

**SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE - AGUA - LODOS  
PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE  
PALMA MEDIANTE TÉCNICAS DE MICROONDAS**



**JOHANNA MARCELA BASTOS BOTELLO  
LUZ SAYDA ZAMBRANO BARRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES  
BUCARAMANGA  
2006**

**SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE - AGUA - LODOS  
PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE  
PALMA MEDIANTE TÉCNICAS DE MICROONDAS**

**JOHANNA MARCELA BASTOS BOTELLO  
LUZ SAYDA ZAMBRANO BARRERA**

Trabajo presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniera Química

Director

**EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY**  
Ingeniero Químico Ph.D.

Codirector

**CARLOS ALBERTO FERNÁNDEZ BOTÍA**  
Ingeniero Químico.  
Investigador División Usos y Procesos  
Cenipalma - C.E.P.V - Zona Central.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES  
BUCARAMANGA  
2006**

*Terminamos una etapa de estudiantes  
Cada una de las historias que nos acompañaron  
Han hecho de nosotras unas profesionales*

*Dios, Nuestra Familia, Profesores y Amigos  
Colocaron un grano de arena  
Para la nueva etapa de nuestra vida  
Que ahora comienza.*

*Sayda y Johanna*



## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos:

Al “*profe*” Edgar Fernando Castillo, por haber dedicado parte de su tiempo a escucharnos y a solucionar algunos inconvenientes presentados, por las palabras de aliento, por intercambiar sonrisas, interrogantes, preocupaciones e ideas.

Al ingeniero Carlos Fernández por el entusiasmo brindado, por estar pendiente de los detalles, por su colaboración y dedicación en la ejecución de este proyecto.

Al ingeniero Leonardo Castellanos, por permitirnos desarrollar la parte inicial de experimentación en las instalaciones de la Planta de Beneficio de Palmas Oleaginosas Bucarelia y brindar apoyo logístico en el envío de las muestras al laboratorio de Bucaramanga.

A la ingeniera Rocío Pérez “*Rope*”, por todos sus valiosos aportes e ideas en la creación y desarrollo de este trabajo; también por los comentarios alentadores que a buena hora llegaron.

A todas las personas vinculadas de una u otra forma con el desarrollo del proyecto, al CEIAM, a Cenipalma y finalmente al personal operativo de Bucarelia tanto los de laboratorio de control de calidad como los de la planta.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. CONCEPTOS TEÓRICO</b>	4
1.1 ACEITE CRUDO DE PALMA	4
1.1.1 Generalidades del aceite crudo de palma.	4
1.1.2 Proceso de extracción de aceite de palma.	5
1.2 FUNDAMENTOS DE SEDIMENTACIÓN POR GRAVEDAD	6
1.2.1 Ecuaciones de Stokes y su influencia en la teoría de sedimentación por gravedad	6
1.2.2 Zonas de sedimentación	7
1.2.3 Velocidad de Sedimentación	8
1.3 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE MICROONDAS	8
1.3.1 Generalidades	8
1.3.2 Interacción de las ondas electromagnéticas con el agua	10
1.3.3 Generación de calor	10
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	11
2.1 RECONOCIMIENTO DEL PROCESO	12

2.2	PRIMERA FASE DE EXPERIMENTACIÓN	12
2.2.1	Cálculo de la Energía Promedio Consumida durante un Minuto de Operación del Horno.	12
2.2.2	Determinación de los dos fluidos de proceso para someterlos al tratamiento con MW.	12
2.3	SEGUNDA FASE: EXPOSICIÓN A LAS MICROONDAS	15
2.3.1	Experimentación Final para Muestras de LP sin Dilución.	15
2.3.1.1	Determinación de la relación existente entre $\lambda_{calc}$ y $\lambda_{real}$	15
2.3.1.2	Efecto de las MW sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado.	16
2.3.2	Experimentación Final para Muestras de Recuperados de Centrifuga.	17
2.4	DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON MICROONDAS	17
2.4.1	Descripción del Análisis	18
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	19
3.1	PRIMERA FASE DE EXPERIMENTACIÓN – PRUEBAS PRELIMINARES	19
3.1.1	Energía consumida por el horno	19
3.1.2	Determinación de los dos fluidos de proceso con mejor comportamiento en las pruebas de sedimentación	20
3.2	SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTACIÓN: EXPOSICIÓN A LAS MICROONDAS	22

3.2.1	Experimentación Definitiva para Muestras de Licor de Prensa	22
3.2.1.1	Determinación de la relación existente entre $\lambda_{\text{calc}}$ y $\lambda_{\text{real}}$	22
3.2.1.2	Evaluación del efecto de las microondas sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado	24
3.2.2	Experimentación Definitiva para Recuperados de Centrífuga.	26
3.2.2.1	Evaluación del efecto de las microondas sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado, en muestras de Recuperados de Centrífuga	27
3.3	DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE DESPUÉS DE HABER SIDO TRATADO CON MICROONDAS	29
3.3.1	Análisis Cualitativo	30
3.3.2	Análisis Cuantitativo	30
4.	<b>CONCLUSIONES</b>	31
5.	<b>RECOMENDACIONES</b>	33
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	34
	<b>ANEXOS</b>	37

## LISTA DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
Tabla 1.	Tratamientos aplicados en la primera fase: Determinación de fluidos	13
Tabla 2	Tratamientos para aplicar en la fase II para el licor de prensa	17
Tabla 3	Tratamientos para aplicar en la fase II para los recuperados de centrífuga	17
Tabla 4	Eficiencia de sedimentación y composición volumétrica para licor de prensa y recuperados de centrífuga	21
Tabla 5	Valores de velocidad determinados en tres momentos específicos de la sedimentación	25
Tabla 6	Valores de eficiencia determinados en tres momentos específicos de la sedimentación	25
Tabla 7	Condiciones de muestreo y exposición a MW del aceite que se llevó al análisis cromatográfico	29
Tabla 8	Comparación de los resultados obtenidos en el análisis de ácidos grasos con la composición típica reportada del aceite de palma colombiano	30

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de palma, con la identificación de los puntos de muestreo para las corrientes que se van a estudiar	5
Figura 2. Esquema de las zonas de sedimentación correspondientes a las gráficas de tiempo de sedimentación contra la altura de líquido claro en la interfase.	7
Figura 3. Comportamiento de diferentes medios ante la irradiación con MW	9
Figura 4. Esquema general del cambio de orientación de moléculas de agua bajo un campo eléctrico E.	10
Figura 5. Diagrama de la metodología experimental empleada	11
Figura 6. Metodología empleada en las pruebas de sedimentación.	13
Figura 7. Montaje para las pruebas de sedimentación	14
Figura 8. Representación general del cálculo de la composición volumétrica	15
Figura 9. Esquema metodológico para la comparación entre el comportamiento real y el calculado para diluciones de licor de prensa	16

Figura 10.	Energía promedio consumida por el horno durante un minuto de operación para cada uno de sus niveles de potencia	19
Figura 11	Perfil de la velocidad de sedimentación para muestras de licor de prensa a 90 – 95 °C	20
Figura 12.	Perfil de la velocidad de sedimentación para recuperados de centrífuga a 90 – 95 °C	21
Figura 13.	Comportamiento de la $\lambda_{real}$ respecto a $\lambda_{cal}$	22
Figura 14.	Comportamiento de la temperatura final de cada una de las diluciones en los diferentes tiempos de exposición a las microondas	24
Figura 15.	Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de 2,5 a diferentes Tiempos de Exposición a Microondas	25
Figura 16.	Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de 2,5 a diferentes Tiempos de Exposición a Microondas	26
Figura 17.	Comportamiento de la temperatura final de cada uno de los tiempos de exposición a las microondas	27
Figura 18.	Perfil de la velocidad de sedimentación para Recuperados de Centrífuga a un tiempo de 20 s	28
Figura 19.	Perfil de la eficiencia de sedimentación para Recuperados de Centrífuga a un tiempo de 20 s	28

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A Resultados gráficos de las pruebas de sedimentación después de haber aplicado el tratamiento con microondas	37
ANEXO B Propiedades fisicoquímicas del aceite crudo de palma	44
ANEXO C Glosario	46
ANEXO D Resultados del análisis cromatográfico para las muestras de aceite testigo e irradiada	50
ANEXO E Registro fotográfico	53

## RESUMEN

### TITULO:

**SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE - AGUA - LODOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA MEDIANTE TÉCNICAS DE MICROONDAS\***

### AUTORES:

Johanna Marcela Bastos Botello  
Luz Sayda Zambrano Barrera \*\*

### PALABRAS CLAVE:

Microondas, aceite de palma, emulsión.

### DESCRIPCIÓN:

El proceso de extracción de aceite de palma requiere la separación de emulsiones aceite – agua – lodos. Para lograr este objetivo es necesario usar técnicas de sedimentación y/o centrifugación. Sin embargo, en diferentes corrientes del proceso se presentan pérdidas significativas y su reducción implica un aumento en el tamaño de los equipos. Experimentos preliminares, muestran que la radiación con microondas (2.45 GHz) aplicada en períodos menores de un minuto, mejoran la velocidad de sedimentación y también la eficiencia de sedimentación de la mezcla.

Las corrientes de licor de prensa (aceite bruto de prensa) y recuperados de centrífuga fueron expuestas a las microondas; los tiempos de exposición probados estuvieron en el intervalo de 10 s a 60 s con incrementos de 10 s; en el caso del licor de prensa, también fueron evaluadas diferentes relaciones de dilución y los resultados fueron comparados con los perfiles de velocidad y eficiencia de sedimentación para muestras de los mismos fluidos sin haber sido irradiadas y se mantuvo el perfil de temperatura dentro del rango de operación de la planta (90 °C – 95 °C). Finalmente se realizó una prueba de cromatografía para determinar el perfil de ácidos grasos de muestras una radiada y una sin radiar para determinar el efecto de las microondas en la calidad del aceite.

Los mejores resultados fueron obtenidos para muestras expuestas a las microondas durante 30 s y 20 s, porque fue posible romper los equilibrios de cargas y polaridades en las emulsiones a menores temperaturas que las utilizadas en el proceso (las temperaturas alcanzadas están entre 55 °C - 65 °C). Aunque el proyecto no permite la aplicación inmediata de esta tecnología en las plantas de proceso, si demuestra que existe un efecto favorable de las microondas en el rompimiento de emulsiones y es necesario continuar con esta línea de investigación pero operando ahora el equipo en forma continua.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química  
Director del proyecto Edgar Fernando Castillo Monroy, Ph.D.,  
Co-director del proyecto Carlos Alberto Fernández Botía, Chem. Eng. de Cenipalma.

## SUMMARY

### TITLE:

**SEPARATION OF EMULSIONS OIL – WATER – SLUDGE COMING FROM PALM OIL EXTRACTION PROCESS THROUGH MICROWAVES TECHNIQUES \***

### AUTHORS:

Johanna Marcela Bastos Botello  
Luz Sayda Zambrano Barrera \*\*

### KEY WORDS:

Microwaves, palm oil, emulsion.

### DESCRIPTION:

The palm oil mills extraction process requires the separation of oil – water – sludge emulsions. For this purpose is necessary to use sedimentation and/or centrifugation techniques. However, significant losses are presented in different process streams and their reduction implies an increase in the size of the equipments. Preliminary experiments, showed that microwaves radiation (2.1 GHz) applied in periods lesser to one minute, improves the sedimentation speed and also the sedimentation efficiency of the mixture.

Press liquor stream (press crude oil) and recovered stream of the centrifugal step were exposed to the microwaves; the exposure times tested were the interval from 10 s to 60 s with increments of 10 s; in the press liquor case, different ratio dilution oil/water were also evaluated and the results were compared with the speed and efficiency sedimentation profiles for samples of these same fluids without being irradiated. It was maintained the temperature profile for the separation steps between plant operation range (90 °C – 95°C). Finally a chromatographic test was made for determining the fatty acids profile of non-irradiated and irradiated samples in order to determine the effect of the microwaves on the oil quality.

The best results were obtained for samples exposed to the microwaves during 30 s and 20 s, because it was possible to break the balances of charges and polarities in the emulsions at a lower temperature that which utilized in the process (the reached temperatures are among 55 °C - 65 °C). Although the project does not allow the immediate application of the technology in the process plants, it proves that a favorable effect of the microwaves in the break of emulsions exists and is necessary to continue with this research topics but now operating the equipment in a continuous way.

---

\* Grade Project.

\*\* Faculty of Physical Chemistry Engineering, Chemical Engineering School  
Project Director Edgar Fernando Castillo Monroy, Ph.D.,  
Project co-director Carlos Alberto Fernández Botía, Chem. Eng. from Cenipalma.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de extracción de aceite de palma ocurre la formación de emulsiones estables de aceite-agua-lodos. Dichas emulsiones están presentes en las corrientes del proceso y son separadas mediante operaciones convencionales de clarificación, centrifugación y decantación, las cuales requieren de altos tiempos de operación para alcanzar un grado de recuperación de aceite aceptable, disminuyendo la eficiencia del proceso. Sin embargo, la pérdida de aceite en diferentes flujos de proceso es inevitable y tratar de reducirlas con las combinaciones tecnológicas con que hoy se tienen es poco probable, ya que implicaría aumentar el volumen de los equipos y por ende un aumento en el espacio requerido, los costos de mantenimiento y la deficiencia en el control en las pérdidas. Adicionalmente, y en particular para las plantas de beneficio, el rompimiento de las emulsiones facilita la separación del aceite lo que permite reducir los tiempos de residencia en la clarificación y con ello afrontar los períodos de alta producción (pico de cosecha), reduciendo las pérdidas de aceite en los efluentes.

Según el informe de Cenipalma <sup>[11]</sup> para el primer semestre de 2006 se reportan a nivel nacional pérdidas de 0.53% aceite/TRFF (7,06 g aceite/l efluente) para las plantas extractoras de aceite, y para la Zona Central se encuentra en 0.58% aceite/TRFF, equivalente a 7.12 g aceite/l efluente.

Entre los métodos tradicionales para separar emulsiones aceite-agua se encuentra la aplicación de calentamiento, rompimiento microbiano, centrifugación y adición química; con estos tratamientos se obtienen separaciones parciales. Los calentamientos convencionales tienen problemas por la lenta transferencia de calor entre los lodos densos, por la acumulación de metales pesados de residuos

sólidos en superficies de transferencia de calor y por la pérdida de volátiles; los desemulsificantes químicos como las poliamidas, están sujetos a regulaciones de descarga en aguas públicas y además pueden que no logren altos niveles en la separación de algunas emulsiones de lodos densos.

Por tal razón, es necesario buscar alternativas que disminuyan el balance másico de pérdidas de aceite en las plantas extractoras colombianas. Una de las tecnologías exploradas científicamente en el tratamiento de emulsiones son las microondas cuyos resultados presentan una alternativa de separación efectiva, con tecnología más limpia y libre de químicos o calentamiento convencional.

La separación de emulsiones aceite-agua y dispersiones usando la radiación de microondas fue usada por primera vez en 1986. *Nicholas Wolf* publicó la patente “*El uso de radiación microondas en la separación de emulsiones y dispersiones de hidrocarburos en agua*” (US Pat. No.4.582.629) <sup>[20]</sup>, este trabajo demostró que una potencia controlada de microondas aplicada a emulsiones aceite-agua podría incrementar las velocidades de separación que con calentamiento convencional, siendo así una nueva forma de separación.

Los investigadores *C. S. Fang, B. Chang, P. Lai, and W. J. Klaila* en 1995, realizaron experimentos con emulsiones agua–aceite, empleado aceite mineral <sup>[4]</sup>. Su trabajo mostró que el calentamiento con microondas es más efectivo para el calentamiento de emulsiones densas viscosas estables, que los calentamientos con gases o con combustibles. Posteriormente se generaron más patentes para la separación de emulsiones, aplicando microondas, específicamente en la industria petrolera.

En 1996 se realizó en la Universidad Industrial de Santander <sup>[15]</sup> una investigación sobre rompimiento de emulsiones agua–crudo, usando ondas electromagnéticas. En este trabajo se encontró que en comparación con un tratamiento termoquímico,

las microondas proporcionan mejores resultados en un tiempo de 17 a 36 veces menor, alcanzando grados de separación de agua de más del 70% en solo 10 minutos.

Así entonces la tecnología de microondas representa un potencial aún no explotado como alternativa de reemplazo y mejoramiento de procesos agroindustriales, dada su facultad de generar energía calorífica dentro de la muestra expuesta, aprovechando sus propiedades dieléctricas y eliminando limitantes en los procesos de transferencia de calor tradicionales; actualmente las investigaciones que se han realizado, se limitan a emulsiones preparadas a nivel de laboratorio estabilizadas con emulsificantes artificiales, especialmente en el área de la petroquímica.

Con el presente trabajo se propone determinar el efecto de la aplicación del tratamiento con microondas en la separación y en la calidad del aceite obtenido de emulsiones aceite-agua proveniente del proceso de extracción de aceite crudo de palma. El contenido de este libro abarca 5 capítulos. El primer capítulo comenzará aclarando algunos conceptos teóricos claves en el desarrollo de la investigación, referentes al proceso de extracción de aceite, procesos de sedimentación y tecnología de microondas. Posteriormente se describirá el procedimiento experimental desarrollado en la investigación, en cada una de sus fases: reconocimiento, escogencia de los fluidos con mejor comportamiento en las pruebas de sedimentación y finalmente la aplicación de microondas para el rompimiento de las emulsiones aceite-agua-lodos.

## 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan conceptos teóricos que se tuvieron en cuenta en el desarrollo del presente trabajo. Su contenido considera primero una descripción general del proceso de extracción de aceite de palma, haciendo énfasis en la etapa de clarificación, junto con pruebas de sedimentación en laboratorio y finalmente la tecnología de microondas.

### 1.1 ACEITE CRUDO DE PALMA

**1.1.1 Generalidades del aceite crudo de palma.** El aceite crudo de palma, proviene de la palma africana (*Elaeis guineensis*) originaria del Golfo de Guinea e introducida al país en 1932. Es un cultivo que tarda entre dos y tres años para producir fruto y puede hacerlo durante 25 años. El fruto de la palma de aceite está formado por tres secciones: el mesocarpio, la nuez y la almendra. El mesocarpio es la parte carnosa del fruto donde se almacena el aceite crudo, la nuez es la corteza o cuesco que contiene la almendra y finalmente la almendra de la cual se obtiene el aceite de palmaste <sup>[10, 21, 22]</sup>.

La superficie sembrada en palma en Colombia (haciendo referencia solamente al espacio ocupado por la palma de aceite y calculada con base en densidades de siembra reportada por los productores) corresponde a 275317 hectáreas, distribuidas en 54 municipios de 15 departamentos como Bolívar, Cesar, Norte de Santander, Santander, Antioquia, Córdoba, Guajira, Magdalena, Caquetá, Casanare, Cundinamarca, Meta, Cauca, Nariño y Valle del cauca; los cuales a su vez son divididos en 4 grandes grupos con base en su ubicación geográfica: zona norte (32,6%), zona central (23,4%), zona oriental (32,4%) y zona occidental (11,6%) <sup>[11]</sup>.



En la extracción por prensado, la fruta es sometida a los procesos de esterilización, desfrutado, digestión, prensado, clarificación y secado; en el anexo C se describen cada una de estas etapas. Como insumo único podría considerarse el agua, utilizada como medio de dilución, producción de vapor y lavado.

## 1.2 FUNDAMENTOS DE SEDIMENTACIÓN POR GRAVEDAD

Es la operación que consiste en separar de una suspensión un fluido claro y un lodo con una concentración elevada de materias sólidas que se depositan por efecto gravitacional y por tener peso específico mayor que el fluido. Se produce Sedimentación por gravedad si la densidad de la partícula ( $\rho$ ) es mayor que la densidad del disolvente ( $\rho_0$ ).

**1.2.1 Ecuaciones de Stokes y su influencia en la teoría de sedimentación por gravedad** [12, 18, 19]. La ecuación para la velocidad de precipitación, formulada en 1851 por G.G. Stokes es el punto de inicio para cualquier discusión sobre sedimentación.

$$\text{LEY DE STOKES} \quad V = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot g \cdot D_p^2}{18\mu} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_p$  = Densidad de partículas de aceite

$\rho$  = Densidad del fluido de aceite crudo

$g$  = Fuerza de gravedad

$D_p$  = Diametro de la particula de aceite

$\mu$  = Viscosidad del fluido

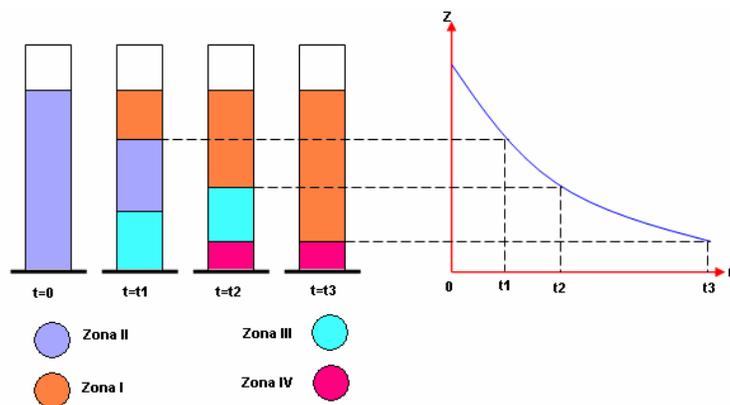
$V$  = Velocidad de levantamiento de particulas de aceite  $D_p$

En este caso particular de la **ley de Stokes** se comprueba qué:

- La velocidad de sedimentación de cada partícula es proporcional a su tamaño.
- La velocidad de sedimentación es proporcional a la densidad de la partícula y a la del medio.
- La velocidad de sedimentación es nula cuando ambas densidades se igualan.
- La velocidad de sedimentación disminuye al aumentar la viscosidad del medio.
- La velocidad de sedimentación aumenta al aumentar el campo de fuerza.

**1.2.2 Zonas de sedimentación.** Fundamentalmente en las muestras a analizar se dejará entrever la presencia de cuatro zonas, descritas de la siguiente manera y representadas en la figura 2:

- **Zona I:** Región que no contiene agua ni sólidos (zona de aceite claro).
- **Zona II:** Zona en la cual se observa una mezcla emulsionada con bajo porcentaje de aceite
- **Zona III:** Fase de transición poco apreciable en la que existe agua y lodos pesados.
- **Zona IV:** Abarcará la zona de lodos pesados.



**Figura 2.** Esquema de las zonas de sedimentación correspondientes a las gráficas de tiempo de sedimentación contra la altura de líquido claro en la interfase.

**1.2.3 Velocidad de Sedimentación.** Esta variable corresponde al volumen de aceite recuperado, dividido en el tiempo transcurrido en el punto a analizar.

$$\text{Velocidad de Sedimentación} = \frac{\text{Volumen de Aceite Recuperado}}{\text{Tiempo}} \quad (2)$$

## **1.3 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE MICROONDAS** [2, 3, 8]

**1.3.1 Generalidades.** Las microondas (MW) son un tipo de energía radiante que forman parte del espectro electromagnético entre las ondas de radio y el infrarrojo, con el fin de aumentar la frecuencia que fluctúa entre 300 y 30.000 MHz, las cuales fueron descubiertas por James Clark Maxwell en 1864.

Las microondas se propagan en un medio dieléctrico, son absorbidas por sustancias polares, transmitidas a través del plástico, papel, vidrio y cerámica, entre otras y reflejadas por los metales. De acuerdo con la teoría de *Maxwell* las ondas electromagnéticas constan de dos campos, uno eléctrico y otro magnético que forman un ángulo de 90 grados entre sí y cada uno de los cuales son función del tiempo.

Algunas ventajas del uso de la tecnología microondas son: calentamiento sin limitaciones de transferencia de calor superficial (absorción volumétrica, evitando el sobrecalentamiento de la capa superficial de las sustancias tratadas), calentamiento rápido y selectivo de áreas húmedas y eliminación de la oxidación de la superficie del material tratado, ahorros energéticos y de material, alta eficiencia de transformación de la energía de las ondas electromagnéticas, además de que las microondas solamente calientan el producto y no el aire adentro, por lo cual es desplazada menor energía al ambiente local.

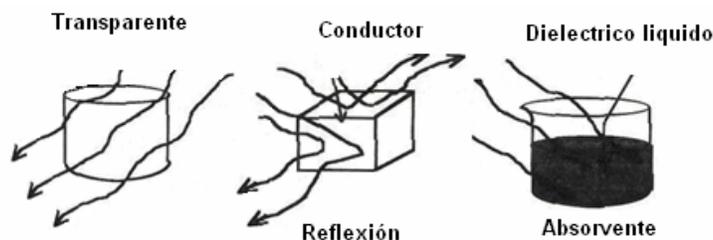
La penetración de la microonda en el material depende básicamente de:

- Constante dieléctrica: capacidad de un material de absorber energía.
- Factor de pérdida: conversión de energía electromagnética en calor.
- Tangente de pérdidas: capacidad de un material de ser penetrado por un campo eléctrico y disipar energía eléctrica como calor
- Frecuencia de la onda

Se ha encontrado que en algunos casos el uso de ondas electromagnéticas presenta limitaciones como:

- Si se tiene un producto guardado en un material conductor no se produce el efecto de calentamiento interior, debido a que el campo no puede penetrar el metal, sino que se transmite a través de la superficie del conductor.
- Algunos sólidos amortiguan las vibraciones inducidas por las MW y otros continúan absorbiendo energía aún en la ausencia de solventes polares, haciendo los materiales susceptibles a sobrecalentamiento.
- La imposibilidad de medir la temperatura dentro de la cavidad, ya que las termocuplas son afectadas por el campo eléctrico intenso y sensores tales como termómetros infrarrojos pueden únicamente sondear la temperatura superficial.

En la práctica los campos son generalmente funciones sinusoidales con frecuencia  $f$ , periodo  $T = 1/f$  y frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ . En la figura 3 podemos observar el comportamiento de diferentes medios ante la irradiación con ondas microondas.

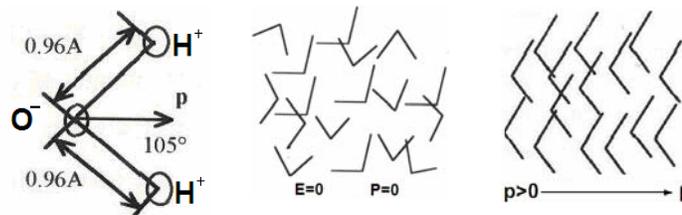


**Figura 3.** Comportamiento de diferentes medios ante la irradiación con MW.

Se han reportado estudios sobre las aplicaciones de tecnologías de microondas en ciertas actividades relacionadas con la industria del aceite de palma para evaluar la calidad de los frutos que llegan a la planta de procesamiento [3, 6, 7].

**1.3.2 Interacción de las ondas electromagnéticas con el agua.** Gracias a su configuración asimétrica, las moléculas de agua tienen una polarización alta, esto la convierte en un material ideal para calentamiento con ondas electromagnéticas. El comportamiento de las moléculas de agua al ser irradiadas con MW se representa en la figura 4.

**Figura 4.** Esquema general del cambio de orientación de moléculas de agua bajo un campo eléctrico E.

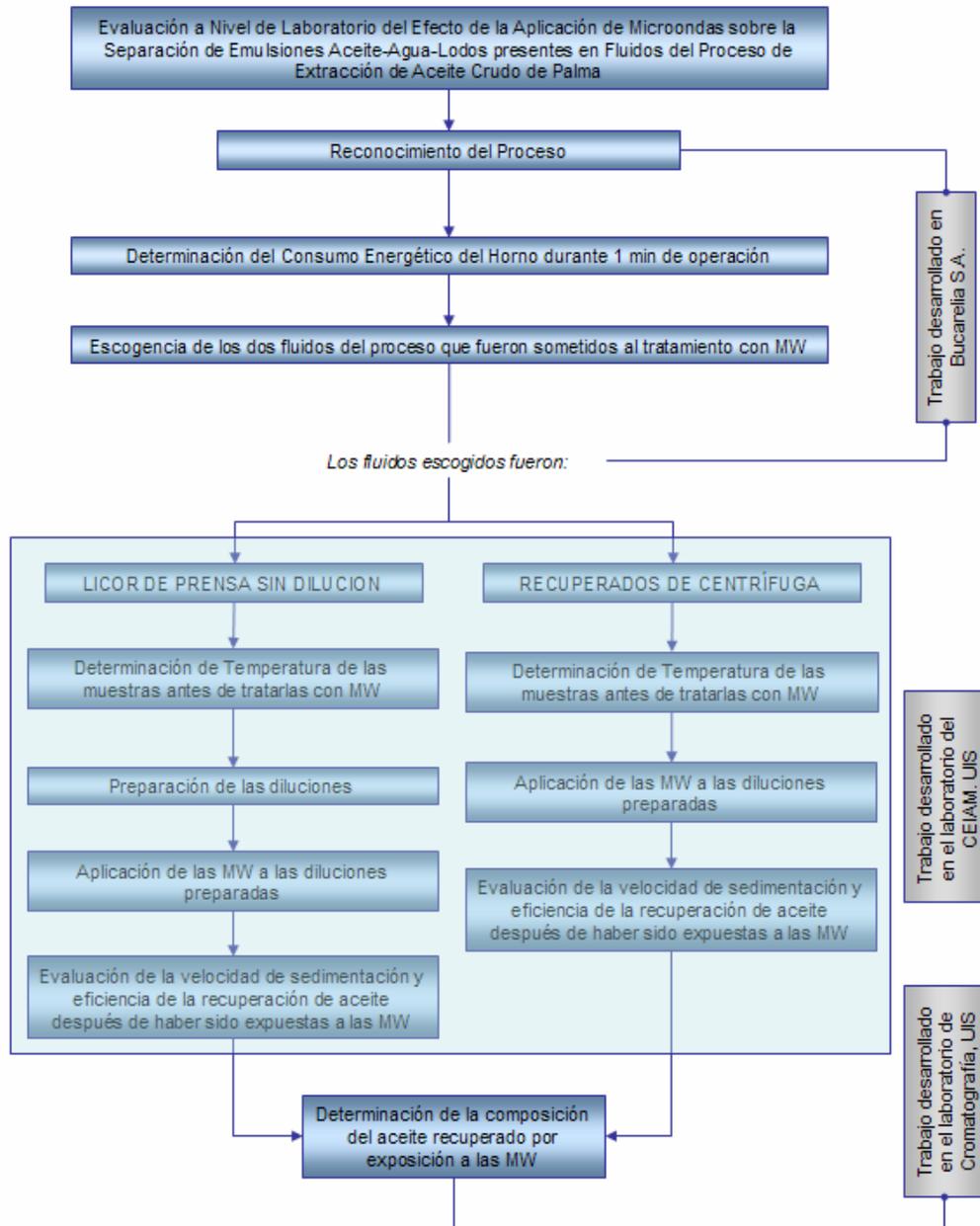


**1.3.3 Generación de calor.** La onda interactúa directamente con el medio y la acción alternante del campo eléctrico ocasiona movimientos de las moléculas polares o de los iones cargados eléctricamente en la sustancia expuesta. Los movimientos pueden ser de traslación (en el caso de cargas libres) o de rotación y vibración (en el caso de cargas enlazadas). El calentamiento volumétrico produce las temperaturas más altas en el interior del material y puede dar origen a evaporación interna.

El calentamiento por MW de un dieléctrico polar se debe a la disipación de una parte de la energía del campo electromagnético. Los mecanismos moleculares se pueden describir como fenómenos friccionales en donde la rotación de los dipolos es impedida por los enlaces intermoleculares. Este fenómeno es influenciado por la intensidad del campo aplicado, su frecuencia y el factor de pérdida dieléctrico del medio.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental necesario para esta investigación. En la figura 5 se describe la metodología experimental empleada para cada una de las fases del proyecto.



**Figura 5.** Diagrama de la metodología experimental empleada

## **2.1 RECONOCIMIENTO DEL PROCESO**

En la extractora Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A., ubicada en el Corregimiento El Pedral, vía a Puerto Wilches, se identificaron las etapas del proceso de extracción de aceite de palma, equipos empleados y sus respectivas condiciones de operación; también se localizaron los puntos de muestreo para las seis corrientes propuestas para evaluación, dichos puntos se encuentran localizados gráficamente en la figura 1, y además en el anexo E se encuentra el registro fotográfico de cada uno de estos puntos.

## **2.2 PRIMERA FASE DE EXPERIMENTACION**

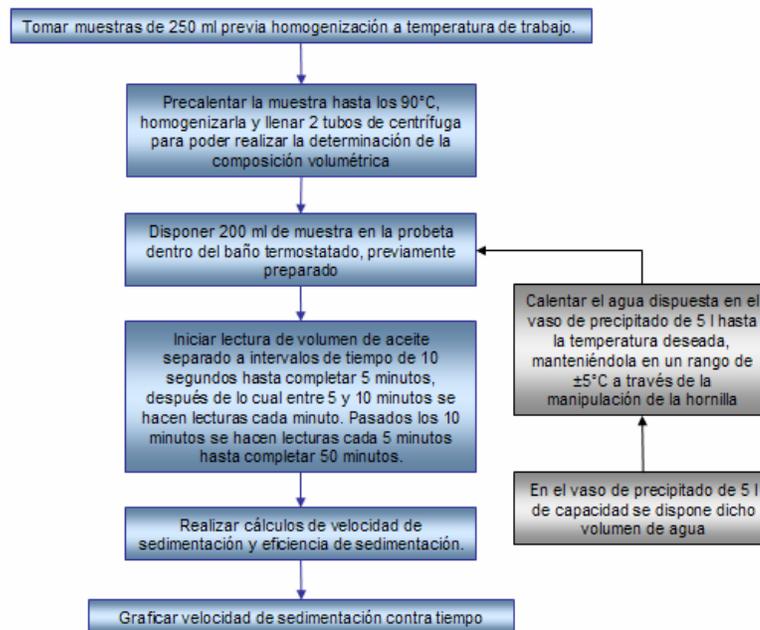
**2.2.1 Cálculo de la Energía Promedio Consumida durante un Minuto de Operación del Horno.** Se adquirió un horno microondas comercial *JWIN*, 0.9 ft<sup>3</sup>, 900 W, frecuencia de 2450 MHz, 10 niveles de potencia los cuales son mantenidos por un controlador de potencia que se encuentra en el equipo, línea de entrada de 110 V y una pinza voltiamperimétrica Wavetek Meterman AC 38, para la realización de toda la experimentación. Esta fase consistió en operar el horno a sus 10 diferentes niveles de potencia durante 1 minuto (que corresponde al tiempo máximo de radiación para las muestras a tratar) y medir la corriente que circulaba por el equipo; luego con los datos obtenidos se calculó la energía consumida expresada como Joules durante el minuto de operación.

**2.2.2 Determinación de los dos fluidos de proceso para someterlos al tratamiento con MW.** Se realizó la experimentación exploratoria con los seis fluidos mencionados en la sección de reconocimiento del proceso, con el fin de seleccionar las dos corrientes de proceso las cuales serían sometidas a las MW en la etapa final. El criterio de escogencia de los fluidos fue la velocidad y eficiencia de sedimentación a la temperatura del proceso (de 90 a 95°C); en la tabla 1 se describen los tratamientos aplicados en esta etapa del trabajo.

**Tabla 1.** Tratamientos aplicados en la primera fase: Determinación de fluidos

FACTORES	NIVELES	ESPECIFICACIÓN NIVEL	TOTAL CURVAS DE SEDIMENTACIÓN
Fluidos del Proceso	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condensados de Esterilización</li> <li>• Recuperados de Centrifuga</li> <li>• Descarga del Ciclón Desarenador</li> <li>• Aceite Bruto de Prensas</li> <li>• Entrada a Florentinos</li> <li>• Salida de Efluentes hacia Lagunas</li> </ul>	12
Temperaturas Iniciales del Proceso	1	90°C	
Repeticiones	2		

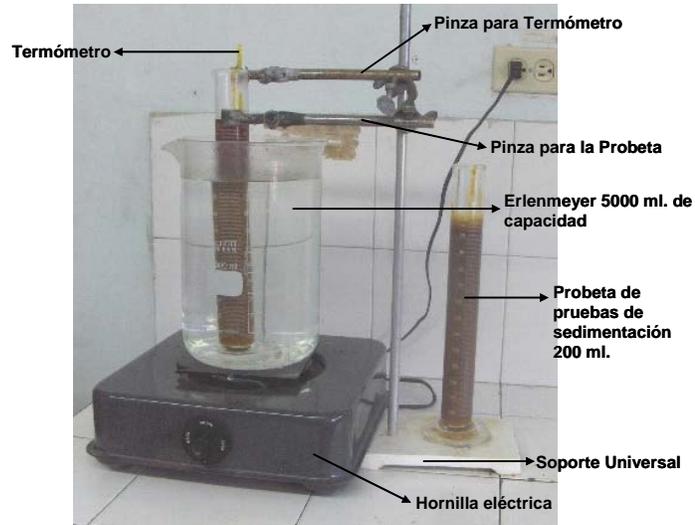
Con todos los fluidos de prueba se realizaron curvas de sedimentación como se describe en la figura 6; esta metodología se aplicó para todas las pruebas realizadas, tanto en la fase exploratoria como en la fase definitiva del proyecto.



**Figura 6.** Metodología empleada en las pruebas de sedimentación.

Para el montaje de las pruebas de sedimentación se empleó un vaso de precipitado Schott Duran de 5000 ml., una probeta de vidrio Pyrex de 250 ml., 2

termómetros (uno para medir la temperatura del baño y el otro para medir la temperatura de la muestra), dos pinzas con nuez, un soporte universal y una cocineta eléctrica *HACEB*; el montaje se muestra en la figura 7.

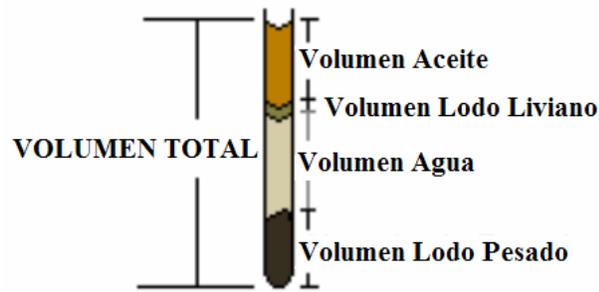


**Figura 7.** Montaje para las pruebas de sedimentación.

El volumen de aceite recuperado corresponde al volumen de la fase separada de los lodos. Para el cálculo de la eficiencia se tuvo en cuenta tanto el aceite que se recuperó en la prueba de sedimentación como el porcentaje volumétrico de aceite presente en la muestra como lo expresa la siguiente ecuación.

$$Eficiencia\ volumétrica = \frac{\% \text{ de aceite separado por gravedad}}{\% \text{ de aceite en muestra}} \quad (3)$$

Para la determinación de la composición volumétrica de las muestras se emplearon dos tubos plásticos calibrados para centrífuga y una centrífuga *Dynac Centrifuge Clay Adams*, trabajando aproximadamente a 3000 rpm. Una vez centrifugada la muestra, se hacía la lectura de los volúmenes de aceite, agua, lodos livianos, lodos pesados y finalmente del volumen total de muestra en el tubo; en la figura 8 se representa un resultado típico de composición volumétrica y la forma de realizar el cálculo de la misma, para cualquier muestra en general.



$$\% \text{ ACEITE} = \frac{\text{VOLUMEN ACEITE}}{\text{VOLUMEN TOTAL}} * 100$$

**Figura 8.** Representación general del cálculo de la composición volumétrica

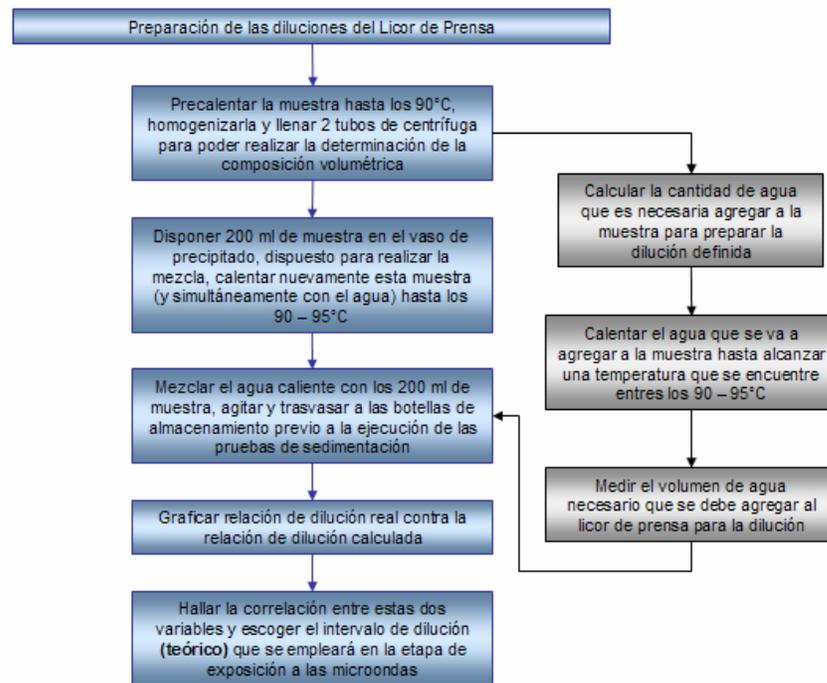
### 2.3 SEGUNDA FASE: EXPOSICIÓN A LAS MICROONDAS

La segunda etapa del proyecto fue realizada en las instalaciones del laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM de la Universidad Industrial de Santander – UIS; para el desarrollo de esta fase se decidió aplicar dos metodologías diferentes para cada uno de los fluidos escogidos en la etapa anterior: licor de prensa (LP) sin dilución y recuperados de centrifuga (RC).

**2.3.1 Experimentación Final para Muestras de LP sin Dilución.** Esta fase del proyecto fue subdividida en dos etapas adicionales: comparación entre la relación de dilución aceite/agua (en volumen) calculada o teórica [ $\lambda_{\text{calc}}$ ] contra la relación de dilución aceite/agua (en volumen) real [ $\lambda_{\text{real}}$ ], y finalmente la evaluación del efecto de las MW sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado.

2.3.1.1 Determinación de la relación existente entre  $\lambda_{\text{calc}}$  y  $\lambda_{\text{real}}$ . El objetivo fue establecer una teoría que permita explicar la diferencia entre la  $\lambda_{\text{calc}}$  (estos cálculos se desarrollaron a partir de la composición volumétrica obtenida por centrifugación en el laboratorio) y la  $\lambda_{\text{real}}$  (obtenida experimentalmente). Para esto,

a partir de muestras de LP se prepararon diluciones en un rango desde 0.6 hasta 1 con un paso de 0.2; y desde 1 hasta 3 con un incremento de 0.25, para un total de 10 tratamientos y cada uno con tres repeticiones; la preparación de estas diluciones se grafican en la figura 9.



**Figura 9.** Esquema metodológico para la comparación entre el comportamiento real y el calculado para diluciones de licor de prensa (LP).

El material empleado para estos experimentos fue: cuatro vasos de precipitado (2 de 600 ml y 2 de 400 ml), dos termómetros (uno para la muestra y otro para el agua que se iba a agregar a la muestra), una probeta de 250 ml, una cocineta eléctrica *HACEB*, dos tubos de centrifuga y finalmente la centrifuga mencionada en la sección donde se explicó la metodología de las pruebas de sedimentación.

2.3.1.2 Efecto de las MW sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado. En el desarrollo de esta etapa se ingresó la muestra a 40 °C (temperaturas mayores presentaban ebullición violenta); en la tabla 2 se presenta el resumen de la evaluación de las MW para LP.

**Tabla 2.** Tratamientos para aplicar en la fase II para el licor de prensa

FACTORES	NIVEL	ESPECIFICACION NIVEL	TOTAL EXP. EN MW	TOTAL EXP. INCLUYENDO TESTIGO
Relación de dilución aceite/agua	5	( $\lambda_{calc}$ ): 1 – 3 con intervalos de 0.5	150	155
Temperatura inicial	1	40 °C		
Frecuencia del horno	1	2.5 Ghz		
Potencia del horno	1	900 W		
Tiempos de exposición	6	Tiempo: 10 s – 60 s con incrementos de 10 s		
Repeticiones	5			

### 2.3.2 Experimentación Final para Muestras de Recuperados de Centrífuga.

Esta corresponde a la etapa final de la experimentación planteada; la descripción de los factores estudiados se encuentra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Tratamientos para aplicar en la fase II para los recuperados de centrífuga

FACTORES	NIVEL	ESPECIFICACION NIVEL	TOTAL EXP. EN MW	TOTAL EXP. INCLUYENDO TESTIGO
Temperatura inicial	1	40°C	30	31
Frecuencia del horno	1	2.5 Ghz		
Potencia del horno	1	900 W		
Tiempos de exposición	6	Tiempo: 10 s – 60 s con incrementos de 10 s		
Repeticiones	5			

## 2.4 DETERMINACION DE LA COMPOSICION DEL ACEITE DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON MICROONDAS

Se solicitó al Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander un estudio del perfil de ácidos grasos por cromatografía de gases con detector de ionización en llama, según las normas ISO 5508 y 5509.

**2.4.1 Descripción del Análisis.** El análisis de ácidos grasos se llevó a cabo mediante la obtención y cuantificación de sus metilésteres por cromatografía de gases con detector de ionización en llama (HRGC – FID), según las normas ISO 5509 (*“Animal and Vegetable Fats and Oils – Preparation of Methyl Ester of Fatty Acids”*) y 5508 (*“Animal and Vegetable Fats and Oils – Analysis by Gas Chromatography of Methyl Ester of Fatty Acids”*), respectivamente. Como patrones de referencia se emplearon la mezcla Supelco™ 37 Component FAME Mix, Supelco, Bellafonte, PA, Cat. No.47885–U y la mezcla de estándares de metilésteres de ácidos grasos GLC–10, GLC–50, GLC–70, GLC–80, GLC–100, Matreya, Inc., Pennsylvania, USA. El análisis cromatográfico de las muestras se realizó en un cromatógrafo de gases (GC) AT 6890N (*Agilent Technologies*, Palo Alto, California, USA), con detector de ionización de llama (FID). La columna empleada en el análisis fue DB–23 (J & W Scientific, Folsom, CA, EE.UU) [50%-cianopropil-poli(metilsiloxano), 60 m × 0.25 mm × 0.25 µm]. La inyección se realizó en modo split (51:1) ( $V_{iny}$ : 2 µl).

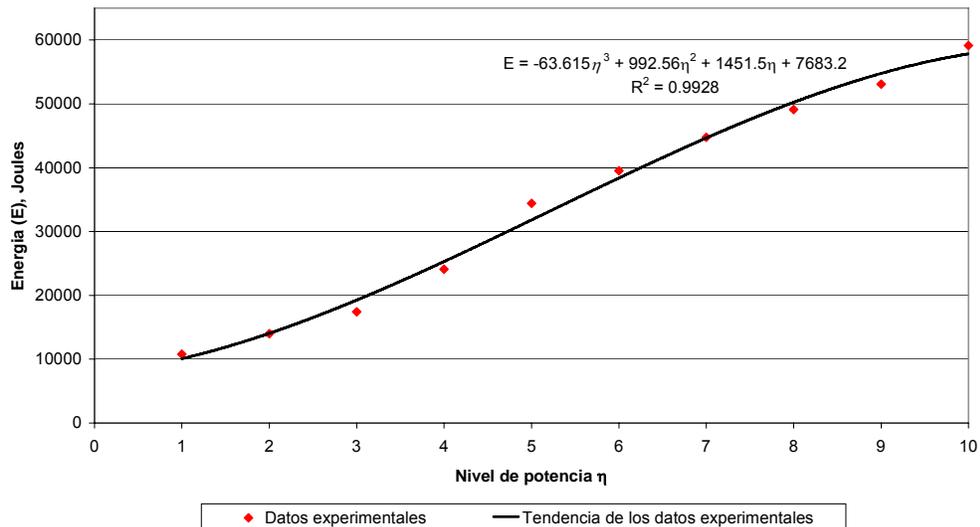
### 3. ANALISIS Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la ejecución de la etapa experimental de este proyecto y sus respectivos análisis son presentados en este capítulo del trabajo.

#### 3.1 PRIMERA FASE DE EXPERIMENTACIÓN – PRUEBAS PRELIMINARES

Después de haber identificado el proceso de extracción de aceite, se comenzó la selección de los dos fluidos con mejores resultados de sedimentación; y se midió y cálculo la energía consumida por el horno durante un minuto de irradiación.

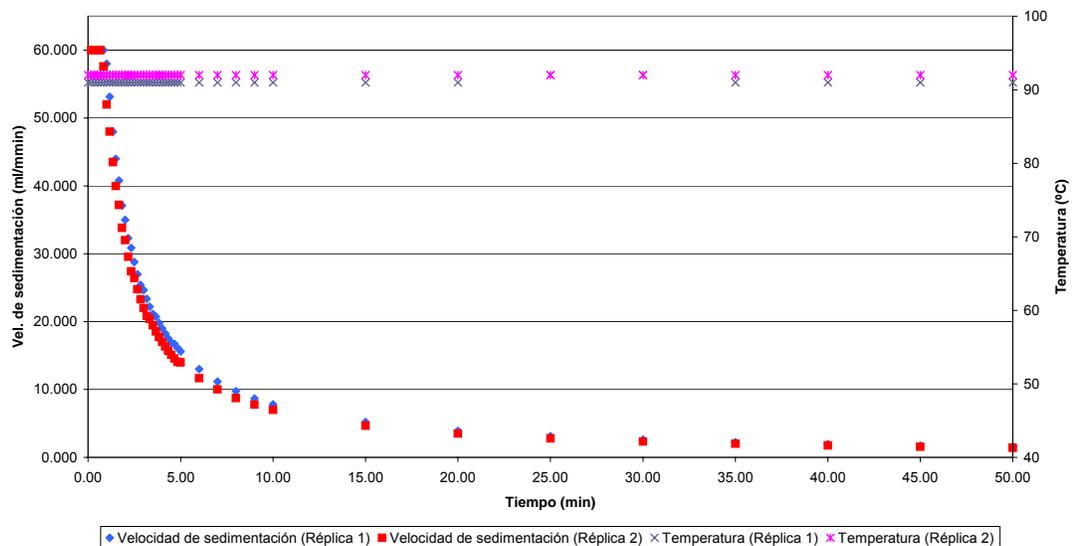
**3.1.1 Energía consumida por el horno.** La figura 10 muestra el valor de la energía promedio (Joules) requerida por el horno para un minuto de operación en cada uno de sus 10 niveles de potencia, partiendo de la lectura de intensidad de corriente observada con la pinza voltiamperimétrica y del voltaje de la línea a la cual se encontraba conectado el equipo (110 V). Estas mediciones se realizaron tres veces cada una.



**Figura 10.** Energía promedio consumida por el horno durante un minuto de operación para cada uno de sus niveles de potencia.

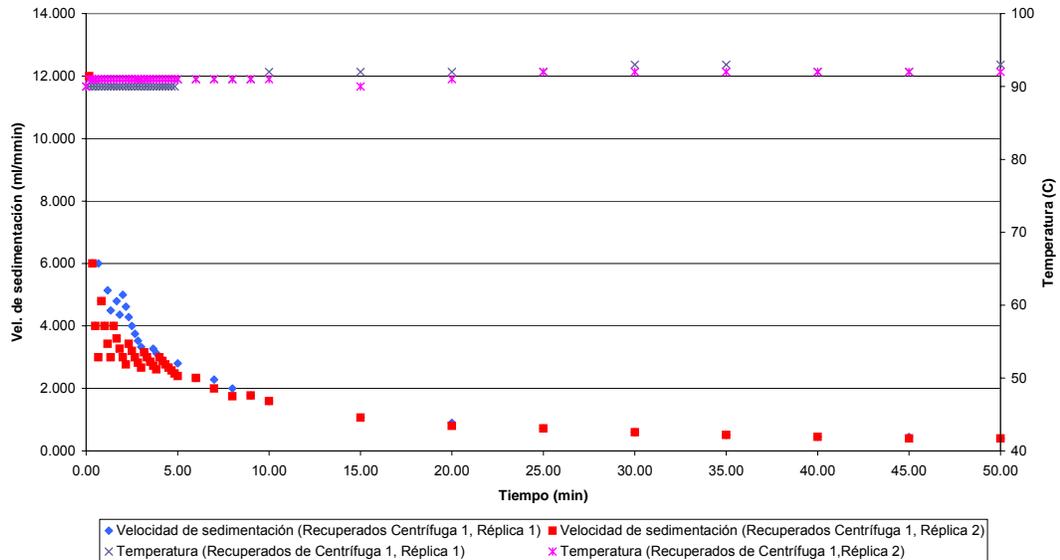
**3.1.2 Determinación de los dos fluidos de proceso con mejor comportamiento en las pruebas de sedimentación.** Se tomaron muestras de seis corrientes del proceso las cuales están identificadas en la figura 1. La temperatura del sistema estuvo entre 90 y 95 °C, manteniendo las condiciones de operación normales de planta. Cada prueba tuvo dos repeticiones. Finalmente los fluidos escogidos fueron Licor de Prensa (LP) y Recuperados de Centrífuga (RC). Los otros cuatro fluidos, presentaron velocidades nulas de sedimentación y no se observó en ninguna de las pruebas realizadas presencia de la capa superficial de aceite.

La figura 11 representa el comportamiento de la velocidad de sedimentación expresada en [ml/min], para una dilución de LP con un  $\lambda_{calc}$  de 1.5 preparada en laboratorio; durante los 50 minutos de la prueba (eje principal de las abcisas), así como también el rango en el que se mantuvo la temperatura durante el mismo tiempo de experimentación (eje secundario de las abcisas).



**Figura 11.** Perfil de la velocidad de sedimentación para muestras de licor de prensa a 90 – 95 °C.

De forma análoga la figura 12 muestra los resultados de las pruebas de sedimentación obtenidos para los RC.



**Figura 12.** Perfil de la velocidad de sedimentación para Recuperados de Centrifuga a 90 – 95 °C.

En la tabla 4 se presentan los resultados de eficiencia de sedimentación para el LP y RC, así como los datos de composición volumétrica. Los datos fueron calculados para 3, 5, 10 y 50 minutos respectivamente.

**Tabla 4.** Eficiencia de sedimentación y composición volumétrica para licor de prensa y recuperados de centrifuga.

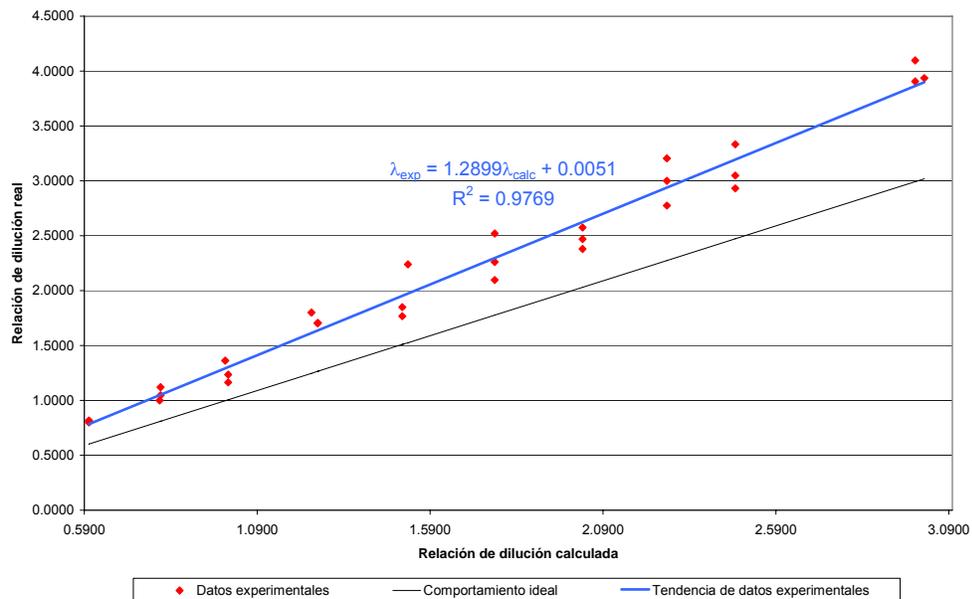
	RC	LP ( $\lambda_{calc} 1.5$ )
$\varepsilon_{(3)}$ %	21.22	74.30
$\varepsilon_{(5)}$ %	29.71	78.81
$\varepsilon_{(10)}$ %	33.96	78.81
$\varepsilon_{(50)}$ %	42.44	78.81
<b>%Aceite</b>	<b>44.41</b>	<b>23.56</b>
<b>% Agua</b>	<b>18.34</b>	<b>34.55</b>
<b>% Lodos Livianos</b>	<b>6.30</b>	<b>7.85</b>
<b>%Lodos Pesados</b>	<b>30.95</b>	<b>34.03</b>

## 3.2 SEGUNDA FASE DE EXPERIMENTACIÓN: EXPOSICIÓN A LAS MICROONDAS

Para la evaluación del impacto de las MW sobre el rompimiento de emulsiones, se trabajó con un manejo específico de tratamientos para el LP y para los RC.

**3.2.1 Experimentación Definitiva para Muestras de Licor de Prensa.** Bajo el rango de diluciones definidas se trabajó esta última etapa experimental. Previo al tratamiento con radiación electromagnética de dichas diluciones, fue necesario determinar la temperatura de salida de las muestras al horno microondas, para definir la temperatura de los montajes en cada uno de los tratamientos hechos y de esta forma evitar interferencias con el efecto térmico.

3.2.1.1 Determinación de la relación existente entre  $\lambda_{\text{calc}}$  y  $\lambda_{\text{real}}$ . Las diluciones fueron preparadas, siguiendo las pautas mencionadas en el capítulo de “Descripción del Procedimiento Experimental”. Los resultados son presentados en la figura 13.

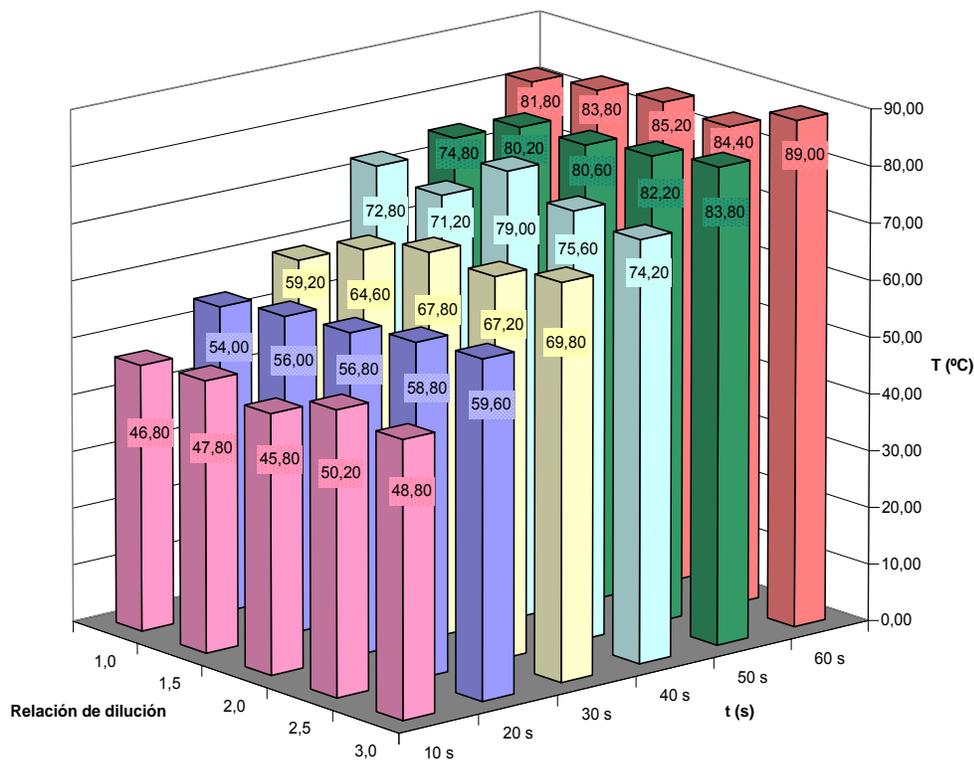


**Figura 13.** Comportamiento de la  $\lambda_{\text{real}}$  respecto a  $\lambda_{\text{calc}}$ .

En la figura 13 se pueden identificar los datos experimentales (puntos rojos), así como también su tendencia a presentar un comportamiento lineal, con un ajuste de datos de 97.69% (línea azul); por otra parte también se encuentra representado el comportamiento ideal entre la relación de dilución real y la calculada, es decir, que para un valor de  $\lambda_{\text{calc}}$  (conociendo el volumen de agua que debe de agregarse a la muestra original), su correspondiente  $\lambda_{\text{real}}$  tuviese aproximadamente el mismo valor numérico (línea negra).

Con la información recolectada en esta corrida experimental, se puede percibir, que los lodos presentes en la emulsión poseen un grado de saturación para el agua atrapada en los mismos, lo anterior ocasiona que a medida que la cantidad de agua agregada a la muestra inicial disminuya (equivalente que  $\lambda_{\text{calc}}$  aumente), la diferencia entre el  $\lambda_{\text{real}}$  y el  $\lambda_{\text{calc}}$  sea más amplia. Cuando el volumen de agua calculado para preparar una determinada  $\lambda_{\text{calc}}$  es igual o mayor que la cantidad de volumen de aceite presente en la muestra, la diferencia entre el comportamiento real y el teórico o calculado está alrededor de 0.2046; de manera análoga cuando dicho volumen de agua es menor que el volumen de aceite presente en la muestra dicha diferencia aumenta hasta 0.9781.

Adicionalmente, para diluciones de LP que se encontraban entre  $\lambda_{\text{calc}}$  de 1 a 3, y para seis tiempos de exposición (10 a 60 s), se determinó la temperatura de salida del horno; esta corrida fue necesaria para determinar el rango de temperaturas al que se debería encontrar el montaje de sedimentación, y evitar que al efecto de las MW se le sumara el efecto térmico. Estas pruebas se realizaron al máximo nivel de potencia del equipo. La figura 14, resume los resultados obtenidos para esta experimentación, se puede observar que la temperatura de salida de las diluciones está directamente relacionada con el tiempo que ha sido irradiada y en menor proporción con la relación de dilución de la muestra.



**Figura 14.** Comportamiento de la temperatura final de cada una de las diluciones en los diferentes tiempos de exposición a las microondas.

3.2.1.2 Evaluación del efecto de las microondas sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado. Las condiciones de ejecución de esta corrida experimental para LP, se encuentran especificadas en la tabla 2.

Después de tener todos los datos para las 150 pruebas y los 5 blancos, se analizaron los resultados en un paquete estadístico llamado STATISTIX para Windows, versión 8.0; el método para detectar diferencias estadísticas es el test de Tuckey, con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5%. El promedio de los resultados obtenidos en cada una de las repeticiones de cada tratamiento, se encuentran graficados en las figuras correspondientes al anexo A, debido a que los registros de estos datos, se encuentran en un archivo demasiado extenso para incluir en este libro (aproximadamente 75 páginas).

En las tablas 5 y 6 se encuentran reportados los valores de velocidad y eficiencia de sedimentación calculados a 3, 5, 10 y 50 minutos de sedimentación, para las dos mejores combinaciones de tratamientos entre  $\lambda_{\text{calc}}$  y tiempo de exposición a las MW que corresponden a:  $\lambda_{\text{calc}}$  2,5 y 30 s de exposición a las microondas; y  $\lambda_{\text{calc}}$  2,5 y 20 s de exposición a las microondas.

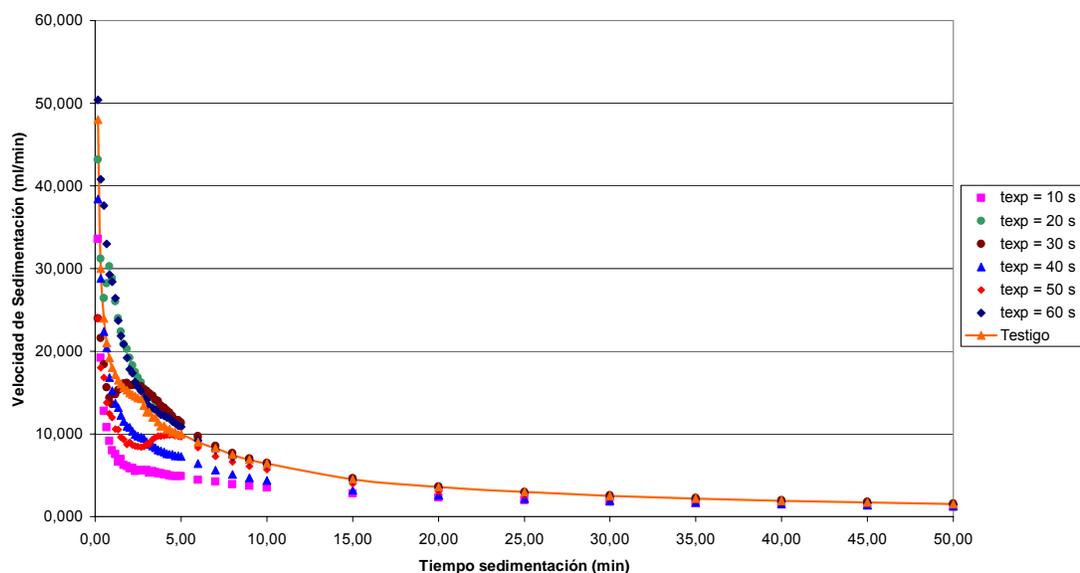
**Tabla 5.** Velocidad de sedimentación para los dos mejores tratamientos.

TRATAMIENTO	$v_{\text{sed}} (3')$ (ml/min)	$v_{\text{sed}} (5')$ (ml/min)	$v_{\text{sed}} (10')$ (ml/min)	$v_{\text{sed}} (50')$ (ml/min)
$\lambda_{\text{calc}} = 2,5; t_{\text{exp}} = 30 \text{ s}$	15,200	11,360	6,480	1,600
$\lambda_{\text{calc}} = 2,5; t_{\text{exp}} = 20 \text{ s}$	15,067	11,200	6,440	1,520

**Tabla 6.** Eficiencia de sedimentación para los dos mejores tratamientos.

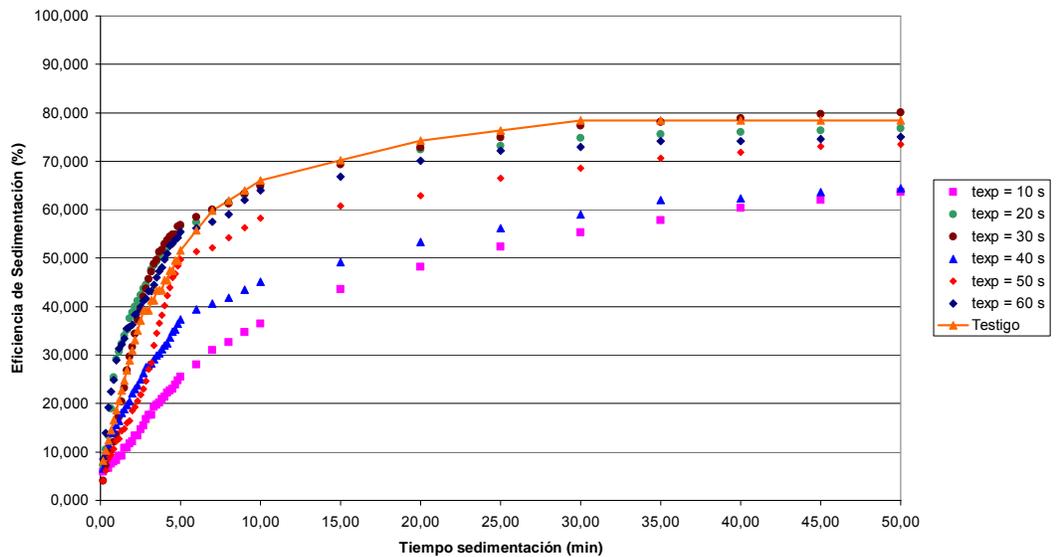
TRATAMIENTO	$\epsilon_{\text{sed}} (3')$ (%)	$\epsilon_{\text{sed}} (5')$ (%)	$\epsilon_{\text{sed}} (10')$ (%)	$\epsilon_{\text{sed}} (50')$ (%)
$\lambda_{\text{calc}} = 2,5; t_{\text{exp}} = 30 \text{ s}$	45,106	56,23	64,154	79,226
$\lambda_{\text{calc}} = 2,5; t_{\text{exp}} = 20 \text{ s}$	45,628	56,556	65,068	76,846

En la figura 15 se representa la velocidad promedio de sedimentación, para los tratamientos realizados con  $\lambda_{\text{calc}}$  de 2,5 y los seis tiempos de radiación.



**Figura 15.** Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de 2,5 a diferentes Tiempos de Exposición a Microondas.

La eficiencia de sedimentación calculada durante los 50 minutos de la prueba de sedimentación, para los mismos tratamientos mencionados en la figura anterior se muestra en la figura 16.

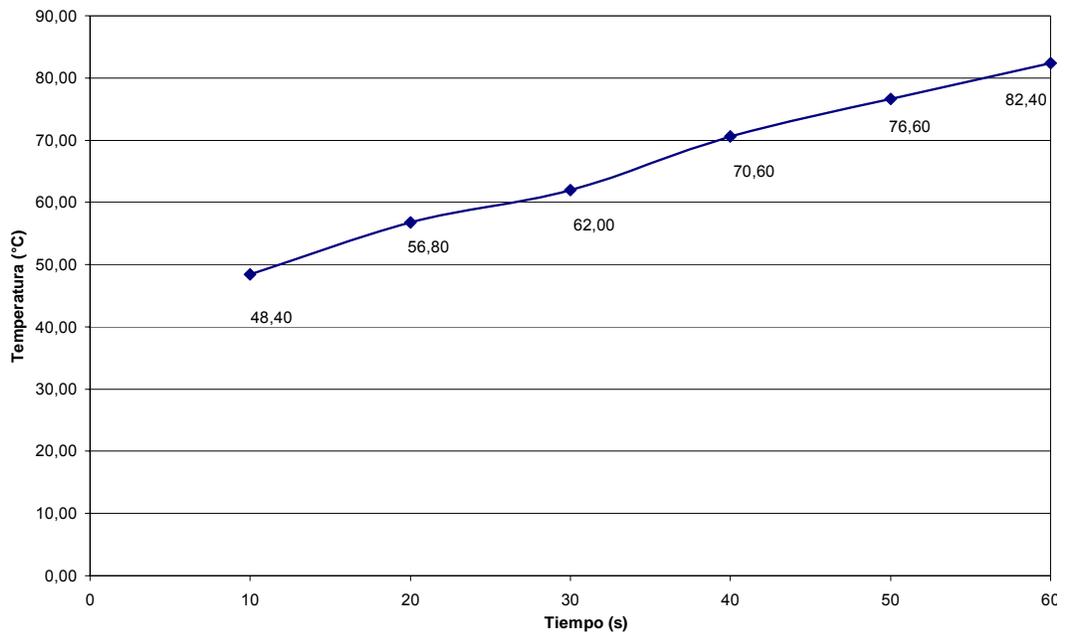


**Figura 16.** Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de 2,5 a diferentes Tiempos de Exposición a Microondas.

Tanto en las curvas de velocidad y eficiencia se puede observar que el comportamiento de la sedimentación con 30 s y 20 s de radiación supera al perfil de la muestra testigo, la cual corresponde a muestra sin irradiar.

**3.2.2 Experimentación Definitiva para Recuperados de Centrífuga.** Se desarrolló una prueba preliminar para la determinación de la temperatura final de la muestra después de ser sometida al tratamiento con MW, con el fin de establecer la temperatura a la que se debe mantener el montaje de sedimentación y de esta forma evitar interferencia del efecto térmico y finalmente las pruebas de sedimentación para evaluar velocidad, eficiencia en la recuperación del aceite irradiado.

Al evaluar la temperatura de salida de las muestras después de haber sido irradiadas para cada uno de los tiempos de exposición, se obtuvieron los resultados expuestos en la figura 17.



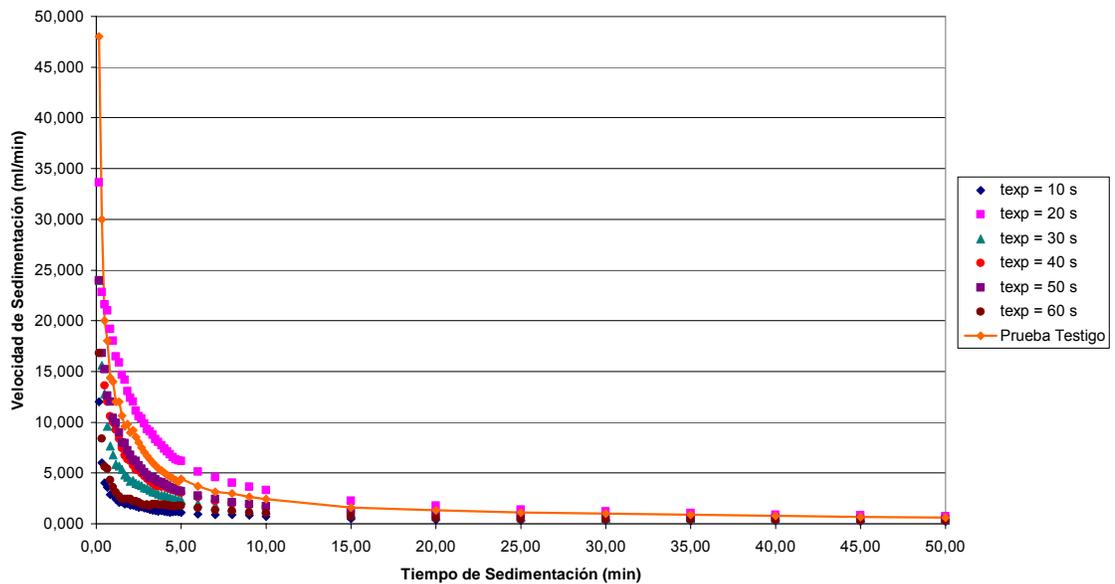
**Figura 17.** Comportamiento de la temperatura final de cada uno de los tiempos de exposición a las microondas.

En la gráfica se puede observar que las muestras de RC presentan comportamiento similar que las de LP respecto al tiempo de radiación.

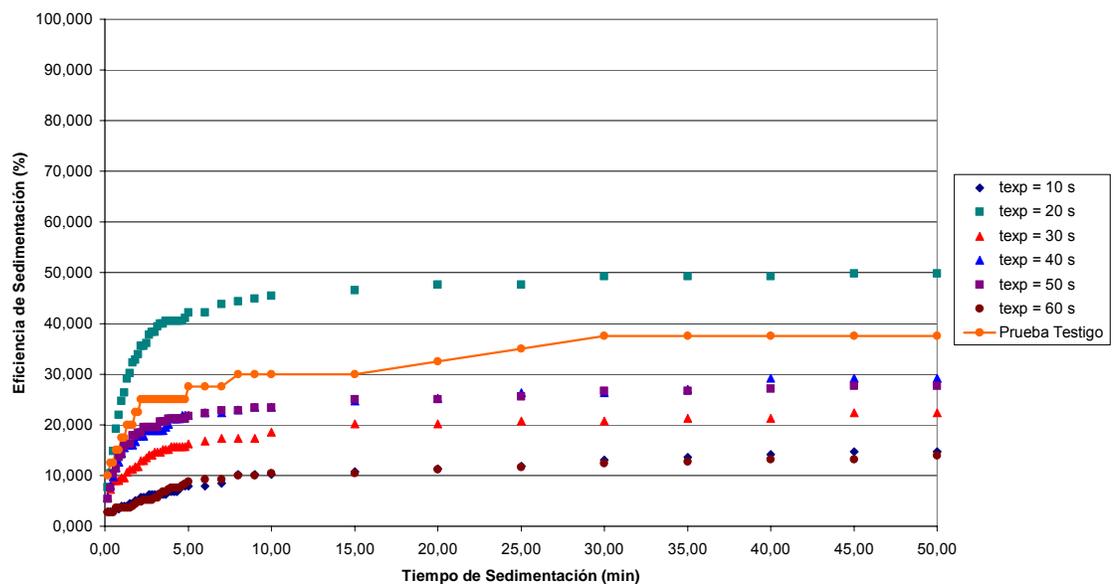
3.2.2.1 Evaluación del efecto de las microondas sobre la velocidad y eficiencia de sedimentación y calidad del aceite recuperado, en muestras de Recuperados de Centrífuga. Las condiciones de ejecución de esta última corrida experimental para recuperados de centrífuga, se realizó bajo los criterios especificados en la tabla 3.

Después de recopilar los datos de las 30 pruebas y el blanco, se analizaron los resultados; el diseño experimental empleado fue el de Bloques Completamente Aleatorizados, y el método empleado para detectar diferencias estadísticas es el test de Tuckey con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5%.

El mejor tratamiento para esta corriente del proceso fue para un tiempo de exposición a las microondas igual a 20 s. La representación gráfica de la muestra radiada a 20 s se puede observar en las figuras 18 y 19 respectivamente.



**Figura 18.** Perfil de la velocidad de sedimentación para Recuperados de Centrifuga a un tiempo de 20 s.



**Figura 19.** Perfil de la eficiencia de sedimentación para Recuperados de Centrifuga a un tiempo de 20 s.

### 3.3 DETERMINACION DE LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE DESPUÉS DE HABER SIDO TRATADO CON MICROONDAS

Se tomaron dos muestras de aceite para el análisis del perfil de ácidos grasos; una de esas muestras fue irradiada durante un minuto a potencia máxima y la otra muestra correspondió al aceite sin irradiar o muestra testigo. Las muestras fueran tomadas a la salida del secador de vacío, este aceite está libre de lodos y debe contener baja humedad, ya que corresponde al aceite que posteriormente será almacenado y despachado para la venta.

Para mantener un rango de temperaturas similar al manejo durante las pruebas de sedimentación y de esa forma contar con las mismas condiciones térmicas y debido a que la tangente de pérdidas del aceite es inferior que la de la emulsión aceite – agua – lodos, se decidió precalentar las muestras de aceite antes de irradiarla. En la tabla 7, se resumen las condiciones de muestreo e irradiación para esta etapa, con sus correspondientes justificaciones.

**Tabla 7.** Condiciones de muestreo y exposición a MW del aceite que se llevó al análisis cromatográfico.

		Justificación y/o Observaciones
<b>Punto de Muestreo</b>	Salida del secador de vacío	Debido a que no era factible tomar muestras que contengan lodos, porque de esa forma no son aptas para ingresar dentro del equipo de cromatografía.
<b>T<sub>inicial</sub> (°C)</b>	75 °C	Fue necesario precalentar para al final obtener una temperatura cercana al valor máximo que se manejo en las pruebas de sedimentación con MW de la etapa anterior.
<b>T<sub>final promedio</sub> (°C)</b>	83.33 °C	
<b>t<sub>exposición</sub> (s)</b>	60 s	Condiciones extremas de exposición a las MW
<b>Nivel de Potencia</b>	Máximo	
<b>% Humedad<sup>*</sup><sub>inicial</sub></b>	0.06%	Antes de ser precalentado el aceite
<b>% Humedad<sup>*</sup><sub>final</sub></b>	0.02%	Después de haber sido precalentado el aceite

Datos suministrados por el laboratorio de Control de Calidad de Bucarelia S.A.

**3.3.1 Análisis Cualitativo.** Para la identificación de los metilésteres de ácidos grasos presentes en las muestras se utilizó un método de comparación de sus tiempos de retención con los parámetros certificados (mezcla de estándares GLC–10, GLC–50, GLC–70, GLC–80, GLC–100, Matreya, Inc., Pennsylvania, USA) y Supelco™ 37 Component FAME Mix, (Supelco, Bellafonte, PA, Cat. No.47885–U), analizados bajo las mismas condiciones cromatográficas.

**3.3.2 Análisis Cuantitativo.** El porcentaje relativo (%) de ácidos grasos en las muestras analizadas se determinó según la norma ISO 5508 - (*“Animal and Vegetable Fats and Oils – Analysis by Gas Chromatography of Methyl Ester of Fatty Acids”*) (ver Anexo D). En la tabla 8, se compara una composición típica del aceite crudo de palma colombiano, con las composiciones obtenidas en los resultados de la cromatografía para la muestra testigo y muestra radiada.

**Tabla 8.** Comparación de los resultados obtenidos en el análisis de ácidos grasos con la composición típica reportada del aceite de palma colombiano.

ACIDO GRASO	CANTIDAD RELATIVA %		
	Composición Típica	Composición Muestra Testigo	Composición Muestra Radiada
Palmítico	44.00	41.10	41.50
Esteárico	5.00	5.10	5.10
Oleico	42.50	41.10	40.8
Linoleico	10.30	9.20	9.10

En los resultados obtenidos en el perfil de ácidos grasos tanto para la muestra testigo como la muestra irradiada, no se observa ningún cambio considerable en la composición del aceite, tampoco se identifica la isomerización de ácidos grasos *cis* a ácidos grasos *trans*, lo que evidencia una muy baja alteración en la composición química debido al tratamiento con MW.

---

\* Fuente: Cenipalma 2005

#### 4. CONCLUSIONES

- Es evidente el efecto que tiene la radiación MW sobre el equilibrio de las emulsiones aceite-agua-lodo reflejada en un aumento en la velocidad de sedimentación.
- Existe la posibilidad de romper los equilibrios de cargas y polaridades en las emulsiones aceite-agua-lodo a una temperatura más baja que la utilizada en el proceso, por medio de esta tecnología.
- Experimentalmente se encuentra que existe una diferencia apreciable entre  $\lambda_{\text{calc}}$  y  $\lambda_{\text{real}}$ , destacándose que a concentraciones menores de agua esta diferencia es más marcada; este fenómeno está directamente relacionado con la capacidad de saturación con agua de los lodos.
- El mayor rendimiento en la sedimentación y recuperación de aceite para el licor de prensa sin microondas se obtuvo para una  $\lambda_{\text{calc}}$  de 1,5. Esto permite corroborar lo encontrado en una investigación anterior <sup>[10]</sup>.
- Los mejores resultados de velocidad y eficiencia de sedimentación para el licor de prensa y recuperados de centrifuga, se obtienen para 20 s de exposición, debido a que existe un óptimo para la energía vibracional que se le da a los enlaces; con ese tiempo se llega a la energía de polarización de los enlaces y con otros mayores se le entrega más de lo que necesita y la radiación se manifiesta hacia efecto térmico.
- Los mejores tratamientos para la corriente correspondiente al licor de prensa son para una relación de dilución de 2,5 con 30 s de exposición a las microondas, y la misma dilución con 20 s de radiación.

- Las corrientes de proceso en las plantas de extracción con un contenido de aceite inferior a 20% en volumen, presentan comportamiento nulo de sedimentación.
- El trabajo de investigación presentado no permite la aplicación inmediata de la tecnología de microondas para las plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia, debido a que sólo se han irradiado mezclas aceite–agua–lodo en régimen estático; pero si deja ver claramente que existe un efecto favorable en el rompimiento de dichas emulsiones, presentes en los fluidos del mencionado proceso, respecto a la velocidad de sedimentación y que es necesario continuar con esta línea de investigación manejando otras condiciones de experimentación.

## 5. RECOMENDACIONES

A baja temperatura de ingreso al tratamiento con microondas, no es posible obtener eficiencias por encima del 80%, luego bajo este patrón no sería competitivo con las condiciones actuales operacionales de las plantas extractoras nacionales. Por esta razón, se recomienda continuar con la investigación en esta línea, pero con temperaturas que oscilen entre los 80 °C y 85 °C y tiempos de exposición a las microondas de 10 s hasta los 30 s, con el fin de obtener mejores eficiencias en la recuperación del aceite y que sean comparables con las condiciones de operación en planta.

Realizar un proyecto a nivel piloto para la aplicación de las microondas en continuo para el proceso de extracción de aceite, ubicándolo en las líneas correspondientes a licor de prensa y recuperados de centrífuga. Así mismo, realizar el estudio de prefactibilidad para la implementación de esta tecnología en el proceso.

Profundizar en el estudio del fenómeno de saturación de los lodos presentes en la emulsión con el agua de dilución, para la corriente del aceite bruto de prensas o licor de prensa.

## BIBLIOGRAFIA

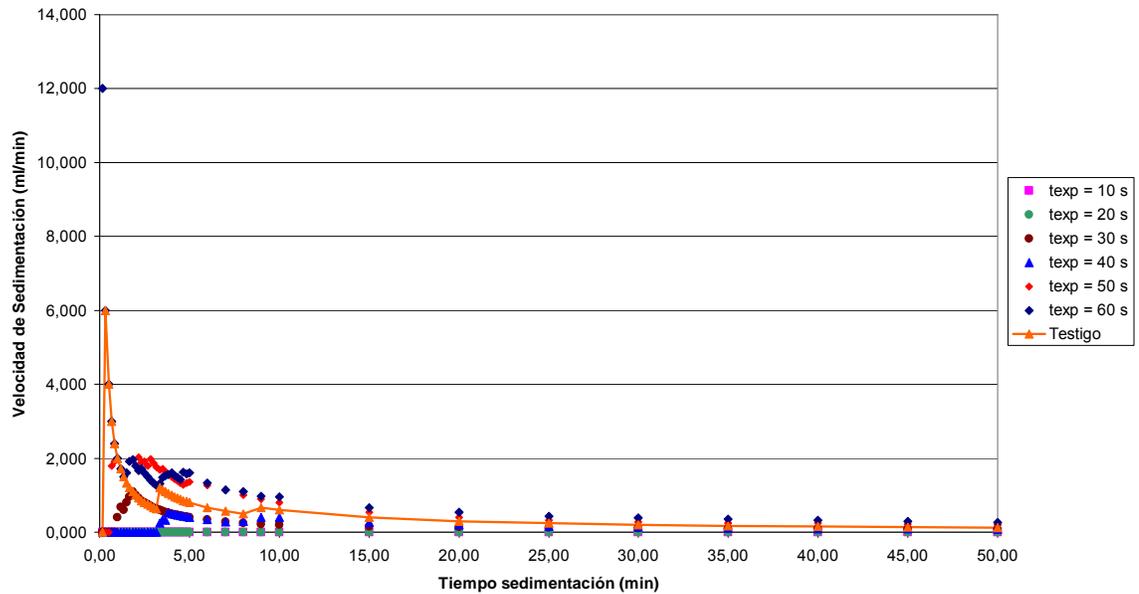
1. CHAN, Chih-Chieh and Chen, Yeong-Ching. 2002. Demulsification of W/O emulsions by microwave radiation. *Separation Science and Technology* 37(15): 3407 – 3420.
2. RAJINDER, Pal and Masliyah, Jacob. 1991. Use of microwaves for demulsification of water-in-oil emulsions. *AOSTRA Journal of Research* 7: 155 – 162.
3. ONG, Thean Huat and Gapor, Top. 1998. Applications of microwave technologies and their potential assimilation in the palm oil industry. *Palmas* 19(3): 75 – 86.
4. C.S., Fang and P.M.C., Lai. 1995. Microwave heating and separation of water-in-oil emulsions. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 30(1): 46 – 57.
5. PARÉ, Jocelyn; Bélanger, Jacqueline and García, Jesús. 2000. The Microwave Assited Process (MAP™): applications to the extraction of palm oil. *Palmas* 21 tomo 2: 371 – 384.
6. KHALID, Kaida; Zakaria, Zahariah and Wan Yusof, Wan Daud. 1996. Variation of dielectric properties of oil palm mesocarp with moisture content and fruit maturity at microwave frequencies. *Elais* 8(2): 83 – 91.
7. CHOW, M. C. and Ma, A. N. 2001. Microwave in the processing of fresh palm fruits. *Proceeding of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Chemistry and Technology)*: 3 – 8.

8. PEREZ, Rocío *et al.* 2006. Caracterización dieléctrica de macroemulsiones mediante el uso de sonda coaxial. Valencia, España. Artículo en preparación. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Comunicaciones.
9. C. S., Fang *et al.* 1989. Oil recovery and waste reduction by microwave radiation. *Environmental Progress* 8(4): 235 – 238.
10. CASTILLO, Edgar F.; Yañez, Edgar y Díaz, Oscar. Estudio del Nivel de Dilución Apropiado del Licor de Prensa en el Proceso de Extracción de Aceite de Palma, Apoyado en el Diseño y Evaluación de un Sistema de Control Automático. Bucaramanga, 2005. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas.
11. FEDEPALMA, Estadísticas de la Palma de Aceite en Colombia, Anuario Estadístico 2006; Capítulo 2.
12. Mc. CABE, Warren; Smith, Julian C. and Harriott, Peter. 2002. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6ta ed. McGrawHill: 1117 – 1128.
13. NILSEN, Paal *et al.* 2001. Method For Separating An Emulsion By Using Microwave Radiation. Patent No. WO0112289. ABB RESEARCH LTD.
14. NUÑEZ, María Fernanda y Ramírez, Olga. Aplicación y Evaluación de los Efectos de Campos Magnéticos en el Rendimiento de la Extracción del Aceite Crudo de Palma. Bucaramanga, 2004. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas.

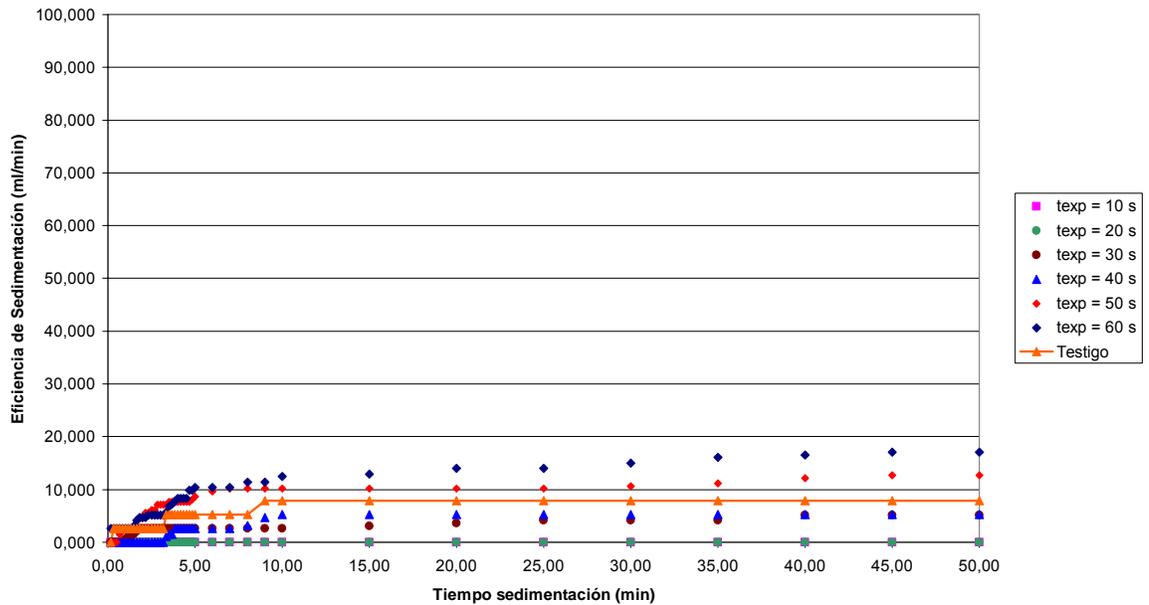
15. ORTIZ G., Claudia Z. y Zona G., Alfonso. Rompimiento de Emulsiones Agua en Crudo Usando Ondas Electromagnéticas. Bucaramanga, 1996. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas.
16. OWENS, Thomas. 1999. Application of Microwave Radiation in a Centrifuge for the Separation of Emulsions and Dispersions. Patent No. US5911885.
17. PARÉ, Jocelyn. 1991. Microwave-Assisted Natural Products Extraction. Patent No. US5002784.
18. PERRY, Robert H. and GREEN, Down W. 2001. Manual del Ingeniero Químico. Tomo I. 7<sup>ma</sup> ed. McGrawHill: 18-74 – 18-82.
19. TREYBAL, Robert E. 1988. Operaciones de Transferencia de Masa. McGrawHill: 804 – 807.
20. WOLF, Nicholas O. 1986. Uso de Radiación Microondas en la Separación de Emulsiones y Dispersiones de Hidrocarburos en Agua. Patente No. US4582629.
21. OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Estadísticas, la Cadena de Oleaginosas en Colombia.
22. <http://www.fedepalma.org>

**ANEXO A. RESULTADOS GRÁFICOS DE LAS PRUEBAS DE  
SEDIMENTACIÓN DESPUÉS DE HABER APLICADO EL TRATAMIENTO CON  
MICROONDAS**

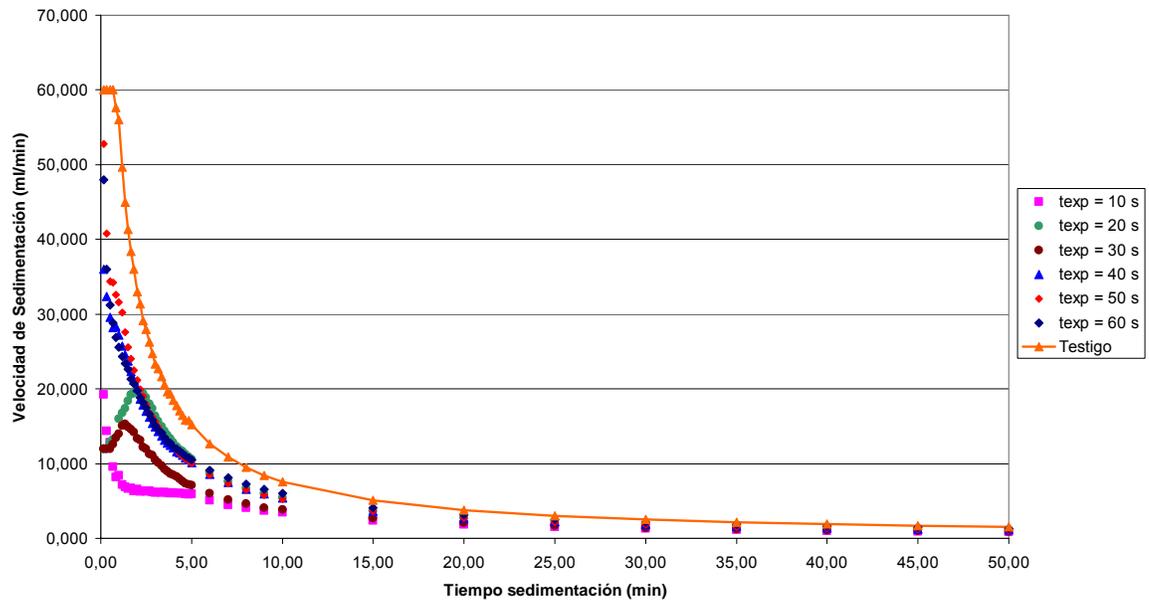
## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 1,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



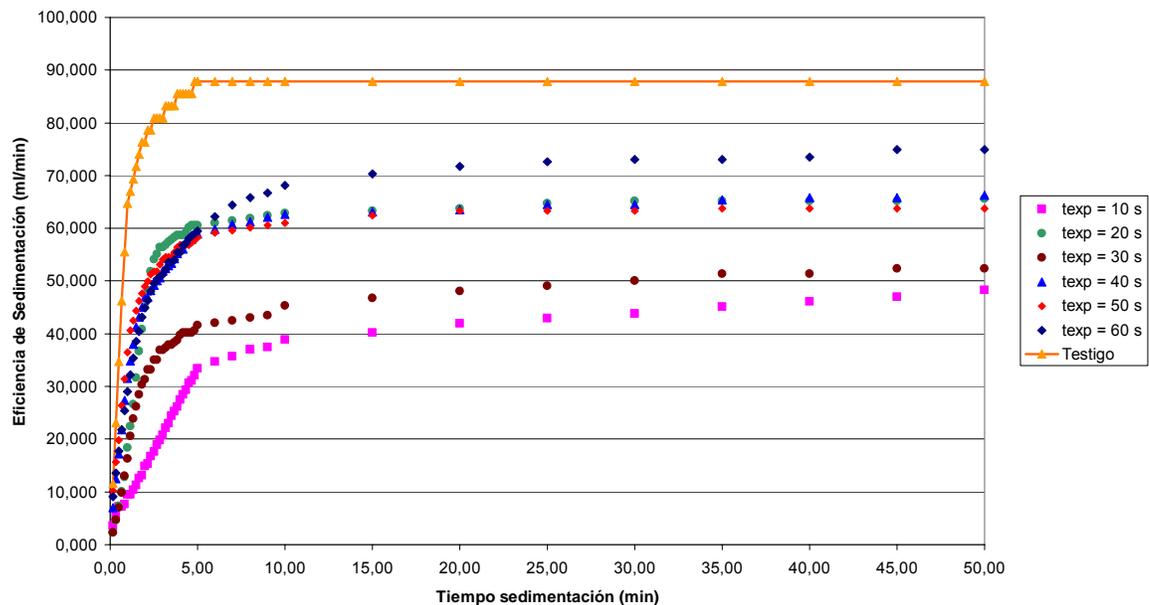
## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 1,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



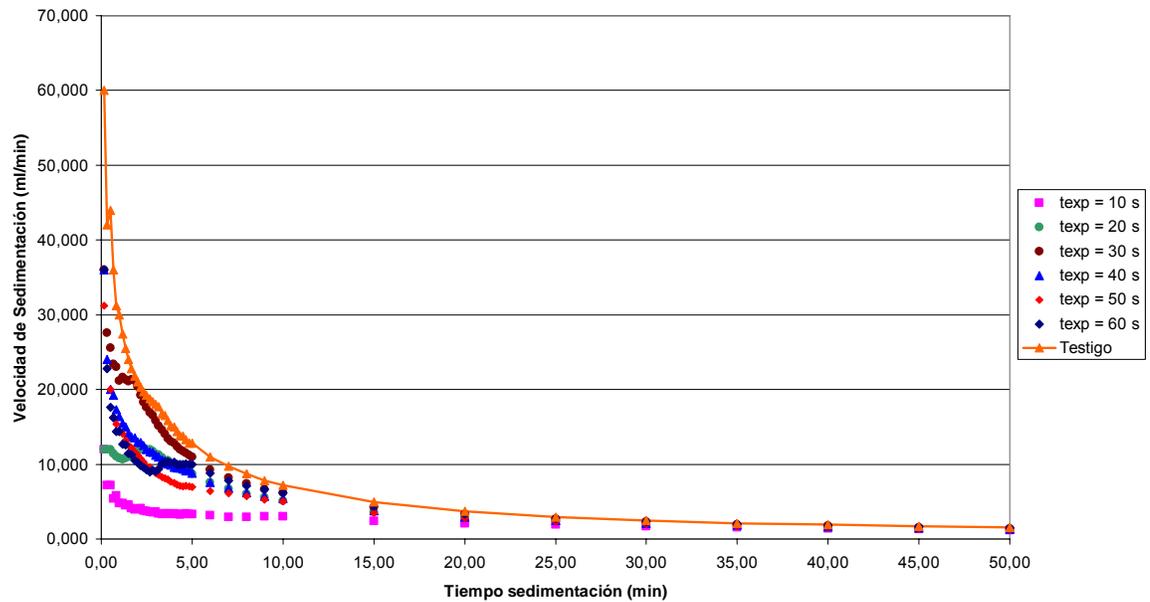
## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 1,5 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



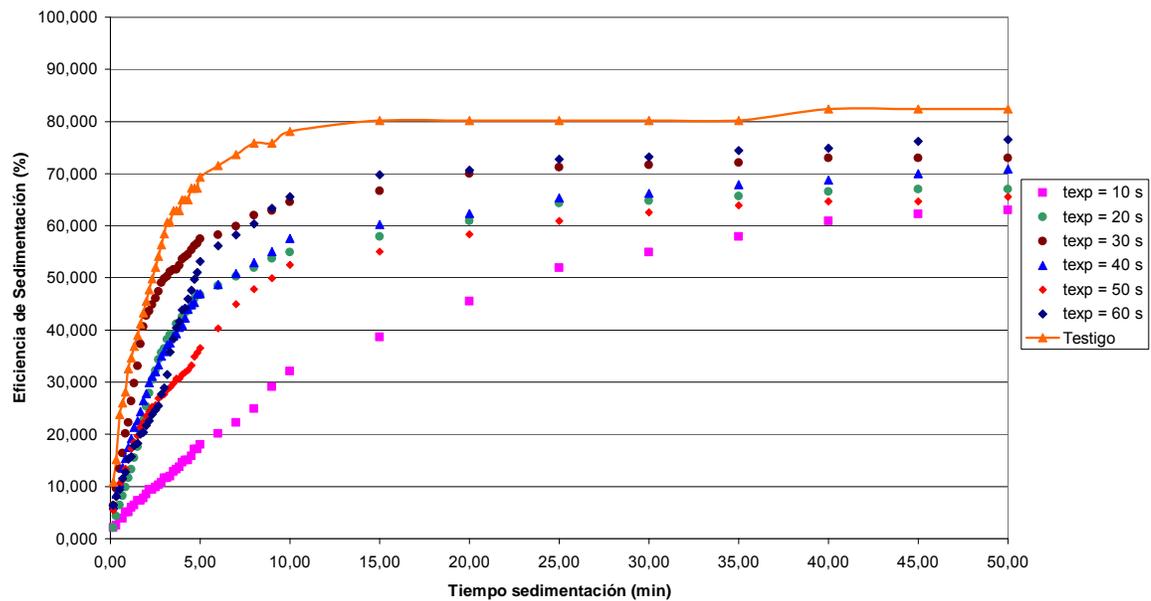
## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 1,5 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



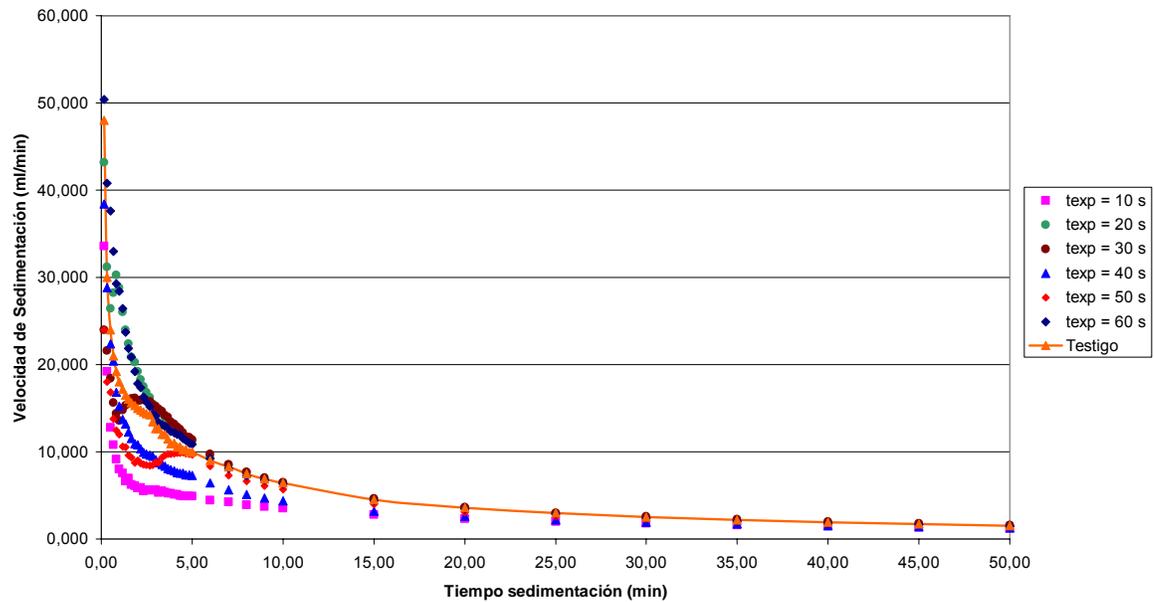
## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 2,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



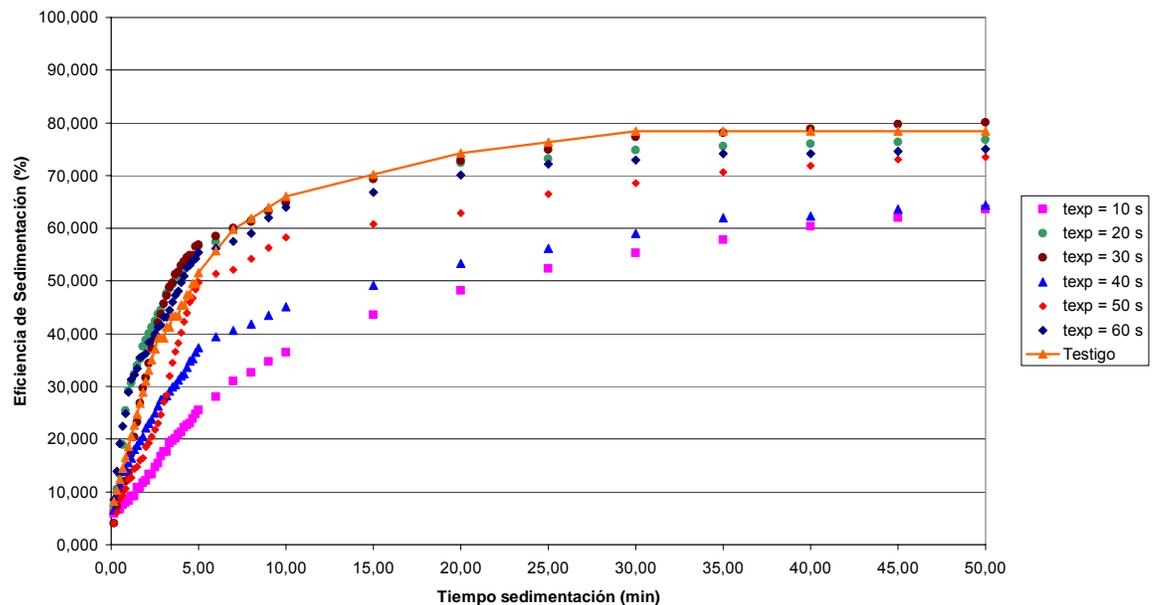
## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 2,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



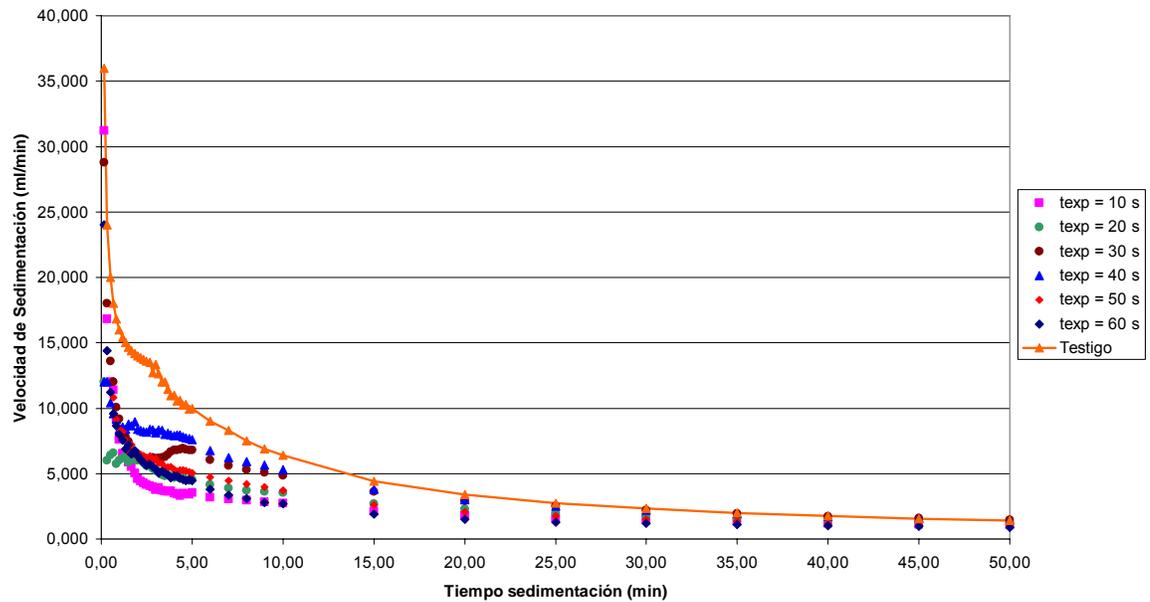
## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 2,5 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



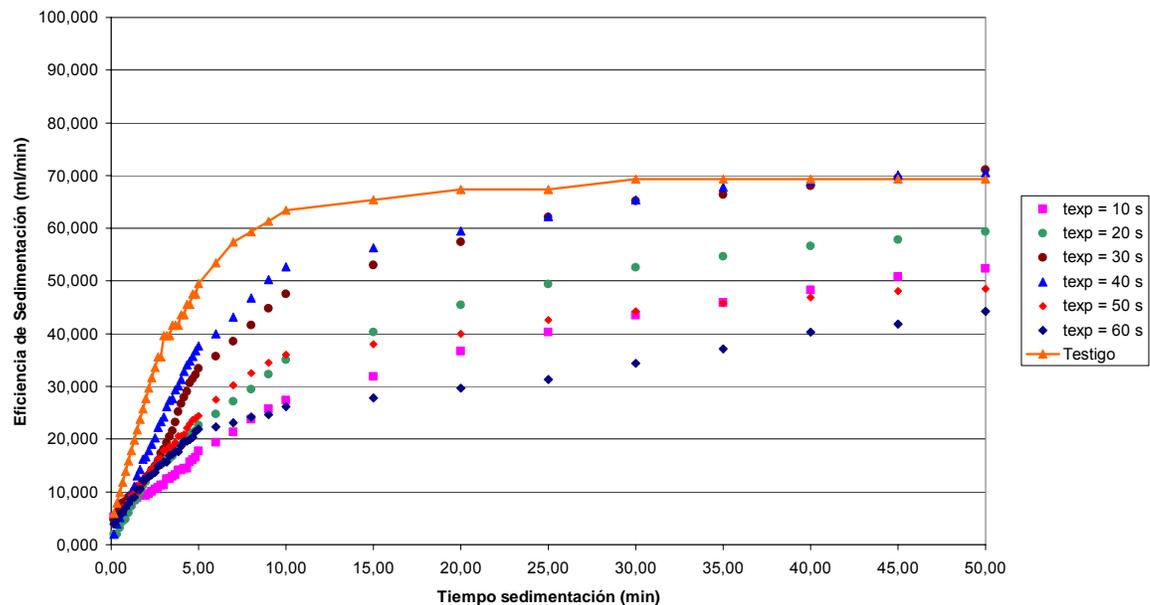
## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 2,5 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



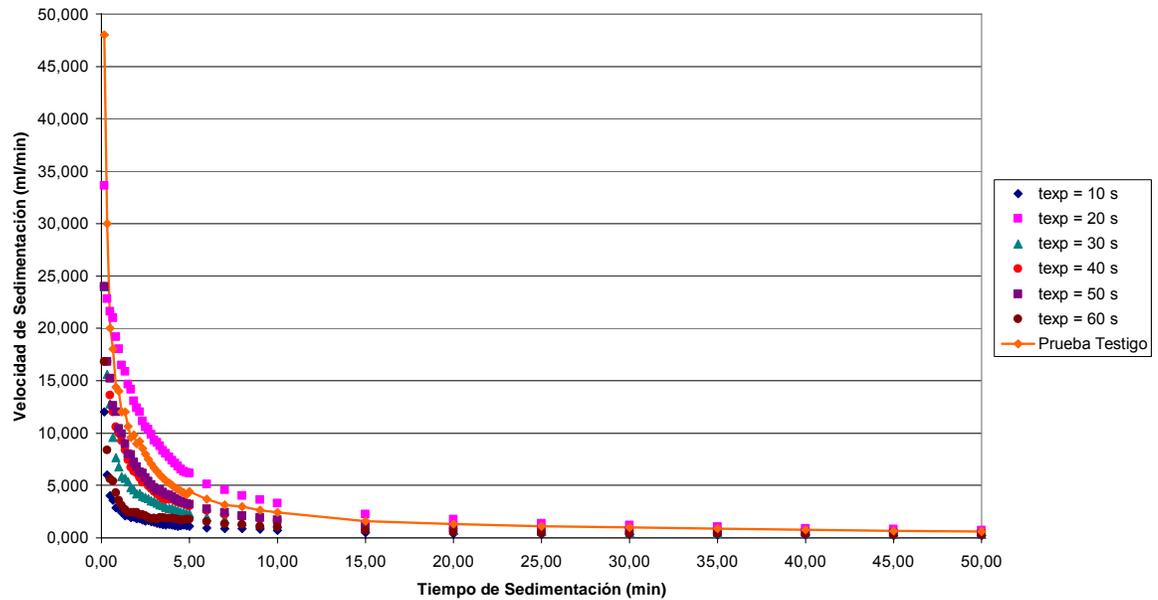
## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 3,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



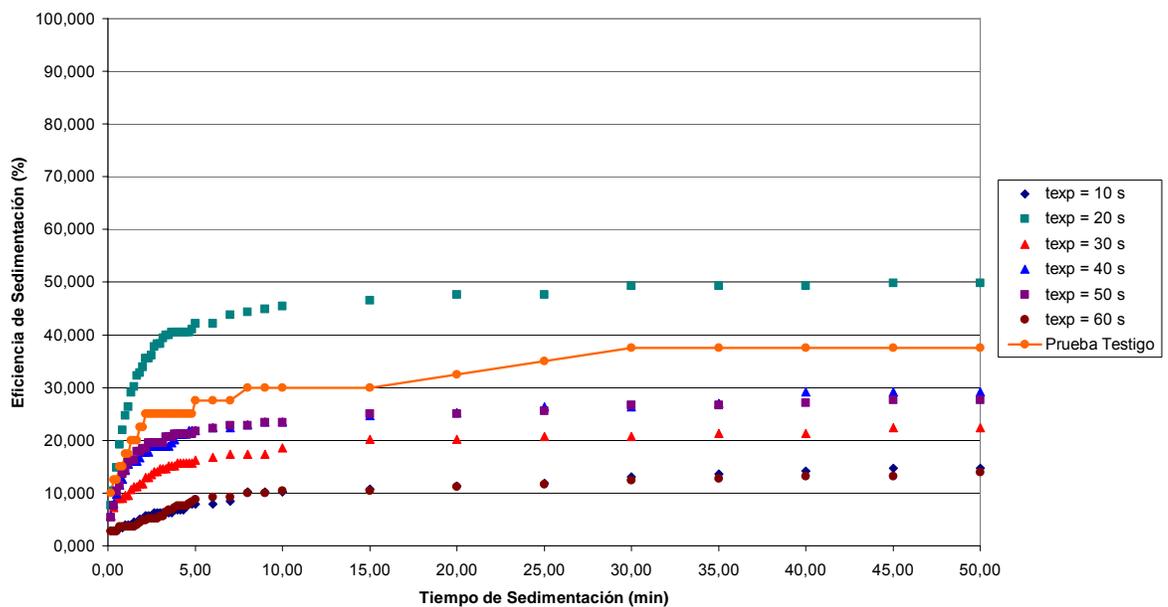
## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Diluciones de Licor de Prensa de 3,0 a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



## Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación para Recuperados de Centrífuga a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



## Comportamiento de la Eficiencia de Sedimentación para Recuperados de Centrífuga a Diferentes Tiempos de Exposición a Microondas



**ANEXO B. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE CRUDO DE  
PALMA**

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACEITE CRUDO DE PALMA. <sup>[22]</sup>

En el aceite de palma esta compuesto de ácidos grasos: ácido palmítico 44%, ácido oléico 42.50%, ácido esteárico 5%, linoleico 10.30% y en menor proporción mirístico y linolénico. Los ácidos palmíticos y esteáricos son ácidos grasos saturados mientras que el oléico y el linoleico son de tipo insaturado. También se puede encontrar en pequeñas fosfolípidos, ácidos grasos libres, sustancias orgánicas volátiles, aldehídos, cetonas y elementos como cobre, hierro, calcio, magnesio y Níquel.

El color rojizo característico del aceite crudo es debido a los carotenoides liposolubles (0,05 -0,2%), que también son responsables del contenido elevado de pro vitamina A del mismo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos en que es utilizado dentro de productos comestibles, el aceite es decolorado y este proceso de refinado destruye la pro vitamina A.

Algunas propiedades fisicoquímicas del aceite de palma se muestran en la tabla 8.

### Propiedades físicas del aceite de palma.

índice de Acidez	3.6%
índice de Saponificación	210ppm
Humedad	0,2%
Punto de Fusión	34.2 °C
Punto de Chispa	250 °C
índice de Refracción a 50 °C	1.4531
Densidad Aparente a 50 °C (g/ml)	0.889
índice Yodo	58,5

## **ANEXO C. GLOSARIO**

## GLOSARIO

### Etapas del Proceso de Extracción de Aceite Crudo de Palma

- Esterilización. Esta operación se realiza en autoclaves horizontales, donde se alimentan las vagonetas cargadas de fruta. El proceso se realiza en dos o tres picos de presión que oscilan entre 2 y 3 Kgf/cm<sup>2</sup>, previa desaireación del autoclave y descarga del vapor condensado entre pico y pico, para un tiempo total de esterilización entre 60 y 100 minutos. Este proceso reduce el contenido de humedad del racimo y afloja los frutos. La esterilización también desactiva las enzimas y, por lo tanto, estabiliza la calidad del aceite en término del desarrollo de ácidos grasos libres.
- Desfrutación. Esta etapa se realiza en un desfrutador, el cual es un tambor rotatorio que por medio del golpeteo permite separar la fruta esterilizada del raquis. Usualmente el raquis es utilizado como fertilizante de potasio en las plantaciones de palma.
- Digestión. El fruto separado en el desfrutado, es transportado a los digestores. Estos son tanques cilíndricos en donde el fruto se macera, hasta el grado de romper vasos lipógenos y liberar cierta cantidad de aceite. Esto se logra a una temperatura de 95 °C durante 20 minutos.
- Extracción por prensado. El fruto digerido es alimentado por gravedad a las prensas de tornillo, que trabajan entre 90 y 100 Kgf/cm<sup>2</sup>, contra la presión de unos conos ubicados a la salida, estos ejercen la acción de prensado extrayendo el aceite del mesocarpio. El aceite extraído que contiene impurezas orgánicas (material vegetal) e inorgánicas (arena) es enviado al proceso de clarificación. La masa del mesocarpio (fibra) y las nueces, conocida como torta, abandona la prensa y es transportada hacia la etapa

de beneficio de almendras, llamada palmistería. Durante la extracción, se debe controlar la presión de prensado para evitar el rompimiento exagerado de nueces, asimismo se recomienda trabajar con dos a más prensas en el proceso.

- Clarificación. La clarificación es básicamente una etapa de la separación del aceite del agua, lodo (material celular) por decantación, gracias a la diferencia de densidad existente entre sus componentes (aceite < lodos ligeros < agua < lodos pesados) y a la temperatura que disminuye la viscosidad del aceite para facilitar su separación de los lodos.
- Centrifuga deslodadora. Se encargan de recuperar el aceite presente en lodos provenientes de clarificación. El efluente de las deslodadoras es conducido a florentinos y el aceite recuperado es llevado a tanque de aceite Bruto para posteriormente ser enviado al Clarificador primario.
- Secado. El aceite proveniente de clarificación es llevado a los tanques secadores. Esta operación se realiza a una temperatura aproximadamente de 110°C, con el fin de obtener un producto de humedad del 0.1 %, para evitar que el aceite se oxide por la formación de hidroperóxidos.
- Almacenamiento. El aceite secado, es almacenado en tanques con calentamiento para posteriormente ser despachado en carro tanques para los clientes finales.

**Licor de Prensa:** También llamado aceite crudo diluido, es una mezcla constituida por aceite, agua del fruto, agua de dilución puesta en la prensa, sólidos naturales del fruto, arena y arcilla del suelo. Los rangos de composición son los siguientes: Aceite 40-75 %vol/vol; agua 10-40 %vol/vol y sólidos 6-25 %vol/vol

**Lodos Pesados:** Arena, arcilla, partículas pequeñas de huesco y fibras.

**Lodos Livianos:** Sustancias orgánicas como almidones, peptinas y gomas hidrolizadas.

**Mucílagos:** El mucílago es un producto orgánico de origen vegetal, de peso molecular elevado, superior a 200.000 g/gmol, cuya estructura molecular completa es desconocida. Están conformados por polisacáridos celulósicos que contienen el mismo número de azúcares que las gomas y peptinas. Los mucílagos producen coloides muy poco viscosos, que presentan actividad óptica y pueden ser hidrolizados y fermentados que se forman en el interior de las plantas durante su crecimiento, los cuales se utilizan en el proceso de clarificación de los jugos de la caña de azúcar para producir panela.

**ANEXO D. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO PARA LAS  
MUESTRAS DE ACEITE TESTIGO E IRRADIADA**

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO PARA LAS MUESTRAS  
DE ACEITE TESTIGO E IRRADIADA**

**Cantidad Relativa (%) de Ácidos Grasos Presentes en la Muestra Identificada  
como Muestra Testigo de Aceite Crudo de Palma.\***

ACIDO GRASO	CANTIDAD RELATIVA %		
	MEDICION 1	MEDICION 2	PROMEDIO
Caproico	0.01	0.01	< 0.1
Caprílico	0.01	0.01	< 0.1
Cáprico	0.01	0.01	< 0.1
Láurico	0.14	0.14	0.1
Mirístico	0.78	0.78	0.8
Pentadecanoico	0.05	0.05	< 0.1
Palmítico	41.08	41.16	41.1
Palmitoleico	0.13	0.13	0.1
Heptadecanoico	0.11	0.11	0.1
Esteárico	5.09	5.09	5.1
Oleico	41.11	41.11	41.1
Linoleico	9.19	9.22	9.2
Nonadecanoico	0.04	0.04	< 0.1
Linolénico	0.25	0.25	0.2
Araquídico	0.46	0.44	0.4
Eicosenoico	0.17	0.16	0.2
Behénico	0.07	0.07	< 0.1
Lignocérico	0.08	0.09	< 0.1

---

\* Laboratorio de Cromatografía, Universidad Industrial de Santander – UIS, 2006

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO PARA LAS MUESTRAS  
DE ACEITE TESTIGO E IRRADIADA**

**Cantidad Relativa (%) de Ácidos Grasos Presentes en la Muestra Identificada  
como Muestra Radiada de Aceite Crudo de Palma.\***

ACIDO GRASO	CANTIDAD RELATIVA %		
	MEDICION 1	MEDICION 2	PROMEDIO
Caproico	0.01	0.01	< 0.1
Caprílico	0.01	0.01	< 0.1
Cáprico	0.01	0.01	< 0.1
Láurico	0.14	0.13	0.1
Mirístico	0.78	0.77	0.8
Pentadecanoico	0.05	0.05	< 0.1
Palmítico	41.43	41.48	41.5
Palmitoleico	0.13	0.13	0.1
Heptadecanoico	0.11	0.11	0.1
Esteárico	5.10	5.09	5.1
Oleico	40.84	40.83	40.8
Linoleico	9.14	9.14	9.1
Nonadecanoico	0.03	0.03	< 0.1
Linolénico	0.25	0.25	0.2
Araquídico	0.45	0.45	0.4
Eicosenoico	0.17	0.17	0.2
Behénico	0.07	0.07	< 0.1
Lignocérico	0.08	0.08	< 0.1

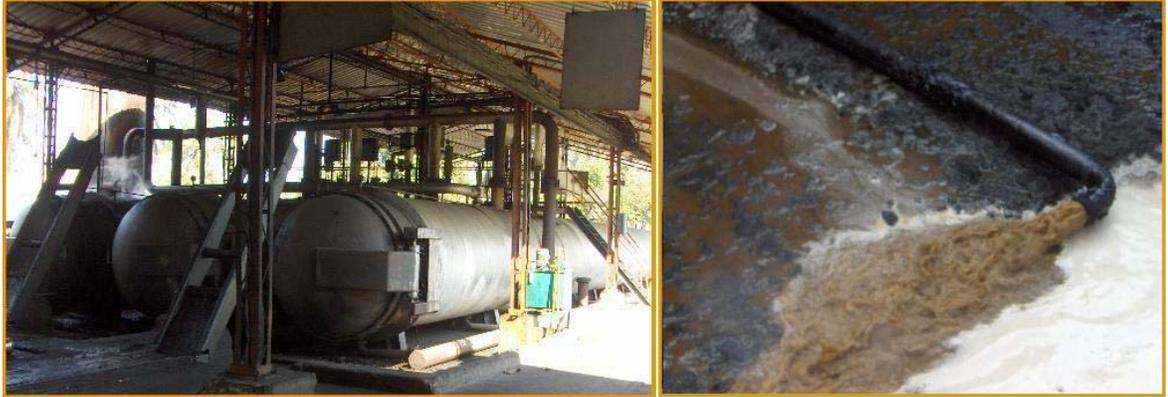
---

\* Laboratorio de Cromatografía, Universidad Industrial de Santander – UIS, 2006

## **ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO**

## REGISTRO FOTOGRÁFICO

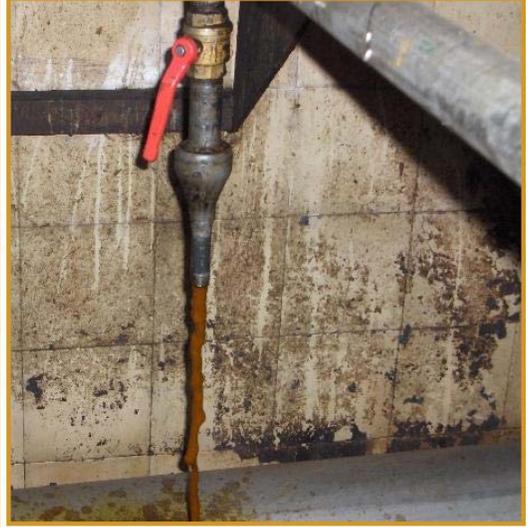
### PUNTO DE MUESTREO PARA CONDENSADOS DE ESTERILIZACIÓN



### PUNTO DE MUESTREO PARA LICOR DE PRENSA SIN DILUCIÓN



## PUNTO DE MUESTREO PARA RECUPERADOS DE CENTRÍFUGA



## PUNTO DE MUESTREO PARA DESCARGAS DEL CICLÓN DESARENADOR



**PUNTO DE MUESTREO PARA ENTRADA A FLORENTINOS**



**PUNTO DE MUESTREO PARA SALIDA DE EFLUENTES HACIA LAGUNAS**

