

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS EN DIFERENTES
ETAPAS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA
MEDIANTE EL METODO ARGENTOMÉTRICO S.M 4500 Cl⁻ B**

LUISA MARINA ORTIZ GÓMEZ

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Química Ambiental

Director

YANETH QUINTERO LÓPEZ

Magister en Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2022

A Dios, por darme salud, sabiduría y fe para poder culminar esta nueva etapa de desarrollo profesional.

A mi madre Eliana Sofia Gómez, por ser la luz en mi vida, por su amor y apoyo incondicional.

A mi abuela Myriam Gómez y a mi hermano Juan Manuel Ortiz, por su amor, su compañía y buenos deseos.

A Dante Johan Bayona, porque con su paciencia, humildad y amor me ha enseñado a no desfallecer ante ningún obstáculo, a ver la vida desde un ángulo más positivo y a creer en mis habilidades.

Y a todos aquellos de una forma u otra han contribuido en el desarrollo de este nuevo objetivo

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Yaneth Quintero, por su ayuda durante el desarrollo del proyecto.

A los ingenieros Heli Meneses y Eliberto Moreno por la disposición y colaboración para la ejecución de este proyecto.

A Dante Johan Bayona, por su tiempo e infinita colaboración durante todo el desarrollo de este proyecto.

Al laboratorio de aguas del centro de estudios e investigaciones ambientales (CEIAM) y a todos sus miembros por su colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 13 |
| 2. OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 Objetivo General | 15 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 3. MARCO LEGAL..... | 16 |
| 4. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO | 19 |
| 4.1. Generalidades sobre la palma de aceite y su proceso de beneficio..... | 19 |
| 4.2. Proceso de extracción del aceite de palma..... | 21 |
| 4.2.1. <i>Transporte y recepción del fruto</i> | 21 |
| 4.2.2. <i>Esterilización</i> | 22 |
| 4.2.3. <i>Desfrutado</i> | 22 |
| 4.2.4. <i>Digestión</i> | 23 |
| 4.2.5. <i>Prensado</i> | 23 |
| 4.2.6. <i>Clarificación</i> | 24 |
| 4.2.7. <i>Palmistería</i> | 24 |
| 4.3. El Agua en la industria de la extracción de aceite de palma..... | 24 |
| 4.4. Cloruros en la industria del aceite de palma | 26 |
| 4.5. Método Argentométrico S.M 4500 Cl B | 30 |
| 4.5.1. <i>Limitaciones e interferencias</i> | 31 |
| 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 32 |
| 5.1. Determinación de los puntos de muestreo. | 32 |
| 5.2. Toma de muestras en la planta de beneficio. | 34 |
| 5.3. Determinación del contenido de cloruros. | 35 |
| 5.3.1. <i>Materiales y reactivos</i> | 35 |
| 5.3.2. <i>Equipamiento de laboratorio</i> | 35 |
| 5.3.3. <i>Valoración del titulante AgNO3 0,0141 N</i> | 36 |
| 5.3.4. <i>Blanco del método</i> | 36 |
| 5.3.5. <i>Pretratamiento de las muestras</i> | 36 |
| 5.3.6. <i>Medición de cloruros – Marcha analítica.</i> | 37 |

| | | |
|------|---|----|
| 6. | RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 39 |
| 6.1. | Valorización del titulante <i>AgNO3</i> | 39 |
| 6.2. | Medición de cloruros – Marcha analítica..... | 39 |
| 7. | CONCLUSIONES | 48 |
| 8. | RECOMENDACIONES..... | 50 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Palma de aceite variedad <i>Elaeis Guineensis</i> | 19 |
| Figura 2. Distribución de plantas de extracción en Colombia | 21 |
| Figura 3. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma. | 32 |
| Figura 4. Puntos de recolección de muestras: A) Corriente de salida del licor de tusas, B) Corriente de salida del preclarificador, C) Corriente de salida de los condensados, D) Deslodadora, E) Corriente de salida de la deslodadora, F) Toma de Muestra Corriente ingreso STARI, G) Corriente de ingreso al STARI. ... | 33 |
| Figura 5. Proceso de toma y preparación de las muestras de agua del proceso de extracción de aceite de palma..... | 34 |
| Figura 6. Muestras pretratadas listas para el proceso de titulación con AgNO_3 | 37 |
| Figura 7. Determinación y ajuste de pH en las muestras. | 37 |
| Figura 8. Titulación de muestras con AgNO_3 | 38 |
| Figura 9. pH muestra de la corriente de condensados tomada el segundo día. | 41 |
| Figura 10. Concentración de cloruros en las corrientes del proceso seleccionadas. | 43 |
| Figura 11. Diagrama de caudales y concentraciones de cloruro en líneas de flujo donde se tomaron las muestras. | 47 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Identificación de corrientes del proceso de la Figura 3..... | 33 |
| Tabla 2. Parámetros para la determinación de cloruros. | 40 |
| Tabla 3. Resultados obtenidos durante la aplicación del método Argentométrico en las muestras de diferentes líneas del proceso de extracción de aceite de palma | 42 |
| Tabla 4. Diferencia Porcentual Relativa RPD para la concentración de cloruros en las líneas de proceso. | 43 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Normalidad del agente Titulante | 39 |
| Ecuación 2. Determinación de la concentración de cloruros. | 40 |
| Ecuación 3. Balance de masa en recirculación | 46 |

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS EN DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA MEDIANTE EL METODO ARGENTOMÉTRICO S.M 4500 Cl- B*

AUTOR: ORTIZ GÓMEZ, Luisa Marina**.

Palabras clave: Aceite de palma, proceso de extracción, cloruros, método argentométrico

DESCRIPCIÓN

El presente trabajo muestra el proceso de determinación de la concentración de cloruros en diferentes etapas del proceso de extracción de aceite de palma africana mediante el método Argentométrico S.M 4500 Cl- B. Para ello, se realizó un muestreo en diferentes líneas de proceso, tales como la salida del licor de tusas, salida de condensados del proceso de esterilización, salida del preclarificador, salida de las deslodadoras, entrada y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI).

Los resultados para los diferentes análisis muestran una concentración promedio de cloruros entre 1724mgCl⁻/L hasta valores de 3773mgCl⁻/L en las corrientes analizadas. A partir de los datos obtenidos fue posible determinar que el aporte de cloruros al proceso está directamente relacionado con los racimos de fruto fresco puesto que el método de extracción del aceite solo involucra operaciones térmicas y mecánicas.

De igual manera, a partir de los datos obtenidos para las corrientes de entrada y salida a la planta de tratamiento de aguas residuales (STARI), etapa en la cual se realiza el proceso de tratamiento biológico del efluente, fue posible determinar que, el porcentaje de remoción de la concentración de cloruros fue de 14,2%, presentando una concentración promedio de 1736,97mgCl⁻/L al final del proceso.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización química ambiental. Directora: MSc. Yaneth Quintero López. Magíster en química.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF CHLORIDES CONCENTRATION IN DIFFERENT STAGES OF THE AFRICAN PALM OIL EXTRACTION PROCESS USING THE ARGENTOMETRIC METHOD S.M 4500 Cl- B*

AUTHOR: ORTIZ GÓMEZ, Luisa Marina** .

Keywords: Palm oil, extraction process, chlorides, argentometric method.

DESCRIPTION

The present work shows the process of determining the concentration of chlorides in various stages of the extraction process of African palm oil by means of the Argentometric method S.M 4500 Cl- B. For this, a sampling was carried out in different process lines, such as the output of the rachis liquor, the output of condensates from the sterilization process, the output of the pre-clarifier, the output of the desludgers, the input and output of the industrial wastewater treatment. plant (STARI).

The results of the different analyzes show an average concentration of chlorides between 1724mgCl-/L up to values of 3773mgCl-/L in the streams analyzed. From the data obtained, it was possible to determine that the contribution of chlorides to the process is related to the fresh fruit bunches, since the oil extraction method only involves thermal and mechanical operations.

In the same way, from the data obtained for the inlet and outlet currents to the wastewater treatment plant (STARI), a stage in which the biological treatment process of the effluent is carried out, it was possible to determine that the percentage of chloride removal concentration was 14.2%, presenting an average concentration of 1736.97mgCl-/L at the end of the process.

* Degree Work

** Science Faculty. Chemistry school. Specialization in environmental chemistry. Director: MSc. Yaneth Quintero López. Master's degree in chemistry

INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria agronómica, la palmicultura ha sido uno de los cultivos sobresalientes en materia económica, esto dado a que es un monocultivo perenne cuya producción puede durar hasta 25 años (Pazmiño, 2015). Esta industria tuvo su origen en África, pero se expandió a diversos países sobre la línea ecuatorial que por sus características climatológicas lo hacían el lugar ideal para su producción a gran escala (Pérez & Ríos, 2018).

En Colombia, tuvo sus inicios hacia el año 1932, pero su auge comercial se logró a mediados del siglo XX con cultivos en la llanura caribe, valle del Magdalena medio, piedemonte llanero y el suroccidente colombiano (Fontalvo et al., 2014).

Como toda industria, la extracción de aceite de palma no se encuentra exenta de la generación de residuos cuyas características fisicoquímicas pueden interactuar de manera negativa con el medio ambiente, provocando afectaciones en la biodiversidad.

Al incrementar la demanda de aceite de palma, aumentan de manera proporcional sus residuos, entre ellos, los residuos líquidos derivados del proceso de extracción. Estos residuos denominados efluentes, poseen alto contenido de sólidos, DQO, DBO y sales (Parthasarathy et al., 2015) (Tabassum et al., 2015). Investigaciones realizadas han encontrado que muchos de estos parámetros no han logrado ser disminuidos a valores considerables mediante el tratamiento actual y tradicional de degradación biológica, por el contrario, se han evaluado métodos avanzados donde se pueda obtener una mayor eficiencia en el tratamiento.

Los cloruros son uno de los parámetros que presenta dificultad en su eliminación, razón por la cual su relevancia a nivel de investigación y desarrollo en el sector palmero, tanto por el grado de contaminación de aguas y suelos como por su participación en la generación de uno de los dos contaminantes de alto impacto encontrados en los aceites vegetales, el éster de 3-

monocloropropanodiol o 3-MCPDE(Cañada, 2020), (Jos Gallego et al., 2018), (Pérez & Ríos, 2018).

Por ello, esta monografía tiene como enfoque la determinación de la concentración de iones cloruro presentes en el agua de las corrientes de salida de algunas unidades dentro del proceso extractivo de aceite de palma y de esta manera poder aportar y contribuir a la generación de conocimiento en esta área.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de palma de aceite tiene su origen en el occidente y centro de África. En el periodo comprendido entre los siglos XVI y XIX extendió su cultivo a las regiones tropicales del sudeste asiático y América del Sur (Tan et al., 2021).

Esta industria ha aumentado el interés comercial a lo largo de los años dado a la versatilidad del aceite de palma. Actualmente, Malasia es el mayor productor a nivel mundial (Chung et al., 2018). Colombia por su parte, es el mayor productor a nivel Latinoamérica y ocupa el cuarto lugar en esta industria a nivel global contando con 540.691 hectáreas sembradas, 68 plantas de beneficio y alrededor de 7500 productores distribuidos en las 4 zonas palmeras (Beltrán & Hinestroza, 2019).

La alta demanda de este aceite por países importadores como China e India han incrementado la producción de aceite a nivel mundial. Dicho incremento ha llevado al crecimiento de los cultivos y con estos un incremento en la generación de efluentes contaminantes en sus plantas de beneficio (Iskandar et al., 2018),(Pazmiño, 2015).

Entre estos contaminantes, uno de los destacados es la presencia de cloruros. Cenipalma, ha resaltado en sus investigaciones que la presencia de cloruros en efluentes está por encima de los límites establecidos por la normatividad colombiana. Este contaminante al no ser controlado antes del vertimiento genera daños a largo plazo en los cultivos debido a la acumulación de sales en el suelo, asimismo, produce afectaciones al medio acuático, afecta la potabilidad del agua y su posibilidad de uso a nivel agrícola e industrial (Arroyo & Ruiz, 2018).

De igual forma, su presencia en altas concentraciones en el aceite de palma puede representar una amenaza para la salud humana dada su participación en la generación del 3-MCPDE, uno de los dos contaminantes de alto impacto encontrados en los aceites vegetales con

capacidad de desarrollar cáncer en los humanos y afectar de forma severa el corazón, el hígado, musculo estriado y los riñones (Cañada, 2020), (Jos Gallego et al., 2018).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Establecer la concentración de cloruros en diferentes etapas del proceso de extracción de aceite de palma africana mediante el método argentométrico S.M 4500 Cl⁻ B

2.2 Objetivos Específicos

Revisar en literatura científica el proceso industrial de extracción de aceite de palma africana, la importancia de los cloruros en dicha industria y el método de cuantificación argentométrico S.M.4500-Cl⁻ B.

Establecer dentro del proceso extractivo de aceite de palma los puntos de interés para la toma de muestras, tomando como base las corrientes de salida en las etapas del proceso con mayor generación de fluidos acuosos.

Cuantificar mediante el método argentométrico S.M.4500-Cl⁻ B la concentración de cloruros en las diferentes corrientes de salida de agua seleccionadas del proceso de extracción de aceite de palma africana.

3. MARCO LEGAL

Decreto 1594 de 1984: establece en su capítulo IV “de los criterios de la calidad para destinación del recurso”, artículo 38, que el agua con una cantidad de cloruros de 250mg/L puede potabilizarse con tratamiento convencional, tal como establece el artículo 5 de la misma ley. Resaltando además que este no es el único parámetro en consideración, pero en nuestro caso de estudio, los cloruros son nuestra materia de interés (Ministerio de agricultura, 1984).

Ley 99 de 1993: En su Título IV “de las corporaciones autónomas”, artículo 31 “funciones”, párrafo 12, expresa que las corporaciones autónomas deben ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, comprendiendo el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos, al agua, al aire o a los suelos, así como los vertimientos o emisiones con potencial de daño del normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. Dichas funciones comprenden la expedición de licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos (Congreso de la república de Colombia, 1993).

Ley 138 de 1994: Por la cual se establece la cuota para el fomento de la Agroindustria de la Palma de Aceite y se crea el Fondo del Fomento Palmero, buscando que todas las personas que se benefician del fruto de la palma, sean jurídicas o naturales, paguen un porcentaje del valor comercial del fruto y este rubro tenga como fin el apoyo a programas de investigación donde se mejore el material genético, la implementación de tecnologías que mejoren la eficiencia de los cultivos y su beneficio, investigación en problemas agronómicos que afectan los cultivos de palma, a mejorar el uso de palma de aceite y aumentar su valor comercial, a la divulgación y promoción, entre otros (Congreso de la república de Colombia, 1994).

Ley 373 de 1997: Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Con dicha ley se busca la implementación del uso, ahorro y rehúso del recurso hídrico, señala incentivos tarifarios y sanciones, la protección de zonas de interés o de manejo especial, campañas educativas entre la sociedad, entre otros (Congreso Nacional de Colombia, 1997).

Decreto 3930 del 25 de octubre del 2010: por el cual se establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010a).

Decreto 4728 del 23 de diciembre del 2010: Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010, en su artículo 1 estipula que el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial deberá establecer las normas de vertimientos en aguas superficiales, sistemas de alcantarillado, al suelo y aguas marinas estableciendo los límites máximos y parámetros permisibles (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010b).

Resolución 2154 de 2012: Por la cual se establece el reglamento técnico de los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal o animal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten, importen y/o comercialicen en el país, destinados para el consumo humano y se dictan otras disposiciones (Ministerio de salud y protección social, 2012).

Resolución 4506 del 30 de octubre del 2013: Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano y se dictan otras disposiciones (Ministerio de salud y protección social, 2013).

Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores de los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, en el artículo

9, se establecen los parámetros para la agroindustria de extracción de aceite de palma de origen vegetal, teniendo como límite máximo para los iones de cloruros de 500 mg/L (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).

Codex alimentarius CXC 79-2019: Código de prácticas para reducir los ésteres de 3-monocloropropano-1,2-diol (3- MCPDE) y los ésteres glicídicos (GE) en los aceites refinados y en los productos de aceites refinados (FAO/OMS, 2019).

4. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO

4.1. Generalidades sobre la palma de aceite y su proceso de beneficio.

La palma de aceite de la variedad *Elaeis guineensis* (Figura 1) es una planta oleaginosa, versátil y monoica (Ahmad et al., 2019), (Chung et al., 2018). Es un cultivo perenne con un periodo de vida económica útil de 25 años aproximadamente. Tiene un rendimiento entre los 600 y 800kg de fruto anuales (Pazmiño, 2015). Requiere de ciertas condiciones específicas para ser cultivadas como climas cálidos y húmedos con temperaturas entre los 24°C y 28°C, zonas con precipitaciones entre 1800-2500mm dado a la alta cantidad de agua que requiere, y altitudes entre los 0 y 500msnm, se cultivan en suelos con características arcillosas o limosos con pH entre 6 y 6,5 (Pérez & Ríos, 2018), (Figueroa, 2012).

Figura 1. Palma de aceite variedad *Elaeis Guineensis*

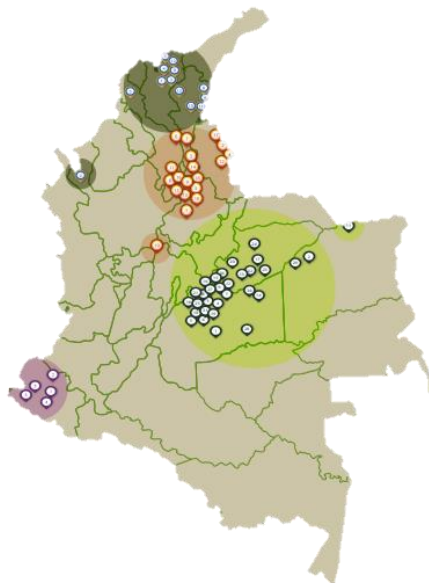


Tomado de: (Rico, 2020)

El cultivo de palma de aceite tiene su origen en el occidente y centro de África. En el periodo comprendido entre los siglos XVI y XIX extendió su cultivo a las regiones tropicales del sudeste asiático y América del Sur, siendo sus principales usos la medicina y alimento (Tan et al., 2021), (Mba et al., 2015a), (Iskandar et al., 2018).

Promovido por el aumento en la demanda de países importadores como India, China y la Unión Europea, el aceite de palma ha sido el aceite vegetal más comercializado a escala mundial a mediados de la década de los 2000 (Iskandar et al., 2018). Durante el 2015 y 2016, el consumo global de aceite de palma fue de aproximadamente 58,46 y 60,96 millones de toneladas, respectivamente, con una tendencia de crecimiento dado al incremento de la población mundial, convirtiendo a la industria palmera en un importante contribuyente en materia económica (Lee et al., 2021), (Liew et al., 2015).

Países como Indonesia, Malasia, Tailandia, Colombia y Nigeria se encuentran entre principales productores de aceite de palma (Mba et al., 2015b). Colombia por su parte, es el mayor productor a nivel Latinoamérica (Beltrán & Hinestroza, 2019), contando con 540.691 hectáreas sembradas, 68 plantas de beneficio y alrededor de 7500 productores distribuidos en las 4 zonas palmeras (Pérez & Ríos, 2018), siendo así, la palmicultura una de las actividades económicas en el ámbito agrícola más prometedoras para impulsar el desarrollo nacional con una vasta producción de aceite en millones de toneladas anuales (Lomineth, 2020).

Figura 2. *Distribución de plantas de extracción en Colombia*

Tomado de: (Fedepalma, 2021)

4.2. Proceso de extracción del aceite de palma

4.2.1. *Transporte y recepción del fruto:*

Cuando el fruto de la palma llega al estado de madurez, se inicia el proceso de cosecha donde el fruto es cortado de manera manual, recolectado y luego transportado en volquetas hasta la planta de beneficio en un lapso corto, con el fin de disminuir el aumento de acidificación y oxidación del aceite (generación de ácidos grasos libres) dado al efecto que produce la temperatura (Nieto et al., 2015). La buena calidad del aceite que se produce depende en gran medida del cuidado que se tenga desde el proceso de corte, recolección y transporte.

El proceso de extracción inicia cuando el vehículo llega desde la plantación, estos se pesan por medio de una báscula y son descargados en la tolva de recibo desde donde se hace una inspección inicial de la calidad del fruto. Después de esta revisión pasan de las tolvas de recibo hacia las vagonetas de esterilización.

4.2.2. Esterilización

Esta etapa del proceso consiste en la introducción de las vagonetas cargadas con fruto de palma en unas autoclaves donde son sometidas a la acción del agua en forma de vapor. Es uno de los pasos más importantes durante el proceso de extracción pues de este dependen las demás etapas del proceso, dado a que, en esta etapa se somete al fruto a un tratamiento fisicoquímico, que afectará el rendimiento y la calidad final del aceite sino es ejecutado de forma correcta (Ojeda, 1991).

A grandes rasgos, los principios fundamentales en el proceso de esterilización están dados a neutralizar los efectos de la acidificación y producción de ácidos grasos, el ablandamiento de los frutos adheridos al raquis logrando un desprendimiento fácil, inducir un cambio fisicoquímico en el pericardio del fruto facilitando las operaciones de digestión y prensado, reducir el quiebre de almendras y ruptura de nueces durante el prensado (Ojeda, 1991).

Para ello el tiempo de cocción, la temperatura y la presión de la autoclave determinan la eficiencia del proceso. Las condiciones de operación del equipo están comprendidas entre 125°C a 145°C de temperatura, 3 bar de presión durante un periodo aproximado de 75 minutos (Reinosa Pulido, 2009), (Narváez, 2015a).

4.2.3. Desfrutado

Luego del proceso de esterilización, los racimos son transportados hacia un tambor desfrutador rotatorio, proceso de separación mecánica que consiste en un tambor o cilindro a manera de jaula, el cual gira sobre un eje central y provoca que los racimos esterilizados contenidos en él choquen de manera repetitiva, provocando la separación del racimo en fruto suelto y raquis (Reinosa Pulido, 2009). En este proceso no se emplea agua, pero la fruta llega con humedad desde el esterilizador (Narváez, 2015).

El fruto separado, es enviado hasta los digestores mientras que el raquis se somete a un proceso de prensado para la eliminación de humedad, posteriormente este residuo será cargado en volquetas y dispuesto en las áreas de cultivo, donde se descomponen de manera natural, generando nutrientes para las plantaciones. Los racimos luego del proceso de desfrutado que contengan más de 5 frutos adheridos son reintegrados al proceso de esterilización (Pico, 2014).

4.2.4. Digestión

Posterior al proceso de desfrutado, el fruto libre de raquis y esterilizado se somete a un proceso de digestión, en el cual el fruto es calentado a una temperatura de 80°C a 90°C usando vapor de agua dentro de unos cilindros verticales provistos de agitadores, los cuales van a macerar el fruto hasta formar una masa blanda homogénea, que permitirá que las células de aceite se desprendan del fruto, así como, un aumento eficiente durante la recuperación del aceite en el momento del prensado (Pico, 2014).

4.2.5. Prensado

Esta operación unitaria, es un proceso mecánico por presión, empleado para la extracción del aceite contenido en el mesocarpio del fruto. La masa homogénea extraída del proceso de digestión es ingresada a unas prensas compuestas de canastas perforadas (camisas) y tornillos sinfín de paso regresivo, que giran paralelamente en sentido contrario, los cuales ejercen una contrapresión y permiten la separación de una fase acuosa compuesta por agua, lodo y aceite, y una fase sólida conformada por las nueces y fibras (Pico, 2014), (Narváez, 2015).

Para facilitar la extracción del aceite durante el prensado, se agrega agua caliente, de modo que permita lavar las fibras y obtener una adecuada dilución del aceite, para realizar de manera posterior una eficiente separación en la etapa de clarificación (Narváez, 2015), (Reinosa Pulido, 2009).

4.2.6. Clarificación

Con este proceso se busca alcanzar un alto rendimiento de aceite crudo con un mínimo de impurezas, esto se logra a partir de la eliminación del agua e impurezas lodosas del aceite, mediante operaciones de filtración, decantación y centrifugación (Reinosa Pulido, 2009). El aceite puro obtenido es sometido a un proceso de secado a vacío, donde se usa de forma combinada eyectores y vapor de agua con el propósito reducir la humedad del aceite hasta un 0,1% y evitar su oxidación. El aceite seco es finalmente depositado en los tanques de almacenamiento y distribución.

4.2.7. Palmistería

La fase sólida eliminada en el proceso de prensado es conducida hasta la zona de separación neumática, en la cual son separadas las nueces de las fibras mediante una columna de aire conocida como tubo neumático. Las fibras se redirigen hacia las calderas donde serán usadas como combustible y las nueces se someten a procesos de trituración, separación (almendra-cuesco), secado y prensado, obteniendo como producto final el aceite de palmiste y la torta o harina de almendra (Narváez, 2015).

4.3. El Agua en la industria de la extracción de aceite de palma

Para el proceso de extracción de aceite de palma se requiere una gran cantidad de agua que generalmente es obtenida de fuentes de agua superficial, como los ríos, o en aguas profundas extraídas mediante pozos perforados, dado que, presentan costos bajos de tratamiento y bombeo (Liew et al., 2015). Para procesar una tonelada de racimo de fruta fresca se requieren entre 1 y 1,5 toneladas de agua, y por cada tonelada obtenida de aceite crudo de palma se generan entre 2,5m³ a 3,5m³ de agua residual (Narváez, 2015b), (Ahmad et al., 2019), (Osman et al., 2020). Por tanto, un alto consumo de agua incurre en una alta generación de efluentes. Investigadores han clasificado el efluente de las plantas de beneficio de aceite de palma como un desperdicio industrial

contaminante si se libera al medio ambiente de manera directa, provocando una disminución de la biodiversidad y de la capacidad del ecosistema acuático (Osman et al., 2020), (Jagaba et al., 2020).

Los efluentes generados en el proceso de extracción de aceite de palma son denominados efluente de la fabricación de aceite de palma o POME (Palm Oil Mill Effluent), conocidas también como aguas residuales de descarga industrial (Chibuzo Igwe & Onyegbado, 2007). Es el único desecho líquido que se genera durante el proceso extractivo (Cheng et al., 2021).

El POME es generado en varios puntos durante el proceso de extracción de aceites, entre ellos, la clarificación, los condensados de la esterilización, el agua del lavado del fruto y el drenaje de los hidrociclones, calderas, tanques y decantadores (Chibuzo Igwe & Onyegbado, 2007), (Cheng et al., 2021).

La composición del POME tiene diferentes fuentes siendo la mayor parte agua (93-95%), aceite (0,5-2%), sólidos suspendidos y disueltos (3-4%) (Chibuzo Igwe & Onyegbado, 2007), (Cheng et al., 2021). Sus propiedades fisicoquímicas están condicionadas a la fuente del fruto (temporada de cosecha, madurez del fruto, edad de la palma, especie o variedad de la palma), de las diferentes etapas del proceso extractivo donde se generen los efluentes, el clima y el tipo de tratamiento dado a este tipo de agua residual (Cheng et al., 2021).

Generalmente las características de este efluente industrial son las siguientes:

- Se caracteriza por tener un color marrón o parduzco oscuro formado a partir de una mezcla coloidal (Saad et al., 2021).
- Presencia de compuestos orgánicos solubles que disminuyen la cantidad de oxígeno disuelto en las corrientes hídricas, causando mal olor y generando cierto sabor en el agua.
- Sólidos orgánicos suspendidos que también se producen por la disminución del oxígeno disuelto.

- Sólidos inertes suspendidos que causan turbiedad y pueden encontrarse en el fondo como sedimentos.
- Son aguas ricas en materia orgánica (DBO ~28835mg/L y DQO~74118mg/L) (Cheng et al., 2021).
- pH ácidos debido a la presencia de ácidos grasos orgánicos de forma compleja.
- Sustancias tóxicas y metales pesados.
- Aceite y material flotante.
- Sales disueltas particularmente fosfatos, cloruros y nitratos (Chibuzo Igwe & Onyegbado, 2007), (Saad et al., 2021), (Narváez, 2015).

Estos componentes son perjudiciales para el medio ambiente y requieren ser tratados o purificados antes de ser descargados. Este es el mayor objetivo en el tratamiento industrial de efluentes, cuyo propósito es reducir la cantidad de estos compuestos potencialmente tóxicos y llegar a los valores permisibles dentro de la legislación ambiental (Chibuzo Igwe & Onyegbado, 2007).

4.4. Cloruros en la industria del aceite de palma

El cloro es un elemento esencial para los humanos, los animales y las plantas (Baldini, 2019). La unión química entre el cloro y un elemento químico diferente del oxígeno da origen a sales de cloruro, puesto que cuando se encuentra combinado con el oxígeno da origen a óxidos ácidos de cloro (Baldini, 2019), (Buitrago, 2017).

El ion cloruro (Cl^-) forma sales en general con alta solubilidad, ejemplo de ello, se puede encontrar el cloruro de sodio formado a partir de la unión el ion cloruro (Cl^-) con el ion sodio (Na^+), especialmente en aguas muy salobres (Baldini, 2019), (Buitrago, 2017), (Rigola, 1990).

Es muy importante no confundir el cloro (Cl_2) con el ion cloruro (Cl^-). El primero es un gas venenoso, tóxico y corrosivo, empleado generalmente como blanqueador o desinfectante, no se genera en la naturaleza, solo es soluble en agua y puede ser descompuesto con facilidad por la luz. Por otra parte, el ion cloruro es altamente soluble en agua y puede ser absorbido por las plantas con facilidad (Baldini, 2019).

Las cantidades de cloruros en el agua pueden variar dependiendo del tipo de ésta. Se estima que en aguas dulces es posible encontrar entre 10ppm y 250ppm de cloruros, sin embargo, no es extraño encontrar aguas dulces con valores un poco más elevados. En aguas saladas como el agua de mar, es posible encontrar valores de 20.000ppm y se pueden extender a aguas salobres con cantidades exorbitantes que pueden acercarse a valores de millares de ppm de cloruros (Rigola, 1990), (Ayala, 2016).

El agua como solvente universal asociada con iones cloruro en altas concentraciones se transforma en un contaminante que, aunque su presencia pasa desapercibida a simple vista, sus afectaciones e impactos en el medio ambiente son ampliamente perceptibles (Jarava & Planeta, 2017). A partir de las 300ppm de cloruros, el agua empieza a adquirir un sabor salobre, esto hace que el contenido de cloruros afecte la potabilidad del agua y su uso a nivel agrícola e industrial (Rigola, 1990), (Ayala, 2016).

Altos contenidos de cloruros llevan al deterioro de aguas superficiales como ríos, caños, laguna o ciénagas, logrando transformar un recurso importante para la naturaleza en un residuo peligroso que afecta la biota acuática y provoca daños a la salud, generando la proliferación de organismos que afectan las especies endémicas y el equilibrio del ecosistema, siendo además un indicador importante de contaminación por aguas residuales domésticas cuando no hay presencia de aguas marinas (Jarava & Planeta, 2017), (Martínez, 2017).

Las aguas con altas cargas de cloruros pueden ser altamente corrosivas dando origen al detrimento de tuberías, equipos y sistemas de distribución. Este proceso de corrosión se da porque el tamaño del ion puede penetrar con facilidad la capa que protege la tubería en la interfase oxido-metal, logrando reaccionar con el hierro estructural (Rigola, 1990), (Martínez, 2017).

Ahora bien, en el cultivo de palma de aceite uno de los fertilizantes con mayor aplicación son las sales de cloruro, entre ellas el cloruro de potasio (KCl), uno de los principales fertilizantes empleados para tratar deficiencia de potasio en los suelos de las plantaciones de palma, que puede llevar a la pérdida del follaje y bajo rendimiento de la planta (Owen, 1992).

Durante los procesos de fertilización de cultivos de palma africana, es posible señalar el KCl como uno de los fertilizantes más empleados en la planta desde la etapa de vivero (con aplicaciones hasta de 15g por plántula) dado a las características ácidas de los suelos en Colombia (Buitrago, 2017), llegando a considerarse uno de los donadores importantes de iones cloruros al suelo, no descartando la posibilidad de que estos puedan venir de la salinidad de suelo, del uso de herbicidas o de los compuestos empleados cuando se hacen riegos con aguas tratadas.

Los cloruros son de fácil absorción por la planta durante la fase de crecimiento como cloruros orgánicos o como sales de cloruro (cloruro inorgánico) del suelo, las cuales pueden entrar en contacto durante la fase de cosecha con los racimos de fruta (Baldini, 2019). De igual forma, el empleo de cloro incrementa los contenidos de cloro en el tejido, incrementa la producción (mayor aceite/racimo, almendra/racimo, peso de almendra, peso de fruto y mayor número de racimos) y reduce el contenido de potasio (Owen, 1992).

Cuando los suelos son ácidos se deben usar una variedad de fertilizantes dependiendo de las deficiencias en nutrientes del suelo. El cloruro de potasio y el sulfato doble de potasio y

magnesio son empleados cuando se tienen deficiencias en potasio y magnesio, respectivamente. Cuando los suelos son alcalinos, se emplea el sulfato de potasio (Owen, 1992).

En el proceso de extracción de aceite de palma, se puede encontrar una influencia directa de los cloruros con cada una de las etapas. Según (Baldini, 2019), durante el proceso de esterilización, los racimos de fruto entran en contacto con vapor de agua, el cual puede contener cloruros que son arrastrados desde la caldera en forma de vapor húmedo, asimismo, parte del fruto puede ser triturado de manera prematura en esta etapa del proceso y da la posibilidad de encontrar aceite en mezcla con el condensado de la esterilización.

En la industria de extracción, habitualmente se emplea el condensado como mecanismo para diluir el aceite antes de su recuperación, incrementando el rendimiento de obtención de aceite. Los flujos de aceite recuperados del condensado y del prensado del licor de raquis pueden tener un alto contenido de cloruro (Baldini, 2019).

Estudios realizados por (Molina, 2019) han demostrado que se producen alrededor de 165 toneladas de cloruros anuales en aguas derivadas de las etapas de producción de aceite de palma, haciendo la necesidad de reducir este ítem con el propósito de minimizar problemas a escala ambiental.

Uno de los puntos de especial interés en el estudio de los cloruros en el proceso de obtención de aceite de palma, es por su participación en la generación del éster de 3-monocloropropanodiol o 3-MCPDE, uno de los dos contaminantes de alto impacto encontrados en los aceites vegetales y uno de los más abundantes en los alimentos como el cereal, café, pan, pescado, cárnicos, salsa de soja, cerveza, entre otros (Cañada, 2020), (Jos Gallego et al., 2018).

Estudios diversos realizados en roedores han demostrado que los principales órganos afectados por la exposición a 3-MCPDE son el corazón, el hígado, musculo estriado y los riñones,

siendo este último el más afectado dado a sus efectos nefrotóxicos, aunque aún no se ha podido demostrar en humanos. Asimismo, se ha podido descubrir que tienen otros efectos tóxicos como hepatotoxicidad, inmunotoxicidad y neurotoxicidad, afectaciones en la fertilidad masculina y posible agente cancerígeno (Grupo 2B) (Cañada, 2020) (Jos Gallego et al., 2018).

Aunque el descubrimiento del 3-MCPDE se realizó a finales de 1970 no fue sino hasta el año 2007 donde cobró una gran importancia y relevancia su estudio, dando lugar a que entre el año 2011 y 2012 se lograra un importante avance en el estudio de su formación y mitigación, logrando actualmente que las plantas de refinado de aceite de palma puedan alcanzar aceites de alta calidad con valores menores a 2ppm de este compuesto, siempre y cuando se tome en cuenta que durante el proceso de extracción se debe procurar una reducción y/o eliminación de precursores de cloro y contar con bajos contenidos de diacilglicéridos (DAG), asimismo, durante el proceso de refinación utilizar tierras de blanqueo natural y temperaturas menores a 230°C (Jiménez, 2019), (Varón Cárdenas et al., 2020).

4.5. Método Argentométrico S.M 4500 Cl⁻ B

En química analítica, esta metodología es comúnmente utilizada para la determinación de la concentración de iones cloruro en una muestra. Este método está basado en la valoración por precipitación del cloruro de plata de manera previa a la formación del cromato de plata, utilizando como indicador el cromato de potasio y como solución titulante el nitrato de plata.

La formación del cromato de plata se puede identificar a partir del cambio de color que sufre la solución a naranja-rojizo, punto en el cual ambas soluciones han reaccionado estequiométricamente de forma equivalente (Baird et al., 2017).

4.5.1. Limitaciones e interferencias

En aguas residuales, iones como el bromuro, el yoduro o el cianuro en concentraciones iguales al cloruro pueden generar interferencias al método. De igual forma los sulfatos, tiosulfatos y sulfuros interfieren, pero pueden ser eliminados por tratamiento previo con peróxido de hidrógeno, el ortofosfato en concentraciones mayores a 25mg/L, se precipita como fosfato de plata y el hierro en exceso de más de 10mg/L interfiere al cambiar el punto final de la titulación (Baird et al., 2017).

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Determinación de los puntos de muestreo.

Las muestras fueron tomadas en la empresa Agroindustrias del Cesar LTDA Y CIA S.C.A, empresa que se dedica a la operación de una planta de beneficio industrial de extracción de aceite de palma en la zona sur del departamento del Cesar, específicamente en los municipios de Aguachica y Rio de oro.

Previo al muestreo, se realizó una visita a la planta extractora para conocer el proceso de obtención de aceite vegetal a partir del fruto de la palma africana y concertar los puntos de muestreo mediante la identificación de las líneas de flujo en las diferentes fases del proceso basados en el diagrama del proceso mostrado en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma.

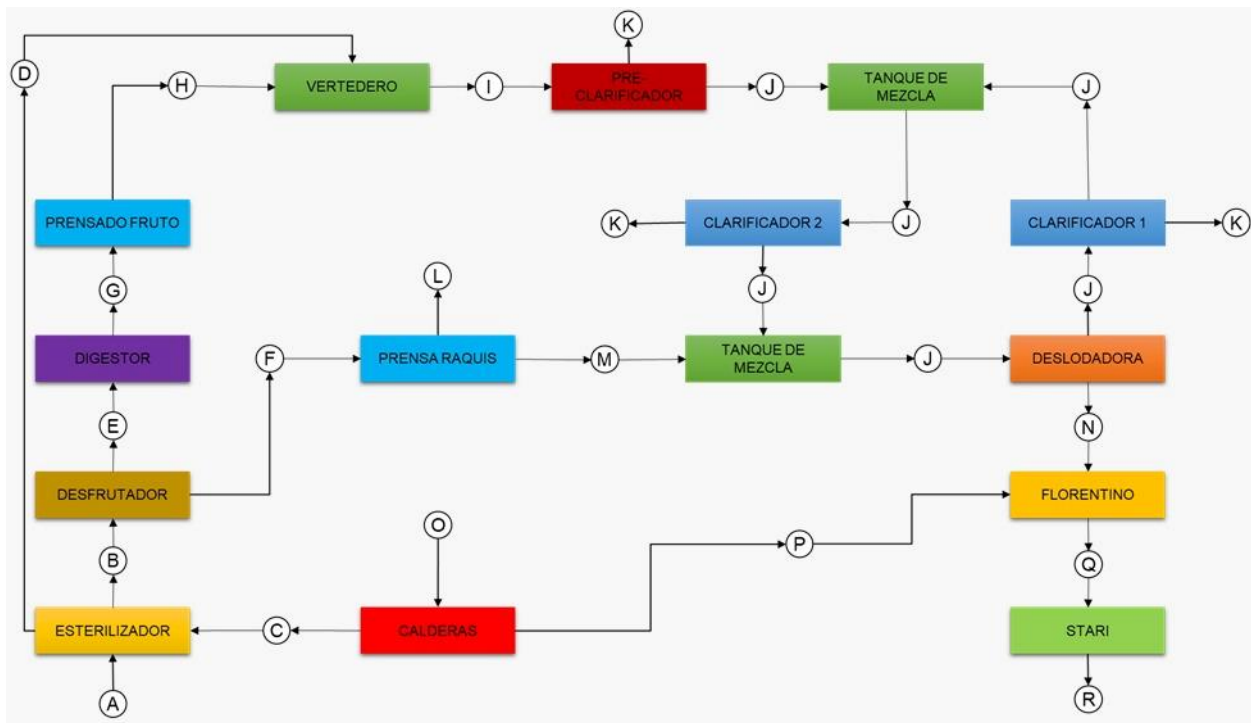
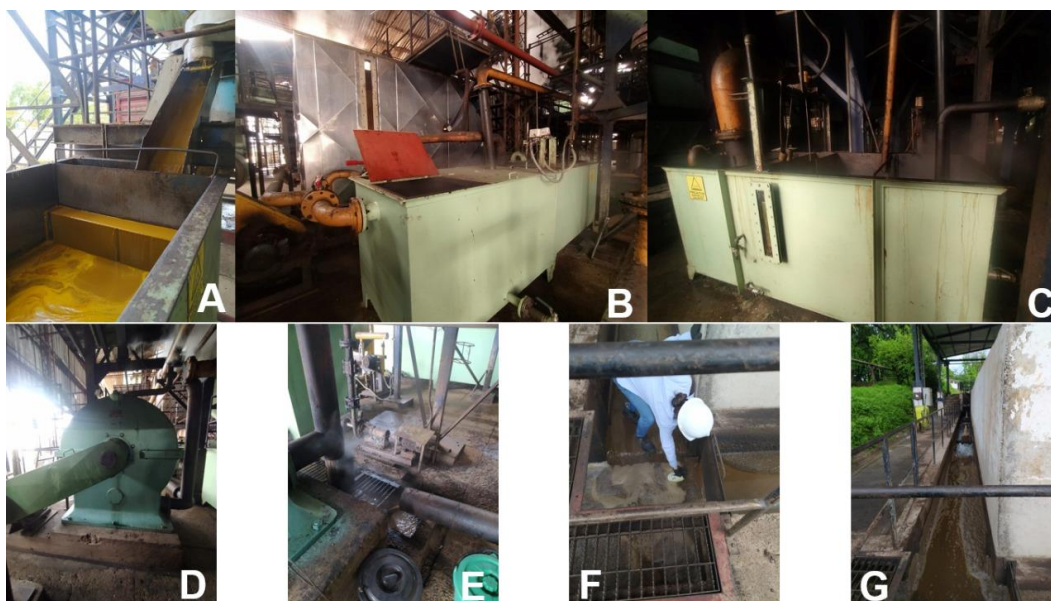


Tabla 1. Identificación de corrientes del proceso de la Figura 3.

| Distribución líneas de proceso | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| A | Racimo de fruto fresco. | J | Lodos + aceite + agua |
| B | Racimo esterilizado. | K | Aceite |
| C | Vapor de agua. | L | Raquis o tusa con bajo % de humedad |
| D | Condensados. | M | Licor de tusas |
| E | Fruto desprendido. | N | Descarga o purga |
| F | Raquis o tusa húmeda. | O | Agua de calderas |
| G | Fruto luego del proceso de digestión. | P | Purgas de calderas |
| H | Licor de prensa sin diluir | Q | Entrada STARI |
| I | Licor de prensa diluido | R | Salida STARI |

Se establecieron 6 puntos de muestreo dentro del proceso de extracción, siendo estos la salida del licor de tusas (Figura 4A), salida de condensados del proceso de esterilización (Figura 4C), salida del preclarificador (Figura 4B), salida de las deslodadoras (Figura 4E), entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI) (Figura 4F) y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI).

Figura 4. Puntos de recolección de muestras: **A)** Corriente de salida del licor de tusas, **B)** Corriente de salida del preclarificador, **C)** Corriente de salida de los condensados, **D)** Deslodadora, **E)** Corriente de salida de la deslodadora, **F)** Toma de Muestra Corriente ingreso STARI, **G)** Corriente de ingreso al STARI.



5.2. Toma de muestras en la planta de beneficio.

Se realizaron dos muestreos diarios durante 2 días de operación para las 6 corrientes previamente definidas, el primero de ellos se ejecutó a las 10:30 am y el segundo a las 4 horas posteriores, en cada uno de ellos se tomó de manera puntual un volumen de 500ml por corriente.

Seguidamente, cada una de estas muestras fue sometida a un proceso de centrifugación en un equipo ROTOFIX 32A a 4000rpm por 5 minutos, con el objetivo de lograr una separación de la fase aceitosa y la acuosa. Para la conformación de la muestra a analizar, se tomaron de la fase acuosa 100ml por muestreo para de esta manera obtener un volumen total en cada corriente de 200ml por día. Dicho proceso se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5. *Proceso de toma y preparación de las muestras de agua del proceso de extracción de aceite de palma.*



Las 12 muestras obtenidas durante el desarrollo del muestreo se almacenaron en recipientes plásticos debidamente rotulados y de esta manera fueron llevadas al laboratorio CEIAM en la ciudad de Bucaramanga según los lineamientos establecidos por el Standard Methods 23rd Edition, para la realización del respectivo análisis.

Para el análisis de este parámetro no fue necesario usar ningún tipo de preservante, en concordancia con lo que expresa el método, sólo se utilizó la refrigeración de la muestra.

5.3. Determinación del contenido de cloruros.

La determinación de la concentración de cloruros se realizó mediante el método Argentométrico 4500 Cl^- B. reportado en el Standard Methods for examination of water and wastewater edición 23 del 2017 (Baird et al., 2017).

5.3.1. Materiales y reactivos

Durante el desarrollo experimental en la cuantificación de cloruros en las diferentes muestras se emplearon reactivos como: solución indicadora de cromato de potasio, solución patrón de cloruro de sodio (NaCl), titulante de nitrato de plata ($AgNO_3$) estándar 0,0141N, solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,02N y agua destilada.

5.3.2. Equipamiento de laboratorio

Los materiales y equipos de laboratorio usados para el desarrollo del método fueron: plancha de agitación magnética marca THERMO SCIENTIFIC, bureta de 25ml con soporte, pHmetro y sonda para medir pH marca SI ANALYTICS, balones aforados de 50ml, pipeta automática (Transferpipeta) y puntas, pipetas volumétricas de 10, 20 y 50ml y vasos de precipitado de 150ml.

5.3.3. Valoración del titulante $AgNO_3$ 0,0141 N

Para el proceso de estandarización de la solución titulante de nitrato de plata, se tomaron 20ml de la solución patrón de cloruro de sodio de una concentración conocida (0,0141N) en un vaso de precipitado de 150ml, sometiéndola a agitación magnética. Seguidamente, se realizó la medición del parámetro de pH ajustándolo (entre 7 y 10 unidades de pH) empleando la solución de hidróxido de sodio y finalmente se agregó 1ml de la solución indicadora de cromato de potasio.

Se realizó la titulación con la solución de nitrato de plata, hasta que dicha disolución virara a un color naranja-rojizo, se registró el volumen gastado de titulante y se determinó la concentración de este.

5.3.4. Blanco del método

Se tomó un volumen de 50ml de agua destilada en un vaso de precipitado de 150ml, sometiéndola a agitación por medio de una plancha magnética, se agregó 1ml de la solución indicadora de cromato de potasio, se procedió a la titulación de la muestra con la solución estándar de nitrato de plata 0,0141N y se registró el volumen gastado.

5.3.5. Pretratamiento de las muestras

Las 12 muestras llevadas al laboratorio fueron atemperadas de manera previa a su análisis. Debido a la coloración de la muestra y para el desarrollo de esta técnica titulométrica, se realizaron disoluciones en balones aforados tomando alícuotas de 1ml de muestra y aforando a 50ml con agua destilada, este proceso se realizó de igual manera para los duplicados.

Figura 6. Muestras pretratadas listas para el proceso de titulación con AgNO_3



5.3.6. Medición de cloruros – Marcha analítica.

Seguido de la verificación de la concentración del agente titulante, se transvasaron las disoluciones de las muestras previamente preparadas a vasos de precipitado de 150ml, en donde fueron sometidas a agitación de tipo magnética.

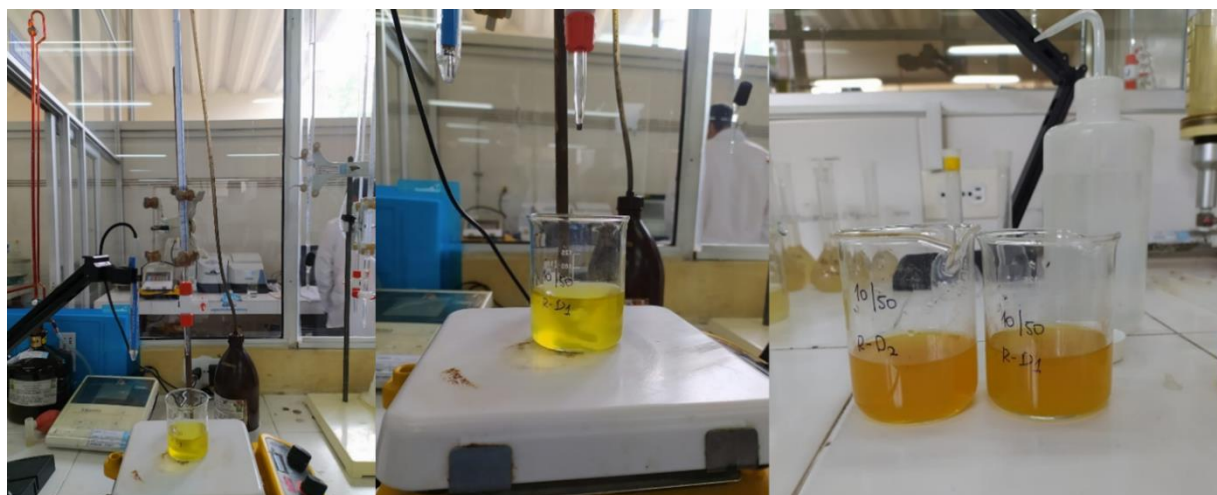
Se realizó la medición de pH (Figura 7), para estas muestras se ajustó este parámetro alrededor de 8 unidades de pH debido al carácter ácido de las muestras tomadas, añadiendo unas gotas de la solución de hidróxido de sodio. Por último, se adicionó 1ml de la solución indicadora de cromato de potasio.

Figura 7. Determinación y ajuste de pH en las muestras.



Se inició con el proceso de titulación de la muestra por medio de la solución de nitrato de plata 0,0141N contenida en la bureta, terminando dicha valoración cuando la muestra cambió o viró a un color naranja-rojizo (Figura 8). Se registró el volumen gastado del titulante para las diferentes muestras y controles del método. Finalmente, se determinó la concentración de iones cloruro de éstas utilizando las fórmulas correspondientes del método estandarizado. El resultado es expresado en mgCl^-/L .

Figura 8. *Titulación de muestras con AgNO_3 .*



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. Valorización del titulante $AgNO_3$

Para la estandarización de la concentración del agente titulante, se empleó la Ecuación 1.

Ecuación 1. Normalidad del agente Titulante

$$N = \frac{V_{NaCl} * N_{NaCl}}{Vg_{AgNO_3}}$$

Donde:

- N : Normalidad del agente titulante.
- V_{NaCl} : Volumen de solución patrón de NaCl
- N_{NaCl} : Concentración de la solución patrón de NaCl
- Vg_{AgNO_3} : Volumen gastado de solución titulante

Para 20ml de solución patrón de NaCl con una concentración de 0,0141N, se gastaron 20ml de solución titulante de $AgNO_3$, determinando de esta manera la concentración real del titulante a partir de la ya conocida.

$$N = \frac{(20 \text{ ml}) * (0,0141 \text{ N})}{(20 \text{ ml})}$$

$$N = 0,0141$$

6.2. Medición de cloruros – Marcha analítica

Para la determinación de la concentración de cloruros en las muestras recolectadas se empleó la Ecuación 2. Para cada ensayo se mantuvieron constantes los parámetros relacionados en la Tabla 2. Previamente antes de analizar las muestras, se realiza la valoración del blanco con

el propósito de conocer el volumen de titulante gastado, valor requerido para cuantificar el exceso de titulante que se emplea en las muestras para la determinación del punto final de la reacción.

Ecuación 2. *Determinación de la concentración de cloruros.*

$$\frac{mgCl^{-}}{L} = \frac{[Vg AgNO_3(muestra) - VgAgNO_3(blanco)] * N AgNO_3 * 35450}{Vmuestra}$$

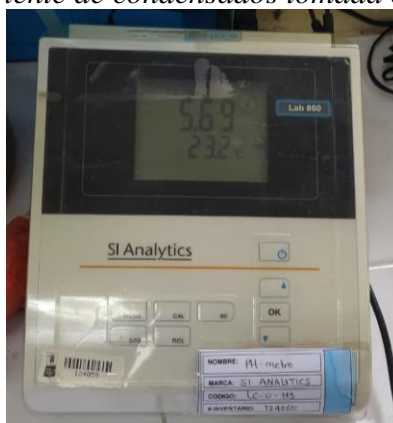
Tabla 2. *Parámetros para la determinación de cloruros.*

| Variable | Descripción | Unidades | Valor |
|--|---|----------|------------------------------|
| <i>Vg AgNO₃(muestra)</i> | Volumen gastado en la titulación de la muestra. | ml | Específico para cada muestra |
| <i>VgAgNO₃(blanco)</i> | Volumen gastado en la titulación del blanco del método. | ml | 0,3 |
| <i>N AgNO₃</i> | Normalidad de la solución titulante (nitrato de plata). | N | 0,0141 |
| <i>Vmuestra</i> | Volumen de muestra tomado para el análisis. | ml | 50 |

En la Tabla 3, se exhiben los resultados obtenidos durante el desarrollo de la técnica titulométrica tales como el pH inicial para las diferentes muestras y su valor de reajuste, igualmente se presentan los valores de volumen gastado de la solución titulante de AgNO₃, tanto para muestras como para duplicados.

Es posible apreciar, que las muestras analizadas derivadas de las corrientes del proceso presentan valores de pH ácidos (Figura 9) debido a la presencia de ácidos grasos orgánicos de forma compleja tal como expresa la literatura, con valores que no exhiben una gran variabilidad entre las corrientes del proceso, moviéndose en un rango de 5 a 6 unidades en la escala de pH hasta el punto de ingreso al STARI.

Figura 9. *pH muestra de la corriente de condensados tomada el segundo día.*



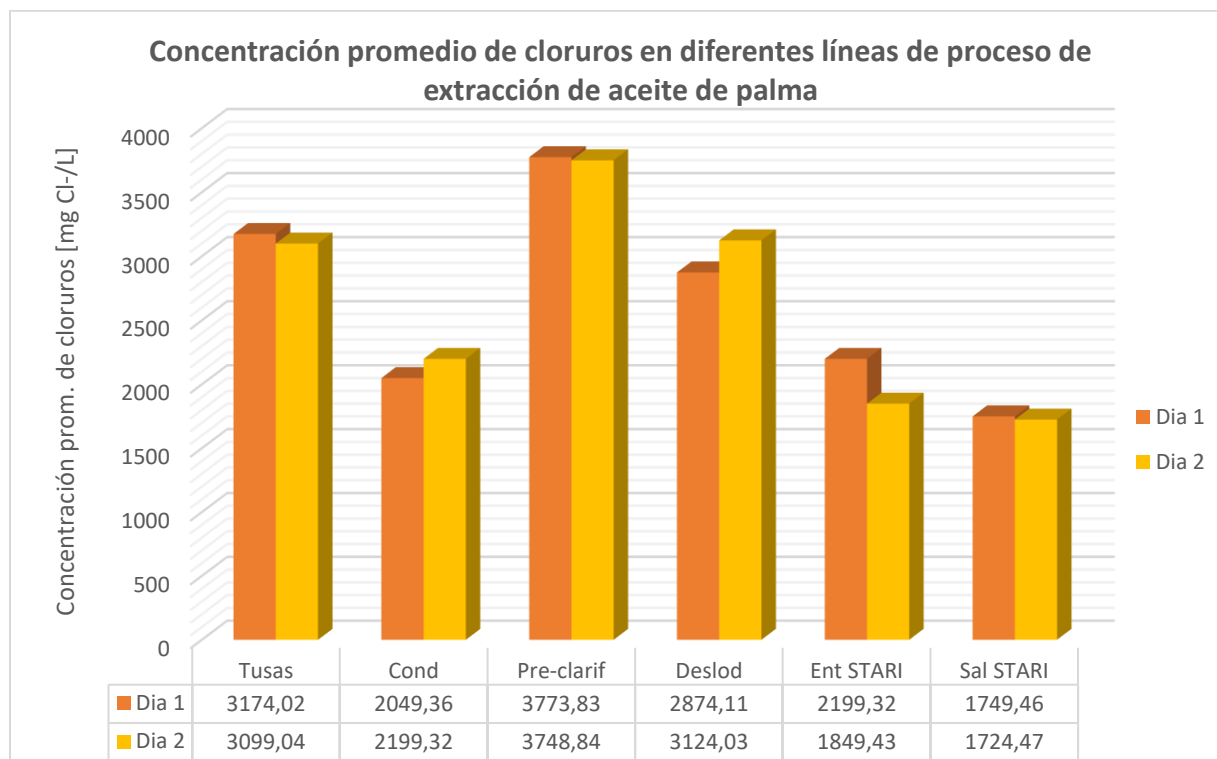
El punto de muestra de la corriente de salida del STARI cuenta con un pH básico con valores por encima de 8 unidades de pH, esto como resultado del manejo de este residuo a través de procesos de tratamiento convencional por medio biológico.

Para la determinación de la concentración de cloruros en las muestras, se empleó la Ecuación 2. El volumen gastado de la solución titulante fue tomado del valor promedio obtenido para las muestras y sus duplicados. Es importante resaltar que, es necesario tener en cuenta el factor de dilución utilizado en la preparación de las muestras para conocer el valor real de la concentración de cloruros.

Tabla 3. Resultados obtenidos durante la aplicación del método Argentométrico en las muestras de diferentes líneas del proceso de extracción de aceite de palma

| | Líneas de proceso | MUESTRA | | | DUPLICADO | | | Vg prom [ml] | [mg Cl ⁻ /L] prom | RPD (%) |
|--|-------------------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|--------------|------------------------------|---------|
| | | pH inicial | pH final | Vgm [ml] | pH inicial | pH final | Vgd [ml] | | | |
| Día 1 | Prensa de tusas | 5,62 | 8,17 | 6,6 | 5,70 | 8,08 | 6,7 | 6,65 | 3174,02 | 1,6 |
| | Condensados | 5,42 | 8,18 | 4,3 | 5,53 | 8,02 | 4,5 | 4,4 | 2049,36 | 4,9 |
| | Pre-clarificador | 5,83 | 8,08 | 7,9 | 5,72 | 8,09 | 7,8 | 7,85 | 3773,83 | 1,3 |
| | Deslodadoras | 5,47 | 8,06 | 6,1 | 5,55 | 8,05 | 6,0 | 6,05 | 2874,11 | 1,7 |
| | Entrada STARI | 5,71 | 7,94 | 4,7 | 5,40 | 8,07 | 4,7 | 4,7 | 2199,32 | 0,0 |
| | Salida STARI | 8,19 | 8,19 | 3,7 | 8,14 | 8,14 | 3,9 | 3,8 | 1749,46 | 5,7 |
| Día 2 | Prensa de tusas | 5,80 | 8,02 | 6,6 | 5,85 | 8,20 | 6,4 | 6,5 | 3099,04 | 3,2 |
| | Condensados | 5,69 | 8,00 | 4,7 | 5,60 | 8,02 | 4,7 | 4,7 | 2199,32 | 0,0 |
| | Pre-clarificador | 5,64 | 8,21 | 7,9 | 5,76 | 8,05 | 7,7 | 7,8 | 3748,84 | 2,7 |
| | Deslodadoras | 5,46 | 8,05 | 6,5 | 5,51 | 8,00 | 6,6 | 6,55 | 3124,03 | 1,6 |
| | Entrada STARI | 6,04 | 8,15 | 4,0 | 5,80 | 8,16 | 4,0 | 4,0 | 1849,43 | 0,0 |
| | Salida STARI | 8,29 | 8,29 | 3,7 | 8,30 | 8,30 | 3,8 | 3,75 | 1724,47 | 2,9 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Vgm= volumen gastado de AgNO₃ en la titulación de las muestras. • Vgd= volumen gastado de AgNO₃ en la titulación de los duplicados. • Vgprom= volumen promedio gastado de AgNO₃ en la titulación. • RPD= diferencia porcentual relativa | | | | | | | | | | |

Ahora bien, en la Figura 10 se puede apreciar los resultados de la concentración de cloruros en las líneas de proceso seleccionadas. En cada una de ellas se encontraron valores de concentración promedio entre 1724mgCl⁻/L hasta valores de 3773mgCl⁻/L.

Figura 10. Concentración de cloruros en las corrientes del proceso seleccionadas.

Durante los dos días que se realizó el muestreo de aguas del proceso, las concentraciones de cloruros en las diferentes corrientes de salida de las operaciones unitarias previas a la entrada al STARI exhibieron un comportamiento relativamente similar, presentando una Diferencia Porcentual Relativa (RPD) baja como puede apreciarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Diferencia Porcentual Relativa RPD para la concentración de cloruros en las líneas de proceso.

| | Líneas de proceso | DÍA 1 | DÍA 2 | PROMEDIO | RPD (%) |
|------------------------|-------------------|---------|---------|----------|---------|
| [mg Cl-/L] prom | Prensa de tusas | 3174,02 | 3099,04 | 3136,53 | 2,39 |
| | Condensados | 2049,36 | 2199,32 | 2124,34 | 7,06 |
| | Pre-clarificador | 3773,83 | 3748,84 | 3761,34 | 0,66 |
| | Deslodadoras | 2874,11 | 3124,03 | 2999,07 | 8,33 |
| | Entrada STARI | 2199,32 | 1849,43 | 2024,38 | 17,28 |
| | Salida STARI | 1749,46 | 1724,47 | 1736,97 | 1,44 |

La corriente de los condensados obtenida del proceso de esterilización presentó valores promedio de concentración para los dos días de 2124,34mgCl⁻/L. Este resultado puede tener una relación directa con el aporte de cloruros realizado por los Racimos de Fruta Fresca (RFF), teniendo en cuenta que para dicha operación unitaria solo se presenta interacción entre el RFF y la corriente de vapor de agua proveniente de las calderas.

El aporte de cloruros en los RFF puede estar condicionado desde la etapa de fertilización del cultivo de palma de aceite, donde se emplean sales de cloruros como el cloruro de potasio (KCl), uno de los más utilizados en esta industria desde la etapa de vivero debido a las características que presentan los suelos en Colombia.

La corriente de salida del preclarificador presentó un alto contenido de cloruros, con una concentración promedio para los dos días de 3761,34mgCl⁻/L. Dicho resultado estaría directamente relacionado con la corriente del licor de prensa sin diluir y la salida de los condensados del proceso de esterilización, únicas corrientes de entrada al proceso de preclarificación. Aunque a la corriente del licor de prensa sin diluir no se le determinó el aporte de cloruros, la alta concentración de estos en el proceso de preclarificación podría indicar que dicha corriente deberá aportar iones de cloruro al proceso, dado que la concentración en los condensados no aporta toda la cantidad encontrada a la salida de dicha operación unitaria.

La corriente de salida del licor de tusas presentó una concentración promedio de cloruros de 3136,53mgCl⁻/L para los dos días de muestreo. El producto de entrada a esta operación es el raquis obtenido del proceso de desfrutado. Debido a la unión que existe entre este medio de soporte con los frutos, su alto contenido de cloruros se podría ver directamente influenciado por los procesos de fertilización de la palma. Estudios han demostrado que después del proceso de prensado del raquis, este es una fuente importante de nutrientes para el suelo como, por ejemplo,

el potasio empleado generalmente en suelos ácidos como cloruro de potasio o muriato de potasio (Chee & Chiu, 2000)

En el caso de la línea de salida de las deslodadoras o centrifugas, dispuestas para el proceso de separación dinámica de las diferentes fases presentes en dicha corriente (agua, lodo y aceite), la concentración de cloruros promedio para los dos días fue de 2999,07mgCl⁻/L. Es congruente este alto valor dado que en dicho proceso la corriente de entrada está compuesta de las líneas de salida de la etapa de preclarificación y el licor de tusas que presenta una alta concentración de cloruros.

Por último, las corrientes involucradas en la línea de flujo de entrada al STARI son las purgas de las deslodadoras combinadas con purgas de las calderas. En ella se encontraron concentraciones promedio de 2024,38mgCl⁻/L. Es importante notar que una vez la corriente de salida de la deslodadora ingresa a los tanques florentinos, donde se unen con la purga de calderas, la concentración de cloruros a la salida del tanque disminuye en un 38,81% como resultado de un proceso de dilución al momento de la unión de fluidos.

Esta corriente es dirigida de manera directa hacia el sistema convencional de tratamiento de aguas residuales industriales, compuesta por 5 piscinas en las cuales se realiza el proceso de tratamiento biológico para la remoción de la carga contaminante, obteniéndose alrededor de 14,2% de remoción de iones cloruro por medio de este tratamiento presentando una concentración promedio de 1736,97mgCl⁻/L de cloruros al final del proceso.

En la Figura 11. se presenta parte del diagrama de proceso de extracción de aceite de palma. En él se muestran los caudales y la concentración de cloruros promedio de los dos días de muestreo. Para corroborar que los datos obtenidos son relevantes y acordes a la operación, se realizó un balance masa en la zona de recirculación empleando la Ecuación 3. Se tomaron como datos de

entrada la corriente de salida del preclarificador (J) y la corriente de salida del licor de tusas (M) y como datos de salida, la corriente de la salida de las deslodadoras o centrifugas.

Ecuación 3. Balance de masa en recirculación

$$Q_{pre}x_{pre} + Q_{lt}x_{lt} = Q_{des}x_{des}$$

Donde:

Q_{pre} : Caudal preclarificador (L/h)

x_{pre} : Concentración de cloruros preclarificador (mg/L)

Q_{lt} : Caudal licor de tusas (L/h)

x_{lt} : Concentración de cloruros licor de tusas (mg/L)

Q_{des} : Caudal deslodadora (L/h)

x_{des} : Concentración de cloruros deslodadora (mg/L)

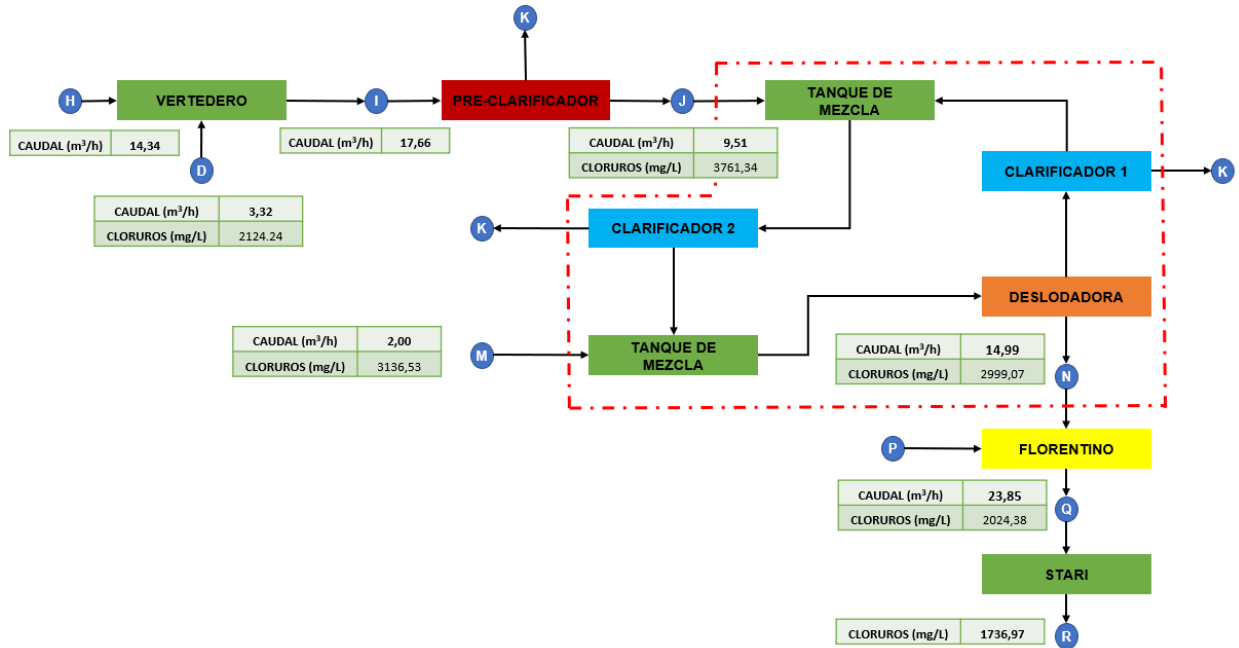
Tomando los datos presentados en el diagrama y reemplazando en la ecuación del balance global de masa se obtuvieron los resultados presentados a continuación:

$$\left(9510 \frac{L}{h}\right) * \left(3761,34 \frac{mg}{L}\right) + \left(\frac{2000L}{h}\right) * \left(3136,53 \frac{mg}{L}\right) = \left(14990 \frac{L}{h}\right) * \left(2999,07 \frac{mg}{L}\right)$$

$$42043,4 \frac{g}{h} \cong 44956,1 \frac{g}{h}$$

En los resultados presentados, se puede observar un margen de diferencia del 6% aproximadamente entre la entrada y salida del proceso de clarificación, este porcentaje es relativamente aceptable dentro del rango de operación, dado que, durante el muestreo no se tuvo en cuenta el tiempo de retención de cada corriente en las diferentes etapas del proceso.

Figura 11. Diagrama de caudales y concentraciones de cloruro en líneas de flujo donde se tomaron las muestras.



7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que:

Se evidenció que las corrientes de la salida del licor de tusas, salida de condensados del proceso de esterilización, salida del preclarificador, salida de las deslodadoras, entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI) y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI) presentaban altos valores de concentración de cloruros con valores de concentración promedio entre 1724mgCl⁻/L hasta valores de 3773mgCl⁻/L.

La alta concentración de cloruros en la corriente de salida del preclarificador es un indicador de que el licor de prensa sin diluir es una corriente que contiene y aporta iones cloruros al proceso de extracción de aceite de palma.

El proceso de extracción de aceite de palma involucra operaciones de tratamiento térmico y mecánico, a este proceso no ingresan insumos diferentes a vapor saturado de agua y racimos de fruto fresco, razones por las cuales es posible inducir que el aportante directo de iones cloruro al proceso será principalmente el fruto de cosecha.

Las concentraciones de cloruros encontradas en la salida del proceso de tratamiento biológico empleado en el STARI, permite inferir que actualmente el proceso utilizado para la remoción de carga contaminante con respecto al parámetro de cloruros no responde de la manera adecuada, pues aunque el sistema mostró una disminución del 14,2%, la concentración de cloruros de salida sobrepasa los límites permisibles reportados en el artículo 5 de la resolución 0631 del 2015 para vertimientos a cuerpos de agua superficiales, donde se expresa que el límite máximo para la agroindustria es de 500mgCl⁻/L.

Aunque no se tuvieron en cuenta los tiempos de retención en cada una de las etapas del proceso de extracción para determinar la concentración de cloruros de las corrientes de salida, al realizar un balance de masa en el proceso de clarificación, se pudo determinar que existe una

variación del 6% entre las corrientes de entrada con respecto a las de salida, dato que puede ser aceptado dentro del proceso para corroborar los datos encontrados de manera experimental.

8. RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo del proyecto, se recomienda:

La utilización de un titulador automático en aras de disminuir el porcentaje de error en la determinación del volumen gastado de solución estándar titulante durante el desarrollo del método.

Determinar la concentración de cloruros en la corriente de salida del licor de prensa sin diluir y en el vapor de agua proveniente de las calderas, con el propósito de determinar si existe o no algún aporte de cloruros al proceso de extracción de aceite de palma.

Realizar una optimización al proceso de tratamiento biológico actualmente ejecutado en el STARI con el propósito de incrementar la remoción de cloruros presentes en las corrientes de salida del sistema, evaluando la factibilidad del acoplamiento de otra tecnología de tratamiento a la ya implementada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, A., Bhat, A., Buang, A., Shah, S., & Afzal, M. (2019). Biotechnological application of microalgae for integrated palm oil mill effluent (POME) remediation: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology (Tehran)*, 16(3), 1763-1788.10.1007/s13762-018-2118-8
- Arroyo, L., & Ruiz, D. (2018). Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial
- Ayala, K. (2016). Evaluación de procesos para la remoción de iones cloruro en el agua residual de la planta de alimentos PEPSICO (Funza).
- Baird, R., Bridgewater, L., American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater (23 rd edition ed.)*
- Baldini, R. (2019). Mitigación de 3-MCPDE y GE mediante diversas tecnologías de proceso*. *Revista Palmas-Fedepalma*, 40, 69-75.
- Beltrán, J., & Hinestroza, A. (2019). Estado de la asistencia técnica en el sector palmero y su fortalecimiento para una palmicultura sostenible.
- Buitrago, J. (2017). Extracción de cloruros de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales a través de procesos mecánicos. *Revista Palmas-Fedepalma*, 38, 108-113.
- Cañada, M. (2020). Estudio de la presencia de cloropropanodiolos y glicidol en aceites vegetales y leches infantiles
- Chee, K. H., & Chiu, S. B. (2000). Fruit waste recycling by mulching with empty fruit bunches. *Revista Palmas-Fedepalma*, 21(3)
- Cheng, Y. W., Chong, C. C., Lam, M. K., Ayoub, M., Cheng, C. K., Lim, J. W., Yusup, S., Tang, Y., & Bai, J. (2021). Holistic process evaluation of non-conventional palm oil mill effluent (POME) treatment technologies: A conceptual and comparative review. *Journal of Hazardous*

Materials, 409, 124964. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2020.124964>

Chibuzo Igwe, J., & Onyegbado, C. (2007). A Review of Palm Oil Mill Effluent (Pome) Water Treatment. *Global Journal of Environmental Research*, 54-62.

Chung, C. Y., Selvarajoo, A., Sethu, V., Koyande, A. K., Arputhan, A., & Lim, Z. C. (2018). Treatment of palm oil mill effluent (POME) by coagulation flocculation process using peanut-okra and wheat germ-okra. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(9), 1951-1970. 10.1007/s10098-018-1619-y

Código de prácticas para reducir los ésteres de 3-monocloropropano-1,2-diol (3- MCPDE) y los ésteres glicidílicos (ge) en los aceites refinados y en los productos de aceites refinados, (2019).

Decreto 4728, (2010b). https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_4728_2010.pdf

Decreto 1594 de 1984, (1984). https://archivo.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf

Decreto 3930, (2010a). https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/41-dec_3930_2010.pdf

Fedepalma. (2021). Plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia

Figueroa, O. (2012). Análisis de suelos y fertilización en el cultivo de palma aceitera. ().

Fontalvo, M., Vecino, R., & Barrios, A. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospect*, 12(1), 90-98.

Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in Southeast Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 169-185. 10.1016/j.eti.2017.11.003

Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Latiff, A. A. A., Aziz, N. A. A., Umaru, I., Ghaleb, A. A. S., Abubakar, S., Lawal, I. M., & Nasara, M. A. (2020). Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 951-960. 10.1016/j.asej.2020.01.018

Jarava, R., & Planeta, I. P. (2017). Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A

Jiménez, M. Á. (2019). Análisis de la presencia de cloropropanoles en las distintas clases comerciales de aceite de oliva y medidas a adoptar

Jos Gallego, Á, Conchello Moreno, P., Martín Belloso, O., Ruiz Leal, M. J., & Catunescu, G. M. (2018). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre la prospección de peligros químicos de interés en seguridad alimentaria en España. *Revista del comité científico de la agencia española*:

https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/evaluacion_riesgos/informes_comite/PROSPECTIVOS_QUIMICOS.pdf

Lee, M. D., Mohamad, N. F. A., Hassan, N. A., & Lee, P. S. (2021). Performance of Oil Palm Frond Fiber as Filtration Material in Palm Oil Mill Effluent Treatment. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 690(1), 12039. 10.1088/1755-1315/690/1/012039

Ley 99 de 1993, (1993). https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/app/leyes/6c-ley_0099_1993.pdf

Ley 138 de 1994, (1994). <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/ley138de1994.pdf>

Ley 373 de 1997, (1997).
https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0373_1997.pdf

Liew, W. L., Kassim, M. A., Muda, K., Loh, S. K., & Affam, A. C. (2015). Conventional methods and emerging wastewater polishing technologies for palm oil mill effluent treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 149, 222-235. 10.1016/j.jenvman.2014.10.016

Lomineth, D. (2020). Dinámica espacial y difusión del cultivo de palma de aceite en el caribe colombiano

Martínez, S. (2017). Estudio de la minimización de la presencia de cloruros y sulfatos en el agua tratada de la EDAR del Valle del Vinalopó (Alicante)

Mba, O. I., Dumont, M., & Ngadi, M. (2015a). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry - A review. *Food Bioscience*, 10, 26-41. 10.1016/j.fbio.2015.01.003

Molina, N. (2019). Evaluación a escala experimental de un humedal subsuperficial de flujo horizontal como complemento al sistema de tratamiento de aguas residuales industriales en la empresa UNIPAMA s.a. (Cumaral, Meta).

Narváez, E. (2015a). Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la extracción del aceite crudo de palma

Nieto, D., Urueta, J. C., & Fontanilla, C. (2015). Consideraciones sobre el transporte de fruto de palma de aceite en la Zona Norte de Colombia. *Revista Palmas-Fedepalma*, 36, 41-53.

Ojeda, J. (1991). IX Conferencia internacional sobre palma de aceite. Esterilización. *Revista Palmas-Fedepalma.*, 12, 109-111.

Osman, N. A., Ujang, F. A., Roslan, A. M., Ibrahim, M. F., & Hassan, M. A. (2020). The effect of Palm Oil Mill Effluent Final Discharge on the Characteristics of *Pennisetum purpureum*. *Scientific Reports*, 10(1)10.1038/s41598-020-62815-0

Owen, E. (1992). Fertilización de la palma africana (*Elaeis Guineensis* Jacq.) en Colombia. Revista Palmas-Fedepalma, 13, 39-64.

Parthasarathy, S., Gomes, R. L., & Manickam, S. S. (2015). Process intensification of anaerobically digested palm oil mill effluent (AAD-POME) treatment using combined chitosan coagulation, hydrogen peroxide (H₂O₂) and Fenton's oxidation. Springer Science and Business Media LLC. 10.1007/s10098-015-1009-7

Pazmiño, A. (2015). Estudio de la generación de gas metano (CH₄) y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias de la planta de tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma

Pérez, A., & Ríos, M. C. (2018). Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la planta extractora de aceite de palma de la empresa CI SIGRA S.A

Pico, C. (2014). Métodos de filtración para la eliminación del color de los efluentes industriales del proceso de extracción de aceite

Reinosa Pulido, D. C. (2009). Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de palma: Estudio de un caso. Revista Venezolana De Gerencia, 14(46), 228-247.

Resolución 0631, (2015).
https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res_631_marz_2015.pdf

Resolución 2154, (2012).
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-2154-de-2012.pdf>

Resolución 4506, (2013).
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4506-de-2013.pdf>

Rico, D. (2020). Palma africana de aceite.

Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. marcombo boixareu editores.

Saad, M. S., Wirzal, M. D. H., & Putra, Z. A. (2021). Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. *Journal of Environmental Management*, 286, 112209. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.jenvman.2021.112209>

Tabassum, S., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2015). An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge – A pilot study. *Journal of Cleaner Production*, 95, 148-155. 10.1016/j.jclepro.2015.02.056

Tan, K. A., Wan Maznah, W. O., Morad, N., Lalung, J., Ismail, N., Talebi, A., & Oyekanmi, A. A. (2021). Advances in POME treatment methods: potentials of phycoremediation, with a focus on South East Asia. *International Journal of Environmental Science and Technology (Tehran)*, 10.1007/s13762-021-03436-6

Varón Cárdenas, D. A., Nuñez, J. A. G., Caballero Blanco, K., & Diaz, A. G. (2020). Compuestos contaminantes en aceites vegetales (2-y 3-MCPD y EG): formación, importancia y recomendaciones de mitigación. doi:10.13140/rg.2.2.15268.09609 Retrieved from <https://search.datacite.org/works/10.13140/rg.2.2.15268.09609>