

# Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DEL VALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

Determinación del efecto de mitigación de formación de 3-MCPD en aceite crudo de palma mediante remoción de cloruros por lavado industrial

Trabajo de graduación presentado por  
Ronald Adolfo Herrera Salvatierra  
para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,  
2024



# Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DEL VALLE**  
GRUPO EDUCATIVO


Determinación del efecto de mitigación de formación de 3-MCPD en aceite crudo de palma mediante remoción de cloruros por lavado industrial

Trabajo de graduación presentado por  
Ronald Adolfo Herrera Salvatierra  
para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química


Guatemala,  
2024



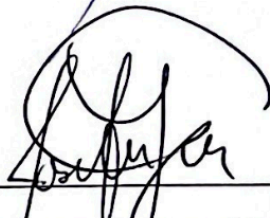
Vo. Bo.

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Juan Pablo Samaniego Duarte

Terna examinadora

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Juan Pablo Samaniego Duarte

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de diciembre de 2024



## Prefacio

La presente investigación nace de mi interés por el proceso general del aceite de palma, desde el cultivo de la palma hasta la refinación, producto de haber realizado mis prácticas profesionales en plantas de refinación de aceite de palma y al tomar conciencia de la importancia de las grasas vegetales en la alimentación mundial, lo grande que es el mercado y la relevancia que representa para la economía de ciertas áreas de Guatemala. Al investigar y conocer distintas problemáticas, la seguridad alimentaria fue lo que más resonó en mi mente, pensamientos e ideas, en particular la formación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol, debido a los posibles efectos negativos que tales compuestos tienen en la salud humana. Falta más información sobre los riesgos para la salud humana, siendo la Unión Europea el conjunto de países que más ha realizado investigaciones, principalmente del 3-MCPD, determinando que es un posible cancerígeno con toxicidad renal, con la finalidad de proteger la salud de sus habitantes, ya que el aceite de palma está presente en una gran cantidad de alimentos. Este trabajo de graduación me permitió acercarme más a la parte agroindustrial del aceite de palma, brindándome mayor experiencia como ingeniero en una rama a la que, en un futuro muy cercano, me gustaría dedicarme, para realizar los procesos de la mejor forma posible, maximizando eficiencias y disminuyendo el impacto ambiental.

Quiero agradecer a mis padres por darme el privilegio de recibir una educación superior, algo que es un lujo en una nación donde menos del 2% de la población puede acceder a tal beneficio, el cual permite ampliar la visión del mundo y entender el entorno de otra manera, viéndolo desde una perspectiva donde todo es matemática y química, donde la mejora continua es el éxito que se persigue día a día. También quiero agradecer a todos los maestros que he tenido a lo largo de mi travesía universitaria, ya que cada uno de ellos ha sido parte de mi formación profesional.

La vida es mejor con amigos. Quiero agradecer a cada uno de los amigos que hice durante estos años, conocidos que se hicieron amigos, amigos que se hicieron familia, con quienes pasé muy buenos años llenos de mucha alegría.

## Contenido

<i>Prefacio</i> .....	<i>vii</i>
<i>Listado de cuadros</i> .....	<i>xii</i>
<i>Listado de figuras</i> .....	<i>xv</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>xvi</i>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Justificación</b> .....	<b>3</b>
<b>III. Marco teórico</b> .....	<b>5</b>
<b>A. Descripción de palma africana</b> .....	<b>5</b>
<b>B. Composición de aceite de palma</b> .....	<b>6</b>
<b>C. Factores económicos de la industria nacional</b> .....	<b>7</b>
<b>D. Obtención de aceite crudo de palma</b> .....	<b>8</b>
<b>E. Refinación de aceite de palma</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Blanqueado</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Desodorización</b> .....	<b>9</b>
<b>F. Condiciones de operación</b> .....	<b>9</b>
<b>G. Cualidades de aceite crudo de palma</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Contenido de ácidos grasos</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Contenido de ácidos grasos libres (FFA)</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Contenido de humedad</b> .....	<b>11</b>
<b>4. Contenido de impurezas</b> .....	<b>11</b>
<b>5. Color</b> .....	<b>12</b>
<b>6. Punto de fusión</b> .....	<b>12</b>
<b>7. Composición de tocoferoles y tocotrienoles</b> .....	<b>12</b>
<b>8. Índice de peróxidos</b> .....	<b>12</b>
<b>H. Subproductos</b> .....	<b>12</b>
<b>I. Fertilizantes</b> .....	<b>12</b>
<b>J. Fertilizantes orgánicos</b> .....	<b>12</b>
<b>K. Fertilizantes químicos</b> .....	<b>13</b>
<b>L. Biofertilizantes</b> .....	<b>13</b>
<b>M. Aumento de cloruros en el aceite de palma</b> .....	<b>13</b>
<b>N. Problemas ambientales y sociales</b> .....	<b>13</b>
<b>O. 3MCPD y GE</b> .....	<b>15</b>

<b>P.</b>	<b>Mecanismo de formación 3-MCPD .....</b>	<b>16</b>
<b>Q.</b>	<b>2-MCPD.....</b>	<b>16</b>
<b>R.</b>	<b>Reglamento de la Junta de Aceite de Palma de Malasia 3-MCPD .....</b>	<b>17</b>
<b>S.</b>	<b>Mitigación de 3-MCPD.....</b>	<b>18</b>
<b>T.</b>	<b>Mitigación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol (GE).....</b>	<b>18</b>
	1. Optimización del proceso de refinación .....	18
	2. Uso de materiales de partida con bajo contenido en cloruros.....	18
	3. Uso de adsorbentes .....	18
	4. Adición de agentes antioxidantes .....	19
	5. Monitoreo y control del proceso .....	19
<b>U.</b>	<b>Riesgos a la salud provocados por 3-MCPD, 2-MCPD y Glicidol.....</b>	<b>19</b>
<b>V.</b>	<b>Proceso de lavado de aceite crudo de palma.....</b>	<b>19</b>
<b>W.</b>	<b>Descripción del proceso de lavado .....</b>	<b>19</b>
	1. Introducción del agua .....	19
	2. Mezcla de aceite y agua.....	20
	3. Separación de fases.....	20
	4. Eliminación de agua residual .....	20
	5. Monitoreo y control.....	20
<b>X.</b>	<b>Objetivo y beneficios del lavado de aceite crudo de palma .....</b>	<b>20</b>
	4. Calidad del aceite .....	21
	5. Eficiencia de la separación .....	21
	6. Diseño del equipo.....	21
	7. Costo-beneficio .....	22
<b>Y.</b>	<b>Osmosis inversa .....</b>	<b>22</b>
<b>Z.</b>	<b>Proceso de la ósmosis inversa.....</b>	<b>22</b>
	Aplicaciones comunes: .....	22
<b>AA.</b>	<b>Análisis realizados a aceite crudo de palma.....</b>	<b>23</b>
	1. Peróxido (meq/kg) .....	23
	2. Acidez (%FFA).....	24
	3. P-anisidina.....	24
	4. Humedad (%) .....	24
	5. Dobi.....	24
<b>BB.</b>	<b>Equipos de análisis fisicoquímico para el aceite.....</b>	<b>24</b>
	1. Equipo de medición de cloruros.....	24
<b>CC.</b>	<b>Ventajas del XPLOER TX/TS.....</b>	<b>25</b>
<b>DD.</b>	<b>Espectrofotómetro UV-VIS .....</b>	<b>25</b>
<b>EE.</b>	<b>Cromatógrafo de Gases (GC).....</b>	<b>26</b>
<b>FF.</b>	<b>Certificaciones ISO .....</b>	<b>27</b>

<b>GG. AOCS Cd 29c-13</b> .....	<b>27</b>
<b>1.1.1 Procedimiento</b> .....	<b>27</b>
<b>HH. Ecuaciones utilizadas para obtención de resultados</b> .....	<b>28</b>
<b>Ecuación 1:</b> Determinación de valor de peróxido en aceite crudo de palma.....	<b>28</b>
<b>Ecuación 2:</b> Determinación de ácidos grasos libres de aceite crudo de palma....	<b>28</b>
<b>Ecuación 3:</b> Determinación de valor de yodo en aceite crudo de palma.....	<b>28</b>
<b>Ecuación 4:</b> Determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma...	<b>28</b>
<b>Ecuación 5:</b> Determinación de porcentaje de humedad en aceite crudo de palma. .....	<b>29</b>
<b>Ecuación 6:</b> Determinación de Dobi en aceite crudo de palma .....	<b>29</b>
<b>IV. Antecedentes</b> .....	<b>31</b>
<b>V. Objetivos</b> .....	<b>33</b>
<b>VI. Metodología</b> .....	<b>35</b>
<b>AOCS Cd 8B-90: Determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma.</b> .....	<b>35</b>
<b>AOCS Ca 5a-40: Determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos.</b> .....	<b>36</b>
<b>AOCS Cd 1-25: Determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs.</b> .....	<b>37</b>
<b>AOCS Cd-18-90: Determinación de valor de P-anisidina.</b> .....	<b>39</b>
<b>AOCS Ca 2b-38: Determinación de humedad presente en aceite crudo de palma.</b> .....	<b>40</b>
<b>AOCS Cc13j-97: Determinación de DOBI (Índice de Degradación de Blanqueabilidad)</b> .....	<b>41</b>
<b>Medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS</b> .....	<b>42</b>
<b>ISO 10523:2008: Determinación de pH en agua osmotizada.</b> .....	<b>43</b>
<b>ISO 7888:1985: Determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales.</b> .....	<b>44</b>
<b>ISO 6059:1984 Determinación de dureza total (Ca/Mg)</b> .....	<b>44</b>
<b>ISO 9297:1989: Determinación de cloruros en agua osmotizada.</b> .....	<b>45</b>
<b>ISO 7027:1999: Determinación de turbidez en agua osmotizada.</b> .....	<b>46</b>
<b>VII. Resultados</b> .....	<b>48</b>
<b>VIII. Discusión de resultados</b> .....	<b>50</b>
<b>IX. Conclusiones</b> .....	<b>58</b>
<b>X. Recomendaciones</b> .....	<b>61</b>
<b>XII. Anexos</b> .....	<b>67</b>

<b>Cálculos de muestra .....</b>	<b>67</b>
<b>Datos originales .....</b>	<b>68</b>
<b>Datos calculados .....</b>	<b>69</b>
<b>Imágenes de experimentación .....</b>	<b>72</b>
<b>Balances de masa .....</b>	<b>83</b>
<b>Análisis de error .....</b>	<b>84</b>
<b><i>VIII. Glosario.....</i></b>	<b>86</b>

## Listado de cuadros

<b>Cuadro 1:</b> Cristalería necesaria para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma. ....	35
<b>Cuadro 2:</b> Equipo necesario para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma. ....	35
<b>Cuadro 3:</b> Reactivos necesarios para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma. ....	35
<b>Cuadro 4:</b> Cristalería requerida para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos. ....	36
<b>Cuadro 5:</b> Equipo requerido para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos. ....	36
<b>Cuadro 6:</b> Reactivos requeridos para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos. ....	36
<b>Cuadro 7:</b> Cristalería requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs. ....	37
<b>Cuadro 8:</b> Equipos requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs. ....	37
<b>Cuadro 9:</b> Reactivos requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs. ....	38
<b>Cuadro 10:</b> Cristalería requerida para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma. ....	39
<b>Cuadro 11:</b> Equipo requerido para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma. ....	39
<b>Cuadro 12:</b> Equipo requerido para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma. ....	39
<b>Cuadro 13:</b> Reactivos requeridos para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma. ....	39
<b>Cuadro 14:</b> Cristalería requerida para determinación de humedad presente en aceite crudo de palma. ....	40
<b>Cuadro 15:</b> Equipo requerido para determinación de humedad presente en aceite crudo de palma. ....	40
<b>Cuadro 16:</b> Cristalería requerida para determinación de DOBI en aceite crudo de palma. ....	41
<b>Cuadro 17:</b> Equipo requerido para determinación de DOBI en aceite crudo de palma. ....	41
<b>Cuadro 18:</b> Equipo requerido para determinación de DOBI en aceite crudo de palma. ....	41
<b>Cuadro 19:</b> Reactivos requeridos para determinación de DOBI en aceite crudo de palma. ....	41

<b>Cuadro 20:</b> Cristalería requerida para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS.....	42
<b>Cuadro 21:</b> Equipo requerido para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS. ....	42
<b>Cuadro 22:</b> Reactivos requeridos para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS.....	42
<b>Cuadro 23:</b> Cristalería requerida para determinación de valor de pH en agua osmotizada. ....	43
<b>Cuadro 24:</b> Reactivos requeridos para determinación de valor de pH de agua osmotizada. ....	43
<b>Cuadro 25:</b> Equipos requeridos para determinación de valor de pH de agua osmotizada. ....	43
<b>Cuadro 26:</b> Cristalería requerida para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada. ....	44
<b>Cuadro 27:</b> Reactivos requeridos para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada. ....	44
<b>Cuadro 28:</b> Equipos requeridos para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada. ....	44
<b>Cuadro 29:</b> Cristalería requerida para determinación de dureza total de agua osmotizada. ....	44
<b>Cuadro 30:</b> Reactivos requeridos para determinación de dureza total de agua osmotizada. ....	45
<b>Cuadro 31:</b> Cristalería requerida para determinación de cloruros en agua osmotizada. ....	45
<b>Cuadro 32:</b> Reactivos requeridos para determinación de cloruros en agua osmotizada. ....	45
<b>Cuadro 33:</b> Cristalería requerida para determinación de turbidez de agua osmotizada. ....	46
<b>Cuadro 34:</b> Equipo requerido para determinación de turbidez de agua osmotizada. .	46
<b>Cuadro 35:</b> Reactivos requeridos para determinación de turbidez de agua osmotizada. ....	46
<b>Cuadro 36:</b> Resultado de proporciones de agua utilizadas, cloruros antes de lavado, después y % de remoción de cloruros en ACP. ....	48
<b>Cuadro 37:</b> Resultado de cantidades de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol obtenido de aceite crudo de palma que haya tenido un proceso de lavado industrial con agua osmotizada. ....	48
<b>Cuadro 38:</b> Resultados de parámetros de calidad de aceite crudo de palma que ha pasado por lavado industrial. ....	49
<b>Cuadro 39:</b> Proporciones de agua osmotizada utilizada para lavado respecto al flujo de aceite crudo de palma utilizado.....	68
<b>Cuadro 40:</b> Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 10% de flujo de agua osmotizada....	69
<b>Cuadro 41:</b> Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 7% de flujo de agua osmotizada.....	69

<b>Cuadro 42:</b> Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 5% de flujo de agua osmotizada.....	70
<b>Cuadro 43:</b> Impurezas totales presentes en ACP con base en remoción.....	70
<b>Cuadro 44:</b> Parámetros de calidad de aceite crudo de palma que no ha pasado por lavado industrial.....	71
<b>Cuadro 45:</b> Parámetros de calidad de agua osmotizada luego de un proceso de ósmosis inversa.....	71

## Listado de figuras

<b>Figura 1:</b> Fruto de la semilla de palma africana .....	6
<b>Figura 2:</b> Racimo de frutos de palma africana.....	6
<b>Figura 3:</b> Proceso de extracción de aceite crudo de palma.....	8
<b>Figura 4:</b> Proceso de desgomado de aceite de palma.....	10
<b>Figura 5:</b> Proceso de blanqueado de aceite de palma.....	10
<b>Figura 6:</b> Proceso de desodorización de aceite de palma.....	11
<b>Figura 7:</b> Estructura química de 3MCPD.....	15
<b>Figura 8:</b> Estructura química de 3MCPD.....	15
<b>Figura 9:</b> Estructura química de 3MCPD.....	17
<b>Figura 10:</b> Diagrama de flujo de sistema de lavado de aceite crudo de palma.....	21
<b>Figura 11:</b> Principio de ósmosis inversa.....	23
<b>Figura 12:</b> Espectrofotómetro UV-VIS.....	26
<b>Figura 13:</b> Cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (GC/MS) ...	26
<b>Figura 14:</b> Análisis realizado por laboratorio externo de determinación de cantidad de 3-MCPD, 2-MCPD y Glicidol presente en aceite crudo de palma.....	72
<b>Figura 15:</b> Torre de desodorización de aceite de palma.....	73
<b>Figura 16:</b> Centro de control de torre de desodorización de aceite de palma.....	74
<b>Figura 17:</b> Aceite de palma cruda, luego de blanqueo y después de desodorización.	75
<b>Figura 18:</b> Panel de control de línea 2 de lavado de aceite crudo de palma.....	75
<b>Figura 19:</b> Equipo de microcoulometría XPLORER TX/TS.....	76
<b>Figura 20:</b> Panel de control de centrifugadora que permiten separación de aceite lavado y agua osmotizada con cloruros.....	77
<b>Figura 21:</b> Plantación de palma africana.....	78
<b>Figura 22:</b> Planta de extracción de aceite de palma.....	79
<b>Figura 23:</b> Medidor de flujo másico de coriólisis.....	80
<b>Figura 24:</b> Planta de lavado de aceite crudo de palma.....	81
<b>Figura 25:</b> Sistema de ósmosis inversa.....	82
<b>Figura 26:</b> Plano P&ID de lazo de control relación agua-aceite.....	83
<b>Figura 27:</b> Balance de masa en tanque de agitación de aceite crudo de palma, y agua osmotizada.....	83
<b>Figura 28:</b> Balance de masa de centrifugadora encargada de la separación del agua con impurezas y aceite crudo de palma.....	84

## Resumen

El presente estudio se centra en la mitigación de compuestos nocivos como el 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol en el aceite crudo de palma, mediante la remoción de cloruros, que son precursores de estos contaminantes durante el proceso de refinación. Para ello, se implementó un proceso de lavado industrial utilizando agua osmotizada en diferentes proporciones de flujo (5%, 7% y 10%) con respecto al flujo de aceite crudo. El objetivo principal fue evaluar cómo estas proporciones de agua influyen en la eficiencia de remoción de cloruros y en la reducción de la formación de dichos compuestos.

Los resultados indicaron que el flujo del 10% de agua osmotizada fue el más eficiente, logrando una remoción de cloruros del 90%, reduciendo la concentración de estos a 0.40 ppm, lo cual es significativamente inferior al límite crítico de 10 ppm. Los análisis realizados después del proceso de lavado confirmaron que las concentraciones de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol estaban por debajo del límite de cuantificación (<0.10 ppm), cumpliendo con los estrictos requisitos de seguridad alimentaria, en particular las normativas de la Unión Europea.

Además, se evaluaron parámetros de calidad del aceite crudo de palma lavado, tales como los niveles de peróxidos, acidez, P-anisidina, humedad y el índice DOBI. Los resultados mostraron que, con el flujo del 10%, el aceite presentó valores óptimos para la refinación industrial, con bajos niveles de peróxidos (0.63 meq/kg), una acidez dentro de los límites aceptables y una humedad controlada de 0.45%, lo que evita la necesidad de un secado adicional. El índice DOBI de 3.16 indicó que el aceite es de alta calidad y adecuado para su procesamiento.

Este estudio demuestra que el proceso de lavado con agua osmotizada, particularmente con un flujo del 10%, no solo permite una remoción efectiva de cloruros, sino que también garantiza que el aceite de palma resultante cumpla con los estándares de calidad y seguridad alimentaria internacionales. Estos hallazgos son relevantes para la industria del aceite de palma, ya que optimizan el proceso de refinación, mejoran la calidad del producto final y aseguran la protección de la salud pública.



## I. Introducción

El aceite de palma es actualmente el aceite vegetal de mayor consumo mundial, en gran parte debido a su bajo costo de producción, versatilidad y alto rendimiento. No obstante, el proceso de refinación del aceite plantea varios desafíos en términos de inocuidad alimentaria, particularmente con la formación de contaminantes como 3-monocloropropanodiol (3-MCPD), 2-MCPD y glicidol. Estos compuestos tóxicos se generan principalmente a partir de la presencia de cloruros en el aceite crudo, los cuales provienen del uso de fertilizantes ricos en cloruro de potasio durante el cultivo de la palma.

La preocupación por el 3-MCPD radica en su clasificación como un potencial carcinógeno, habiéndose demostrado su toxicidad renal en estudios con animales. Como respuesta, la Unión Europea ha impuesto límites estrictos a la cantidad permitida de este compuesto en productos alimentarios, lo que ha impulsado a la industria a adoptar medidas que reduzcan su formación durante el proceso de refinación.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar una estrategia para mitigar la generación de 3-MCPD en el aceite crudo de palma mediante la eliminación de cloruros a través de un lavado industrial con agua osmotizada. Se explorarán diferentes proporciones de agua en el proceso para determinar cuál es la más eficiente en la remoción de estos precursores, con el fin de asegurar que el aceite refinado cumpla con los estándares internacionales de calidad y seguridad.

El estudio no solo busca mejorar la calidad final del aceite de palma, sino también optimizar los procesos de producción, reduciendo costos y garantizando la protección de la salud pública. Además, esta investigación contribuirá a fortalecer la competitividad de la industria del aceite de palma en los mercados internacionales, donde la demanda por productos más seguros y de mejor calidad es cada vez mayor.



## II. Justificación

El aceite de palma y sus ácidos grasos, oleína y estearina, son las grasas vegetales de mayor consumo en el mundo. La probabilidad de que un producto que menciona en su etiqueta nutricional la presencia de aceite vegetal sea de palma es sumamente alta. En el año 2022, se consumieron 88.9 millones de toneladas de aceite de palma en el mundo, cifra que va en aumento cada año. (Agraria.pe, 2023)

La producción agrícola de palma ha aumentado debido a la alta demanda de grasas vegetales en el mundo, y en busca de maximizar rendimientos y crecimiento de la palma de aceite, se tiende a utilizar fertilizantes. Estos fertilizantes, si bien ayudan a promover el crecimiento, pueden aumentar la cantidad de cloruros en el aceite de palma. Esto representa una problemática creciente, ya que los cloruros son precursores de 3-MCPDE, un compuesto considerado como posible cancerígeno en humanos. Aunque falta investigación al respecto, se ha determinado que es cancerígeno en animales de prueba en laboratorios. (IARC, 2013)

Países de primer mundo imponen regulaciones sobre el contenido máximo permitido; en Europa, este límite es de 1.5 mg/kg en grasas destinadas a alimentos para niños y 2.5 g/kg en aceites comestibles. Organizaciones como la RSPO (Round Table on Sustainable Palm Oil), agentes certificadores de aceite de palma sostenible, tratan de crear conciencia en los productores sobre sus posibles efectos adversos para la salud, así como proponer procesos para minimizar el contenido de compuestos no deseados. (Santiago, J. K., Silva, W. C., Capristo, 2021)

Es por esta problemática que este trabajo busca mitigar la formación de 3-MCPD mediante la remoción de cloruros en el aceite crudo de palma a través de un lavado industrial utilizando agua osmotizada, garantizando de esa forma un aceite crudo de palma de calidad y seguro para la salud del consumidor.



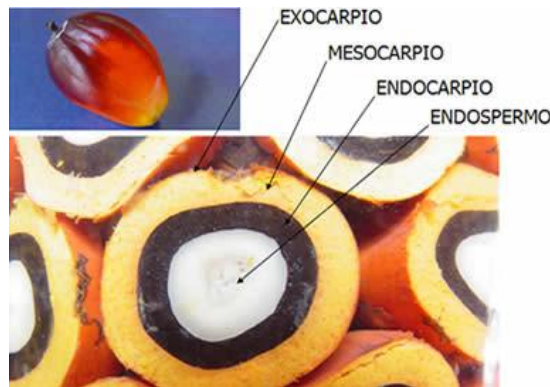
### III. Marco teórico

#### A. Descripción de palma africana

El aceite de palma se obtiene del mesocarpio de la palma africana (*Elaeis guineensis*), una planta tropical originaria de la región del golfo de Guinea, en África Occidental. Este aceite tiene una larga historia, con evidencias que sugieren su uso en tiempos antiguos; se han encontrado restos de grasa en jarrones funerarios en Abydos, Egipto, los cuales podrían haber sido de palma africana. Esta planta prospera en climas tropicales cálidos y en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 500 metros. Su propagación y uso global se atribuyen a los colonizadores y comerciantes portugueses, quienes la introdujeron como parte de su dieta. Con el tiempo, la palma y su aceite se han consolidado como parte fundamental de la alimentación de miles de personas en todo el mundo, un fenómeno favorecido por la globalización. Hoy en día, el aceite de palma es la grasa vegetal más consumida a nivel mundial. Su popularidad se debe, en parte, a su bajo costo, versatilidad, solidez a temperatura ambiente y textura, lo que lo convierte en un excelente sustituto de la mantequilla y las grasas hidrogenadas en muchos productos procesados. Además, su uso no se limita solo a la alimentación, ya que también es utilizado en sectores industriales como el de los cosméticos y productos de limpieza.

Los frutos de la palma africana tienen una forma ovoide, miden entre 3 y 6 cm de largo y pesan aproximadamente de 5 a 12 gramos. Su piel es lisa y brillante (exocarpio), y están compuestos por una pulpa o tejido fibroso que contiene las células con aceite (mesocarpio), una nuez o semilla formada por un cuesco lignificado (endocarpio) y una almendra aceitosa o palmiste (endospermo). Estos frutos están dispuestos en espiguillas que rodean el raquis de manera helicoidal, formando racimos cuyo peso varía entre los 5 y 40 kg. (Borrero, C. A., 2015)

**Figura 1:** Fruto de la semilla de palma africana



Fuente: Borrero, C.A., 2015.

**Figura 2:** Racimo de frutos de palma africana.



Fuente: Borrero, C.A., 2015.

## **B. Composición de aceite de palma**

El aceite es ampliamente conocido por la composición de ácidos grasos y otros componentes vitamínicos que esta posee, los valores pueden cambiar respecto al origen de la plantación la forma de extracción y del procesamiento.

- **Ácido palmítico:** Aproximadamente 44-47%
- **Ácido oleico:** Alrededor del 39-43%
- **Ácido linoleico:** Cerca del 10-13%
- **Ácido esteárico:** Aproximadamente 4-5%
- **Otros ácidos grasos (ácido mirístico, ácido linolénico, etc.):** Menor al 2%
- **Vitaminas liposolubles:** El aceite de palma contiene vitaminas liposolubles como la vitamina E, tocotrienoles y carotenoides, incluyendo el beta-caroteno, que le confiere su color rojizo característico.
- **Fitoesteroles:** Son compuestos vegetales que se encuentran en el aceite de palma y pueden tener efectos beneficiosos para la salud.

- **Tocoferoles y tocotrienoles:** Formas de vitamina E presentes en el aceite de palma que actúan como antioxidantes. (Chow, C.K, 2007)

### **C. Factores económicos de la industria nacional**

La palma tiene mayor rentabilidad que otros aceites, pudiendo obtener hasta más de 25 toneladas por hectárea, todo dependiendo de las condiciones y del cuidado que se le dé, en comparación a las 5 toneladas por hectárea que se pueden conseguir con el aceite de soya, siendo otro de los más consumidos, pero no posee un rendimiento tan bueno como el que la palma puede conseguir (Sergieieva, K, 2023).

En Guatemala, el sector agrícola tiene un impacto positivo en el desarrollo de los sectores y comunidades donde actúa. Y en el caso del cultivo de aceite de palma africana, los datos indican que el aporte al país es bueno:

1. El sector palmicultor genera más de 28,500 empleos directos, lo que da como resultado 143,000 beneficiados de forma indirecta.
2. Cuando vamos a millones de dólares, el cultivo de este aceite, genera más de USD\$400 millones.
3. Las exportaciones de aceite de palma africana, generan más de USD\$390 millones, tomando en cuenta que en 2019 el 93% de la producción, se exportó.
4. El sector palmicultor representa el 1.09 del PIB.

Los tres territorios geográficos más beneficiados con esto, son:

- El Sur Occidente, con San Marcos y Retalhuleu.
- El Sur, con Escuintla.
- El Nor Oriente con Izabal.
- El Norte con Petén (Repsa, 2020).

## D. Obtención de aceite crudo de palma

En la primera etapa del proceso de extracción de aceite de palma, los racimos de fruta ingresan al esterilizador para ser sometidos a un proceso de cocimiento. Esto consiste en la aplicación de vapor de agua a baja presión con lo que se logran tres propósitos, detener el proceso de maduración, ablandar los tejidos oleaginosos de la pulpa de la fruta de palma y esterilizar los RFF.

Luego de la esterilización los racimos ingresan al desfrutador para separar los frutos del raquis o tuzas. Este primer subproducto es reutilizado en la producción agrícola para mejorar la textura de los suelos de la plantación (Repsa, 2021).

Posteriormente los frutos ingresan a las prensas y digestores en donde son sometidos a un proceso de macerado para desprender así la pulpa de las nueces y disponer el aceite contenido en la pulpa. La masa obtenida se somete a una temperatura de 95°C quedando lista para el prensado en donde se separa la pulpa, las nueces y una fase líquida que contiene el aceite, agua y lodos (Repsa, 2021).

Esta fase líquida que se obtiene en la separación de las prensas pasa al clarificador donde inicia el proceso de separación de sedimentos, agua y aceite rojo; el flujo continúa hacia las centrífugas donde finalmente se separa el aceite del agua que ha acompañado todo el proceso. De esta forma se obtiene el aceite crudo de palma (Repsa, 2021).

**Figura 3:** Proceso de extracción de aceite crudo de palma.



Fuente: Aceites de Palma, S.A., 2014.

## E. Refinación de aceite de palma

### 1. Desgomado y neutralización

En esta fase, se eliminan fosfolípidos, metales, y ácidos grasos libres. Se agrega ácido fosfórico o cítrico, que precipita las impurezas, y una base como hidróxido de sodio (NaOH) para neutralizar los ácidos grasos libres (AGL). Esto permite separar estos elementos no deseados mediante centrifugación o decantación. (Ramli, M. R., Ismail, R., & Idris, Z, 2017)

## 2. Blanqueado

El objetivo del blanqueado es eliminar pigmentos (carotenoides y clorofila), además de otros componentes oxidativos y metales traza. Para ello, se usa tierra blanqueadora (un material absorbente). El aceite se calienta y pasa por un filtro de tierras que absorbe estos contaminantes. El proceso también ayuda a eliminar restos de jabón formados en la neutralización. (Ramli, M. R., Ismail, R., & Idris, Z, 2017)

## 3. Desodorización

Este proceso es clave para remover compuestos volátiles que generan olores y sabores no deseados. La desodorización se realiza sometiendo el aceite a altas temperaturas (240–260 °C) en un flujo de vapor, lo que volatiliza y elimina esos compuestos. (Ramli, M. R., Ismail, R., & Idris, Z, 2017)

## F. Condiciones de operación

### 1. Desgomado

- **Temperatura:** 70-80°C.
- **Agentes:** Ácido fosfórico o ácido cítrico.
- **Objetivo:** Eliminar fosfolípidos y otras impurezas solubles en agua.

### 2. Neutralización

- **Temperatura:** 60-70°C.
- **Agentes:** Hidróxido de sodio (NaOH) o carbonato de sodio.
- **Objetivo:** Neutralizar los ácidos grasos libres presentes en el aceite.

### 3. Blanqueo

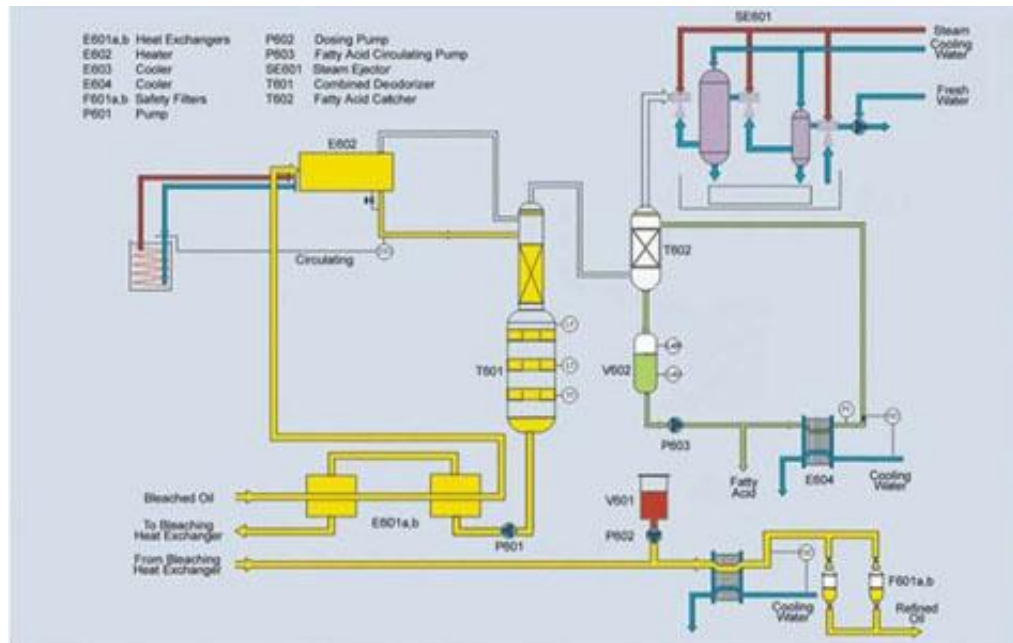
- **Temperatura:** 85-105°C.
- **Agentes:** Arcillas activas o carbón activado.
- **Objetivo:** Eliminar colorantes y otros compuestos no deseados.

### 4. Desodorización

- **Temperatura:** 180-240°C.
- **Presión:** Vacío (para evitar la oxidación).
- **Objetivo:** Eliminar olores y sabores no deseados a través de la destilación al vacío



**Figura 6:** Proceso de desodorización de aceite de palma.



Fuente: KROHNE Messtechnik GmbH., s.f.

## G. Cualidades de aceite crudo de palma

### 1. Contenido de ácidos grasos

El aceite de palma crudo contiene una mezcla de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. La proporción de estos ácidos grasos puede variar y tiene un impacto en la estabilidad y calidad del aceite. (K Gupta, M, 1998)

### 2. Contenido de ácidos grasos libres (FFA)

Los ácidos grasos libres son indicadores de la degradación del aceite. Altos niveles de FFA pueden ser un signo de una calidad inferior del aceite. (K Gupta, M, 1998)

### 3. Contenido de humedad

El aceite de palma crudo puede contener ciertos niveles de humedad que pueden influir en su estabilidad y vida útil. (K Gupta, M, 1998)

### 4. Contenido de impurezas

La presencia de impurezas, como residuos sólidos, partículas suspendidas o materiales extraños, puede afectar la calidad del aceite y requerir procesos de purificación. (K Gupta, M, 1998)

## **5. Color**

El color del aceite de palma crudo puede variar desde un tono rojizo hasta un color amarillo oscuro debido a los pigmentos naturales presentes en las frutas de palma. (K Gupta, M, 1998)

## **6. Punto de fusión**

El punto de fusión es la temperatura a la cual el aceite pasa del estado sólido al líquido. En el caso del aceite de palma, su punto de fusión es relativamente alto debido a su contenido de ácidos grasos saturados. (K Gupta, M, 1998)

## **7. Composición de tocoferoles y tocotrienoles**

Los tocoferoles y tocotrienoles son antioxidantes naturales presentes en el aceite de palma crudo que pueden influir en su estabilidad oxidativa. (K Gupta, M, 1998)

## **8. Índice de peróxidos**

Es una medida del nivel de oxidación inicial en el aceite, lo que indica su frescura y estabilidad. (K Gupta, M, 1998)

## **H. Subproductos**

En las extractoras se utilizan todos los subproductos derivados del proceso de obtención de aceite crudo de palma, los raquis o tuzas se utilizan en campo, de las nueces del fruto se obtiene el aceite y la harina de palmiste, la fibra de la pulpa se emplea como biocombustible que alimenta las calderas y el efluente, luego del proceso de tratamiento, se reutiliza en el sistema de fertirriego instalado en un área de la plantación. (Repsa, 2021)

## **I. Fertilizantes**

Para el crecimiento adecuado de las plantas se necesitan unas condiciones óptimas el suelo y del aire, generalmente esas condiciones no están completas y es necesario acudir a los fertilizantes siendo los que proporcionan los nutrientes para el crecimiento y fortalecimiento de las plantas, dando una mayor productividad a los cultivos agrícolas. (PQP Profesional, 2021)

## **J. Fertilizantes orgánicos**

Son fertilizantes de origen vegetal o animal, se les llama también abono y por lo general se usan en la agricultura ecológica. Estos fertilizantes tardan más en disolverse, por lo cual, el proceso de absorción es más lento, pero mejoran considerablemente la calidad del suelo a largo plazo. Algunos fertilizantes orgánicos son el estiércol de vaca, cerdo, aves de corral y la composta. (PQP Profesional, 2021)

## **K. Fertilizantes químicos**

Son fertilizantes de origen mineral, vegetal o sintético, que tienen procesos de fabricación industrializados. Benefician los cultivos porque actúan de manera más eficiente proporcionando generalmente nitrógeno, fósforo, hierro, zink, potasio entre otros. (PQP Profesional, 2021)

## **L. Biofertilizantes**

Están hechos a base de bacterias u hongos que proporcionan los nutrientes necesarios para mejorar la salud de los suelos y la producción agrícola. Algunos tipos de biofertilizantes son el humus de lombriz y la composta. Productos ideales para la agricultura ecológica, que son inocuos para el medio ambiente y propician un proceso sostenible de cultivo. (PQP Profesional, 2021)

## **M. Aumento de cloruros en el aceite de palma**

La absorción de cloruros por las plantas se debe principalmente a los fertilizantes aplicados en el suelo, especialmente aquellos que contienen compuestos como el cloruro de potasio (KCl), una fuente significativa de cloruros. Cuando estos fertilizantes se integran al suelo, los iones de cloruro son absorbidos por las raíces de las palmas, que luego transportan estos cloruros a las hojas y los frutos de la planta, aumentando así la concentración de cloruros en el aceite extraído. (Ahmed, F. A., & Ali, M., 2016)

El aceite de palma con altos niveles de cloruros puede presentar dificultades durante el proceso de refinación, ya que los compuestos de cloro pueden reaccionar y formar sustancias como el 3-MCPD (3-monocloropropano-1,2-diol) y glicidil ésteres, compuestos potencialmente peligrosos para la salud. (Ahmed, F. A., & Ali, M., 2016)

Por lo tanto, el uso de fertilizantes con un alto contenido de cloruros debe ser manejado con precaución para evitar la acumulación de estos en el producto final, sin comprometer el rendimiento agrícola. (Ahmed, F. A., & Ali, M., 2016)

## **N. Problemas ambientales y sociales**

No es un secreto que la palma africana presenta cualidades adversas y grandes problemas asociados a su cultivo. En nuestro país, la expansión de este cultivo ha generado controversias y preocupaciones debido a sus altos impactos sociales, ambientales y económicos. La proliferación de la palma ha resultado en deforestaciones extensas, particularmente en la región de Petén, donde hectáreas de bosques han sido taladas para dar paso al monocultivo de palma, lo que ha destruido la fauna y flora de los corredores biológicos. Esta situación ha reducido drásticamente la diversidad de

especies animales y vegetales, poniendo en peligro la supervivencia de muchas de ellas, llevándolas incluso a ser consideradas en estado de amenaza.

Los agroquímicos utilizados en el cultivo de palma representan otra problemática significativa, dañando suelos y fuentes de agua, lo que afecta tanto la biodiversidad como la salud de las comunidades cercanas. Estas comunidades se ven obligadas a desplazarse, lo que destruye su modo de vida ancestral y genera grandes problemas sociales. Todo esto ocurre debido a la falta de regulaciones efectivas y a la insuficiente aplicación de leyes de conservación de la fauna y flora, permitiendo que las actividades agrícolas de palma operen sin considerar los impactos ambientales y sociales que conllevan. (No-Ficción, 2023)

La gremial de palmicultores de Guatemala (Grepalma) ha reconocido el daño que los cultivos de palma han causado a los bosques lluviosos del norte del país, razón por la cual han firmado un compromiso voluntario para alcanzar la cero deforestación. Este compromiso se basa en la Política Ambiental y de Cambio Climático de Grepalma y sus socios, y está estructurado en el Eje Estratégico 5: Conservación de la diversidad biológica. Este eje incluye tres líneas de acción clave: 1) evitar la pérdida de bosques naturales en nuevas áreas de cultivo; 2) promover la restauración forestal dentro de las tierras manejadas por los productores de palma y en zonas estratégicas dentro de su área de influencia; y 3) establecer corredores biológicos o zonas de conectividad para los ecosistemas aislados.

Además, este compromiso está respaldado por el Eje Estratégico 2: Acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, el Eje Estratégico 6: Relacionamiento social, y el Eje Estratégico 7: Sistematización y divulgación de la información sobre el medio ambiente y el cambio climático. Con estas directrices, se ha declarado públicamente el compromiso voluntario para lograr la cero deforestación. (Grepalma, 2019)

A través de esta declaración, los firmantes, se comprometen a:

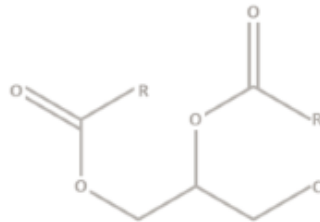
- No deforestar bosque natural para cultivo de palma de aceite.
- Contribuir a la conservación y restauración ambiental en pro del desarrollo sostenible.
- Asegurar que su producción de aceite de palma esté libre de deforestación.
- Actuar bajo principios de responsabilidad extendida, incidiendo sobre las prácticas de los actores de su cadena de valor.
- Colaborar a nivel nacional con la creación e impulso de un Acuerdo voluntario para la Cero Deforestación en la cadena de aceite de palma en Guatemala que entre en vigencia en el año 2020.
- Participar en espacios de diálogo para la promoción de los compromisos adquiridos a través de esta declaración pública e incentivar a otros actores de la cadena a adherirse. (Grepalma, 2019)

### O.3MCPD y GE

Recientemente, el 3-MCPD en los aceites vegetales ha recibido una gran atención dentro de la industria del aceite comestible. Sin embargo, la discusión sobre este compuesto ha existido desde hace décadas. En 1978, el 3-MCPD y sus ésteres (GE) fueron identificados como contaminantes alimentarios en proteínas vegetales hidrolizadas (HVP). Desde entonces, se han realizado esfuerzos para detectar estos contaminantes en otros alimentos, incluidos los aceites comestibles. En 2013, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) señaló a la margarina, las carnes en conserva, el pan y el aceite vegetal como las principales fuentes de 3-MCPD. A raíz de amplios estudios sobre los efectos potencialmente dañinos de estos compuestos en el cuerpo humano, en 2018 se implementaron regulaciones más estrictas sobre el contenido máximo permitido de estos contaminantes en los alimentos. Por lo tanto, resulta crucial comprender qué es el 3-MCPD y cómo reducir su formación durante el procesamiento de alimentos (Alfa Laval, 2022).

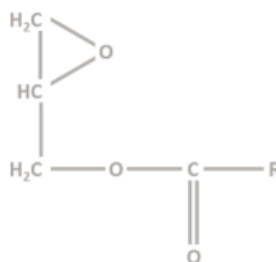
El 3-MCPD significa 3-monocloropropanodiol y es un contaminante común que se forma en alimentos que contienen grasas sometidas a procesamiento térmico, a partir de glicerol o acil glicéridos en presencia de iones de cloruro. Los 3-MCPDE son los ésteres que se forman durante este mismo proceso.

**Figura 7:** Estructura química de 3MCPD.



Los ésteres de ácidos grasos (GE) de glicidilo son contaminantes formados a partir del aceite comestible durante los procesos de refinación a alta temperatura. Los GE, por lo tanto, terminan en alimentos que contienen aceites y grasas.

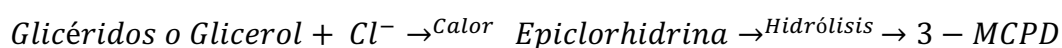
**Figura 8:** Estructura química de 3MCPD.



Tanto los 3MCPD como los GE son motivo de preocupación debido a los riesgos para la salud relacionados con la exposición. Las recomendaciones de salud pública aconsejan a las personas que minimicen la cantidad de estos contaminantes que consumen y, por lo tanto, los productores de aceite comestible deben minimizar su formación durante la producción.

En 2018, la Unión Europea fijó el contenido máximo de éster de glicidilo en aceite de palma en 1 ppm (reportado como glicidol) para el consumo en alimentos para adultos y un máximo de 0.5 ppm para el consumo en fórmulas infantiles, alimentos para bebés, alimentos procesados a base de cereales. y jugos para bebés y niños pequeños. (Alfa Laval, 2022)

## P. Mecanismo de formación 3-MCPD



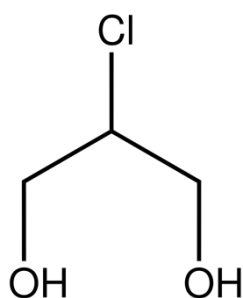
El 3-MCPD se forma durante el procesamiento térmico de alimentos que contienen grasas y cloruros. Los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), reaccionan con glicéridos o glicerol en condiciones de calor, formando un intermedio llamado epiclorhidrina, que luego se hidroliza en 3-MCPD. Factores como alta temperatura, pH ácido y mayor concentración de cloruros aceleran esta reacción,

## Q. 2-MCPD

El 2-MCPD (2-monocloropropano-1,2-diol) es un compuesto químico perteneciente a los contaminantes del grupo de los cloropropanoles, que se puede formar durante el procesamiento de alimentos a altas temperaturas, especialmente en productos que contienen grasas y aceites. Este compuesto ha sido identificado como un contaminante potencialmente tóxico y ha generado preocupación debido a sus posibles efectos adversos para la salud, ya que algunos estudios han sugerido que tiene propiedades carcinogénicas en estudios con animales. (Velisek, J., & Cejpek, K, 2007)

El 2-MCPD se puede formar a partir de la interacción de lípidos (grasas) y cloruros (como el cloruro de sodio o potasio) durante el procesamiento o refinación de alimentos y aceites, como el aceite de palma. Los glicéridos presentes en los aceites reaccionan con los iones de cloro, lo que resulta en la formación de compuestos como los ésteres de 2-MCPD. (Velisek, J., & Cejpek, K, 2007)

**Figura 9:** Estructura química de 3MCPD.



## **R. Reglamento de la Junta de Aceite de Palma de Malasia 3-MCPD**

Con el fin de establecer estándares industriales más altos y cumplir con los nuevos requisitos de seguridad alimentaria de la Unión Europea, la Junta de Aceite de Palma de Malasia implementó regulaciones para los productores de aceite de palma del país. A partir del 1 de enero de 2021, el contenido máximo permitido de GE en el aceite de palmiste procesado fue fijado en 1 ppm, y la misma limitación se aplica al aceite de palma procesado.

Durante el año 2021, el contenido máximo de 3MCPDE en el aceite de palmiste procesado fue de 1.25 ppm, mientras que en el aceite de palma procesado fue de 2.5 ppm. Sin embargo, desde el 1 de enero de 2022, el contenido máximo de 3MCPDE en el aceite de palma procesado se redujo de 2.5 ppm a 1.25 ppm para refinerías integradas, exportadores e importadores. Para las refinerías independientes, esta reducción entró en vigor el 1 de enero de 2023.

El 3MCPDE se forma en alimentos grasos que han sido procesados térmicamente a partir de glicerol o acil glicéridos en presencia de iones de cloruro. Este proceso es irreversible y, una vez formado el 3MCPDE, no existe un método conocido para eliminarlo. Por otro lado, el GE se genera durante el procesamiento a alta temperatura en la etapa de desodorización.

A diferencia del 3MCPDE, el GE puede ser transformado en compuestos inofensivos o eliminado del aceite refinado. (Alfa Laval, 2022)

Existen varias opciones para mitigar el 3-MCPD a lo largo de la cadena de valor, desde la plantación hasta el aceite refinado final. Las estrategias de mitigación variarán según el punto en el que se encuentren en la cadena de procesamiento.

## **S. Mitigación de 3-MCPD**

En las plantaciones, la elección del fertilizante puede reducir el nivel de cloruro en los racimos de fruta fresca. En las plantas extractoras, lavar los racimos frescos de palma para eliminar el cloro es una acción crítica en una fase temprana, que evita que el cloro entre en contacto con el aceite desde el principio. Sin embargo, a pesar de los mejores esfuerzos, el cloro aún puede terminar en el aceite. Procesar los racimos de frutas dentro de las primeras 48 horas reduce la hidrólisis y el contenido de DAG en el aceite de palma. Esto mejora la calidad del aceite de palma crudo, o CPO, haciéndolo menos propenso a la formación de GE durante la refinación.

En las refinерías, el lavado del aceite crudo de palma antes de la refinación garantiza los niveles más bajos posibles de cloruro. Siempre que sea posible, se deben minimizar tanto la temperatura como el tiempo de residencia durante la desodorización. Estas medidas contribuirán en gran medida a cumplir con las especificaciones finales del aceite refinado, como el color. (Alfa Laval, 2022)

## **T. Mitigación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol (GE)**

### **1. Optimización del proceso de refinación**

Una de las formas más efectivas de reducir la formación de ésteres de glicidol, 2-MCPD Y 3-MCPD es optimizar el proceso de refinación del aceite. El uso de temperaturas más bajas durante la desodorización (menos de 240°C) puede limitar la formación de estos compuestos, ya que tienden a formarse a temperaturas elevadas. Además, la reducción de la presión durante este proceso también puede ayudar a minimizar la reacción entre los ácidos grasos y los cloruros, que es clave para la formación de estos contaminantes. (Weißhaar, R., & Perz, R, 2010)

### **2. Uso de materiales de partida con bajo contenido en cloruros**

Dado que los ésteres de glicidol, 2-MCPD Y 3-MCPD se forman a partir de la interacción de los lípidos con los cloruros presentes en los alimentos, reducir la cantidad de cloruros en los materiales de partida es crucial. Seleccionar aceites o materias primas con bajo contenido de sales de cloro, o lavar las materias primas para reducir su concentración, puede ser una estrategia preventiva efectiva. (Weißhaar, R., & Perz, R, 2010)

### **3. Uso de adsorbentes**

El uso de adsorbentes como tierras blanqueadoras o arcillas activadas durante el procesamiento del aceite ha demostrado ser efectivo para la reducción de estos compuestos. Estos materiales pueden captar los precursores de los ésteres de glicidol, 2-MCPD y 3-MCPD, evitando su formación o eliminando los compuestos una vez formados. (Weißhaar, R., & Perz, R, 2010)

#### **4. Adición de agentes antioxidantes**

La adición de antioxidantes al aceite durante el proceso de refinación también ha mostrado cierta capacidad para reducir la formación de estos contaminantes. Esto se debe a que los antioxidantes pueden inhibir las reacciones que conducen a la formación de cloropropanoles y glicidil ésteres. (Weißhaar, R., & Perz, R, 2010)

#### **5. Monitoreo y control del proceso**

Implementar un control estricto del proceso en cuanto a los parámetros de temperatura y tiempo durante la refinación es esencial para reducir la formación de estos compuestos. La instalación de sistemas de monitoreo en línea que detecten precursores o la formación temprana de ésteres también puede permitir una intervención rápida para ajustar el proceso de refinación en tiempo real. (Weißhaar, R., & Perz, R, 2010)

### **U. Riesgos a la salud provocados por 3-MCPD, 2-MCPD y Glicidol**

Son compuestos potencialmente cancerígenos, sobretodo en el caso del 3-MCPD del cual se tienen más estudios donde se ha determinado que posee toxicidad renal para animales en los estudios que se han realizado. En el caso de 2-MCPD se cree que puede afectar el sistema reproductivo, esto investigado en animales de laboratorio, el Glicidol en estudios con animales, el glicidol ha mostrado ser genotóxico, lo que significa que puede dañar el ADN y potencialmente causar cáncer, aunque se sabe de algunos daños a la salud que pueden causar estos compuestos aún falta realizar más investigaciones. (EFSA, 2016)

### **V. Proceso de lavado de aceite crudo de palma**

Etapla crítica diseñada para reducir la concentración de impurezas, principalmente cloruros, los cuales pueden tener efectos negativos durante el refinado posterior.

### **W. Descripción del proceso de lavado**

#### **1. Introducción del agua**

El aceite crudo de palma, después de la extracción, contiene varias impurezas, como fosfolípidos, ácidos grasos libres, compuestos oxidados y cloruros. Para eliminar estos componentes, se introduce agua osmotizada o desionizada en el sistema de lavado. El agua utilizada generalmente tiene un caudal controlado, siendo común el uso de un

flujo de 10% respecto a la cantidad de aceite, lo cual es óptimo para la remoción de cloruros sin causar excesiva emulsificación del aceite. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## **2. Mezcla de aceite y agua**

El aceite crudo y el agua se mezclan vigorosamente para permitir la disolución de los iones de cloro y otras impurezas en el agua. Durante este proceso, los cloruros se transfieren desde la fase oleosa (el aceite) a la fase acuosa (el agua). Este proceso se facilita debido a la afinidad que los cloruros y otras sales tienen por la fase acuosa. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## **3. Separación de fases**

Después de la mezcla, el agua que contiene las impurezas se separa del aceite utilizando centrifugadoras. Estas máquinas emplean fuerzas centrífugas para separar la fase acuosa (que contiene los cloruros disueltos) de la fase oleosa (el aceite). El uso de centrifugadoras es fundamental para asegurar una separación efectiva y minimizar la pérdida de aceite. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## **4. Eliminación de agua residual**

Una vez que el agua contaminada es separada del aceite, se eliminan las pequeñas cantidades de agua residual en el aceite utilizando equipos de secado o deshidratación. Esta etapa es crucial para evitar problemas de estabilidad en el aceite final, ya que la presencia de agua puede promover la oxidación y la descomposición de triglicéridos. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## **5. Monitoreo y control**

Durante todo el proceso, se monitorean parámetros como la cantidad de cloruros restantes, el contenido de agua y la estabilidad oxidativa del aceite. Los ajustes en el flujo de agua y las condiciones de operación de las centrifugadoras se realizan en función de los resultados del monitoreo para asegurar que el aceite cumple con los estándares de calidad requeridos. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## **X. Objetivo y beneficios del lavado de aceite crudo de palma**

El principal objetivo del proceso de lavado del aceite crudo de palma es reducir la concentración de cloruros, que son precursores de compuestos como los 3-MCPD y los ésteres de glicidol durante el refinado del aceite. Estos compuestos han sido relacionados con riesgos para la salud, por lo que la industria alimentaria busca minimizarlos mediante la remoción de los cloruros en etapas tempranas del procesamiento del aceite. Además, el lavado ayuda a eliminar impurezas no deseadas que pueden afectar la calidad del aceite y su vida útil. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## 1. Reducción de impurezas

El lavado remueve eficientemente las sales y otros componentes que pueden interferir en la calidad del producto final. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

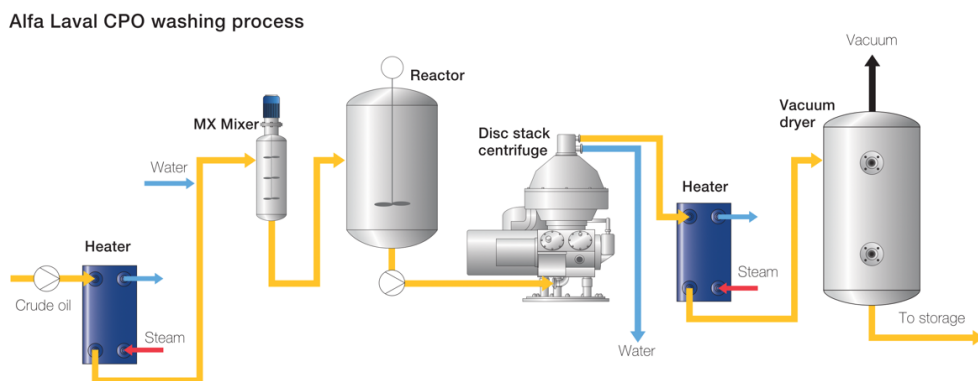
## 2. Mejora en la eficiencia del refinado

Al reducir los cloruros y otros compuestos que promueven la formación de contaminantes durante el refinado, se asegura un proceso de refinación más eficiente y económico. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

## 3. Mayor estabilidad del aceite

Al eliminar trazas de agua y compuestos oxidados, se mejora la estabilidad del aceite, lo que extiende su vida útil y minimiza la formación de radicales libres. (Tang, T. S., & Lin, S. W, 2005)

**Figura 10:** Diagrama de flujo de sistema de lavado de aceite crudo de palma.



Fuente: Alfa Laval., 2021.

## 4. Calidad del aceite

Si el aceite crudo contiene niveles altos de cloruros y otras impurezas, puede ser necesario aumentar el flujo de agua por encima del 10%. Sin embargo, superar el 15% puede llevar a problemas operativos, como una emulsificación difícil de manejar. (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K, 2014)

## 5. Eficiencia de la separación

Con un flujo superior al 15%, el riesgo de emulsificación aumenta, lo que puede dificultar la separación entre el aceite y el agua. Esto puede generar pérdidas de aceite y aumentar los costos de energía en la centrifugación y secado. (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K, 2014)

## 6. Diseño del equipo

Algunos sistemas de centrifugación están diseñados para manejar flujos de agua mayores, pero en la mayoría de los casos, los equipos están optimizados para un flujo de hasta 15%. Superar este umbral puede requerir ajustes en el equipo para mantener la eficiencia de la separación. (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K, 2014)

## 7. Costo-beneficio

Un flujo mayor de agua implica un consumo adicional de agua y energía para la separación y tratamiento del agua residual. Si bien un flujo ligeramente superior puede mejorar la eliminación de cloruros, es importante considerar el balance entre la eficiencia de remoción y los costos adicionales. (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K, 2014)

El flujo máximo de agua recomendado en el proceso de lavado de aceite de palma es generalmente de 10% del volumen de aceite. Flujos por encima de este valor podrían incrementar la emulsificación, las pérdidas de aceite y los costos operativos, sin aportar beneficios significativos adicionales en la eliminación de impurezas. (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K, 2014)

## Y. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso de purificación de agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas, y partículas más grandes del agua. En este proceso, se aplica una presión que es mayor que la presión osmótica para forzar el agua a moverse a través de la membrana, dejando atrás las impurezas. La ósmosis inversa se emplea principalmente en la desalación de agua de mar, tratamiento de aguas residuales, y en la producción de agua potable y agua ultrapura para aplicaciones industriales. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)

## Z. Proceso de la ósmosis inversa

En condiciones normales de ósmosis, el agua fluye naturalmente desde una solución de baja concentración de solutos a una de alta concentración a través de una membrana semipermeable para igualar las concentraciones. Sin embargo, en la ósmosis inversa, se invierte este proceso aplicando presión, forzando el agua a fluir en la dirección opuesta, es decir, desde la solución de mayor concentración (agua contaminada) hacia una de menor concentración (agua purificada), dejando atrás sales y contaminantes. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)

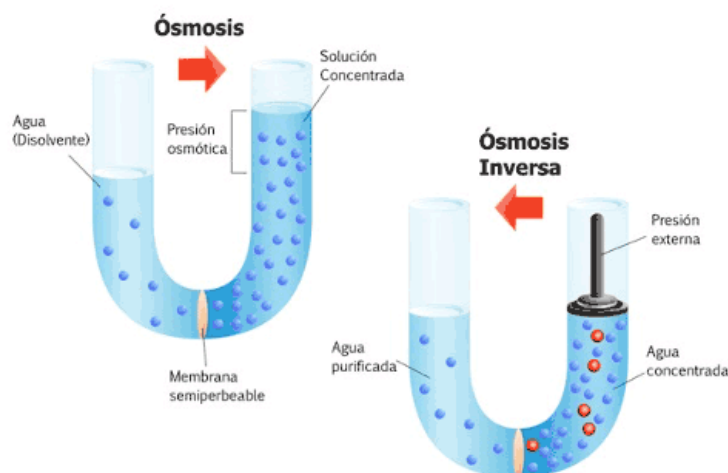
### Aplicaciones comunes:

- **Desalación:** La ósmosis inversa se utiliza para desalinizar agua de mar y agua salobre, haciéndola apta para el consumo humano. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Tratamiento de aguas:** Se emplea en el tratamiento de aguas residuales y en la purificación del agua en instalaciones industriales. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Producción de agua ultrapura:** En la industria farmacéutica, electrónica, y de alimentos y bebidas, se utiliza para producir agua libre de impurezas. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)

El agua osmotizada se utiliza en el lavado de aceite crudo de palma para eliminar impurezas sin introducir contaminantes al producto. Para garantizar su calidad, es necesario realizar varios análisis físico-químicos y microbiológicos.

- **La conductividad eléctrica:** Refleja la cantidad de sales disueltas en el agua, por lo que mantenerla por debajo de 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$  asegura una baja concentración de iones. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Sólidos disueltos totales (TDS):** Indican la presencia de minerales y otras sustancias disueltas, cuya acumulación podría causar incrustaciones en los equipos y afectar la eficiencia del proceso. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Dureza total:** Determinada por la concentración de calcio y magnesio, debe ser inferior a 1 ppm para prevenir la formación de depósitos en las tuberías y evitar problemas operativos. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Cloruros:** Representa un riesgo de corrosión en los materiales de la planta, por lo que su concentración debe mantenerse en niveles mínimos para evitar daños estructurales y contaminación del aceite. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)
- **Turbidez:** Es un indicador de la presencia de partículas en suspensión. (Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T, 2018)

**Figura 11:** Principio de ósmosis inversa.



Fuente: Carbotecnial., 2024.

## AA. Análisis realizados a aceite crudo de palma

### 1. Peróxido (meq/kg)

El índice de peróxidos mide la cantidad de peróxidos presentes en el aceite, lo cual es un indicador de la oxidación primaria. El valor se expresa en miliequivalentes de oxígeno activo por kilogramo de grasa (meq/kg). Un aumento en este índice indica que el aceite ha comenzado a descomponerse, lo que reduce su calidad y afecta su vida útil. (Gunstone, F. D., & Norris, F. A, 1983)

## **2. Acidez (%FFA)**

El índice de acidez se refiere al contenido de ácidos grasos libres (FFA, por sus siglas en inglés) en el aceite. Este valor es importante porque los ácidos grasos libres son productos de la hidrólisis de los triglicéridos. Un alto contenido de FFA es indicativo de un proceso de degradación del aceite, lo que puede disminuir la calidad. (Shahidi, F, 2005)

## **3. P-anisidina**

El índice de p-anisidina mide la oxidación secundaria en los aceites, específicamente los aldehídos resultantes de la descomposición de los hidroperóxidos. Es un indicador clave del deterioro del aceite, ya que mide la rancidez asociada con la oxidación. (Frankel, E. N, 1998)

## **4. Humedad (%)**

El contenido de humedad en el aceite indica la cantidad de agua presente en el producto. Un alto contenido de agua puede causar problemas en la estabilidad y conservación del aceite, promoviendo la oxidación y la degradación. (Hamilton, R. J, 1999)

## **5. Dobi**

El índice de DOBI (Degradation of Bleachability Index) es una medida que evalúa la calidad del aceite de palma crudo. El índice mide la relación entre los carotenos y los productos de oxidación secundarios. Un valor más alto de DOBI indica que el aceite de palma es de mejor calidad para procesos de refinación y blanqueado. (Siew, W. L, 2002)

## **BB. Equipos de análisis fisicoquímico para el aceite**

### **1. Equipo de medición de cloruros**

El equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS es un dispositivo utilizado principalmente para la determinación precisa y automática de trazas de compuestos halogenados y sulfurados (como cloruros y azufres) en diferentes matrices de muestras. Este tipo de equipo es especialmente relevante en industrias como la petroquímica, la alimentaria y la farmacéutica, donde el control de impurezas de azufre y halógenos es crucial para cumplir con normativas internacionales de calidad. (Thermo Scientific, 2019)

Este equipo utiliza el principio de microcoulometría, un método electroquímico donde la muestra es primero pirolizada a alta temperatura (descomposición térmica) en presencia de oxígeno, lo que convierte los compuestos que contienen cloro o azufre en productos de combustión, como HCl (ácido clorhídrico) o SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre). Estos productos de combustión se llevan a una celda coulombimétrica, donde se realiza la detección. (Thermo Scientific, 2019)

#### CC. Ventajas del XPLOER TX/TS

- **Alta sensibilidad:** Puede detectar concentraciones muy bajas de cloruros y azufres. (Thermo Scientific, 2019)
- **Automatización:** Permite la automatización del proceso, lo que lo hace adecuado para laboratorios de control de calidad con un alto volumen de muestras. (Thermo Scientific, 2019)
- **Versatilidad:** Compatible con diferentes tipos de muestras, desde líquidos hasta sólidos, lo que lo convierte en una herramienta flexible para diversas industrias. (Thermo Scientific, 2019)

#### DD. Espectrofotómetro UV-VIS

Este equipo se utiliza para medir la índice de color y determinar compuestos como los carotenoides presentes en el aceite de palma. El aceite crudo de palma contiene un alto contenido de carotenoides, que le otorgan su color rojo-naranja característico. (Goh, S. H., & Choo, Y. M, 2020)

El aceite se diluye con un solvente adecuado y se coloca en una cubeta que se inserta en el espectrofotómetro. La luz UV-Vis pasa a través de la muestra, y el equipo mide la cantidad de luz absorbida por los compuestos coloreados en el aceite. La longitud de onda específica para los carotenoides es alrededor de 450 nm. (Goh, S. H., & Choo, Y. M, 2020)

**Aplicación:** Se utiliza para monitorear el contenido de carotenoides y antioxidantes, lo que influye en la calidad y estabilidad del aceite. (Goh, S. H., & Choo, Y. M, 2020)

## EE. Cromatógrafo de Gases (GC)

El cromatógrafo de gases se emplea principalmente para analizar la composición de ácidos grasos y determinar la presencia de contaminantes o compuestos no deseados como 3-MCPD y 2-MCPD. (Berger, K. G, 2015)

El aceite de palma se somete a una derivatización para convertir los ácidos grasos en ésteres metílicos, los cuales se volatilizan y se introducen en la columna del GC. Los componentes se separan en función de su afinidad con la fase estacionaria de la columna. El detector de ionización de llama (FID) o el detector de masas puede identificar y cuantificar cada ácido graso presente en la muestra. (Berger, K. G, 2015)

**Aplicación:** Se utiliza para realizar análisis de perfil de ácidos grasos, lo que es crucial para determinar la calidad del aceite y su idoneidad para diferentes usos industriales. (Berger, K. G, 2015)

**Figura 12:** Espectrofotómetro UV-VIS.



Fuente: Viresa., 2021.

**Figura 13:** Cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (GC/MS)



Fuente: Gallpe., 2021.

## FF. Certificaciones ISO

**ISO/IEC 17025:** Es el estándar internacional para la competencia técnica de laboratorios de ensayo y calibración. Esta certificación garantiza que los laboratorios SGS operan bajo los más altos estándares técnicos y de gestión para garantizar resultados precisos y fiables. (SGS Group, 2024)

**FSSC 22000:** Esta certificación está enfocada en la seguridad alimentaria y abarca el sistema de gestión de la seguridad alimentaria. SGS está acreditada bajo este estándar para asegurar que sus pruebas se realizan bajo condiciones que minimizan riesgos para la seguridad alimentaria. (SGS Group, 2024)

**ISO 9001:** Este es uno de los estándares de calidad más reconocidos y asegura que SGS sigue procesos de calidad gestionados y controlados para entregar resultados consistentes y precisos. (SGS Group, 2024)

## GG. AOCs Cd 29c-13

Método de determinación de 2 y 3 MCPD ésteres de ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos de glicidol.

### 1.1.1 Procedimiento

- 1) Mediante una balanza analítica pesar 0.5-1g de aceite crudo de palma en un erlenmeyer de 50mL.
- 2) Utilizando una pipeta volumétrica de 10mL agregar 10mL de n-heptano al 99% para disolver el aceite dentro del erlenmeyer de 50mL, agitar de forma manual con movimientos circulares de forma vigorosa.
- 3) Mediante una pipeta volumétrica de 1mL agregar 1mL de solución sodio metóxido-metanol 0.5M al erlenmeyer de 50mL que contiene la mezcla de aceite de crudo de palma, n-heptano.
- 4) La solución del paso anterior ubicada dentro de un erlenmeyer de 50mL debe ser calentada en un baño de agua caliente a una temperatura de  $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos. Luego del enfriamiento dejar enfriar la mezcla hasta alcanzar una temperatura ambiente.
- 5) Haciendo uso de una pipeta de 1mL agregar cuidadosamente 1mL de ácido clorhídrico 1M al erlenmeyer de 50mL, agitar la mezcla de forma manual con movimientos circulares.
- 6) A la solución anterior agregar 1mL de fenilborato mediante una pipeta de 1mL. Agitar con un agitador magnético durante 15 minutos, mantener una velocidad de agitación moderada para evitar salpicaduras.
- 7) Pasados los 15 minutos transferir 1mL de la solución anterior ubicada en el erlenmeyer de 50mL a un vial de análisis GC-MS de 2mL asegurando un sello correcto antes de introducir al autoinyector de cromatógrafo.
- 8) Inyectar la muestra en el cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (GC-MS).

- 9) Configurar el equipo de cromatografía acoplado a espectrometría de masas GC-MS con un método específico para la detección de los derivados de 2-MCPD, 3-MCPD y ésteres de glicidilo.

#### HH. Ecuaciones utilizadas para obtención de resultados

**Ecuación 1:** Determinación de valor de peróxido en aceite crudo de palma.

$$\text{Valor de peróxido} = \frac{(S - B) * M * 1000}{\text{mass test portion, g}}$$

Donde:

B= Volumen de tiosulfato de sodio utilizado para titular, ml de blanco.

S= Volumen de tiosulfato de sodio utilizado para titular, ml de porción de análisis.

M= Molaridad de solución de tiosulfato de sodio.

**Ecuación 2:** Determinación de ácidos grasos libres de aceite crudo de palma.

$$\text{Ácidos grasos libres Aceite de palma \%} = \frac{\text{ml de NaOH} * \text{Molaridad} * 25.6}{\text{masa (g) de muestra}}$$

**Ecuación 3:** Determinación de valor de yodo en aceite crudo de palma.

$$\text{Valor de yodo} = \frac{(B - S) * N * 12.69}{\text{masa de muestra (g)}}$$

Donde:

B=Volumen tiosulfato de sodio utilizado en titulación de blanco, mL.

S=Volumen tiosulfato de sodio utilizado en titulación de muestra, mL.

N=Normalidad de solución de Tiosulfato de sodio.

**Ecuación 4:** Determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma.

$$P - A. V. = \frac{25 * (1.2A_s - A_b)}{M}$$

Donde:

A<sub>s</sub>=Absorbancia de la solución de aceite crudo de palma con reactivo de p-anisidina

A<sub>b</sub>=Absorbancia de la solución de aceite crudo de palma

M= masa de muestra, g

**Ecuación 5:** Determinación de porcentaje de humedad en aceite crudo de palma.

$$\text{Humedad \%} = \frac{\text{pérdida de masa, g}}{\text{masa de muestra, g}} * 100$$

**Ecuación 6:** Determinación de Dobi en aceite crudo de palma.

$$DOBI = \frac{A446}{A269}$$

Donde

A446=Absorbancia medida a 446 nm (carotenoides)

A269=Absorbancia medida a 269 nm (compuestos oxidados)



## IV. Antecedentes

Desde el descubrimiento de los cloropropanoles y ésteres de glicidol en los aceites refinados en la década de 1970, numerosos estudios se han centrado en identificar las condiciones bajo las cuales se forman estos compuestos. Se ha establecido que su formación está directamente relacionada con la presencia de cloruros en el aceite crudo de palma y las altas temperaturas empleadas durante el proceso de desodorización, una de las etapas críticas de la refinación (Zulkurnain, 2015).

El 3-MCPD y 2-MCPD, así como el glicidol, se forman cuando los cloruros presentes en el aceite reaccionan con los lípidos durante el calentamiento intenso. Varios estudios han demostrado que la remoción de cloruros en las primeras etapas del procesamiento, como el lavado del aceite crudo, puede ser una estrategia efectiva para reducir la formación de estos compuestos (Choo et al., 2014). Esta técnica, basada en el uso de agua desionizada u osmotizada, ayuda a eliminar las sales presentes en el aceite crudo, minimizando los precursores necesarios para la formación de cloropropanoles.

A pesar de los avances en la tecnología de lavado del aceite crudo de palma, persisten algunos desafíos técnicos y científicos. Uno de los principales problemas es la variabilidad en la composición del aceite crudo de palma, que puede contener diferentes niveles de cloruros dependiendo de factores como el suelo, los fertilizantes utilizados y el agua de riego. Esta variabilidad dificulta la estandarización del proceso de lavado y puede influir en la eficacia de la remoción de cloruros. Además, el costo adicional de implementar un proceso de lavado con agua osmotizada, junto con el riesgo de emulsificación y pérdida de aceite, plantea desafíos económicos que deben abordarse para asegurar la viabilidad comercial de esta técnica. (Choo et al., 2014)

La importancia de estudiar y mejorar el proceso de lavado del aceite crudo de palma radica en la creciente demanda global de aceites seguros y de alta calidad, en conformidad con regulaciones cada vez más estrictas. En particular, la industria del aceite de palma en países exportadores como Guatemala debe adaptarse a estos estándares internacionales si desea mantener su competitividad en el mercado global. La implementación de medidas como el lavado con agua osmotizada no solo tiene implicaciones para la salud pública, sino también para la sostenibilidad de la industria, al mejorar la calidad del producto y reducir los costos asociados con la eliminación de contaminantes en etapas más avanzadas del proceso.



## **V. Objetivos**

### **A. Objetivo general**

Determinar efecto de mitigación de formación de 3-MCPD, al realizar una remoción de cloruros en el aceite crudo de palma mediante un lavado industrial haciendo uso de agua osmotizada.

### **B. Objetivos específicos**

1. Determinar la proporción de flujo de agua entre 5%, 7% y 10% con respecto al flujo de aceite crudo de palma que maximice la remoción de cloruros para determinar la eficiencia de remoción comparando los cloruros antes y después del lavado de aceite.
2. Obtener cantidades de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol en aceite crudo de palma que haya tenido un proceso de lavado industrial con agua osmotizada.
3. Determinar parámetros de calidad del aceite crudo de palma que ha pasado por el proceso de lavado industrial, para garantizar que cumpla con los estándares y especificaciones del mercado.



## VI. Metodología

### AOCS Cd 8B-90: Determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma.

**Cuadro 1:** Cristalería necesaria para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Erlenmeyer con tapón de vidrio	250	0.1
Pipeta	0.5	0.001
Bureta	50	0.1
Balón aforado	1000	0.1
Balón aforado	100	0.1
Probeta	100	0.1
Probeta	20	0.1
Pipeta	20	0.001

**Cuadro 2:** Equipo necesario para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (g)</b>
Balanza analítica	0-500	0.01

### Reactivos

**Cuadro 3:** Reactivos necesarios para determinación de peróxido en muestra de aceite crudo de palma.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Indicador de almidón	Apto yodometría
Solución ácido acético-isooctano.	Proporción 3:2 v/v. Reactivos al 99.9%
Solución saturada de yoduro de potasio	Concentración 15% p/v.
Solución tiosulfato de sodio	0.1M
Solución sodio dodecil sulfato	98%

## Procedimiento para grasas y aceites

1. En un Erlenmeyer de 250 mL tarado, pesar una muestra de 5 g de aceite de palma crudo en una balanza analítica y colocar un tapón de vidrio.
2. Utilizando una probeta de 100 mL, agregar 50 mL de la solución al 98% de concentración de ácido acético-isooctano 3:2 al Erlenmeyer del paso anterior y agitar manualmente con movimientos circulares.
3. Tomar 0.5 mL de solución saturada de KI con una pipeta y agregarla al Erlenmeyer.
4. Dejar reposar la solución durante un minuto, agitar el Erlenmeyer manualmente de forma suave con movimientos circulares al menos 3 veces durante el minuto e inmediatamente agregar 30 mL de agua destilada.
5. Titular utilizando una bureta de 50 mL con solución de tiosulfato de sodio 0.1M, agregando gradualmente mientras se agita vigorosamente. Continuar la titulación hasta que el color amarillo sea imperceptible.
6. Agregar 0.5 mL de solución de SDS al 10% y, con una pipeta volumétrica de 0.5 mL, añadir 0.5 mL de indicador de almidón. Continuar la titulación agitando el Erlenmeyer manualmente en movimientos circulares hasta alcanzar el punto final, cuando se observe un cambio de color azul.
7. Con la bureta de 50 mL, agregar la solución de tiosulfato gota a gota hasta que el color azul desaparezca.

### AOCS Ca 5a-40: Determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos.

**Cuadro 4:** Cristalería requerida para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Erlenmeyer	250	0.01
Probeta	100	0.1
Pipeta	2	0.01
Bureta	3	0.01

**Cuadro 5:** Equipo requerido para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (g)</b>
Balanza analítica	0-500	0.01

**Cuadro 6:** Reactivos requeridos para determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites crudos.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Alcohol etílico	95% neutralizado
Indicador de fenolftaleína	Detección del 1 al 95% en etanol
Solución hidróxido de sodio	0.25M

## Procedimiento

1. Se deben pesar 7.05g de aceite de palma utilizando una balanza analítica con un rango de 0-500 g, colocando la muestra dentro de un Erlenmeyer de 250 mL.
2. Utilizando una probeta de 100 mL, agregar 75 mL de alcohol al 95% neutralizado al Erlenmeyer del paso anterior. Luego, con una probeta de 2 mL, agregar 2 mL de indicador de fenolftaleína.
3. Usando una bureta de 30 mL y una solución estándar de hidróxido de sodio 0.25M, titular la solución preparada en los pasos anteriores. Agitar el Erlenmeyer manualmente con movimientos circulares hasta que aparezca un color rosa pálido. El color debe persistir durante 30 segundos.

### AOCS Cd 1-25: Determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs.

**Cuadro 7:** Cristalería requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Matraz para yodo con tapón de vidrio	500	0.1
Matraz volumétricos con tapón de vidrio	1000	0.1
Pipeta	25	0.01
Dispensador volumétrico	20	0.01
Dispensador volumétrico	2	0.01
Dispensador volumétrico	50	0.01
Pipeteadora automática	20	0.01
Beaker	5	0.1
Embudo	N/A	N/A
Probeta	100	0.1
Bureta	50	0.1

**Cuadro 8:** Equipos requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (g)</b>
Balanza analítica	0-1000	0.0001
Horno de aire caliente	N/A	N/A
Agitador magnético	N/A	N/A
Papel filtro- Whatman no. 41H	N/A	N/A
Termómetro analógico	0 a 150°C	

**Cuadro 9:** Reactivos requeridos para determinación de valores de yodo en aceite crudo de palma mediante reactivo Wijs.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución Wijs	99.9%
Solución KI	10.0%
Solución almidón soluble	1%
Dicromato de potasio	Patrón primario
Solución tiosulfato de sodio	0.1N

### **Procedimiento**

1. Pesar una muestra de 0.5288 g utilizando una balanza analítica.
2. Filtrar la muestra de aceite de palma crudo para remover cualquier impureza y trazas de humedad usando papel filtro Whatman No. 41H. Colocar el papel filtro dentro de un embudo y un vaso de precipitados de 5 mL. La filtración puede realizarse en un horno de aire caliente a una temperatura de 80-85°C, corroborando la temperatura con un termómetro analógico, y debe completarse en un lapso de 5 minutos.
3. Luego de la filtración, esperar a que la temperatura baje a 68°C, verificando con un termómetro analógico.
4. Una vez la muestra alcance la temperatura de 68°C, pesarla en una balanza analítica dentro de un matraz para yodo con tapón de vidrio, con capacidad de 500 mL.
5. Usando una pipeta de 25 mL, agregar 15 mL de tetracloruro de carbono en la parte superior de la muestra dentro del matraz para yodo de 500 mL y agitar manualmente con movimientos circulares para asegurar que la muestra esté totalmente disuelta.
6. Dispensar 25 mL de solución de Wijs usando la pipeteadora automática en el matraz para yodo de 500 mL. Colocar el tapón y agitar manualmente con movimientos circulares para obtener una mezcla inmediata. Posteriormente, esperar 30 minutos para que repose la mezcla.
7. Inmediatamente, almacenar el matraz de yodo de 500 mL en la oscuridad durante el tiempo de reacción requerido, a una temperatura de 25°C, la cual debe corroborarse con un termómetro digital.
8. Retirar los recipientes del almacenamiento y agregar 20 mL de solución de KI utilizando un dispensador volumétrico de 20 mL. Posteriormente, agregar 100 mL de agua utilizando una probeta de 100 mL.
9. Las soluciones deben titularse utilizando una bureta de 50 mL con una solución titulante de tiosulfato de sodio 0.1N, agregándola gradualmente en el matraz de yodo de 500 mL con una agitación constante de forma manual. Continuar la titulación hasta que el color amarillo desaparezca. Luego, agregar 2 mL de indicador de almidón con un dispensador volumétrico de 2 mL y continuar titulado con la solución y el sistema mencionado, agitando manualmente en movimientos circulares hasta que el color azul desaparezca.

## AOCS Cd-18-90: Determinación de valor de P-anisidina.

**Cuadro 10:** Cristalería requerida para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Matraz volumétrico	25	0.1
Tubos de ensayo con tapón	10	N/A
Pipeteador volumétrico	5	0.01
Pipeteador volumétrico	2	0.01
Pipeteador volumétrico	1	0.01
Probeta	20	0.1

**Cuadro 11:** Equipo requerido para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (g)</b>
Balanza analítica	0-500	0.01

**Cuadro 12:** Equipo requerido para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Incertidumbre ± (nm)</b>
Espectrofotómetro UV-VIS	350	N/A
Celda cuarzo para espectrofotómetro	N/A	N/A

**Cuadro 13:** Reactivos requeridos para determinación de valor de P-anisidina en aceite crudo de palma.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Isooctano (2,2,4-trimetilpentano)	99% ópticamente claro
Ácido acético glacial	99%
p-Anisidina	99%

### Procedimiento

1. Pesar 0.5g de muestra de aceite crudo de palma utilizando un pipeteador volumétrico de 1 mL. Con una balanza analítica, pesar dentro de un matraz volumétrico de 25 mL previamente tarado. Agregar isooctano al 99% usando una probeta de 20 mL hasta la marca de aforo. Posteriormente, disolver y mezclar de forma manual con movimientos circulares.
2. Usando un espectrofotómetro UV-VIS, medir la absorbancia de la solución en un rango de 350 nm. Esto se realiza agregando la solución de aceite crudo de palma e isooctano a la celda de cuarzo, mediante un pipeteador volumétrico de 2 mL, llenando la celda lo suficiente sin desbordar el recipiente.
3. En un tubo de ensayo, agregar 5 mL de la solución con un pipeteador volumétrico de 5 mL y exactamente 5 mL de isooctano al 99% en otro tubo de

ensayo. Agregar 1 mL de p-anisidina al tubo de ensayo que contiene la muestra de aceite crudo de palma, utilizando un pipeteador volumétrico de 1 mL. Tapar ambos tubos de ensayo con un tapón y mezclarlos de forma manual, sacudiendo los tubos vigorosamente. Dejar reposar durante 10 minutos.

4. Luego de 10 minutos, medir la absorbancia en ambos tubos de ensayo usando un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 350 nm, agregando las muestras con un pipeteador volumétrico de 2 mL en una celda de vidrio de cuarzo.

**AOCS Ca 2b-38: Determinación de humedad presente en aceite crudo de palma.**

**Cuadro 14:** Cristalería requerida para determinación de humedad presente en aceite crudo de palma.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Beakers	25	0.1
Desecador con agente desecante	N/A	N/A
Pipeteador volumétrico	5	0.01

**Cuadro 15:** Equipo requerido para determinación de humedad presente en aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (mg)</b>
Balanza	1-1000	0.001
Estufa eléctrica de laboratorio	N/A	N/A

**Procedimiento**

1. En un beaker de 25 mL, secado previamente en un desecador con agente desecante, pesar 20 g de la muestra de aceite crudo de palma utilizando una balanza analítica.
2. Utilizando una estufa eléctrica de laboratorio, calentar la muestra a una temperatura de 130°C. Durante el calentamiento, rotar el beaker de forma suave con movimientos circulares manuales.
3. El calentamiento se detiene cuando se observa un leve humo en la muestra.
4. Luego, se deja enfriar a temperatura ambiente y se coloca el beaker de 25 mL con la muestra en un desecador con un agente desecante durante 30 minutos. Después de este tiempo, se pesa nuevamente la muestra utilizando una balanza analítica.

**AOCS Cc13j-97: Determinación de DOBI (Índice de Degradación de Blanqueabilidad)**

**Cuadro 16:** Cristalería requerida para determinación de DOBI en aceite crudo de palma.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Matraz aforado	100	0.1
Celdas de cuarzo	N/A	N/A
Pipeteador volumétrico	5	0.01
Pipeta	50	0.01

**Cuadro 17:** Equipo requerido para determinación de DOBI en aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Rango (g)</b>	<b>Incertidumbre ± (mg)</b>
Balanza analítica	0-10000	0.001

**Cuadro 18:** Equipo requerido para determinación de DOBI en aceite crudo de palma.

<b>Equipo</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Incertidumbre ± (nm)</b>
Espectrofotómetro UV-VIS	269-446	N/A

**Cuadro 19:** Reactivos requeridos para determinación de DOBI en aceite crudo de palma.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Isooctano (2,2,4-trimetilpentano grado espectrofotométrico)	99%

**Procedimiento**

1. Haciendo uso de una balanza analítica pesar 0.2g de aceite crudo de palma dentro de un matraz aforado de 100mL previamente tarado.
2. Posteriormente, se diluye la muestra pesada dentro del matraz aforado de 100mL con isooctano al 99% grado espectrofotométrico hasta el aforo, utilizando una pipeta de 50mL.
3. Se llena una celda de vidrio de cuarzo del espectrofotómetro con la solución de aceite crudo de palma e isooctano, usando una pipeteadora volumétrica de 5 mL, y se mide su absorbancia a 269 y 446 nm con el espectrofotómetro UV-VIS.
4. Se realiza un blanco llenando una celda de vidrio de cuarzo del espectrofotómetro con isooctano al 99%, usando una pipeteadora volumétrica de 5 mL, y se mide su absorbancia a 269 y 446 nm con el espectrofotómetro UV-VIS.

## Medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS

**Cuadro 20:** Cristalería requerida para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS.

Cristalería	Capacidad ± (ml)	Incertidumbre ± (ml)
Erlenmeyer	100	0.1
Probeta	10	0.1
Pipeta volumétrica	5	0.01
Pipeta volumétrica	10	0.01
Pipeta volumétrica	25	0.01
Pipeta volumétrica	10	0.01
Frascos lavadores	30	N/A
Matraz aforado	100	N/A
Celdas de titulación	10	N/A

**Cuadro 21:** Equipo requerido para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS.

Equipo	Rango (g)	Incertidumbre ± (mg)
Balanza analítica	0-10000	0.001
Equipo de coulometría XPLOER TX/TS	N/A	N/A

**Cuadro 22:** Reactivos requeridos para medición de cloruros totales por microcoulometría XPLOER TX/TS.

Reactivo	Concentración
Solución estándar NaCl	0.1M
Ácido nítrico	0.1M
Solución de nitrato de plata	0.1M
Ácido sulfúrico	0.1M
Agua desionizada	N/A

### Procedimiento

1. Antes de comenzar, se limpia el equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS usando un frasco lavador con agua desionizada para enjuagar ambas celdas del equipo, la celda de titulación y los electrodos.
2. Se montan los electrodos del sistema de microcoulometría XPLOER TX/TS generador del equipo. Los electrodos se limpian con una solución de ácido nítrico al 5% utilizando frascos lavadores de 30 mL.
3. Se miden 10 mL de aceite crudo de palma utilizando una pipeta volumétrica de 10 mL y se agregan a un matraz aforado de 100 mL, donde se diluyen hasta la marca de aforo con agua desionizada.
4. Con una pipeta volumétrica de 5 mL, se agregan 5 mL a la celda de titulación de 10 mL del coulómetro.
5. En la misma celda de un equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS, se agrega 1 mL de solución generadora de plata al 0.1M utilizando una pipeta volumétrica de 1 mL.

6. En la misma celda de titulación del equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS, se agrega 1 mL de ácido sulfúrico al 0.1M utilizando una pipeta volumétrica de 1 mL.
7. Luego de preparar la celda de titulación y el equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS, se configuran los parámetros según la muestra de aceite crudo de palma.

El procedimiento estándar para la obtención de los valores se puede encontrar en la sección de ecuaciones de marco teórico.

### ISO 10523:2008: Determinación de pH en agua osmotizada.

**Cuadro 23:** Cristalería requerida para determinación de valor de pH en agua osmotizada.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Beaker	50	0.1
Beaker	25	0.1
Probeta	50	0.1
Piseta	500	N/A

**Cuadro 24:** Reactivos requeridos para determinación de valor de pH de agua osmotizada.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución buffer pH 4.0 (rojo de metilo, ftalato de ácido de potasio)	99.5%
Solución buffer pH 7.0 (fosfato monopotásico y disódico)	99.5%
Solución buffer pH 10.0 (borato de sodio y bicarbonato de sodio)	99%
Agua destilada	N/A

**Cuadro 25:** Equipos requeridos para determinación de valor de pH de agua osmotizada.

<b>Equipo</b>	<b>Precisión ± pH</b>
Potenciómetro con electrodo de vidrio	0.01

### Procedimiento

1. Calibrar potenciómetro con soluciones buffer de distinto pH 4,7 y 10. Haciendo uso de beakers de 25mL.
2. Enjuagar el electrodo con agua destilada haciendo uso de una piseta.
3. Tomar muestra de agua osmotizada con una probeta de 50mL, transferir a beaker de 50mL, sumergir potenciómetro y esperar estabilidad.
4. Registrar valor.

**ISO 7888:1985: Determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales.**

**Cuadro 26:** Cristalería requerida para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Beaker	50	0.1

**Cuadro 27:** Reactivos requeridos para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución patrón KCL 1413 $\mu\text{S/cm}$	99.5
Agua destilada	N/A

**Cuadro 28:** Equipos requeridos para determinación de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en agua osmotizada.

<b>Equipo</b>	<b>Precisión ± <math>\mu\text{S/cm}</math></b>
Conductivímetro con celda de platino	0.01

**Procedimiento**

1. Calibrar el conductivímetro con soluciones estándar dentro de beaker de 50mL.
2. Enjuagar la celda de medición con agua destilada.
3. Sumergir la celda en la muestra y registrar lectura en  $\mu\text{S/cm}$ .
4. Para sólidos disueltos totales multiplicar el resultado por un factor de conversión de 0.7.

**ISO 6059:1984 Determinación de dureza total (Ca/Mg)**

**Cuadro 29:** Cristalería requerida para determinación de dureza total de agua osmotizada.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Erlenmeyer	250	0.5
Pipeta volumétrica	10	0.02
Bureta	50	0.1

**Cuadro 30:** Reactivos requeridos para determinación de dureza total de agua osmotizada.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución EDTA	0.01M
Tampón pH 10 (cloruro de amonio + hidróxido de amonio)	99%
Indicador negro de eriocromo T	99%

### **Procedimiento**

1. Pipetear 50mL de muestra en el erlenmeyer haciendo uso de una bureta de 50mL.
2. Agregar 2mL de tampón pH 10 y 3 gotas del indicador.
3. Titular haciendo uso de pipeta volumétrica de 10mL solución de EDTA hasta observar cambio de color de rojo a azul.
4. Registrar volumen consumido.

### **ISO 9297:1989: Determinación de cloruros en agua osmotizada.**

**Cuadro 31:** Cristalería requerida para determinación de cloruros en agua osmotizada.

<b>Cristalería</b>	<b>Capacidad ± (ml)</b>	<b>Incertidumbre ± (ml)</b>
Erlenmeyer	250	0.5
Pipeta volumétrica	100	0.02
Bureta	50	0.1

**Cuadro 32:** Reactivos requeridos para determinación de cloruros en agua osmotizada.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución de nitrato de plata	99%
Indicador cromato de potasio 5%	99%

### **Procedimiento**

1. Pipetear 100mL de muestra dentro de un erlenmeyer de 250mL.
2. Agregar 1mL de indicador de cromato de potasio.
3. Titular con nitrato de plata hasta coloración rojo ladrillo.
4. Registrar volumen consumido.

## ISO 7027:1999: Determinación de turbidez en agua osmotizada.

**Cuadro 33:** Cristalería requerida para determinación de turbidez de agua osmotizada.

<b>Cristalería</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Incertidumbre ± (mm)</b>
Celdas de medición	25	0.1

**Cuadro 34:** Equipo requerido para determinación de turbidez de agua osmotizada.

<b>Equipo</b>	<b>Rango ± 0.01 NTU</b>
Turbidímetro calibrado	0-1000

**Cuadro 35:** Reactivos requeridos para determinación de turbidez de agua osmotizada.

<b>Reactivo</b>	<b>Concentración</b>
Solución patrón formazina 0.02, 10 y 100 NTU.	99.5%

### Procedimiento

1. Encender y permitir la estabilización del turbidímetro.
2. Calibrar el equipo con soluciones patrón de formazina en el rango de medición.
3. Enjuagar la celda de medición con agua destilada y secarla con un paño libre de pelusa.
4. Llenar la celda de 25mm con la muestra sin burbujas de aire y tapanla herméticamente.
5. Insertar la celda en el compartimento de medición, alineándose con la marca de referencia del equipo.
6. Medir y registrar la turbidez en NTU.
7. Enjuagar la celda después de cada uso y almacenarla adecuadamente.



## VII. Resultados

**Cuadro 36:** Resultado de proporciones de agua utilizadas, cloruros antes de lavado, después y % de remoción de cloruros en ACP.

Proporción de flujo de agua osmotizada %	Promedio de cloruros totales antes de lavado ACP (ppm)	Promedio de cloruros totales después de lavado ACP (ppm)	% de remoción promedio de cloruros en ACP
5	5.97±0.0597	1.78±0.0178	70
7	5.86±0.0586	1.41±0.0141	76
10	4.16±0.0416	0.40±0.040	90

En el cuadro anterior se observa la proporción de agua utilizada para cada análisis, así como los cloruros totales en el aceite crudo de palma, medidos en ppm, antes y después del proceso de lavado.

**Cuadro 37:** Resultado de cantidades de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol obtenido de aceite crudo de palma que haya tenido un proceso de lavado industrial con agua osmotizada.

Parámetro	Método	Resultado (ppm)	Límite de cuantificación (ppm)
3-MCPD	ISO 18363-2	< 0.10	0.10
2-MCPD	ISO 18363-2	< 0.10	0.10
Glicidol	ISO 18363-2	< 0.10	0.10

En el cuadro anterior se pueden observar las cantidades de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol obtenidas del aceite de palma crudo que ha pasado por un proceso de lavado industrial con agua osmotizada. Cuadro realizado con base en informe obtenido de laboratorio externo, SGS, siendo la **Figura 15** del apartado de imágenes de experimentación.

**Cuadro 38:** Resultados de parámetros de calidad de aceite crudo de palma que ha pasado por lavado industrial.

<b>Análisis</b>	<b>Agua osmotizada al 5%</b>	<b>Agua osmotizada al 7%</b>	<b>Agua osmotizada al 10%</b>	<b>Especificación ACP</b>	<b>Metodología</b>
<b>Peróxido (meq/kg)</b>	0.46	0.53	0.63	8.0 Máximo	AOCS Cd 8b-90
<b>Acidez (%FFA)</b>	3.98	3.95	3.97	5.0 Máximo	AOCS Ca 5a-40
<b>P-anisidina</b>	3.71	4.97	3.82	< 5.0	AOCS Cd-18-90
<b>Humedad (%)</b>	0.87	0.89	0.45	< 0.5	AOCS Ca 2b-38
<b>Dobi</b>	3.12	3.19	3.16	< 2 pobre calidad	AOCS CC-13j-97
				2.75 = calidad promedio	
				> 3.25 muy buena calidad	

En el cuadro anterior se pueden observar los análisis de parámetros de calidad realizados al aceite crudo de palma, así como los resultados de cada uno de ellos y las especificaciones requeridas según la metodología aplicada.

## VIII. Discusión de resultados

El objetivo del presente trabajo de graduación fue la determinación del efecto de reducción de la formación de 3-MCPD (3-monocloropropanodiol) al realizar una remoción de cloruros en el aceite crudo de palma mediante un lavado industrial usando agua osmotizada, debido a que los cloruros se disuelven en agua. Se experimentó con 3 distintas proporciones de flujo de agua, siendo estas 5%, 7% y 10% respecto al flujo de aceite crudo de palma que entra al sistema. Se eligieron dichas proporciones de agua porque dependen de las partes por millón (ppm) de cloruros que tiene el aceite. Cuando se tienen niveles muy altos de cloruros totales, tales como 10 ppm o superiores, puede ser necesario aumentar el flujo por encima del umbral del 10% de agua osmotizada, sin superar el 15%, ya que esto podría llevar a problemas técnicos, tales como emulsificación (Choo, Y. M., & Nesaretnam, K., 2014), generando pérdidas de aceite e implicando un consumo adicional de agua y energía para la separación y el tratamiento residual. Un flujo mayor puede permitir un tanto mayor porcentaje de remoción, pero implica costos adicionales y mayor humedad residual, lo que no siempre resulta en una mejora del rendimiento del proceso. Según los **cuadros 40, 41 y 42** del apartado de datos calculados, el aceite crudo de palma con el que se realizó la experimentación tiene entre 3.85 ppm y 6.88 ppm de cloruros, lo que es menor al límite de 10 ppm; por lo tanto, la proporción más grande que se usó fue del 10%, por los motivos mencionados anteriormente. A partir de este valor, se eligieron las proporciones de 5% y 7%, ya que a menores flujos se obtienen ahorros en el tratamiento de agua y energía sin dejar de cumplir con el objetivo de remoción de cloruros.

En el proceso de lavado de aceite crudo de palma (**Figura 27** en plano P&ID), el control de los flujos es importante debido a que el flujo de agua depende del de aceite, y era necesario mantener las relaciones experimentales agua/aceite que se eligieron. Para garantizar esto, se emplean medidores másicos, caudalímetros de coriolis, en la Figura 11 se identifican como FIT-1 y FIT-2 (Flow Indicator Transmitter), los cuales miden el flujo de agua y aceite en tiempo real enviando los datos a un sistema de control FIC (Flow Indicator Control). Con esta información, válvulas de control automático (**FCV**) regulan el flujo de agua, ajustándose según las variaciones del flujo de aceite. De esta forma se asegura que sin importar las variaciones que puedan existir en el flujo de aceite, la relación siempre se va a mantener. Es importante mencionar que no se utilizan medidores másicos electromagnéticos, a pesar de ser más económicos, porque el principio de medición podría inducir a una oxidación temprana de aceite. Los medidores de Coriolis no fueron calibrados durante la experimentación, ya que, al ser nuevos en el momento de la investigación, venían correctamente calibrados de fábrica. Estos equipos son sometidos a rigurosas pruebas con fluidos de referencia con trazabilidad certificada, lo que garantiza una medición precisa.

Además de controlar las proporciones de flujo, se debe garantizar un tiempo de mezclado adecuado para que el agua esté en contacto con el aceite y, de esta manera, se logre la remoción. Por este motivo, los flujos se mezclan en un tanque agitado. La agitación debe ser capaz de romper la interfase entre el agua y el aceite para formar una mezcla temporal homogénea, sumado a una temperatura de 90 °C, lo que ocasiona una disminución de la viscosidad, permitiendo una separación efectiva. Luego de la agitación, es necesaria una etapa de separación, la cual se realiza en una centrífuga de discos que permite separar ambas fases líquidas con alta eficiencia en este proceso tipo batch intermitente.

La toma de muestras para el objetivo se realizó en el aceite crudo antes de mezclarse con el agua osmotizada y en el aceite que sale de la centrífuga, ya que en estos dos puntos se encuentran el inicio y el final del proceso de lavado industrial. Según el flujo de agua osmotizada utilizado, mediante el análisis de cloruros antes del lavado y después del lavado, según el **Cuadro 36** del apartado de resultados, se determinó que la proporción de flujo adecuada de agua osmotizada es del 10% respecto al flujo de aceite de entrada, con un porcentaje promedio de remoción de cloruros del 90%. Esto se basa en una cantidad promedio de cloruros antes del lavado de  $4.16 \pm 0.0416$  ppm y una cantidad promedio de cloruros después del lavado de  $0.40 \pm 0.040$  ppm. En cuanto al flujo del 7% de agua osmotizada, el porcentaje promedio de remoción fue del 76%, mientras que con un flujo del 5%, el porcentaje de remoción de cloruros baja significativamente hasta un 5%. Esto corrobora lo descrito anteriormente: un mayor porcentaje de agua durante el lavado puede resultar en una mejor calidad del aceite, con niveles más bajos de cloruros.

Las cantidades iniciales de cloruros pueden ser un problema, ya que no todo el aceite de palma tendrá los mismos niveles, debido a que las condiciones del suelo varían en cada hectárea donde se siembra la palma, y esto no depende de la madurez del fruto. La concentración de cloruros en el suelo puede variar según el tipo de fertilizante utilizado, así como por las características propias del suelo. Además, el agua de riego, dependiendo del pozo de donde provenga, puede tener diferentes niveles de cloruros, lo que influye directamente en la cantidad de cloruros absorbidos por la planta y repercute en el fruto. Dependiendo de la cantidad de cloruros (siempre que no sobrepase los 10 ppm), el flujo óptimo será el del 10%, que maximiza la extracción.

El lavado del aceite crudo de palma debe realizarse utilizando únicamente agua osmotizada para asegurar la calidad del proceso. Esto se debe a que este tipo de agua tiene una muy baja concentración de sales y otros iones, lo cual es fundamental para evitar que se introduzcan cloruros en el aceite durante el lavado. El uso de agua no tratada o de calidad inferior, que contenga altos niveles de cloruros, podría incrementar la cantidad de cloruros en el aceite, afectando negativamente la calidad final del producto. En la planta de producción se produce el agua osmotizada en una planta de ósmosis inversa automatizada. El agua se analiza al salir del proceso con la finalidad de garantizar la calidad del agua, osmotizada y permitir una remoción adecuada en el lavado, en el **Cuadro 45** se pueden observar los datos originales del control de calidad, análisis realizado, valores, límites aceptables máximos para de esta forma garantizar un flujo de agua de calidad que permita un lavado certero de aceite crudo de palma. En el apartado de metodología se encuentran todos los procedimientos de control de calidad aplicados al agua osmotizada tales como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos

totales, dureza total (Ca/mg), cloruros y turbidez. El agua utilizada luego terminado del proceso de lavado de aceite crudo de palma es enviada a planta de tratamiento de aguas residuales donde se le da el debido procesamiento para ser utilizada nuevamente dentro de la planta en otros procesos de lavado, ahorrando así recursos hídricos, aumentando la sostenibilidad.

Respecto al segundo objetivo planteado, que es la obtención de las cantidades de 3-MCPD (3-monocloropropano-1,2-diol), 2-MCPD (2-monocloropropano-1,3-diol) y glicidol presentes en el aceite crudo de palma que ha pasado por un proceso de lavado industrial con agua osmotizada, se debe medir la presencia de tales compuestos, ya que están directamente regulados por las autoridades alimentarias en países como los miembros de la Unión Europea (Codex Alimentarius Commission, 2020). Debido a sus riesgos potenciales para la salud, tal como se menciona en el marco teórico, en el apartado de riesgos para la salud provocados por 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol.

El límite permitido de los tres compuestos en la Unión Europea para grasas refinadas es de 1.25 ppm y 0.5 ppm para aceites destinados a alimentos infantiles. Estos límites fueron establecidos por el Reglamento (UE) 2020/1322 de la Comisión Europea, que modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 sobre los niveles máximos de contaminantes en los alimentos (European Commission, 2020). El análisis fue realizado por un laboratorio externo, SGS (Société Générale de Surveillance), en su filial de Hamburgo, Alemania, para determinar las cantidades de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol mediante el método ISO 18363-2. Sus certificaciones de calidad, como ISO/IEC 17025 e ISO 9001, garantizan que sus métodos y resultados son precisos, fiables, y conformes con las normativas internacionales, razón por la cual no fue requerido un triplicado de resultados. La amplia red global de laboratorios y su reputación en la industria hacen de SGS un proveedor confiable para el análisis de estos compuestos críticos en la seguridad alimentaria. (SGS Group, 2024)

Sin embargo, solo se realizó el análisis después del lavado del aceite crudo de palma, utilizando un flujo de 10% de agua osmotizada. Esta proporción fue seleccionada por su mayor porcentaje de remoción de cloruros, que alcanza el 90%. La razón de realizar la determinación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol después del lavado se basa en la posibilidad de evaluar qué tan efectiva ha sido esta etapa para reducir las condiciones que favorecen la aparición de estos compuestos. Medir antes no proporcionaría información tan útil, ya que en esa fase del proceso el foco principal no es la presencia de estos contaminantes, sino la eliminación de los precursores.

Al mitigar la generación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol mediante la remoción de su precursor, los cloruros, se puede lograr un mayor control respecto a la cantidad de estos compuestos. Sin embargo, las cantidades totales resultantes también dependen de las condiciones de refinación, ya que la desodorización se realiza a temperaturas de 240°C a 260°C, combinadas con periodos prolongados de tiempo, que en algunos casos pueden llegar a ser de una hora, dependiendo de la calidad del aceite. Estas condiciones permiten la reacción entre los ácidos grasos del aceite y los cloropropanoles, que pueden originarse a partir de los gliceroles en presencia de cloruros bajo altas temperaturas. De igual manera, el glicidol puede formarse a partir de la descomposición de los ésteres de glicidol, tales como 3-MCPD y 2-MCPD. (EFSA, 2016)

Los resultados de la medición dieron valores inferiores a 0.10ppm para 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol, como se puede observar en el **Cuadro 37**. Este nivel está por debajo del límite de cuantificación (LOQ), lo que significa que no se puede detectar una cantidad significativa de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol. Por lo tanto, el aceite crudo de palma lavado es de alta calidad y cumple con los estándares de seguridad alimentaria, minimizando la posibilidad de formación de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol durante el proceso de refinado al mantener valores seguros. Esto se debe a que la cantidad de  $0.40 \pm 0.040$  ppm de cloruros totales obtenida en base al lavado con 10% de agua osmotizada no dará lugar a la formación directa de estos compuestos, y como se discutió anteriormente, no se detectaron cantidades significativas, lo que confirma la ausencia de formación directa.

La industria de aceite de palma en Guatemala se puede dividir en dos mercados distintos: el mercado de exportación, siendo países europeos los principales compradores de aceite crudo de palma, la gran mayoría de clientes exigiendo un aceite certificado por RSPO, estando dispuestos a pagar más por cada tonelada. El segundo mercado es el mercado local a nivel centroamericano. Este mercado compra los aceites ya debidamente refinados, pero no llevan un proceso de lavado, al no contar con regulaciones de estándares permitidos de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol. Previo al proceso de refinado, se tiene el proceso de blanqueo del aceite de palma, en el cual se utilizan arcillas activadas que permiten retirar pigmentos y contaminantes, incluso cloruros, teniendo la capacidad de disminuir la cantidad de cloruros entre un 20% y 40% (AOCS, 2018), aunque debe tomarse en cuenta que es un proceso que no tiene como objetivo la reducción de cloruros, y podría ser incluso menor la remoción que puede darse, dependiendo de la presencia de otros pigmentos y contaminantes que posea el aceite crudo de palma. Si bien el proceso de blanqueo no tiene como objetivo la remoción de los precursores de compuestos cancerígenos (cloruros), podría estudiarse y modificarse para controlar en cierta medida la reducción, lo que podría ayudar a este mercado si llegaran a optar por obtener las regulaciones que sí rigen el mercado europeo.

La determinación de los valores de tales compuestos es de suma importancia, ya que Guatemala es un gran exportador de aceite crudo de palma a países Europeos y contar con datos sobre la generación de compuestos de tal relevancia debido a sus peligros para la salud permite tener una trazabilidad de los parámetros de calidad y seguridad alimentaria de cloruros precursores de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol, lo que contribuye a que el aceite crudo de palma de Guatemala sea reconocido por su calidad.

Respecto al tercer objetivo planteado, el aceite crudo de palma debe cumplir con especificaciones determinadas por parámetros de calidad a través de distintos análisis, que permitan obtener un aceite crudo de palma lavado de alta calidad. El aceite crudo de palma lavado aún conserva impurezas y características que se eliminan o ajustan en el aceite refinado. Sin embargo, es necesario que sus valores estén dentro de un rango manejable por las refinerías. Por ejemplo, el proceso de lavado solo elimina parte de los cloruros, mientras que el refinado completo involucra varias etapas, como la neutralización, blanqueo y desodorización, que ajustan parámetros como la acidez y la oxidación, y eliminan más completamente compuestos no deseados, resultando en un aceite más estable, sin olores fuertes, y adecuado para el consumo directo o uso industrial (Codex Alimentarius Commission, 2020). Los parámetros evaluados son peróxidos, acidez, p-anisidina, humedad y DOBI, todas las especificaciones

del ACP están basadas en las normas internacionales de calidad de AOCS (American Oil Chemists' Society). Estos análisis fueron seleccionados porque son los que pueden variar con el uso de agua osmotizada durante el lavado, ya que este proceso ayuda a remover impurezas, productos de oxidación y cloruros, lo que mejora la calidad oxidativa en cuanto a los valores de porcentaje de peróxidos y p-anisidina. Además, ayuda a preservar los carotenoides (pigmentos responsables de su color rojo anaranjado característico, betacaroteno y alfa-caroteno), que influyen en el índice DOBI, y puede afectar el porcentaje de humedad presente en el aceite crudo de palma. No se realizó análisis triplicado al tener condiciones experimentales lo suficientemente precisos siguiendo los procedimientos de American Oil Chemists' Society, rigurosos procedimientos de control de calidad para asegurar que los análisis se lleven a cabo de forma estandarizada y en condiciones óptimas, lo que garantiza resultados consistentes a nivel mundial. Además, colabora con organismos internacionales de normalización como la ISO y el Codex Alimentarius, lo que permite que sus métodos sean ampliamente reconocidos y aceptados en los principales mercados globales.

En el caso de los resultados del **Cuadro 38**, se obtuvo un valor de peróxido de 0.46 meq/kg para el aceite crudo de palma con un flujo de agua osmotizada del 5% utilizado para el lavado, 0.53 meq/kg para el ACP con un flujo de agua osmotizada del 7% y 0.63 meq/kg para el ACP con un flujo de agua osmotizada del 10%. En los tres flujos se cumplió el estándar, con valores bajos, incluso mucho por debajo de la especificación de 8.0 meq/kg como valor máximo para el ACP. Estos valores bajos para las tres muestras de ACP con distintos flujos de agua osmotizada representan la frescura del aceite, indicando que aún no ha comenzado a deteriorarse, lo cual prolonga su vida útil, siendo este un parámetro de alta preocupación y exigencia.

En el caso de la acidez del aceite, ocasionada por ácidos grasos libres, se obtuvieron valores muy cercanos entre cada una de las muestras de ACP con distintos flujos de agua osmotizada, siendo 3.98% para el flujo de 5%, 3.95% para el flujo de 7% y 3.97% para el flujo de 10%. Los tres valores fueron bajos, lo que indica que el aceite no ha sufrido una descomposición significativa de los triglicéridos. Se trata de un parámetro crítico, ya que un alto contenido de ácidos grasos libres reduce la vida útil del aceite y afecta su sabor.

El valor de p-anisidina es un parámetro de suma importancia, ya que mide la oxidación secundaria del aceite, principalmente la formación de cetonas y aldehídos, los cuales son responsables de dar un sabor y olor a rancio al aceite. Este es uno de los parámetros que el consumidor reconoce, aunque sin saberlo. Un valor aceptado internacionalmente debe ser menor a 5. En el caso de los flujos de agua osmotizada, el valor del 5% presentó la menor p-anisidina, siendo de 3.71, como se observa en el cuadro 25, seguido del flujo de 10% con un valor de 3.82. Aquí ocurre algo particular: el flujo que presentó el valor más alto de p-anisidina, debido a la mayor presencia de cetonas y aldehídos, fue el del 7%, con un valor de 4.97, muy cercano al límite de 5, siendo aceptado por un margen muy pequeño. Puede parecer extraño que este valor sea mayor que el del flujo de 5%, ya que se esperaría que al haber más agua hubiera una mayor eliminación, como se observa en el flujo de 10%, que fue el segundo valor más bajo. Esto se debe a la interacción efectiva entre el agua y el aceite, que fue lo suficientemente homogénea para permitir una extracción adecuada. En el caso del 7%, al aumentar la cantidad de agua pero no lo suficiente, se obtuvo una mala interacción entre el agua y el aceite, requiriendo más tiempo de contacto. Mientras tanto, en el flujo

de 5%, hubo una interacción más homogénea, favoreciendo la remoción de aldehídos y otros compuestos oxidados.

Un parámetro altamente decisivo y de vital importancia es la humedad presente, ya que un porcentaje bajo evita el deterioro microbiológico y la hidrólisis de los triglicéridos. Por esta razón, es un parámetro que siempre debe estar dentro de las especificaciones internacionales. Dependiendo de la humedad, puede ser necesario utilizar un secador al vacío al finalizar el proceso de lavado, lo que incide en aumento de costos operativos y de mantenimiento. Si el valor es bajo, menor al 0.5%, el aceite puede ir directamente a los tanques de almacenamiento o despacho. En este caso, los flujos de agua osmotizada de 5% y 7% presentaron valores de humedad de 0.87% y 0.89% respectivamente. Si se trabajara con estos valores, sería necesario utilizar un secador al vacío para retirar el exceso de humedad y lograr que el aceite cumpla con los parámetros de calidad internacionales, siendo 0.5% el valor aceptado. En el caso del flujo de 10%, se determinó que es el más adecuado, con una humedad de 0.45%, lo que da como resultado un aceite de alta calidad con baja humedad, que no necesita pasar por un secador al vacío, reduciendo el tiempo y evitando la operación unitaria extra. Al usar un mayor flujo de agua en el lavado del aceite de palma (como el 10%), se mejora el proceso de enjuague, lo que facilita la eliminación más eficiente de impurezas y restos que suelen retener agua en el proceso de separación en la centrífuga. Esto provoca que el agua se separe mejor del aceite, dejando un contenido de humedad más bajo. En cambio, con flujos más reducidos (5% o 7%), el enjuague no es tan efectivo, lo que resulta en una mayor retención de humedad en el aceite, ya que las impurezas no se eliminan por completo.

El DOBI (Índice de Deterioro de Blanqueabilidad) es un parámetro de calidad de suma importancia, ya que a través del contenido de carotenoides se determina la relación de oxidación de los componentes. Valores menores a 2 indican una calidad pobre, 2.75 indica una calidad promedio y valores superiores a 3.25 indican una calidad muy buena. En el caso de los datos obtenidos, los tres valores presentan casi una calidad muy buena, siendo 3.12 para el flujo de 5%, 3.19 para el flujo de 7% y 3.16 para el flujo de 10%, mostrando altos niveles de carotenoides y bajos niveles de productos de oxidación. Este aceite es óptimo para la refinación.

En el **Cuadro 44** del apartado de datos originales se presenta un análisis de los parámetros de calidad de un aceite crudo de palma no lavado, utilizando las mismas variables de medición que para un aceite crudo de palma lavado: peróxidos, acidez, índice de p-anisidina, porcentaje de humedad y DOBI.

Al comparar el aceite crudo de palma lavado con agua osmotizada al 10% con el aceite no lavado, se observan algunas diferencias en sus características. El índice de peróxidos es ligeramente más alto en el aceite lavado (0.63 meq/kg) que en el no lavado (0.49 meq/kg), lo que sugiere una mayor presencia de compuestos oxidantes, posiblemente debido al contacto con oxígeno durante el proceso de lavado. En cuanto a la acidez (%FFA), el aceite lavado presenta un valor ligeramente menor (3.97%) en comparación con el aceite no lavado (4.01%), lo que indica una reducción mínima en los ácidos grasos libres. Por otro lado, el índice de p-anisidina, que mide la presencia de aldehídos secundarios de oxidación, es más bajo en el aceite lavado (3.82) que en el no lavado (4.67), lo que sugiere una leve mejora en la estabilidad oxidativa. En términos

de humedad, el aceite lavado contiene un porcentaje ligeramente mayor (0.45%) en comparación con el aceite no lavado (0.40%), algo esperado debido al contacto con agua, lo que podría influir en su almacenamiento y conservación. Finalmente, el índice de DOBI es ligeramente menor en el aceite lavado (3.16) respecto al no lavado (3.23), lo que podría indicar una disminución en la calidad del color y en la estabilidad oxidativa. En general, el proceso de lavado con agua osmotizada al 10% contribuye a la reducción de ciertos compuestos de oxidación y de los ácidos grasos libres. También en el cuadro 44 se pueden observar los valores límites o rangos aceptados para el aceite, al compararlos con los valores obtenidos para el aceite lavado se puede afirmar que el lavado no afecta de forma negativa al aceite crudo de palma, porque a pesar de las ligeras variaciones todos los parámetros de calidad se encuentran dentro de rango de calidad respecto a metodología AOCS. Es fundamental controlar la humedad, y minimizar la exposición al oxígeno para mantener la calidad del aceite.

En conclusión, el proceso de lavado industrial de aceite crudo de palma con agua osmotizada ha demostrado ser efectivo en la remoción de cloruros, siendo precursores que mitigan la formación de compuestos potencialmente peligrosos como 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol. Los resultados obtenidos indican que, al utilizar un flujo de agua osmotizada del 10%, se logra una remoción del 90% de cloruros, lo que deja una concentración residual de  $0.40 \pm 0.040$  ppm, significativamente baja y segura para evitar la formación de estos compuestos durante el refinado del aceite. Aunque flujos menores, como el 7% y el 5%, también mostraron capacidad de remoción, no fueron tan efectivos, y el flujo del 5% resultó en una remoción insuficiente del 5%. Esto confirma la importancia de utilizar un flujo adecuado de agua para asegurar la máxima eficiencia en la eliminación de cloruros sin incurrir en problemas técnicos, como la emulsificación.

Además, los análisis realizados después del lavado mostraron niveles de 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol por debajo del límite de cuantificación (LOQ), lo que certifica que el proceso cumple con los estándares de seguridad alimentaria internacionales. En resumen, el uso de un 10% de flujo de agua osmotizada garantiza la reducción de precursores de contaminantes, contribuyendo a un aceite de palma de alta calidad y seguro para el consumo humano, sin afectar la calidad del producto final.



## IX. Conclusiones

El lavado del aceite crudo de palma utilizando agua osmotizada resultó en una remoción eficiente de cloruros, con un flujo de agua del 10% que logró una reducción del 90%, pasando de un promedio inicial de  $4.16 \pm 0.0416$  ppm a  $0.40 \pm 0.040$  ppm de cloruros. Los flujos menores, como el 7% y el 5%, presentaron una remoción de cloruros del 76% y 70%, respectivamente, demostrando que un mayor flujo de agua incrementa la eficacia del proceso, sin generar problemas técnicos como la emulsificación, siempre que no se supere el 15% de agua osmotizada. Esta reducción significativa en los niveles de cloruros asegura una calidad mejorada del aceite crudo de palma, reduciendo el riesgo de formación de contaminantes en etapas posteriores del proceso de refinación.

La reducción de los precursores de 3-MCPD, 2-MCPD y Glicidol mediante el lavado con agua osmotizada resultó en un aceite de alta calidad, libre de cantidades significativas de estos compuestos peligrosos. Al medir estos compuestos después del proceso de lavado, se observó que los niveles estaban por debajo del límite de cuantificación ( $<0.10$  ppm), confirmando que el lavado fue efectivo en mitigar su formación. El análisis, realizado por un laboratorio acreditado, respalda que el aceite crudo de palma lavado cumple con los estándares internacionales de seguridad alimentaria, lo que es especialmente relevante para el mercado europeo, donde estos compuestos están estrictamente regulados. El proceso asegura que el aceite crudo de palma de Guatemala puede ser reconocido por su calidad y seguridad.

Los resultados obtenidos en los parámetros de calidad del aceite crudo de palma lavado, como el índice de peróxidos, la acidez, el valor de p-anisidina, la humedad y el índice DOBI, confirman que el lavado con agua osmotizada mejora la estabilidad y calidad del aceite. Los valores de peróxidos se mantuvieron bajos, con 0.46 meq/kg para un flujo de agua del 5%, 0.53 meq/kg para el 7% y 0.63 meq/kg para el 10%, todos muy por debajo del límite máximo de 8.0 meq/kg, indicando la frescura del aceite. La acidez mostró valores consistentes de 3.98%, 3.95% y 3.97% para los flujos de 5%, 7% y 10%, respectivamente, confirmando que no ha ocurrido una descomposición significativa de triglicéridos. El valor de p-anisidina, que mide la oxidación secundaria, fue más bajo en el flujo del 5%, con 3.71, mientras que el flujo del 10% registró 3.82 y el flujo del 7% 4.97, siendo este último aceptable, pero cercano al límite de 5. En cuanto a la humedad, el flujo de agua del 10% fue el único que no requirió secado adicional, presentando un valor de 0.45%, por debajo del estándar de 0.5%. Finalmente, el índice DOBI, con valores de 3.12, 3.19 y 3.16 para los flujos de 5%, 7% y 10%, respectivamente, muestra que el aceite es óptimo para refinación y cumple con estándares internacionales, garantizando un aceite de alta calidad para el consumo y uso industrial.

El proceso de lavado con agua osmotizada no afecta negativamente la calidad del aceite crudo de palma, ya que no genera cambios significativos en sus parámetros fundamentales. Aunque se observa un ligero aumento en el índice de peróxidos y en el contenido de humedad, estos efectos pueden controlarse con un adecuado manejo del proceso. Además, la reducción en la acidez y el índice de p-anisidina sugiere que el lavado puede contribuir a mejorar la estabilidad oxidativa del aceite. Por lo tanto, este tratamiento puede considerarse una alternativa viable sin comprometer la calidad del producto final.



## **X. Recomendaciones**

Se sugiere explorar nuevas tecnologías emergentes, como el uso de ultrasonidos o membranas, que podrían complementar el proceso de lavado con agua osmotizada. Estas tecnologías pueden mejorar la eficiencia en la eliminación de cloruros y otros precursores de contaminantes sin comprometer la calidad del aceite.

La implementación de un sistema de monitoreo continuo de los niveles de cloruros durante el proceso de lavado podría ser ventajosa. Este sistema permitiría realizar ajustes automáticos en el flujo de agua, optimizando así la remoción de cloruros y evitando el desperdicio de recursos, lo que aumentaría tanto la eficiencia operativa como la económica.

Realizar estudios que evalúen la estabilidad del aceite crudo de palma lavado a lo largo del tiempo es crucial. Estos estudios deben enfocarse en monitorear parámetros como los índices de oxidación y la acidez, lo que ofrecerá información valiosa sobre cómo el proceso de lavado afecta la longevidad del aceite antes de su refinación.

Sería recomendable evaluar el uso de tecnologías de pretratamiento del aceite antes del lavado, tales como la filtración o clarificación. Estas técnicas podrían ayudar a eliminar sólidos o impurezas, mejorando la eficiencia del lavado y reduciendo la probabilidad de formar emulsiones.

Finalmente, para garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar de la población de Guatemala, es indispensable que solo se comercialice aceite crudo de palma que haya sido sometido a un proceso de lavado. Esto permite minimizar la presencia de compuestos como 3-MCPD, 2-MCPD y glicidol, los cuales pueden representar riesgos para la salud humana.



## XI. Referencias

- Aceites de Palma, S.A. de C.V. (2014). *Proceso productivo | Aceites de palma*. Induagro. <https://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html>
- Agraria.pe. (2023, junio 1). *Consumo mundial de aceite de palma alcanzó los 88.9 millones de toneladas en 2022*. <https://agraria.pe/noticias/consumo-mundial-de-aceite-de-palma-alcanzo-los-88-9-millones-31401>
- Ahmad, A., Majumder, M., Farooqui, U. R., & Choudhury, T. (2018). Water treatment: Principles and design of membrane processes. In *Springer handbook of membrane technology* (pp. 565-610). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61772-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61772-3_25)
- Ahmed, F. A., & Ali, M. (2016). The impact of fertilizers on the accumulation of chlorides in palm oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(9), 2364-2372. <https://doi.org/10.1021/jf505987y>
- Alfa Laval. (2021). *Procesado de aceite de palma*. <https://www.alfalaval.com.co/industrias/alimentos-lacteos-y-bebidas/procesado-de-alimentos/procesado-de-grasas-y-aceites/procesado-de-aceite-de-palma/>
- Alfa Laval. (2022, 26 septiembre). *Cómo reducir 3MCPD y GE contaminantes del aceite de palma*. Alfa Laval. Recuperado 14 de noviembre de 2023, de <https://www.alfalaval.com.co/industrias/alimentos-lacteos-y-bebidas/procesado-de-alimentos/procesado-de-grasas-y-aceites/how-to-reduce-3mcpd-and-ge-palm-oil-contaminants-during-palm-oil-processing/>
- Berger, K. G. (2015). Developments in analytical methods for palm oil quality assessment. *Palm Oil Developments*, 61, 10-15.
- Borrero, C. A. (2015). *Palma de aceite*. Infoagro. [https://infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma\\_aceite2.htm](https://infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite2.htm)
- Carbotecnia. (2024). *¿Qué es la ósmosis inversa y cómo funciona un purificador?* Carbotecnia. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>
- Choo, Y. M., & Nesaretnam, K. (2014). *Advances in oil palm research*. Malaysian Palm Oil Board.

- Choo, Y. M., & Nesaretnam, K. (2014). Palm oil: Production, processing, characterization, and uses. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(2), 137-152. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2401-8>
- Chow, C. K. (Ed.). (2007). *Fatty acids in foods and their health implications* (3rd ed.). CRC Press.
- Codex Alimentarius Commission. (2020). *Norma general para aceites y grasas comestibles*. FAO/OMS. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2016). Risk for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food. *EFSA Journal*. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>
- European Commission. (2020). *Commission regulation (EU) 2020/1322 of 23 September 2020. Official Journal of the European Union*.
- European Food Safety Authority (EFSA). (2016). *Risks for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPDs) and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food*. *EFSA Journal*.
- Frankel, E. N. (1998). *Lipid oxidation*. Oily Press.
- Gallpe. (2021). Soluciones en cromatografía de gases. <https://gallpe.com/soluciones/soluciones-en-cromatografia-de-gases/>
- Grepalma. (2019, 3 octubre). Declaración pública de socios de GREPALMA compromiso voluntario para la cero deforestación. Grupo Hame. Recuperado 14 de noviembre de 2023, de <https://grupohame.com/wp-content/uploads/2021/06/DECLARACION-PUBLICA-COMPROMISO-VOLUNTARIO-CERO-DEFORESTACION-Grepalma-2.pdf>
- Gunstone, F. D., & Norris, F. A. (1983). *Lipids in foods: Chemistry, biochemistry and technology*. Pergamon Press.
- Gupta, M. (1998). *Practical guide to vegetable oil processing* (2nd ed.). AOCS.
- Hamilton, R. J. (Ed.). (1999). *Lipid analysis: A practical approach*. Oxford University Press.
- Hew, K. S., Asis, A. J., Tan, T. B., Yusoff, M. M., Lai, O. M., Nehdi, I. A., & Tan, C. P. (2019). Revising degumming and bleaching processes of palm oil refining for the mitigation of 3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE) and glycidyl esters (GE) content in refined palm oil. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125545>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2013). 3-Monochloro-1,2-propanediol. In *Some chemicals present in industrial and consumer*

*products, food and drinking-water* (Vol. 101, pp. 349-353). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France: IARC.

- KMEC. (2014). Desodorización del aceite para el proceso de refinación de aceite de palma. *Plantas Aceiteras*. <https://www.plantasaceiteras.com/planta-de-refineria-de-aceite/desodorizacion-del-aceite.html>
- Krohne Messtechnik GmbH. (s.f.). Desgomado en la refinación de aceite de palma crudo. KROHNE. <https://cmp.krohne.com/palm-oil-es/desgomado/>
- No-Ficción. (2023, April 12). Cultivar palma africana ya no tiene alto impacto ambiental en Guatemala. <https://www.no-ficcion.com/projects/cultivar-palma-africana-impacto-ambiental-guatemala>
- Perkinelmer. (2021). Early detection of chloride in 3-MCPD precursors in palm oil through the analysis of chloride in edible oil with the Avio 220 max ICP-OES. Perkinelmer. Recuperado 15 de noviembre de 2023, de [https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/app\\_avio200-icp-oes-chloride-in-palmoil.pdf](https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/app_avio200-icp-oes-chloride-in-palmoil.pdf)
- PQP Profesional. (2021). ¿Qué son los fertilizantes y para qué sirven? <https://pqpprofesional.com/que-son-los-fertilizantes-y-para-que-sirven/>
- Producción de la Palma Africana. (n.d.). <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea28s/ch33.htm>
- Producción Industrial - REPSA. (2021, August 11). REPSA. <https://repsa.com.gt/produccion-industrial/>
- Ramli, M. R., Ismail, R., & Idris, Z. (2017). Refining of palm oil: An overview. *Journal of Oil Palm Research*, 29(4), 475-486.
- Repsa. (2020, November 19). Lo positivo del cultivo de palma de aceite. REPSA. <https://repsa.com.gt/2020/09/01/lo-positivo-del-cultivo-de-palma-de-aceite/>
- Rossell, J. B. (Ed.). (1991). *Classical analysis of oils, fats, and derivatives*. Springer.



## XII. Anexos

### Cálculos de muestra

**Cálculo 1:** Determinación de valor de peróxido en aceite crudo de palma mediante método AOCS Cd 8B-90, esto para la muestra de aceite crudo de palma lavada a un flujo de 5% de agua osmotizada.

$$\text{Valor de peróxido} = \frac{(S - B) * M * 1000}{\text{masa (g) de muestra ACP}}$$

B= Volumen de titulante, ml de blanco.

S= Volumen de titulante, ml de porción de análisis.

M= Molaridad de solución de tiosulfato de sodio.

$$\text{Valor de peróxido} = \frac{(0.023\text{mL}) * 0.1\text{M} * 1000}{5\text{g}} = 0.46$$

**Cálculo 2:** Determinación de ácidos grasos libres para ácidos grasos libres de aceite crudo de palma mediante método AOCS Ca 5a-40, esto para la muestra de aceite lavada con 5% de agua desionizada.

$$\begin{aligned} \text{Ácidos grasos libres aceite crudo de palma \%} \\ = \frac{\text{ml de NaOH} * \text{Molaridad} * 25.6}{\text{masa (g) de muestra ACP}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ácidos grasos libres aceite crudo de palma \%} &= \frac{4.38\text{mL} * 0.25\text{M} * 25.6}{7.05\text{g}} \\ &= 3.98\% \end{aligned}$$

**Cálculo 3:** Determinación de valor de yodo para aceite crudo de palma mediante método AOCS Cd 1-15, esto para la muestra de aceite crudo de palma lavada a un flujo de 10% de agua osmotizada.

$$\text{Valor de yodo} = \frac{(23.09\text{ml}) * 0.1\text{N} * 12.69}{0.5288\text{g}} = 55.41$$

Fue utilizada ecuación 3 ubicada en el apartado de marco teórico.

**Cálculo 4:** Determinación de valor de P-anisidina para aceite crudo de palma mediante método AOCS Cd 18-90, esto para la muestra de aceite crudo de palma lavada a un flujo de 10% de agua osmotizada.

$$P - A.V. = \frac{25 * (1.2(0.1) - 0.0436)}{0.5 g} = 3.82$$

Fue utilizada ecuación 4 ubicada en el apartado de marco teórico.

**Cálculo 5:** Determinación de contenido de humedad y material volátil en aceite crudo de palma mediante método AOCS Ca 26-38, esto para la muestra de aceite crudo de palma lavada a un flujo de 10% de agua osmotizada.

$$Humedad y materia volátil, \% = \frac{0.9g}{20g} * 100 = 0.45\%$$

Fue utilizada la ecuación 5 ubicada en el apartado de marco teórico.

**Cálculo 6:** Determinación de índice de blanqueamiento (DOBI) de aceite crudo de palma mediante método AOCS Cc 13j-97, esto para la muestra de aceite crudo de palma lavada a un flujo de 10% de agua osmotizada

$$DOBI = \frac{0.316}{0.1} = 3.16$$

Fue utilizada la ecuación 6 ubicada en el apartado de marco teórico.

### Datos originales

**Cuadro 39:** Proporciones de agua osmotizada utilizada para lavado respecto al flujo de aceite crudo de palma utilizado.

Flujo de ACP (kg/h)	Flujo de agua osmotizada al 5% (kg/h)	Flujo de agua osmotizada al 7% (kg/h)	Flujo de agua osmotizada al 10% (kg/h)
9000	450	630	900

En el cuadro anterior se puede observar las proporciones de agua utilizadas, respecto al flujo de aceite crudo de palma.

### Datos calculados

**Cuadro 40:** Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 10% de flujo de agua osmotizada.

<b>Flujo de agua osmotizada</b>			
<b>10% de total de flujo de entrada de aceite</b>			
<b>Entrada cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Salida cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Remoción (ppm)</b>	<b>% de remoción</b>
3.85	0.36	3.49	91%
4.02	0.51	3.51	87%
4.36	0.28	4.08	94%
4.37	0.43	3.94	90%
4.21	0.41	3.80	90%
<b>Promedio de entrada de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio de salida de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio remoción</b>	90%
4.21	0.40		

En el cuadro anterior se pueden observar los datos calculados de la remoción de cloruros en aceite crudo de palma, tales como la entrada de cloruros totales, la salida de cloruros totales, el promedio de cloruros totales en entrada y salida, la remoción de cloruros y el promedio del porcentaje de remoción de cloruros. Esto se realizó utilizando un flujo del 10% de agua osmotizada respecto al flujo total de entrada de aceite crudo de palma. Los datos fueron obtenidos en base al XPLORER TX/TS.

**Cuadro 41:** Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 7% de flujo de agua osmotizada.

<b>Flujo de agua osmotizada</b>			
<b>7% de total de flujo de entrada de aceite</b>			
<b>Entrada cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Salida cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Remoción (ppm)</b>	<b>% de remoción</b>
6.18	1.30	4.88	79%
6.41	1.69	4.72	74%
5.67	1.38	4.29	76%
6.12	1.56	4.56	75%
4.93	1.11	3.82	77%
<b>Promedio de entrada de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio de salida de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio remoción</b>	76%
4.93	1.41		

En el cuadro anterior se pueden observar los datos calculados de la remoción de cloruros en aceite crudo de palma, tales como la entrada de cloruros totales, la salida de cloruros totales, el promedio de cloruros totales en entrada y salida, la remoción de cloruros y el promedio del porcentaje de remoción de cloruros. Esto se realizó utilizando un flujo del 7% de agua osmotizada respecto al flujo total de entrada de aceite crudo de palma. Los datos fueron obtenidos con el XPLOER TX/TS.

**Cuadro 42:** Cloruros de totales en aceite crudo de palma entrada salida, remoción, porcentaje de remoción y promedios, esto para 5% de flujo de agua osmotizada.

<b>Flujo de agua osmotizada</b>			
<b>5% de total de flujo de entrada de aceite</b>			
<b>Entrada cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Salida cloruros totales ACP (ppm)</b>	<b>Remoción (ppm)</b>	<b>% de remoción</b>
6.35	2.10	4.25	67%
6.66	1.69	4.97	75%
4.58	1.38	3.20	70%
5.36	1.56	3.80	71%
6.88	2.15	4.73	69%
<b>Promedio de entrada de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio de salida de cloruros totales en ACP (ppm)</b>	<b>Promedio remoción</b>	70%
5.97	1.78		

En el cuadro anterior se pueden observar los datos calculados de la remoción de cloruros en aceite crudo de palma, como la entrada de cloruros totales, la salida de cloruros totales, el promedio de cloruros totales en entrada y salida, la remoción de cloruros y el promedio del porcentaje de remoción de cloruros. Esto se realizó utilizando un flujo del 5% de agua osmotizada respecto al flujo total de entrada de aceite crudo de palma. Los datos fueron obtenidos con el XPLOER TX/TS.

**Cuadro 43:** Impurezas totales presentes en ACP con base en remoción.

<b>Flujo de agua osmotizada %</b>	<b>Impurezas totales -promedios de remoción (PPM)</b>
10	3.76
7	4.45
5	4.19
<b>Promedio Impurezas totales -promedios de remoción (PPM)</b>	
4.14	

En el cuadro anterior se pueden observar las impurezas totales presentes en el aceite crudo de palma, las cuales fueron retiradas utilizando agua osmotizada y centrifugación, con distintos flujos de agua: 10%, 7% y 5%.

**Cuadro 44:** Parámetros de calidad de aceite crudo de palma que no ha pasado por lavado industrial.

Análisis	ACP sin proceso de lavado	Especificación ACP	Metodología
<b>Peróxido (meq/kg)</b>	0.49	8.0 Máximo	AOCS Cd 8b-90
<b>Acidez (%FFA)</b>	4.01	5.0 Máximo	AOCS Ca 5a-40
<b>P-anisidina</b>	4.67	< 5.0	AOCS Cd-18-90
<b>Humedad (%)</b>	0.40	< 0.5	AOCS Ca 2b-38
<b>Dobi</b>	3.23	< 2 pobre calidad 2.75 = calidad promedio > 3.25 muy buena calidad	AOCS CC-13j-97

En el cuadro anterior se puede observar los parámetros de calidad de aceite crudo de palma analizado que no ha pasado por un lavado industrial con agua osmotizada, así como las especificaciones con las que debe cumplir.


**Cuadro 45:** Parámetros de calidad de agua osmotizada luego de un proceso de ósmosis inversa.

Parámetro	Unidad	Valor agua osmotizada	Especificación agua osmotizada
<b>Conductividad total</b>	μS/cm	18.5	<50
<b>Sólidos disueltos (TDS)</b>	mg/L	9.2	<30
<b>Dureza total (Ca/Mg)</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2.8	<5
<b>Cloruros (Cl)</b>	mg/L	0.5	<10
<b>Turbidez</b>	NTU	0.2	<0.5

En el cuadro anterior se puede observar los parámetros de calidad analizados al agua osmotizada, unidad de medición, valores y las especificaciones que debe cumplir para poder ser utilizada en un proceso de lavado de aceite crudo de palma.

## Imágenes de experimentación

**Figura 14:** Análisis realizado por laboratorio externo de determinación de cantidad de 3-MCPD, 2-MCPD y Glicidol presente en aceite crudo de palma.



SGS Germany GmbH Heidenkampsweg 99 20097 Hamburg

GUATEMALA  
GUATEMALA

Hamburg,

**Test Report**  
Order #  
Customer

SGS Germany GmbH  
Heidenkampsweg 99  
20097 Hamburg

ILAC-MRA  
DAKKS  
Deutsche  
Akkreditierungsstelle  
D-PL-11020-04-01

**General Information:**

Sample No.:  
Sample: #1 ACP Lavado  
Date of receipt:  
Testing period (begin / end):  
Quantity: 778g  
Packaging: Plastic can

**Test Results:**

Parameter	Method	Lab Unit	Result	Limit of quantification	Requirements
<b>Special analyses:</b>					
Glycidylester det. as free Glycidol	ISO 18363-2	HH mg/kg	< 0,10	0,10	
Sum free 2-MCPD, 2-MCPDester, det. as free 2-MCPD	ISO 18363-2	HH mg/kg	< 0,10	0,10	
Sum free 3-MCPD, 3-MCPDester, det. as free 3-MCPD	<u>ISO 18363-2</u>	HH mg/kg	< 0,10	0,10	

The laboratory sites of the SGS group Germany according to the abbreviations mentioned above including the corresponding accreditation process numbers are listed at <http://www.institut-fresenius.de/filestore/89/laborstandortkuerzelsgs.pdf>.

SGS Germany GmbH

**Summary of used test methods:**

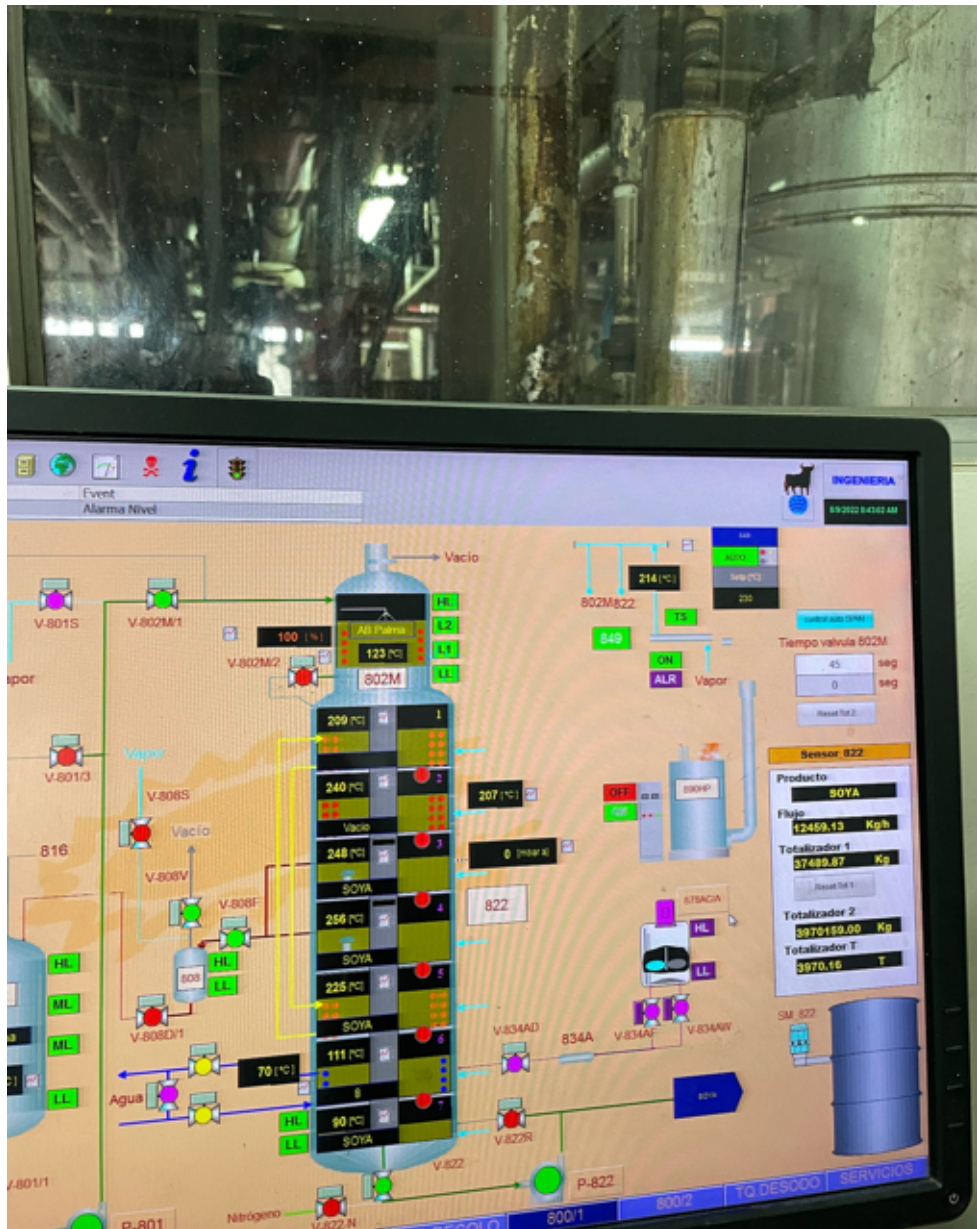
ISO 18363-2 2018-12 corresponds to SGS "3in1" and AOCS Cd 29b-13 extended measurement uncertainty (relative) with p = 95 %, k = 2 (sampling was not taken into account): 4-12 % for the sum 3-MCPD, determined on different food with 0,38-73 mg/kg 8-24 % for Glycidylester, determined on different food with 0,3-35,9 mg/kg

Page 1 of 2

**Figura 15:** Torre de desodorización de aceite de palma.



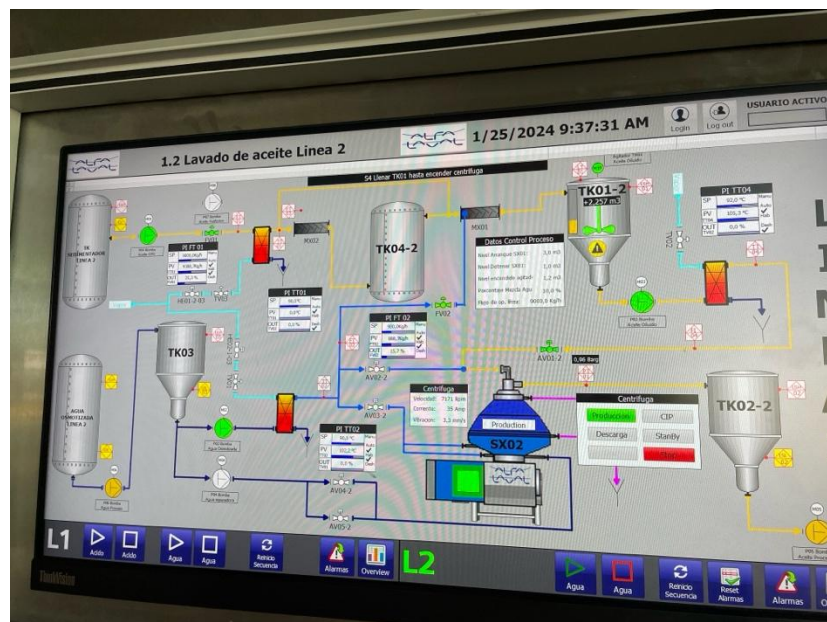
Figura 16: Centro de control de torre de desodorización de aceite de palma.



**Figura 17:** Aceite de palma cruda, luego de blanqueo y después de desodorización.



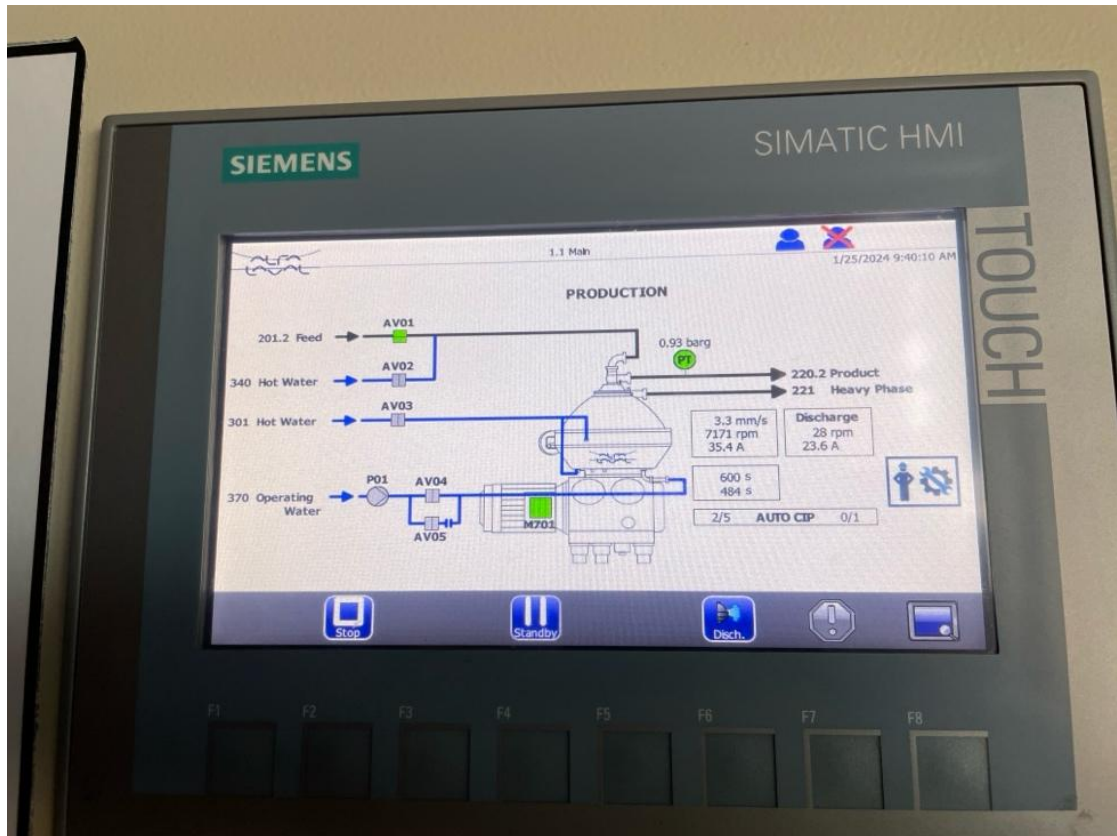
**Figura 18:** Panel de control de línea 2 de lavado de aceite crudo de palma.



**Figura 19:** Equipo de microcoulometría XPLOER TX/TS.



**Figura 20:** Panel de control de centrifugadora que permiten separación de aceite lavado y agua osmotizada con cloruros.



**Figura 21:** Plantación de palma africana.



**Figura 22:** Planta de extracción de aceite de palma.



**Figura 23:** Medidor de flujo másico de coriolis.



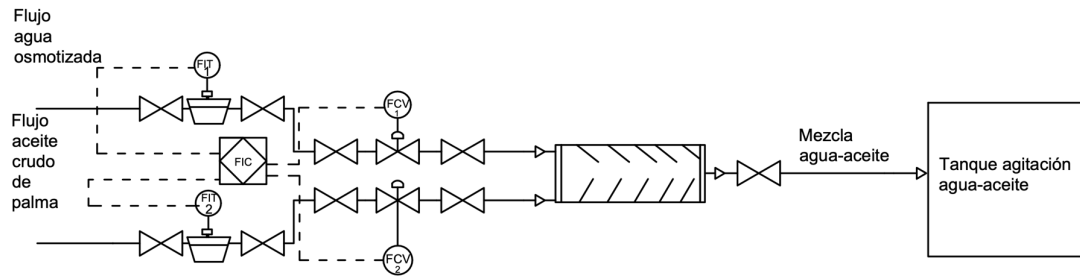
**Figura 24:** Planta de lavado de aceite crudo de palma.



**Figura 25:** Sistema de osmosis inversa.

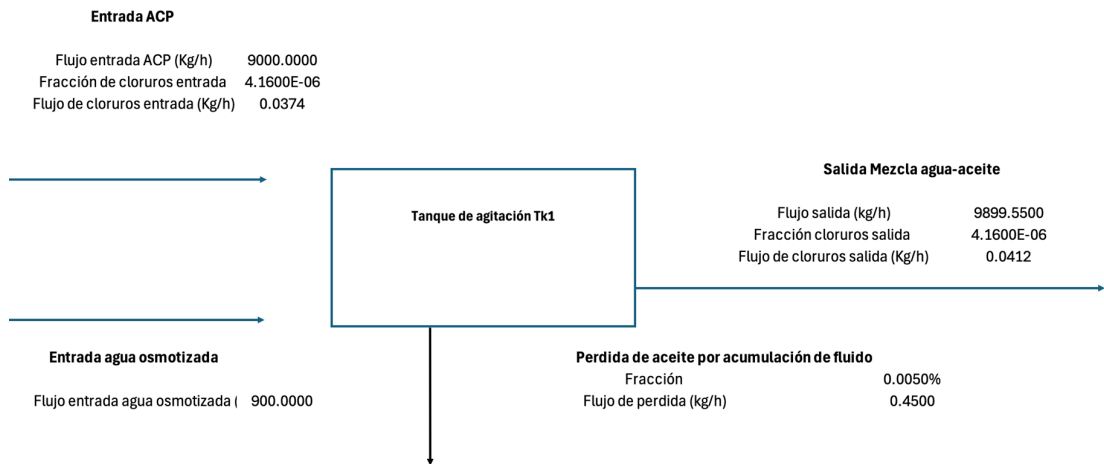


**Figura 26:** Plano P&ID de lazo de control relación agua-aceite.

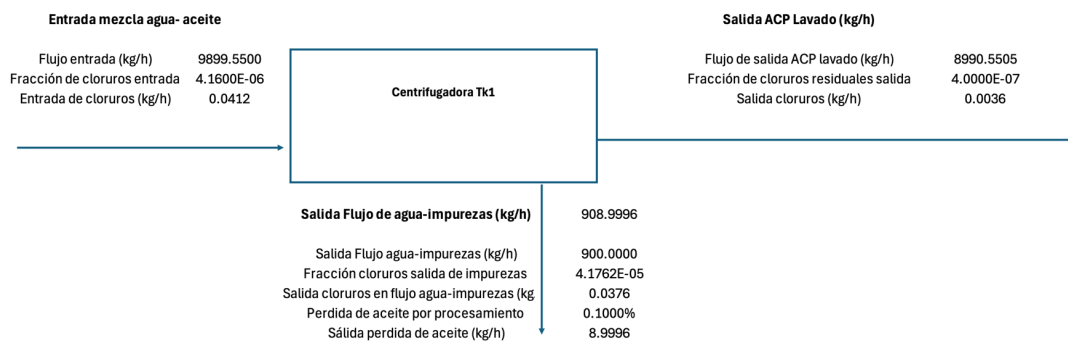


### Balances de masa

**Figura 27:** Balance de masa en tanque de agitación de aceite crudo de palma, y agua osmotizada.



**Figura 28:** Balance de masa de centrifugadora encargada de la separación del agua con impurezas y aceite crudo de palma.



### Análisis de error

**Cálculo 7:** Determinación de media de promedio de cloruros luego de terminado proceso de lavado de aceite crudo de palma y un flujo de agua osmotizada al 10%.

$$Media = \frac{(0.36 + 0.51 + 0.28 + 0.43 + 0.41)}{5} = 0.40.$$

Cálculo realizado para la determinación de media de promedio de cloruros luego de terminado proceso de lavado de aceite crudo de palma y un flujo de agua osmotizada al 10%.



## VIII. Glosario

**ACP:** Aceite crudo de palma.

**Ácido fosfórico:** Sustancia que a veces se añade durante el proceso de lavado para ayudar en la neutralización de los ácidos grasos libres y facilitar la separación de impurezas.

**Ácidos grasos libres (FFA):** Compuestos que se encuentran en el aceite crudo de palma y que deben reducirse mediante el proceso de lavado o refinación, ya que afectan la calidad y estabilidad del aceite.

**Aceite crudo de palma (CPO):** El aceite sin refinar que se extrae del fruto de la palma. Contiene impurezas, ácidos grasos libres, y una mezcla de triglicéridos, agua y otros compuestos no deseados.

**Agitador:** Dispositivo mecánico utilizado para mezclar los componentes dentro de un tanque. En el lavado de aceite de palma, se utiliza para homogenizar la mezcla de agua y aceite antes de la separación.

**Centrifugación:** Proceso mecánico utilizado para separar el aceite de las impurezas y el agua a través de la fuerza centrífuga. En el lavado de aceite de palma, se utiliza una centrifugadora para separar el agua y los sólidos suspendidos del aceite.

**Control de proceso:** Conjunto de parámetros como la temperatura, presión, velocidad de flujo y niveles de mezcla que deben monitorearse y controlarse para asegurar que el proceso de lavado y separación se lleve a cabo de manera eficiente.

**Eficiencia de separación:** Medida de qué tan efectivamente se separan el aceite y las impurezas. Una alta eficiencia es clave para obtener un aceite más puro con menos contaminantes.

**Flujo másico:** Cantidad de materia (en kg/h, por ejemplo) que fluye a través del sistema. El control de este flujo es importante para mantener un balance adecuado entre las corrientes de entrada y salida.

**Impurezas:** Partículas sólidas, fibras, tierra y otros compuestos no deseados presentes en el aceite crudo de palma. Estas impurezas se eliminan durante el proceso de lavado y centrifugación.

**Intercambiador de calor:**Equipo utilizado para transferir calor entre dos fluidos. En el lavado de aceite, se usa para calentar el aceite y el agua a temperaturas óptimas para la separación de fases.

**Lavado de aceite:** Proceso en el que se introduce agua en el aceite crudo para disolver y remover impurezas, ácidos grasos libres y otros compuestos no deseados.

**Mezcla agua-aceite:** Una emulsión de agua y aceite que se forma durante el proceso de lavado. Esta mezcla debe separarse en una centrifugadora o decantador.

**Microcoulometría:** Técnica electroquímica utilizada para medir la cantidad de una sustancia en una muestra mediante la determinación de la cantidad de electricidad (en coulombs) necesaria para provocar una reacción química completa en la muestra. Esta técnica es muy sensible y precisa, ideal para detectar pequeñas cantidades de un analito, como trazas de elementos o compuestos en concentraciones muy bajas.

**Porcentaje de mezcla:** Relación de la cantidad de agua utilizada en comparación con el aceite durante el proceso de lavado. Un control preciso de esta proporción es esencial para maximizar la eficiencia de la separación.

**Porcentaje de sólidos:** Cantidad de sólidos suspendidos en la corriente de aceite crudo, que deben ser removidos durante el proceso de lavado. Se expresa como un porcentaje del total.

**PPM (Partes por millón):**Unidad de medida utilizada para cuantificar concentraciones muy pequeñas, como la cantidad de impurezas en el aceite. En el lavado de aceite de palma, el contenido de impurezas se suele expresar en ppm.

**Purgado:**Proceso de descarga de impurezas o sedimentos acumulados en equipos como centrifugadoras o sedimentadores. Mantiene la eficiencia del sistema.

**Sedimentador:** Tanque utilizado para permitir la sedimentación de partículas más pesadas y sólidos antes de que el aceite pase a las etapas posteriores de centrifugación o separación.

**Separador:**Equipo mecánico, a veces parte de la centrifugadora, utilizado para dividir el aceite de las impurezas sólidas o líquidas.

**Separación de fases:** Proceso de dividir el aceite, el agua y las impurezas en diferentes corrientes. La separación se facilita al aplicar fuerza centrífuga o gravedad en equipos especializados.

**Tanque de mezcla:** Recipiente utilizado para mezclar el aceite con agua u otros aditivos para ayudar en la separación de impurezas. Los tanques generalmente están equipados con agitadores o agitadores estáticos.

**Velocidad de centrifugación:** Velocidad a la que gira la centrifugadora, medida en revoluciones por minuto (rpm). A mayor velocidad, mayor es la fuerza centrífuga aplicada para separar el aceite del agua y las impurezas.