o recuperación de ACP	18
Imagen 3 – Tratamiento 1.3 a 80°C, repetición 1	21
Imagen 4 – Tratamiento 1.3 a 80°C, repetición 2	21
Imagen 5 – Tratamiento 1.3 a 85°C, repetición 1	22
Imagen 6 – Tratamiento 1.3 a 85°C, repetición 2	22
Imagen 7 – Tratamiento 1.3 a 85°C, repetición 3	22
Imagen 8 – Tratamiento 1.3 a 90°C, repetición 1	22
Imagen 9 – Tratamiento 1.3 a 90°C, repetición 3	22
Imagen 10 – Tratamiento 1.4 a 85°C, repetición 2	22
Imagen 11 – Tratamiento 1.4 a 85°C, repetición 3	23
Imagen 12 – Tratamiento 1.4 a 90°C, repetición 1	23
Imagen 13 – Tratamiento 1.4 a 90°C, repetición 2	23
Imagen 14 – Tratamiento 1.4 a 90°C, repetición 3	23
Imagen 15 – Tratamiento 1.5 a 85°C, repetición 1	23
Imagen 16 – Tratamiento 1.5 a 85°C, repetición 2	23
Imagen 17 – Tratamiento 1.5 a 85°C, repetición 3	24
Imagen 18 – Tratamiento 1.5 a 90°C, repetición 2	24
Imagen 19 – Tratamiento 1.5 a 90°C, repetición 3	24
Imagen 20 – Análisis de varianza, eficiencia de separación	29
Imagen 21 – Análisis de varianza, velocidad de separación	29
Imagen 22 – Prueba de Tukey, eficiencia de separación	30

Imagen 23 – Prueba de Tukey, velocidad de separación	30
Imagen 24 – Test de normalidad, eficiencia de separación	31
Imagen 25 – Test de normalidad, velocidad de separación	31

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

BPD	Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A
RFF	Racimo de fruta fresca
TEA	Tasa de extracción de aceite
ACP	Aceite crudo de palma
OxG	<i>Elaeis Oleifera</i> x <i>Elaeis Guineensis</i>
PRE 1	Preclarificador 1

RESUMEN

Este estudio evaluó la influencia de la dilución y la temperatura en la eficiencia y velocidad de separación en el proceso de extracción de aceite. Se probaron factores de dilución de 1.3, 1.4 y 1.5, y temperaturas de 80, 85 y 90°C. Los resultados mostraron que a menor dilución (1.3), solo la temperatura de 90°C estabilizó la velocidad de separación después de 20 minutos. A mayor dilución (1.4 y 1.5), la eficiencia fue significativamente mayor, alcanzando hasta un 93% a 85 y 90°C, con tiempos de estabilidad más cortos. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que tanto la dilución como la temperatura afectan la eficiencia de separación, aunque la dilución tiene mayor impacto. La prueba de Tukey demostró que las diluciones de 1.4 y 1.5 a 85 y 90°C tienen la mayor eficiencia sin diferencias significativas entre ellas. Estos hallazgos sugieren que diluciones más altas, 1.4 y 1.5, combinadas con temperaturas de 85 y 90°C, aumentan la eficiencia de separación entre 69 y 93%, además, reducen el tiempo del proceso de 15 a 20 minutos de operación.

***Palabras clave* — Extracción, aceite de palma, dilución, separación, estabilidad.**

ABSTRACT

This study evaluated the influence of dilution and temperature on the efficiency and speed of separation in the oil extraction process. Dilution factors of 1.3, 1.4 and 1.5, and temperatures of 80, 85 and 90°C were tested. The results showed that at lower dilution (1.3), only the temperature of 90°C stabilized the separation rate after 20 min. At higher dilution factors (1.4 and 1.5), the efficiency was significantly higher, reaching 93% at 85 and 90°C, with shorter stability times. Analysis of variance (ANOVA) indicated that both dilution and temperature affect separation efficiency, although dilution has a greater impact. Tukey's test showed that 1.4 and 1.5 dilutions at 85 and 90°C have the highest efficiency with no significant differences between them. These findings suggest that higher dilutions, 1.4 and 1.5, combined with temperatures of 85 and 90°C, increase the separation efficiency between 69 and 93%, and reduce the process time from 15 to 20 minutes of operation.

Keywords — Extraction, palm oil, dilution, separation, stability.

I. INTRODUCCIÓN

Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A. es una empresa que se dedica a la extracción de aceite crudo de palma híbrida OxG (alto oleico) en la región de Urabá desde hace más de 10 años. A pesar de su juventud, es una empresa vibrante y eficaz, impulsada por un equipo humano y profesional que garantiza su sostenibilidad a largo plazo y un crecimiento responsable. Se ha posicionado como la pionera y única extractora de aceite de palma alto oleico en la región de Urabá [4]. El aceite de palma alto oleico, derivado del híbrido OxG, ha ganado terreno como una opción saludable debido a sus beneficios para el bienestar humano. Su alto contenido en vitaminas y fitonutrientes lo convierte en un poderoso antioxidante que combate los efectos negativos de la peroxidación lipídica y el estrés oxidativo. Gracias a sus numerosos beneficios para la salud y su alta resistencia a la oxidación, el aceite de palma alto oleico se presenta como una opción destacada tanto para la industria alimentaria como para el uso doméstico [12]. Sin embargo, la producción eficiente de este aceite requiere de un manejo adecuado en las plantas de beneficio de aceite crudo de palma (ACP). Bioplanta, al igual que todas las plantas de beneficio de ACP, enfrenta pérdidas asociadas a fallas o fugas en los equipos, la manipulación por parte de los operadores y mediciones incorrectas. La cantidad de pérdidas está directamente relacionada con la tasa de extracción de aceite (TEA), uno de los indicadores más relevantes para una planta de beneficio, ya que influye directamente en la rentabilidad de la empresa en general. Actualmente, la pérdida de aceite durante la clarificación es el segundo factor más importante en la eficiencia general del proceso de extracción de aceite de palma [20]. Por lo tanto, mejorar los procesos y minimizar las pérdidas en esta etapa es crucial para aprovechar al máximo los beneficios del aceite de palma alto oleico y garantizar su rentabilidad y sostenibilidad en el mercado.

El proceso de extracción de aceite de palma híbrida OxG se compone de varias etapas fundamentales que tiene como objetivo extraer el aceite crudo de palma de los RFF. De forma breve, el proceso se divide en diez operaciones o etapas básicas secuenciales que deben ser monitoreadas constantemente y son: 1. Recepción, 2. Esterilización, 3. Desfrutación, 4. Digestión, 5. Prensado, 6. Tamizado, 7. Preclarificación, 8. Clarificación, 9. Secado y 10. Almacenamiento.

Además de las etapas productivas, dentro de una planta de beneficio de ACP se evalúan diferentes indicadores que definen el proceso, como la TEA y la calidad (humedad y acidez) [3]. Normalmente, una planta de beneficio de ACP tiene una TEA entre el 20% y el 26%, dependiendo de las condiciones de operación de cada una de las etapas, los operarios y el estado de los equipos [11]. En un estudio pasado [15], se reportó una TEA para la variedad híbrida OxG del 26%. Este indicador se ve afectado por diferentes factores a lo largo de las etapas; uno de los factores relevantes que debe ser controlado es la eficiencia de separación de aceite en la etapa de preclarificación. La eficiencia de separación depende del factor de dilución, la temperatura y la viscosidad del aceite [5]. El factor de dilución aplicado al licor de prensa en la etapa de preclarificación es una condición de operación característica de cada planta de beneficio, por lo que debe ser estudiado y analizado para su estandarización y monitoreo. Basado en una investigación previa [20], se conoce el rango de temperatura en el que se debe mantener el licor de prensa que va hacia la etapa de preclarificación, entre 80 y 90°C. Si el licor de prensa se somete a una temperatura por encima de 90°C, se puede afectar la calidad del aceite provocando un mayor contenido de ácidos grasos libres. La viscosidad afecta notablemente la etapa de preclarificación y esta se ve influenciada por la temperatura y el factor de dilución [3]. La viscosidad de los fluidos aceitosos depende directamente de la temperatura; a mayor temperatura, menor viscosidad [16]. A menor viscosidad, se obtiene una mayor velocidad de separación de las gotas de aceite del lodo, dando como resultado una estabilización de operación del preclarificador en un corto periodo de tiempo, lo que permite comenzar a separar la mayor cantidad de aceite rápidamente. La correcta operación de un preclarificador permite recuperar en esta etapa al menos el 88% de aceite en menos de una hora de proceso [11]. Con el tratamiento correcto de temperatura y factor de dilución aplicado al licor de prensa, la velocidad de separación se estabiliza en un corto periodo de tiempo, alrededor de ± 20 minutos, recuperando rápidamente al menos el 70% de aceite [20]. Para determinar el correcto tratamiento de temperatura y factor de dilución, Cenipalma desarrolló una metodología denominada “curvas de sedimentación” que permite estudiar el comportamiento de la velocidad de separación del aceite de los lodos y la eficiencia de la etapa de preclarificación, para establecer las condiciones de operación adecuadas a partir de datos y gráficos que son objeto de análisis y fuente de los resultados y conclusiones [17].

En la actualidad, BPD no cuenta con un sistema de control y monitoreo para la temperatura y el factor de dilución en la etapa de preclarificación (pre1), lo que afecta la viscosidad, la velocidad y la eficiencia de separación del ACP. Debido a esto, no se conoce con certeza la eficiencia del equipo, el rango de dilución, el tiempo de estabilización del proceso y la velocidad de separación. En el presente trabajo de investigación se abordó el estudio de las variables que afectan la eficiencia de separación en la etapa de preclarificación, específicamente el factor de dilución y la temperatura, mediante la metodología "curvas de sedimentación", con el fin de determinar las condiciones de operación adecuadas para la planta de beneficio BPD.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Estudiar el efecto del factor de dilución y la temperatura sobre la velocidad y la eficiencia de separación de aceite crudo de palma aplicando la metodología "curvas de sedimentación" con el fin de determinar las condiciones de operación adecuadas para la etapa de preclarificación.

B. Objetivos específicos

- Analizar el efecto del factor de dilución sobre la velocidad y la eficiencia de separación del ACP.
- Determinar el efecto de la temperatura sobre la velocidad y la eficiencia de separación de ACP.
- Identificar el rango de temperatura y el rango dilución que aceleran la estabilidad de la velocidad de separación del ACP buscando obtener una eficiencia de separación del 70% antes de los 20 minutos de operación.

III. MARCO TEÓRICO

Aceite de palma alto oleico

El aceite de palma alto oleico se obtiene del híbrido interespecífico OxG, que resulta del cruce entre las especies *Elaeis Oleífera* y *Elaeis Guineensis*. Este aceite se destaca por su alto contenido de ácido oleico, tocotrienoles y fitonutrientes, así como por su gran resistencia a la oxidación. Contiene un 33% de ácidos grasos saturados (aproximadamente 28% en forma de ácido palmítico) y un 66% de ácidos grasos insaturados (cerca del 54% como ácido oleico) [13].

Licor de prensa

El licor de prensa es un fluido oleoso resultante del proceso de prensado de la pulpa de los frutos de la palma de aceite durante la extracción de aceite de palma. Este licor contiene aceite, agua y sólidos en suspensión (partículas de fibra y otros materiales). Durante el prensado, las células de la pulpa se rompen, liberando el aceite que se mezcla con el agua y los sólidos, formando el licor de prensa. Este licor es luego sometido a procesos de clarificación y purificación para separar el aceite crudo de palma del agua y los sólidos [9].

Extracción de aceite crudo de palma

La extracción de aceite de palma se define como el conjunto de operaciones unitarias que transforman los frutos de la palma aceitera en aceite crudo de palma (ACP) [19]. Este proceso implica la recepción, esterilización, desfrutación, digestión, prensado, tamizado, preclarificación, clarificación-secado y almacenamiento.

Etapas

- **Recepción:** Etapa en la cual los racimos de fruta fresca (RFF) son pesados, evaluados y almacenados en la tolva. Para evaluar los RFF se aplica la metodología de la cuerda con nudos, ya que permite analizar la calidad (racimos verdes, sobre maduros, podridos, pedúnculo largo, producto conforme y mala formación).

-
- **Esterilización:** La fase inicial en la extracción de ACP es la esterilización o vaporización [7]. Durante este proceso, los RFF se someten al contacto con vapor a una temperatura aproximada de 140 °C durante un período de 60 a 90 minutos, lo que desactiva las enzimas responsables de degradar el aceite aumentando la cantidad de ácidos grasos libres. La exposición a altas temperaturas facilita el desprendimiento de los frutos de los racimos en la etapa de desfrutación [10].
 - **Desfrutación:** Los RFF esterilizados se introducen de manera continua en un separador de tambor giratorio, donde los frutos oleaginosos se separan de los racimos. Luego, un transportador de cangilones recoge los frutos desprendidos y los transfiere a los digestores [2], [8].
 - **Digestión:** La digestión es un proceso de agitación de los frutos oleosos aplicando calentamiento con vapor. Los frutos se ablandan a una temperatura de 80 a 90°C mediante inyección directa de vapor vivo y agitación constante, mediante paletas sujetas a un eje giratorio que es impulsado por un motor eléctrico [2]. Bajo altas temperaturas y presiones, las células de los frutos que contienen aceite se romperán para liberar el aceite.
 - **Prensado:** Los frutos oleosos que pasaron por la etapa de digestión entran a una prensa de tornillo que se encarga de extraer el ACP y durante este proceso se agrega agua caliente (90 y 95°C) para mejorar el funcionamiento de la prensa, el transporte del fluido por las tuberías y la separación de los sólidos presentes en la siguiente etapa [18].
 - **Tamizado:** Una vez que se extrae el ACP y es diluido, se denomina “licor de prensa”. Del licor de prensa, se separan los sólidos finos mediante una criba vibratoria con número de malla 20 o 30 [18].
 - **Preclarificación:** El licor de prensa normalmente es una mezcla de 35 a 45% de aceite, 45 a 55% de agua y pequeñas porciones de materiales fibrosos [8], [18]. La mezcla de aceite, agua y lodo se procesa en un tanque de clarificación para recolectar el aceite desnatándolo constantemente en la parte superior del tanque "florentino". La temperatura del tanque se

debe mantener entre 90 y 95°C para asegurar una baja viscosidad del aceite y facilitar la separación. La fase inferior del tanque pasa a través de un separador centrífugo de tres salidas para separar el ACP remanente, el efluente y el lodo [2].

- **Clarificación y secado:** El ACP se refina aún más utilizando una centrífuga y un secador de vacío para eliminar la humedad y más residuos sólidos antes de transferirlo a un tanque de almacenamiento [2].
- **Almacenamiento:** En esta etapa, el ACP que sale de los secadores es enviado a tanques de almacenamiento para contenerlo, secarlo y controlar su acidez hasta el momento de ser despachado.

Factor de dilución

Cantidad de agua añadida al licor de prensa durante la etapa de preclarificación. Este factor es crucial porque ayuda a reducir la viscosidad del licor, facilitando la separación de las gotas de aceite del agua y los sólidos en suspensión (Schuchardt, F. et al, 2024). El factor de dilución se determina como el cociente entre la cantidad de aceite [mL] y la cantidad de agua [mL] de una muestra.

Viscosidad

La viscosidad es una medida que indica la espesura de un líquido o fluido. Se puede pensar en la viscosidad como el movimiento en el interior de un fluido. La viscosidad es una propiedad de los fluidos que está estrechamente relacionada con la resistencia al flujo. Algunos líquidos pueden fluir rápidamente, mientras que otros fluyen lentamente. Los líquidos que fluyen rápidamente como el agua, el alcohol y la gasolina tienen baja viscosidad. Mientras tanto, los líquidos de flujo lento como la glicerina, el aceite y la miel tienen una viscosidad alta [14].

Velocidad de separación

Tiempo necesario para que el aceite se separe del licor de prensa durante la etapa de preclarificación. Este parámetro mide qué tan rápido se puede recuperar el aceite del licor de prensa, influenciado por factores como la temperatura, el factor de dilución y la viscosidad del

licor. Una mayor velocidad de separación indica un proceso más eficiente, mayor separación del aceite crudo en el tiempo [17].

Curva de sedimentación

Ensayo en el que se simula el proceso de clarificación del aceite, observando la sedimentación de partículas de lodo y la formación de una capa de aceite clarificado. Para elaborar la curva (*Figura 1*), se registra la altura de la capa de lodo en función del tiempo de prueba. La duración del ensayo oscila entre 40 y 60 minutos, durante los cuales se controla la temperatura y se registra la información para, al final, estimar las curvas de eficiencia y velocidad de separación del aceite [11].

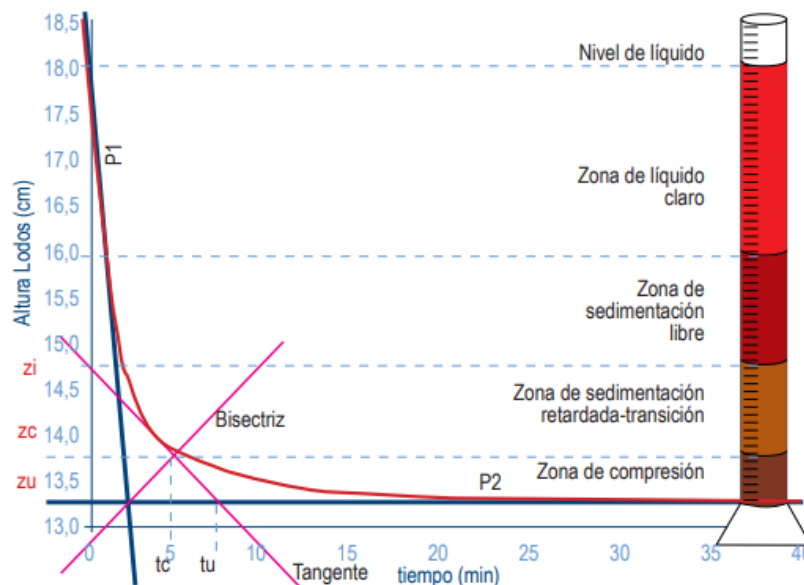


Imagen 1 - Curva de sedimentación de lodos

Extraído de: Mogollón et al., (2011)

Eficiencia de separación

Proporción de aceite que se recupera del licor de prensa en comparación con la cantidad total de aceite disponible. Este parámetro se expresa como un porcentaje y mide la efectividad del proceso de preclarificación para separar y recuperar el aceite. Una alta eficiencia de separación

significa que se está recuperando la mayor cantidad posible de aceite, minimizando las pérdidas [11]. La *figura 2* muestra la curva de eficiencia de separación.

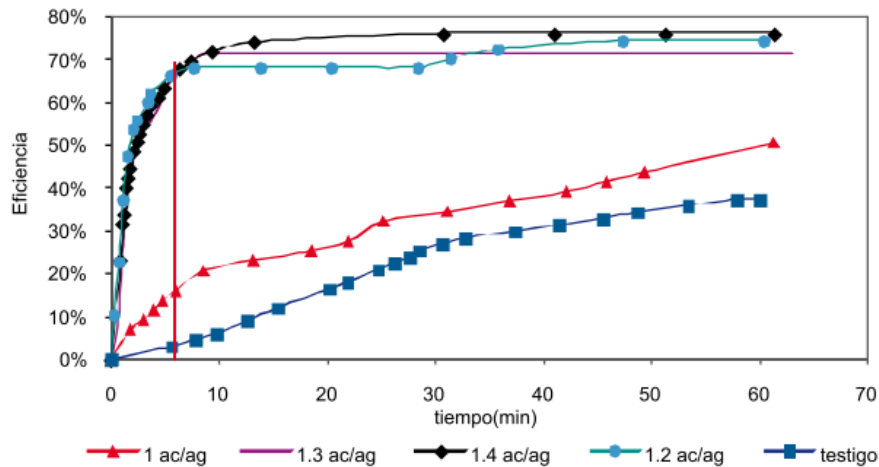


Imagen 2 - Curvas de eficiencia de separación o recuperación de ACP

Extraído de: Yañez et al., (2008)

IV. METODOLOGÍA

El estudio se llevará a cabo en la planta de beneficio Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A, ubicada en el kilómetro 13,6 en la vía Chigorodó-Mutatá, Urabá, Antioquia. Los ensayos se realizarán para el fluido que ingresa al equipo PRE1 en la etapa de preclarificación y para el 100% de la capacidad de producción de la planta (4 prensas en funcionamiento, aproximadamente 28 ton RFF/h). El fluido que ingresa al PRE1 está compuesto por el licor de prensas y el licor de esterilización. El nivel de dilución será manipulado en el laboratorio para obtener los factores de dilución que son objeto de estudio, además, se monitoreará y controlará la temperatura para que se mantenga en los niveles de estudio.

Los niveles del factor de dilución que serán objeto de estudio:

- 1.3
- 1.4
- 1.5

Los niveles de temperatura que serán objeto de estudio:

- 80°C
- 85°C
- 90°C

Materiales, herramientas y equipos

Fluido que ingresa al preclarificador 1 (pre1), agua, horno, centrifuga, estufa eléctrica, plancha de calentamiento, tubos de ensayo de 10 mL, gradilla, beakers de 5000 mL, erlenmeyers de 500 mL, erlenmeyers de 1000 mL, probetas de 250 mL, pipeta graduada 25 mL, pera de succión, soporte universal, nueces, pinzas, termómetro, computador, mesa, silla, papelería y útiles. Todo el material y los equipos necesarios fueron suministrados por la empresa Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A.

Licor de prensa

Las muestras serán tomadas directamente del licor de prensa que ingresa al proceso de preclarificación en la planta de beneficio Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A.

Factor de dilución

Para calcular el factor de dilución de cada muestra de fluido, se utilizará la formula (1). Se tomaron cuatro muestras de licor de prensa por cada momento de análisis, cada muestra de 10 mL, fue centrifugada y, posteriormente, se determinó la composición (%aceite, %lodo liviano, %agua y %lodo pesado) y se calculó el factor de dilución de cada muestra.

Curva de sedimentación

Se usó una probeta graduada sumergida en un baño termostático (80-90°C) para simular el proceso de separación estática de aceite en un preclarificador con el fin de visualizar durante 60 minutos la sedimentación de los lodos, o separación de aceite, que forman parte del fluido que ingresa al preclarificador 1. Para la elaboración de la curva, se lleva el registro de la altura de la capa de los lodos con relación al tiempo de prueba. Finalmente, se determina la velocidad y la eficiencia de separación del ACP.

Velocidad y eficiencia de separación

Se determina la velocidad de separación [mL/min] como el cociente entre el volumen de aceite separado y el tiempo de separación empleado. La eficiencia de separación [%] se calcula como el cociente entre el volumen de aceite separado y el volumen de aceite total en la muestra de fluido que ingresa al pre1 expresada como porcentaje.

Modelos analíticos

- **Factor de dilución**

$$\text{Factor de dilución} = \frac{\text{Aceite}}{\text{Agua}} \quad (1)$$

Donde

- Factor de dilución = Cociente adimensional entre volúmenes de aceite y agua
- Aceite = Volumen de aceite en la muestra [mL]
- Agua = Volumen de agua en la muestra [mL]

- **Altura del lodo sedimentado**

$$HLodos = HTotal - \frac{\text{Vol. de aceite separado}}{\pi * R^2} \quad (2)$$

Donde

- HLodos = Altura de lodos [cm]
- HTotal = Altura total de la columna de licor de prensa [cm]
- R = Radio interno de la probeta graduada [cm]
- Vol. de aceite separado = Volumen de aceite recuperado [mL = cm³]

- **Velocidad de separación**

$$\text{Vel. sep} = \frac{\text{Vol. de aceite separado}}{t. de separación} \quad (3)$$

Donde

- Volumen de aceite separado = Volumen de aceite recuperado [mL]
- t. de separación = Minutos transcurridos para la recuperación [min]

- **Eficiencia de separación**

$$\% E. Separación = \frac{Vol. de aceite separado}{Vol. de aceite total} * 100\% \quad (4)$$

Donde

– % E. Separación = Porcentaje de aceite recuperado [%]

– Vol. de aceite total = Volumen de la muestra de aceite [mL]

– Vol. de aceite separado = Volumen de la capa de aceite superior [mL]

Diseño experimental

Se aplicó un diseño factorial 3^2 con tres repeticiones para cada tratamiento. En total, 27 corridas experimentales. Para realizar el análisis de varianza, se usó un análisis ANOVA con un nivel de significancia del 95%. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey y la normalidad de la distribución de los datos se analizó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Todos los análisis estadísticos fueron realizados a través del Software estadístico RStudio.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Evidencias

En cada imagen (4 a 20), se evidencia la capa de aceite recuperado en la parte superior de la probeta después de realizar los respectivos ensayos.



*Imagen 3 – Tratamiento 1.3 a 80°C,
repetición 1*



*Imagen 4 – Tratamiento 1.3 a 80°C,
repetición 2*



*Imagen 5 – Tratamiento 1.3 a 85°C,
repetición 1*



*Imagen 8 – Tratamiento 1.3 a 90°C,
repetición 1*



*Imagen 6 – Tratamiento 1.3 a 85°C,
repetición 2*



*Imagen 9 – Tratamiento 1.3 a 90°C,
repetición 3*



*Imagen 7 – Tratamiento 1.3 a 85°C,
repetición 3*



*Imagen 10 – Tratamiento 1.4 a 85°C,
repetición 2*



*Imagen 11 – Tratamiento 1.4 a 85°C,
repetición 3*



*Imagen 14 – Tratamiento 1.4 a 90°C,
repetición 3*



*Imagen 12 – Tratamiento 1.4 a 90°C,
repetición 1*



*Imagen 15 – Tratamiento 1.5 a 85°C,
repetición 1*



*Imagen 13 – Tratamiento 1.4 a 90°C,
repetición 2*



*Imagen 16 – Tratamiento 1.5 a 85°C,
repetición 2*



*Imagen 17 – Tratamiento 1.5 a 85°C,
repetición 3*



*Imagen 18 – Tratamiento 1.5 a 90°C,
repetición 2*



Imagen 19 – Tratamiento 1.5 - 90°C, repetición 3

Velocidad de separación

Los gráficos de velocidad de separación ilustran la rapidez con la que el proceso de separación de aceite ocurre en función del tiempo. La curva representa el comportamiento de la velocidad de separación bajo distintas condiciones experimentales, como el factor de dilución y la temperatura. A lo largo del gráfico, se observa cómo la velocidad inicial tiende a incrementarse hasta alcanzar un punto de estabilización, lo que refleja el momento en que la separación del aceite se vuelve constante. Las diferencias entre las curvas para cada conjunto de condiciones permiten analizar la influencia de los factores en la dinámica del proceso.

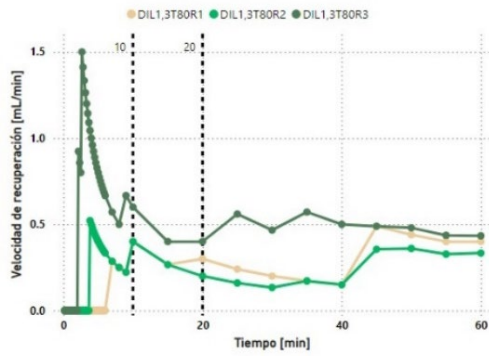


Gráfico 1 – Tratamiento 1.3 a 80°C, velocidad de separación

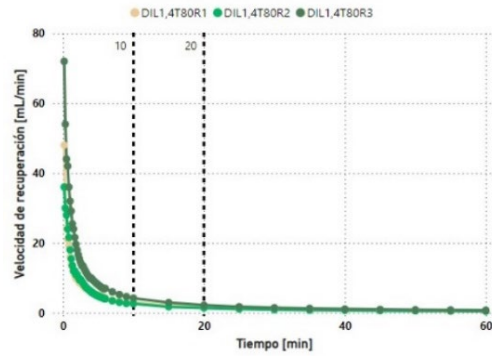


Gráfico 4 – Tratamiento 1.4 a 80°C, velocidad de separación

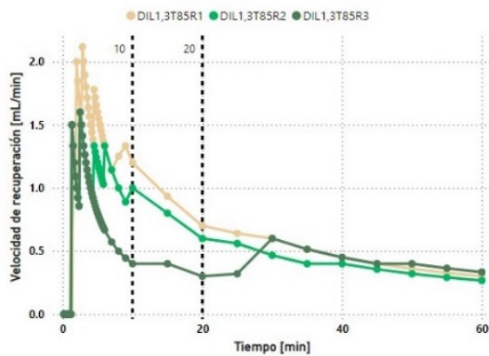


Gráfico 2 – Tratamiento 1.3 a 85°C, velocidad de separación

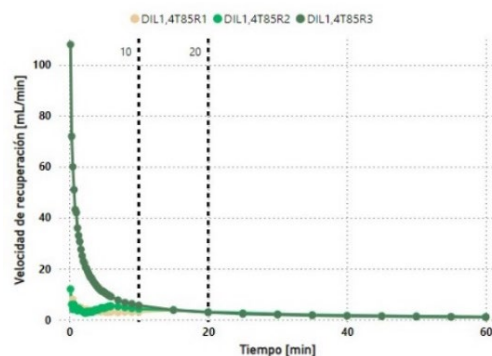


Gráfico 5 – Tratamiento 1.4 a 85°C, velocidad de separación

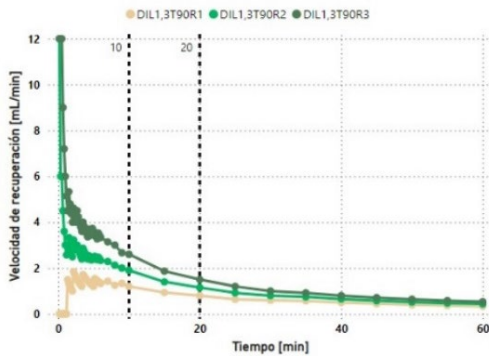


Gráfico 3 – Tratamiento 1.3 a 90°C, velocidad de separación

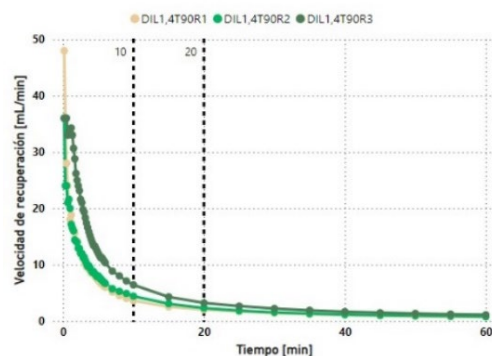


Gráfico 6 – Tratamiento 1.4 a 90°C, velocidad de separación

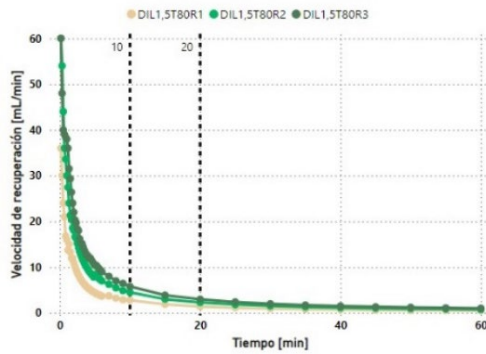


Gráfico 7 – Tratamiento 1.5 a 80°C,
velocidad de separación

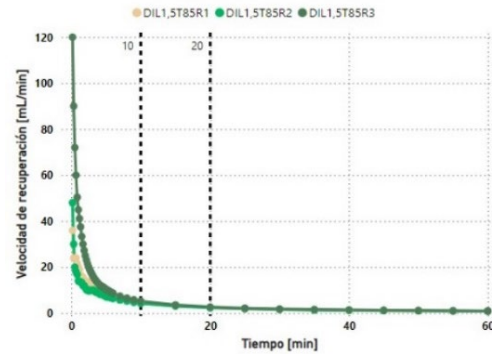


Gráfico 8 – Tratamiento 1.5 a 85°C,
velocidad de separación

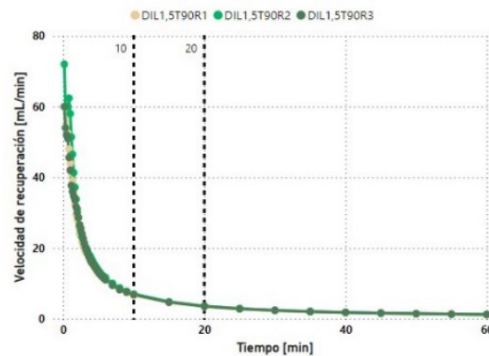


Gráfico 9 – Tratamiento 1.5 a 90°C, velocidad de separación

La velocidad de separación de aceite para el factor de dilución 1.3 no se estabilizó con temperaturas de 80 y 85°C, lo hizo con la temperatura de 90°C y esto pasó después de los 20 minutos de operación. Para el factor de dilución 1.4, la velocidad de separación alcanzó su máximo valor y la estabilidad antes de los 10 minutos de operación con temperaturas de 80 y 85°C, y sólo con la temperatura igual a 90°C se tardó entre 10 y 20 minutos de operación para alcanzar el valor máximo y la estabilidad. Para el factor de dilución 1.5, la velocidad de separación alcanzó un valor máximo y estable entre los 10 y 15 minutos de operación para cada una de las temperaturas de estudio: 80, 85 y 90°C.

Eficiencia de separación

Los gráficos de eficiencia de separación muestran el porcentaje de aceite recuperado a lo largo del proceso bajo diferentes condiciones de operación. Las curvas reflejan cómo varía la eficiencia con el tiempo, proporcionando una visualización del desempeño del sistema de separación en diferentes escenarios de dilución y temperatura. Este gráfico es clave para evaluar el rendimiento del proceso, ya que permite identificar los parámetros que favorecen una mayor recuperación de aceite, mostrando el comportamiento de la eficiencia desde el inicio hasta su estabilización.

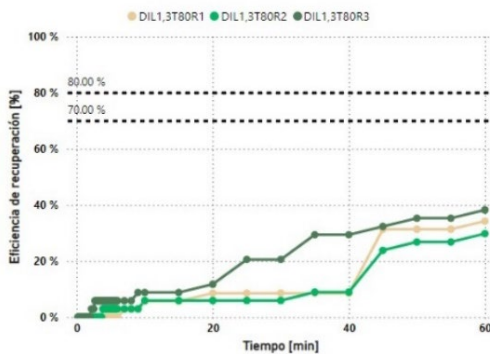


Gráfico 10 – Tratamiento 1.3:80°C,
eficiencia de separación

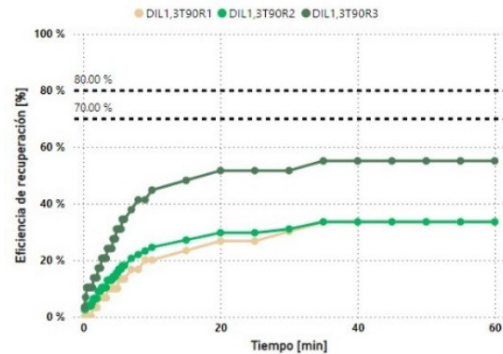


Gráfico 12 – Tratamiento 1.3:90°C,
eficiencia de separación

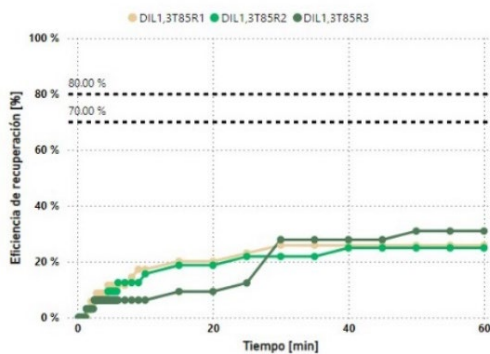


Gráfico 11 – Tratamiento 1.3:85°C,
eficiencia de separación

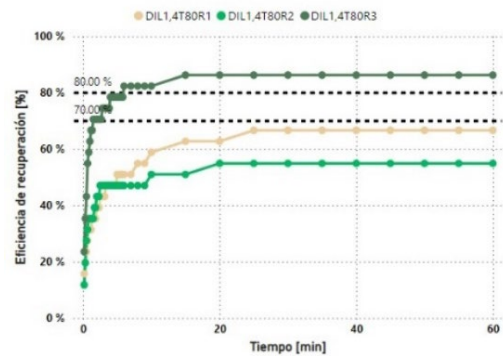


Gráfico 13 – Tratamiento 1.4:80°C,
eficiencia de separación

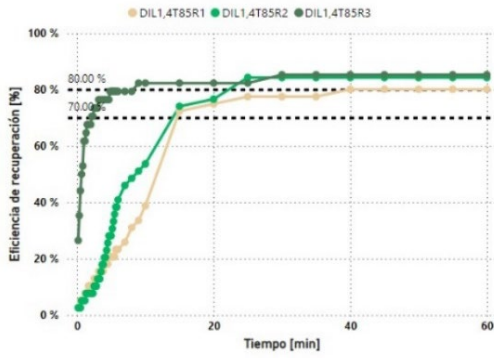


Gráfico 14 – Tratamiento 1.4:85°C, eficiencia de separación

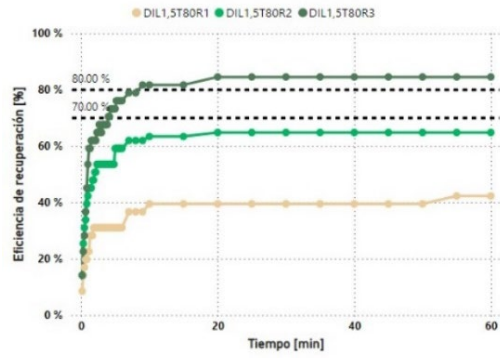


Gráfico 16 – Tratamiento 1.5:80°C, eficiencia de separación

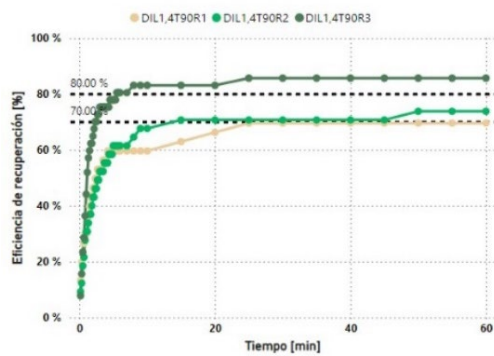


Gráfico 15 – Tratamiento 1.4:90°C, eficiencia de separación

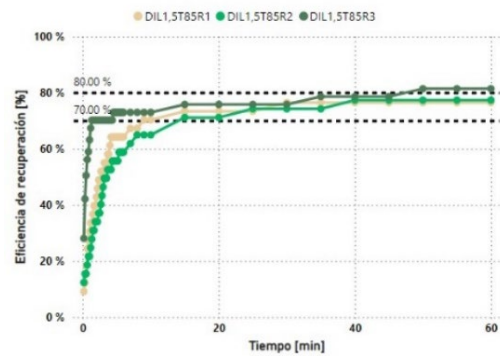


Gráfico 17 – Tratamiento 1.5:85°C, eficiencia de separación

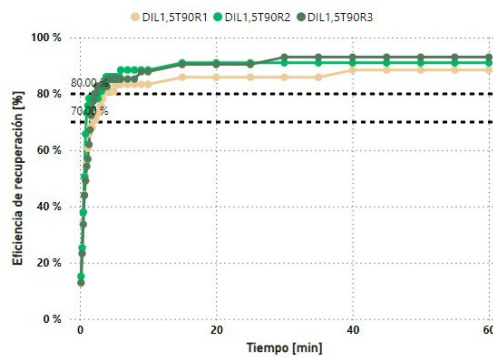


Gráfico 18 – Tratamiento 1.5:90°C, eficiencia de separación

Para el factor de dilución 1.3 a temperaturas de 80 y 85°C la eficiencia de separación estuvo por debajo del 40%, entre el 27 y 39%, y para la temperatura igual a 90°C se recuperó aproximadamente el 59% del crudo. Para la temperatura de 80°C durante el ensayo no hubo estabilidad en la eficiencia, pero, para las temperaturas 85 y 90°C la eficiencia se estabilizó entre 35 y 40 min de operación. La eficiencia de separación para el factor de dilución 1.4 tuvo un mayor valor, entre el 54 y 86%, pero, para las temperaturas de 85 y 90°C el rango estuvo entre el 70 y 86%. La estabilidad para las temperaturas 80 y 90°C se alcanzó a los 25 minutos de operación y para la temperatura igual a 85°C se alcanzó a los 30 min de operación. Para un factor de dilución 1.5 la eficiencia de estuvo en un rango entre el 40 y 93% para la temperatura de 80°C estuvo entre el 40 y 85%, para las temperaturas 85 y 90°C estuvo entre el 75 y 93%. El tiempo de estabilidad para el factor de dilución 1.5 fue de 15 a 20 min de operación.

Análisis estadístico

- **Análisis de varianza (ANOVA)**

Se empleó para determinar si existen diferencias significativas entre los factores experimentales y su impacto en las variables de respuesta (velocidad y eficiencia de separación). Este análisis permite evaluar el efecto individual de los factores dilución y la temperatura sobre el desempeño del proceso, así como la posible interacción entre ellos.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Dilucion	2	11097	5548	51.396	3.62e-08	***
Temperatura	2	828	414	3.834	0.041	*
Dilucion:Temperatura	4	830	207	1.921	0.151	
Residuals	18	1943	108			

Imagen 20 – Análisis de varianza, eficiencia de separación

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Dilucion	2	15913	7956	12.357	0.000419	***
Temperatura	2	47	24	0.037	0.964112	
Dilucion:Temperatura	4	701	175	0.272	0.892126	
Residuals	18	11590	644			

Imagen 21 – Análisis de varianza, velocidad de separación

Para la eficiencia de separación, el análisis de varianza mostró que tanto el factor de dilución como la temperatura tienen efectos significativos sobre la velocidad de separación, siendo el factor de dilución el más influyente sobre la variable de respuesta. No se observó un efecto significativo en la interacción entre ambos factores, lo que indica que su combinación no tiene un impacto relevante adicional sobre la eficiencia.

En el caso de la velocidad de separación, el análisis ANOVA indicó que el factor de dilución presenta un efecto significativo. Esto implica que la temperatura no contribuye sustancialmente a modificar esta variable.

- **Prueba de Tukey**

Esta prueba se aplicó para realizar comparaciones múltiples entre los grupos experimentales después de realizar el ANOVA. Esta prueba permite identificar qué combinaciones de factores presentan diferencias significativas entre sí, proporcionando una clasificación de los tratamientos en distintos grupos.

	Eficiencia groups		
1.5:90	90.81333	a	
1.4:85	83.26000	a	
1.5:85	78.45667	a	
1.4:90	76.37000	a	
1.4:80	69.28000	ab	
1.5:80	63.87000	ab	
1.3:90	40.72333	bc	
1.3:80	34.10000	c	
1.3:85	27.23667	c	

Imagen 22 – Prueba de Tukey, eficiencia de separación

	Eficiencia groups		
1.5:85	68.0000000	a	
1.5:90	64.0000000	a	
1.4:80	52.0000000	a	
1.5:80	52.0000000	a	
1.4:85	44.0000000	a	
1.4:90	40.0000000	a	
1.3:90	8.6000000	a	
1.3:85	1.7666667	a	
1.3:80	0.8333333	a	

Imagen 23 – Prueba de Tukey, velocidad de separación

Para la eficiencia de separación, la prueba de Tukey (*imagen 23*) determinó que los tratamientos 1.4 a 85°C, 1.4 a 90°C, 1.5 a 85°C y 1.5 a 90°C (*grupo a*) no presentan diferencias significativas entre sí y corresponden a los tratamientos con mayor eficiencia. Los tratamientos 1.4 a 80°C y 1.5 a 80°C (*grupo ab*) también comparten similitudes estadísticas, aunque difieren del *grupo a*. Esto refuerza que el aumento en la dilución y la temperatura incrementa la eficiencia. En cuanto a la velocidad de separación, todos los tratamientos se ubicaron en el mismo grupo (*a*), lo que sugiere la inexistencia de diferencias significativas entre ellos.

- **Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)**

Se utilizó para verificar si los datos de las variables de respuesta se ajustan a una distribución normal. Esta verificación es importante para garantizar la validez de los resultados del análisis ANOVA, ya que uno de los supuestos de este análisis es que los residuos del modelo sigan una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk evalúa este supuesto al comparar la distribución de los datos con una distribución normal ideal, lo que permite determinar si se pueden confiar en los resultados del análisis estadístico o si es necesario considerar ajustes adicionales en el modelo.

shapiro-wilk normality test

```
data: residuals(modelo)
W = 0.92981, p-value = 0.06836
```

Imagen 24 – Test de normalidad, eficiencia de separación

shapiro-wilk normality test

```
data: residuals(modelo)
W = 0.84332, p-value = 0.000852
```

Imagen 25 – Test de normalidad, velocidad de separación

Para la eficiencia de separación (*imagen 25*), el valor p obtenido fue mayor a 0.05, lo cual, valida los resultados del análisis ANOVA, indicando que los datos se distribuyen de manera normal y que el análisis estadístico es fiable. Para la velocidad de separación (*imagen 26*), el valor p fue menor a 0.05, lo que cuestiona la confiabilidad del análisis ANOVA en este caso. Esto sugiere que los datos no se ajustan a una distribución normal, por lo que se recomienda utilizar pruebas no paramétricas adicionales para confirmar los resultados.



Fig. 1. Imagen corporativa Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Nota: fuente <https://www.ieee.org/> Esta entidad edita y normaliza la presentación de documentos científicos en el área de ingenierías.



Fig. 2. Logo Universidad de Antioquia

Nota. Fuente <http://www.udea.edu.co>

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio ha demostrado que el factor de dilución y la temperatura son factores clave en la velocidad de separación del aceite crudo de palma. Los resultados sugieren que el factor de dilución de 1.5 a temperatura de 90°C son las condiciones apropiadas para mejorar la velocidad de separación, alcanzando la estabilidad en un período significativamente corto, antes de los 10 minutos de operación. Esta combinación favorece la eficiencia del proceso, ya que permite un rápido acceso al aceite separado, lo cual es esencial para aumentar la productividad y reducir el tiempo de residencia en la preclarificación. En contraste, el factor de dilución de 1.3, aunque se estabiliza a 90°C, requiere más tiempo (más de 20 minutos) para lograr dicha estabilización. Esto indica que, si bien un mayor factor de dilución puede contribuir a una separación más rápida, temperaturas inferiores a 90°C no son suficientes para alcanzar niveles de eficiencia a bajos tiempos. Este hallazgo sugiere que a factores de dilución 1.3 y 1.4, es necesario aplicar temperaturas iguales o superiores a los 85°C para disminuir el tiempo que requiere el proceso de separación.

Para el factor de dilución de 1.5, se observó una estabilidad rápida y uniforme en todas las temperaturas evaluadas, 80, 85 y 90°C, lo que indica que este nivel de dilución ofrece flexibilidad en cuanto a la temperatura sin sacrificar la velocidad de separación. Este comportamiento sugiere que, al utilizar una mayor dilución, se facilita la movilidad de las partículas de aceite, lo cual reduce la dependencia del control de temperatura estricto. Esta conclusión resulta particularmente útil para mejorar la operación, ya que permite mantener una eficiencia elevada sin necesidad de operar constantemente a la temperatura más alta. Este factor de dilución permite acelerar la separación del aceite disminuyendo el tiempo de residencia en el preclarificador 1 y un tiempo de residencia bajo, menor a 20 minutos de operación, permite disminuir las pérdidas en los efluentes.

En términos de eficiencia de separación, se evidenció que los factores de dilución y las temperaturas deben ajustarse minuciosamente para alcanzar un nivel elevado de recuperación de aceite. Los resultados muestran que el factor de dilución 1.3, incluso a temperaturas elevadas, no permite alcanzar eficiencias satisfactorias (por encima del 70%) de forma rápida. En cambio, el factor de dilución de 1.4 logró mejorar considerablemente la eficiencia en tiempos reducidos (10 a 20 minutos), especialmente a temperaturas de 90°C (10 minutos), lo cual confirma su efectividad.

Por otro lado, el factor de dilución de 1.5 mantuvo una eficiencia estable, con porcentajes altos de recuperación del aceite en el rango de tiempo de 10 a 15 minutos, lo que refuerza su conveniencia para maximizar la recuperación sin prolongar los tiempos de operación. Estos hallazgos son cruciales para la empresa, ya que ofrecen una guía práctica para reducir las pérdidas de aceite durante la preclarificación, mejorando así la tasa de extracción de aceite (TEA) y en consecuencia, la rentabilidad del proceso.

A partir de estos resultados, es recomendable que Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A. ajuste sus operaciones hacia un factor de dilución de 1.4 o 1.5, manteniendo las temperaturas entre 80 y 85°C. Estas condiciones no solo aumentan la velocidad y la eficiencia de separación, sino que también permiten flexibilidad operativa sin sacrificar la calidad del aceite extraído. Además, se sugiere la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real de la viscosidad y la temperatura del licor de prensa para afinar aún más el control sobre el proceso de preclarificación.

La investigación demostró que la selección adecuada de las condiciones de operación, específicamente el factor de dilución y la temperatura, puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso de extracción de aceite de palma. El uso de un diseño experimental factorial permitió identificar y validar las combinaciones favorables de estas variables, aportando una metodología cuantitativa y reproducible para la toma de decisiones en el proceso de preclarificación.

REFERENCIAS

- [1] Agronegocios. (2022, 19 agosto). Pequeños palmicultores del Urabá cosechan 40 toneladas de fruto por hectárea anual. AGRONEGOCIOS. <https://www.agronegocios.co/agricultura/pequenos-palmicultores-del-uraba-siembran-40-toneladas-de-fruto-por-hectarea-anual-3427917>
- [2] Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 42, 1260-1278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.073>
- [3] Antonio, Q. V. J. (2022). Implementación de la metodología Kaizen para mejorar el rendimiento del proceso de clarificación en la planta extractora Oleaginosas Amazónicas S.A. – Ucayali 2021. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5994>
- [4] Bioplanta Palmera para el Desarrollo S.A. (2023, 18 enero). Extractora de aceite de palma alto oléico. BioPlanta. <https://bioplanta.co/nosotros-bioplanta/>
- [5] Cortes, C. I. (2014). Caracterización de pérdidas de aceite durante el proceso de extracción en plantas de beneficio para el material híbrido alto oleico (*elaeis oleífera* x *elaeis guineensis*). SIREDA. <https://sired.udenar.edu.co/7622/1/9.pdf>
- [6] EFFECT OF NEW PALM OIL MILL PROCESSES ON THE EFB AND POME UTILIZATION – Page 1000 – Journal of Oil Palm Research. (2024, 12 junio). <http://jopr.mpob.gov.my/effect-of-new-palm-oil-mill-processes-on-the-efb-and-pome-utilization/1000/>
- [7] Hashim, K., Tahiruddin, S., & Asis, A. J. (2012). Palm and Palm Kernel Oil Production and Processing in Malaysia and Indonesia. En Elsevier eBooks (pp. 235-250). <https://doi.org/10.1016/b978-0-9818936-9-3.50011-3>
- [8] Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental*

- Technology & Innovation, 9, 169-185. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.003>
- [9] Kandiah, S. I. V. A. S. O. T. H. Y., & Batumalai, R. (2013). Palm oil clarification using evaporation. *J. Oil Palm Res*, 25(2), 235-244.
- [10] Liew, W. L., Kassim, M. A., Muda, K., Loh, S. K., & Affam, A. C. (2015). Conventional methods and emerging wastewater polishing technologies for palm oil mill effluent treatment: A review. *Journal Of Environmental Management*, 149, 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.016>
- [11] Mogollón, D. I. N., Angarita, E. E. Y., & Núñez, J. A. G. (2011, 1 enero). Preclarificador de aceite crudo de palma: diseño y operación. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/view/10503>
- [12] Mondragón Serna, A y Pinilla Betancourt, C. (2020). Aceite de palma alto oleico: propiedades fisicoquímicas y beneficios para la salud humana. Fedepalma. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11645>
- [13] Mozzon, M., Pacetti, D., Lucci, P., Balzano, M., & Frega, N. G. (2013). Crude palm oil from interspecific hybrid *Elaeis oleifera*×*Elaeis guineensis*: Fatty acid regiodistribution and molecular species of glycerides. *Food Chemistry*, 141(1), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.016>
- [14] Oktaviani, M., Arpy, A., & Pratiwi, P. A. (2024, 8 junio). Viscosity. <https://heijournal.id/index.php/chj/article/view/17>
- [15] Ortiz, K. S., Camperos, J., Cortés, I., Caicedo, A., Castilla, C., & Ceballos, D. (2021, 26 noviembre). Validación a escala comercial del punto óptimo de cosecha para el cultivar híbrido interespecífico OxG Cereté x Deli. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13326>
- [16] Riba, R. J., Bernat, B. E., Baquero, B. G., Puig, P. R., & Rius, R. A. (2010). Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diesel. *Afinidad IQS*. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/269078>
- [17] Rincón, S., Rueda, L., Yáñez, E., & García, J. (2007). Metodología de las pruebas de sedimentación para el estudio del proceso de clarificación del aceite crudo de palma.

Ceniavances. <http://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1331>

- [18] Rupani, P. F., Singh, R. P., Ibrahim, M. H., & Esa, N. (2010). Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as a sustainable practice. *World Applied Sciences Journal*, 11(1), 70-81.
- [19] Shamsuddin, R., Singh, G., Kok, H. Y., Rosli, M. H., Cahyono, N. A. D., Lam, M. K., Lim, J. W., & Low, A. (2021). Palm Oil Industry—Processes, By-Product Treatment and Value Addition. En *Advances in Science, Technology & Innovation/Advances in science, technology & innovation* (pp. 121-143). https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_8
- [20] Yañez, E. E., Díaz, Ó. M., García, J. A., & Castillo, E. F. (2008). Determinación del nivel de dilución apropiado en el proceso de clarificación y diseño de un sistema de control automático de la dilución del licor de prensa. *Palmas*, 29(4), 21-30. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1361/1361>