

**EVALUACIÓN DE LA REACTIVACIÓN DE TIERRAS DE BLANQUEO COMO
MEJORA EN EL PROCESO DE BLANQUEO DE ACEITE CRUDO DE PALMA
(ACP) EN LA COMPAÑÍA C.I. SIGRA S.A.**

ANDRES FERNANDO BETANCOURT TRIANA

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA.
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS INDUSTRIALES.
BOGOTÁ, COLOMBIA.
2020.**

**EVALUACIÓN DE LA REACTIVACIÓN DE TIERRAS DE BLANQUEO COMO
MEJORA EN EL PROCESO DE BLANQUEO DE ACEITE CRUDO DE PALMA
(ACP) EN LA COMPAÑÍA C.I. SIGRA S.A.**

ANDRES FERNANDO BETANCOURT TRIANA

**Proyecto de trabajo de grado para optar por el título de Magíster en
Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales.
Modalidad de Profundización.**

**Directora de trabajo de grado:
Ligia Inés Rodríguez Piedrahita. Ph.D.**

**Asesora dentro de la compañía:
Ing. Luz Ángela Díaz Guevara.
Jefe de Gestión de Calidad**

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA.
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS INDUSTRIALES.
BOGOTÁ, COLOMBIA.
2020.**



FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS O TRABAJO DE GRADO DE FORMA CONFIDENCIAL

Bogotá, D.C., Fecha: 10 de Febrero de 2020

Señores
Sistema de Bibliotecas

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Ciudad

Estimados Señores:

Yo, el abajo firmante, en calidad de autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado: Evaluación de la reactivación de tierras de blanqueo como mejora en el proceso de blanqueo de aceite crudo de palma (ACP) en la compañía C.I. SIGRA S.A. presentado y aprobado en el año 2020, como requisito para optar al título de: Magíster en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales; autorizo al **Sistema de Bibliotecas Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano** para que con fines académicos lo(la) preserve, conserve, organice, edite, modifique tecnológicamente y mantenga de forma **confidencial de forma vitalicia por el siguiente motivo:** *El día 21 de noviembre de 2019 cedí mis derechos patrimoniales sobre el trabajo de grado acá descrito a favor de la compañía C.I. Sigra S.A. Por ende la compañía esta en pleno derecho de disponer de esta obra legítima y de la autorización a publicar total o parcialmente los resultados del trabajo.*

Autorizó a la universidad para guardar el trabajo para fines históricos, estadísticos, administrativos y entre otros por seguridad en caso que más adelante otra persona o institución sea autorizada por la compañía para continuar trabajando con este mismo documento.

El (los) autor(es) certifica(n) que la tesis y/o trabajo de grado no infringe ni atenta contra derechos industriales, patrimoniales, intelectuales, morales o cualquier otro de terceros, así mismo declaran que la Universidad Jorge Tadeo Lozano se encuentra libre de toda responsabilidad civil, administrativa y/o penal que pueda derivarse de la publicación del trabajo de grado y/o tesis en calidad de **confidencial** o en acceso abierto por cualquier medio.

En cumplimiento con lo dispuesto en la Ley 1581 de 2012 y especialmente en virtud de lo dispuesto en el Artículo 10 del Decreto 1377 de 2013, autorizamos a la Universidad Jorge Tadeo Lozano a proceder con el tratamiento de los datos personales para fines académicos, históricos, estadísticos y administrativos de la Institución. De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, aclaramos que **"Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores"**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Cordialmente,

Andrés Fernando Betancourt Triana.

Nombre Completo

Firma

C.C. 1013636270 De: Bogotá

Correo electrónico: andrea.f.betancourt@utadeo.edu.co
afbetancourt@gmail.com.

Vo.Bo de publicación por parte del director, asesor o tutor del trabajo de grado o tesis.

Nombre:

Firma:

Documento de identidad: 39537510

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.

Este proyecto no se hubiese podido realizar sin el apoyo del área técnica de C.I. SIGRA S.A., en especial del Director Técnico de la compañía Jorge Montenegro y de todas las personas que trabajan y trabajaron en el proceso de Gestión de Calidad en el lapso que tomó el desarrollo del mismo. Agradezco y destaco especialmente a la Jefe de Gestión de Calidad Ingeniera Luz Ángela Díaz por transmitir conocimiento de manera franca y desinteresada. También al Analista de Calidad Senior Ricardo Pardo, al Ingeniero de Compras técnicas Marlon Oliveros, a los Analistas de Calidad y en general a quienes aportaron en materia de conocimiento, con datos, ideas o apoyo moral.

En materia académica agradecer a la directora de tesis la doctora Ligia Rodríguez. Sus aportes fueron importantes para dirigir a buen puerto el proyecto, cumplir los objetivos el trabajo y aportar al conocimiento. A los compañeros de maestría quienes aportaron ideas y apoyaron durante el estudio de asignaturas.

De manera personal agradecer a mis padres, Lucila Triana, Enrique Betancourt y a mi pareja la Ing. Diana Paola Rodríguez por su apoyo en materia de ideas, moral, espiritual y emocional. Sin ellos no se hubiese podido terminar de la mejor manera este proyecto.

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	7
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. OBJETIVOS.	12
3.1. OBJETIVO GENERAL.	12
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
4. METODOLOGÍA.....	12
4.1. GRUPO 1.	12
4.1.1. Validación del montaje experimental.	12
4.1.1.1. Materiales.	12
4.1.1.2. Métodos.....	13
4.1.2. Caracterización del aceite crudo de palma.	14
4.1.3. Ensayos de blanqueo con tierra virgen.....	14
4.2. GRUPO 2.	15
4.2.1. Elección de solvente.....	15
4.3. GRUPO 3.	15
4.3.1. Elección de condiciones de calcinación.....	15
4.3.2 Elección del número de reactivaciones.	18
5. RESULTADOS, DISCUSIÓN E IMPACTO.	19
6. CONCLUSIONES Y NUEVAS PERSPECTIVAS.	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Calificación de importancia de parámetros de control y justificación.....	17
Tabla 2. Comparación entre resultados de la caracterización y rangos dados por la NTC 431.	19
Tabla 3. Parámetros de control para ACP, Aceite blanqueado con tierra virgen a escala laboratorio y remoción esperada.....	20
Tabla 4. Resultados de proceso de reactivación y parámetros de control para Aceite de Palma Blanqueado usando tierras reactivadas con n-Hexano y Acetona como solventes de extracción seguidas de calcinación a 600°C por 120 minutos.	21
Tabla 5. Resultados promedio de porcentaje de reactivación para cada parámetro en cada uno de los puntos de la matriz experimental.	22
Tabla 6. Comparación de resultados de blanqueo cuando se utilizó tierra virgen y tierra reactivada en proporción 100:1.25.....	29
Tabla 7. Resumen de inventario de impactos más importantes del proceso actual y propuesto.....	32

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Superficie de respuesta obtenida a partir de los resultados de la matriz de mínimos.	23
Figura 2. Superficie de respuesta de la ecuación de deseabilidad y contornos de superficie de respuesta.	24
Figura 3. Porcentaje de reactivación para cada parámetro en función del número de reactivaciones. La reactivación 0 se refiere a ensayos hechos con tierra virgen.....	26
Figura 4. Diagrama de LCA para el proceso actual.....	30
Figura 5. Diagrama de LCA para el proceso propuesto.....	31
Figura 6. Cuantificación de impactos ambientales evaluados según EcoIndicador 99. Escenarios simulados en SIMAPRO ®.	33
Figura 7. Distribución de los costos directos de producción para el proceso actual y para el proceso propuesto.	34
Figura 8. Tiempo de retorno de la inversión y su relación con la tasa interna de retorno (TRM).	35

LISTA DE ANEXOS.

ANEXO A. DIAGRAMA DE PROCESO Y FLUJO MÁSSICO DEL PROCESO ACTUAL DE BLANQUEO.	41
ANEXO B. DIAGRAMA DE PROCESO Y FLUJO MÁSSICO DEL PROCESO DE BLANQUEO.	42

1. RESUMEN.

Se estudió a escala laboratorio el desempeño en el blanqueo de aceite crudo de palma (ACP) de tierras de blanqueo reactivadas a través de un proceso de extracción de material graso con solvente seguido de un proceso de calcinación, y a partir de este estudio se propuso y se evaluó desde el ámbito económico y ambiental una mejora al proceso de blanqueo actual de ACP en la compañía C.I. SIGRA.S.A. La investigación incluyó la selección de solvente entre hexano y acetona, la determinación de las condiciones óptimas de calcinación (tiempo y temperatura) y número de reactivaciones. En todos los ensayos se evaluaron seis características de calidad del aceite blanqueado y se compararon con respecto a las características del aceite blanqueado con tierra virgen. En la evaluación de solventes se llegó a la conclusión que el más apropiado desde el punto de vista técnico fue el hexano, además de que en su uso se extrajo mayor material orgánico (25.6%) en comparación a cuando se utilizó acetona (13.1%). Las condiciones óptimas de calcinación se hallaron mediante superficies de respuesta obtenidas de dos maneras; la primera una matriz de mínimos de reactivación y la segunda una ecuación de deseabilidad por medio del software STATGRAPHICS ®. Con ambos métodos se obtuvo que las condiciones óptimas de calcinación son 500°C y 120 minutos. En la evaluación del número de reactivaciones, se encontró que más de una reactivación disminuye ostensiblemente la capacidad de remoción de contaminantes de la tierra. Con estos resultados, y a través de simulación usando el software SIMAPRO ®, se concluyó que el proceso propuesto de blanqueo incluyendo etapas de reactivación de la tierra presenta mejoras desde el punto de vista ambiental reduciendo el impacto global en un 38% y los costos de producción del aceite de palma blanqueado en un 6.3% con respecto al proceso actual de blanqueo de la compañía.

2. INTRODUCCIÓN.

La compañía C.I. Sigras S.A. ubicada en la ciudad de Bogotá tiene como propósito empresarial la transformación de productos grasos para consumo humano enfocado principalmente a los negocios de panadería, pastelería y consumo masivo. Sus instalaciones cuentan con áreas de almacenamiento de crudos y refinería donde la principal materia prima es el aceite crudo de palma (ACP). El proceso de refinación de ACP en la compañía, la etapa de blanqueo puede procesar hasta 130 Toneladas de aceite al día. Los objetivos de crecimiento establecidos para los próximos cinco años están ligados a un mayor consumo de ACP. Se calcula que para el año 2019 se procesaron alrededor de 38780 toneladas de ACP y para el año 2020 ascenderá a 44000 toneladas.

El ACP es extraído del mesocarpio de los frutos de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) el cual está compuesto principalmente por triacilglicérols (TAG),

además de sustancias benéficas para el consumo humano como la vitamina E, carotenoides y fitoesteroles que cumplen funciones antioxidantes. Dentro de los compuestos no deseables se encuentran los ácidos grasos libres (FFA), sales metálicas, fosfolípidos y productos de oxidación lipídica (Mba, Dumont y Ngadi, 2015). Según datos del European Palm Oil Alliance (2016) “el consumo mundial de aceite de palma se elevó de 14,6 millones de toneladas en 1995 hasta 61.1 millones de toneladas en 2015, convirtiéndolo en el aceite más consumido en el mundo”.

La refinación física es el proceso más usado para convertir el ACP en un producto apto para el consumo humano. Dicho proceso consta de tres pasos, refinado o desgomado, blanqueo y desodorización. La etapa de blanqueo es la encargada de reducir las sustancias que generan colores en el aceite, que en el caso del ACP son principalmente los carotenos, sustancias catalizadoras de reacciones de oxidación como sales metálicas, hidroperóxidos, aldehídos y cetonas, fosfolípidos hidratados y parte de ácidos grasos libres, todo esto a través del uso de arcillas minerales conocidas como tierras de blanqueo, tierras adsorbentes o arcillas de blanqueo (Corvetto, 2015). Dentro de la refinación el proceso de blanqueo es primordial ya que confiere al producto final características de apariencia, sabor, aroma y estabilidad (Hussin, Aroua y Daud, 2011). Es importante mencionar que en la general la calidad de un aceite refinado, blanqueado y desodorizado (aceite RBD) se mide en términos de contenido de fósforo, trazas metálicas, color de la grasa, acidez y estabilidad del producto medida a través del índice de peróxidos y el índice de anisidina (Corvetto, 2015).

Dentro del proceso de refinación de ACP en la refinería de la compañía, la etapa de blanqueo utiliza como insumo tierra mineral constituido principalmente por montmorillonita, atapulgita y cuarzo con porcentajes del 36, 26 y 10% respectivamente (Haro, De la Torre, Aragón y Guevara, 2014), la cual no se ha sometido a ningún tipo de tratamiento químico. La dosificación estandarizada en la refinería de la planta es de 1 kg de tierra por cada 100 kg de aceite blanqueo. Dado que es el único insumo utilizado en el blanqueo de ACP, los costos de producción están fuertemente ligados al precio de compra. Con respecto a los gastos operacionales, en el año 2018 la compra de tierra en el refinado de ACP ascendió a USD 149.000, y para el año 2019 este ítem llegó a USD 165.000. Además de los precios de compra, se deben tener en cuenta los costos de disposición que suman aproximadamente un 15% adicional.

El uso de tierras de blanqueo en la refinación de ACP presenta problemas como la retención de aceite y problemas medioambientales en su disposición al ser un producto con alta carga orgánica (Hussin et al. 2011). Otra fuente de problemas en la etapa de blanqueo son los parámetros de la operación no ajustados, ya que por ejemplo, una sobredosificación de mineral pueden aumentar las mermas de aceite por adsorción, elecciones erróneas en el tipo de tierra (activada o no activada) pueden generar mermas grandes en el proceso posterior de desodorización al aumentar la cantidad de ácidos grasos libres del producto o pueden generar

procesos deficientes de degradación de peróxidos, contenidos elevados de compuestos fosfatados, sales metálicas y presencia de compuestos coloreados indeseables (Brooks, Berbesi y Hodgson, 2015).

Los mecanismos por los que las tierras de blanqueo son tan eficientes en la remoción de compuestos indeseables son mencionadas por Brooks et. al (2015) los cuales se resumen a continuación:

Adsorción: En este fenómeno el sorbente se une al contaminante principalmente por la atracción que la superficie de la tierra ejerce sobre los contaminantes polares o cargados como sales disueltas. Es el mecanismo principal de remoción por el cual se calcula que se eliminan un 70% del total de contaminantes removidos en el blanqueo.

Absorción: Los poros intragranulares son llenados por el aceite líquido el cual arrastra consigo contaminantes. Por falta de presión el aceite no puede salir de los poros y queda retenido en el gránulo de mineral. Se calcula que la tierra puede absorber entre un 30 y un 50% de su peso en aceite, lo que tiene un peso importante en el cálculo de las mermas en la etapa de blanqueo.

Catálisis: Los contaminantes son degradados por la interacción con la superficie de la tierra, sirviendo el gránulo como catalizador, este mecanismo es el responsable de la descomposición de peróxidos en compuestos secundarios de oxidación. Si se dosifican cantidades insuficientes de tierra la descomposición puede ser incompleta y los compuestos de oxidación secundaria permanecen el aceite y se reflejan en un aumento del índice de anisidina.

Silva et al. (2014) evaluaron a nivel de laboratorio el desempeño de dos tipos de tierra de blanqueo en la refinación de ACP, una de origen natural neutra como la usada en la compañía y otra con bajo nivel de activación ácida. Dicha evaluación se hizo a través de las características fisicoquímicas del aceite de palma. La evaluación se realizó después comparar las características fisicoquímicas de los aceites RBD obtenidos (porcentaje de ácidos grasos libres, contenido de carotenos, índice de peróxidos, índice de anisidina y contenidos de fósforo y hierro) con las del aceite crudo usado como materia prima, arrojando mejores resultados las características del aceite final cuando se utilizó tierra neutra.

En los últimos 15 años se han evaluado el uso de coadyuvantes como mejora al proceso de blanqueo entre los cuales el más usado es el hidrogel de sílice (Sílica Gel) debido a que adsorbe en mayor medida fosfolípidos, trazas metálicas y contaminantes polares (Nock, 2010). Entre las desventajas de la implementación de Sílica Gel como coadyuvante se encuentra su precio, que en promedio es un 15% más alto que el de las tierras adsorbentes, además de que sus ventajas no se ven reflejadas en aceites con altos niveles de color como lo es el ACP (Nock, 2010).

El trabajo hecho por Ooi, Choo, Yap y Ma (1996) tuvo como objetivo mantener la mayor cantidad posible de los antioxidantes naturales contenidos en el aceite de palma crudo sin que se perdieran las condiciones de calidad e inocuidad del producto final. Con este fin, se sumó a la refinación una etapa de destilación molecular la cual planteó ventajas en términos de disminución de mermas y disminución del uso de tierras de blanqueo, sin embargo, es un proceso que requiere una alta inversión en equipos.

La reactivación de tierras de blanqueo usadas para ser reutilizadas en el proceso de blanqueo se plantea como una posibilidad de mejora desde la década de los 80. Kheoh (1987) describe en una patente el proceso para la recuperación de tierras minerales usadas en el proceso de blanqueo de aceites de algodón y arroz mediante la extracción del material orgánico con solventes. Según la metodología propuesta la tierra usada es lavada con solvente orgánico, preferiblemente Metiletilcetona (MEK), seguida de una filtración para separar la tierra del solvente y un secado a 60°C para eliminar el solvente adsorbido en la tierra. Se llega a porcentajes de reactivación del 80% para tierras utilizadas en la refinación de aceite de algodón.

El siguiente paso en la reactivación de tierras fue la evaluación del uso conjunto de operaciones de extracción con solvente y calcinación con el fin de eliminar la totalidad de la carga orgánica adsorbida por la tierra usada. Al-Zahrani y Daous (2000) estudiaron la reactivación de tierras de blanqueo ácidas procedentes del blanqueo de aceite de maíz mediante un proceso de extracción con solvente y posterior calcinación de las tierras variando tanto el solvente como las temperaturas y tiempos de calcinación. Según la metodología planteada, primero se dio la extracción con solventes de la carga orgánica adsorbida por la tierra mediante lavados de 5 minutos con agitación constante, variando entre MEK, acetona, hexano y éter de petróleo, para después calentar las tierras en una mufla variando las temperaturas y los tiempos de calcinación. Las tierras calcinadas fueron sometidas a un test de blanqueo y comparadas con el comportamiento registrado cuando se utilizó tierra fresca. Este test consistió en simular las operaciones de blanqueo a escala de laboratorio y la variable de comparación entre el uso de tierra reactivada y el uso de tierra de blanqueo fresca fue el color del aceite post-blanqueo.

Como resultados de la investigación de Al-Zahrani y Daous (2000) está la relación entre el solvente y la carga orgánica extraída, por ejemplo, el MEK es capaz de retirar el 70% del material orgánico mientras que en el caso del hexano es el 27%. También se demuestra que la temperatura y el tiempo de calcinación son importantes ya que altas temperaturas y/o altos tiempos pueden dañar la configuración cristalina de la tierra, y bajos tiempos y/o bajas temperaturas pueden hacer que los componentes orgánicos que están adsorbidos no se calcinen del todo. La implementación a escala laboratorio de la extracción con solvente y calcinación arrojó resultados de hasta el 94% como porcentaje de reactivación en comparación con la tierra de blanqueo virgen. La temperatura y el tiempo de calcinación con mejores resultados fueron 600°C y 45 minutos respectivamente.

Foletto, Alves, Sganzerla y Porto (2002) evaluaron con la misma metodología seguida por Al-Zahrani y Daous (2000) la reactivación de tierras de blanqueo ácidas procedentes del proceso de refinación de aceite de soya. En este caso se encontraron porcentajes de reactivación de la tierra usada de hasta el 85% en comparación con la tierra fresca. La extracción con solventes presenta resultados similares, teniendo mejor desempeño el MEK con el 67% de material orgánico extraído, y peor desempeño el hexano con el 32%. Además, se encontró como temperatura óptima de calcinación 600°C y tiempo óptimo 40 minutos.

Haro et al. (2014) probaron la reactivación de arcillas de blanqueo procedentes de la industria de aceite de palma ecuatoriana mediante un proceso de extracción y calcinación tomando como parámetro de control la absorbancia del aceite de palma blanqueado a 233 nm como indicador del contenido de hidroperóxidos como productos de oxidación. Para el proceso de extracción evaluaron extracción con acetona y extracción con vapor de agua, Cuando se usó acetona se encontró un máximo de reactivación del 80% con condiciones de calcinación de 600°C y 120 minutos. Cuando se usó vapor de agua se encontró un máximo de reactivación del 95% a condiciones de calcinación de 600°C y 90 minutos, pero este proceso dificulta el secado de la tierra debido a que se comporta como un fluido pseudoplástico de difícil manejo.

Las tres investigaciones antes mencionadas proponen que el material orgánico extraído por el solvente sea usado como materia prima para la industria de jabones debido a que sus características de color y composición no son óptimas para retornar al proceso de refinación.

El presente trabajo de grado muestra los resultados de la regeneración de tierras de blanqueo usadas en el proceso de refinación de ACP midiendo seis parámetros de control relacionados con la calidad: Valor de peróxidos (P.V), Valor de anisidina (A.V), porcentaje de Dienes Conjugados, Color como Betacaroteno, contenido de Fósforo y contenido de Hierro. El método de regeneración de la tierra se compone de dos pasos: El primero es una extracción de carga orgánica mediante el contacto con solvente. En este primer paso se evaluó la extracción con dos solventes: Acetona y Hexano, debido a su uso industrial y a que han sido usados en investigaciones científicas previas; la proporción de solvente: tierra usada será de 8 ml:1 g a condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica (Abd Wafti, Yoo, Lin, Yaw, y Abdullah, 2011). El segundo paso de la regeneración es la calcinación de la tierra a condiciones de tiempo y temperatura variables. Una vez seleccionado el solvente, se evaluaron y optimizaron las variables en la calcinación, además de la evaluación del número de reactivaciones a las que puede ser sometida la tierra sin perder su capacidad de remoción. Como complemento se hizo la evaluación económica y ambiental, de un proceso de blanqueo que incluye las etapas de reactivación de la tierra y su comparación con el proceso de blanqueo actual de la compañía.

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Evaluar técnica y económicamente un método de reactivación de tierras de blanqueo usadas en el proceso de refinación de ACP.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Evaluar las condiciones de proceso para la reactivación de tierras de blanqueo mediante el uso en conjunto de operaciones de extracción con solvente y calcinación.
- Determinar el número de ciclos de reactivación a los cuales pueden ser sometidas las tierras de blanqueo usadas antes de perder su capacidad de blanqueo.
- Determinar el impacto de la implementación del nuevo proceso en los indicadores económicos y ambientales del proceso.

4. METODOLOGÍA.

La metodología de investigación se constituyó de 7 etapas agrupadas en 4 grupos. Al final de cada grupo se estableció un entregable, los cuales al final hacen parte de los entregables del proyecto. A continuación, se describen las etapas, los grupos y los entregables.

4.1. GRUPO 1.

En este grupo se incluyeron las etapas que generaron la línea base del proyecto y se planteó como entregable las características de comparación de aceite blanqueado.

4.1.1. Validación del montaje experimental.

Se validó el montaje experimental por reproducción de las condiciones de blanqueo de la refinería a escala de laboratorio. Por otra parte, se realizó la concepción de las etapas de reactivación a escala laboratorio. En esta etapa se hizo la recolección de materiales y la búsqueda de métodos como se muestra a continuación.

4.1.1.1. Materiales.

Aceite crudo de palma, aceite blanqueado y tierra de blanqueo usadas fueron obtenidos de la refinería de aceite para alimentos de consumo humano de C.I. SIGRA S.A. (Planta de refinación de aceites de SIGRA en Bogotá, Colombia). La tierra virgen comercial fue provista por la compañía C.I. SIGRA S.A. Todos los

reactivos usados fueron de grados analítico. La determinación del valor de anisidina y contenido de dienos conjugados se hizo en un espectrofotómetro SPECORD 50 PLUS ® de Analytik Jena. La determinación del contenido de betacarotenos en el aceite se realizó de acuerdo con el método incluido dentro del colorímetro LOVIBOND Pfixi ® usando una celda de cuarzo de 1 cm. Toda la vidriería de laboratorio fue Scott Duran ®. termómetro de mercurio Brand ® con divisiones de 0.5°C. Balanza analítica Mettler Toledo AB204 ® con precisión de 0.0001 g.

4.1.1.2. Métodos.

4.1.1.2.1. Ciclo de reactivación de tierras de blanqueo.

La tierra de blanqueo se pesó y sometió a extracción con solvente empleando un método Soxhlet en proporción de 8 ml de solvente por 1 g de tierra. Seguido a la extracción con solvente se pesó tanto el extracto orgánico obtenido de la extracción como la tierra seca resultante. La tierra seca resultante fue puesta dentro de un crisol de cerámica y llevada a calcinación dentro de una mufla con controlador electrónico que puede manejar temperaturas entre 300 y 600°C con tiempos de calcinación entre 30 y 180 minutos. La tierra reactivada se enfrió hasta temperatura ambiente y se pesó.

4.1.1.2.2. Blanqueo de aceite de palma.

El blanqueo de ACP se hizo conforme a lo señalado en la literatura (Silva et al., 2014), (Al-Zahrani y Daous, 2000). Se usó tierra de blanqueo en proporción 1 g de tierra por cada 100 g de aceite crudo. El aceite crudo se pesó dentro de un matraz con desprendimiento lateral y se introdujo un agitador magnético para facilitar su mezcla y homogeneización. Al desprendimiento lateral fue conectado una bomba de vacío donde se alcanzaron presiones de 25 mbar.

El aceite dentro del matraz se calentó en una plancha de calentamiento con agitación magnética a 250 rpm. El registro de temperatura se hizo con un termómetro de mercurio de forma visual. Se llevó el aceite a una temperatura de 70°C, allí se agregó ácido cítrico en una proporción 0.15 g por 100 gramos de aceite y se mantuvieron las condiciones durante 40 minutos. Una vez cumplido el tiempo se elevó la temperatura del aceite hasta 90°C y se agregó la tierra de blanqueo, se agitó por 25 minutos manteniendo las condiciones de temperatura, presión de vacío y velocidad de agitación. Una vez cumplidos los 25 minutos se desmontó el matraz de la plancha de calentamiento sin romper el vacío y se dejó a una temperatura entre 50°C y 60°C.

4.1.1.2.3. Medición de parámetros en el aceite blanqueado.

La medición de los compuestos de oxidación, es decir el índice de Peróxidos, Valor de anisidina y Dienos conjugados se realizó inmediatamente después del proceso de blanqueo. Para ello se tomó una parte del aceite blanqueado dentro del matraz

y se filtró usando filtros de papel en una estufa que mantiene la temperatura entre 50°C y 60°C. Los análisis se realizaron según lo descrito en la norma NTC 236 (ICONTEC, 2011) para el valor de peróxidos, NTC 4197 (ICONTEC, 2014) para determinar el índice de anisidina y el método AOCS Cd7 -58 (AOCS, 2017a) para la determinación de dienos conjugados.

Los demás análisis se realizaron una vez se filtró la totalidad del aceite blanqueado, empezando por el contenido de beta carotenos por método espectrofotométrico usando una celda de cuarzo de 1 cm, a 50°C. La determinación del contenido fósforo se realizó siguiendo el método descrito en la NTC 4790 (ICONTEC, 2006), que es un método espectrofotométrico que valora el complejo coloreado que el fósforo forma con molibdato de amonio. La determinación de hierro se realizó siguiendo el Método AOCS Ca 15 -75 (AOCS, 2017b) que es un método de absorción atómica.

4.1.2. Caracterización del aceite crudo de palma.

Paralelo a la etapa 1 se recolectaron 14 L de ACP de los principales proveedores de la compañía (Ver numeral 4.1.1.1.). Para preservar el aceite crudo durante el tiempo de experimentación, se envasó en recipientes color ámbar y se almacenó en un estante lejos de la luz solar y artificial. El cuarto de almacenamiento tiene control de temperatura y ambiente que ajusta las condiciones a 20°C y un porcentaje de humedad relativa de entre 40 y 60%.

Una vez recolectado se realizó la caracterización evaluando los parámetros descritos en el numeral 4.1.1.2.3. y dos análisis adicionales, la determinación del índice de saponificación por titulación según método descrito en la NTC 335 (ICONTEC, 2019) y un perfil de ácidos grasos por cromatografía de gases según método NTC 6261 (ICONTEC, 2018). Se compararon según lo descrito en la norma técnica colombiana NTC 431: Aceite Crudo de Palma Africana (ICONTEC, 2017).

Se evaluó el ACP colombiano respecto al Índice de Saponificación y Perfil de Ácidos grasos como parte de su identidad.

4.1.3. Ensayos de blanqueo con tierra virgen.

La tercera etapa consistió en realizar ensayos de blanqueo con tierra virgen usando el ACP caracterizado. Se repitieron por triplicado los ensayos y se validaron sus resultados mediante la comparación de los parámetros entre el aceite de palma blanqueado obtenido en refinería y el aceite blanqueado en el laboratorio.

Por otra parte, estos resultados fueron aprovechados para establecer una línea base y así contrastar la capacidad de blanqueo de las tierras reactivadas y la tierra virgen. Para condensar lo dicho se planteó el concepto de la remoción esperada, que se definió como la cantidad de contaminante removido en cada parámetro

cuando se usa tierra virgen. La remoción esperada se calculó como según la ecuación (1):

$$\text{Remoción esperada}_i = \text{Parámetro ACP}_i - \text{Parámetro Aceite RB Tierra Virgen}_i \quad (1)$$

Donde *Parámetro ACP_i* es la concentración del parámetro i en el ACP y *Parámetro Aceite RB Tierra Virgen_i* es la concentración del parámetro i en el aceite blanqueado con tierra de blanqueo virgen. Se obtuvieron seis remociones esperadas, una para cada parámetro de comparación.

4.2. GRUPO 2.

Este grupo incluyó una única etapa, la cual consiste en la elección del solvente entre las alternativas evaluadas y tuvo como entregable la conclusión de cuál es el mejor solvente para la reactivación.

4.2.1. Elección de solvente.

Se trabajó con dos solventes, Hexano y Acetona según lo encontrado en la literatura (Al-Zahrani y Daous, 2000) (Foletto et al, 2002). Se eligieron estas dos opciones porque han sido usados en los trabajos científicos anteriores y además se emplean comúnmente en las plantas de extracción de aceites vegetales. Los demás solventes encontrados en la literatura como son MEK o Tetrahidrofurano son tóxicos o de difícil manejo por lo que se descartaron de antemano.

Se reactivó la tierra mediante un ciclo de reactivación completo: Extracción con solvente y calcinación a 600°C y 120 minutos.

4.3. GRUPO 3.

Este grupo incluyó dos etapas y tiene como entregable las condiciones de calcinación óptimas para el tipo reactivación planteada con el solvente seleccionado en la etapa 4.2.1.

4.3.1. Elección de condiciones de calcinación.

La elección de las condiciones de calcinación se hizo realizando ciclos completos de reactivación usando el solvente seleccionado en el numeral 4.2.1., variando la temperatura de calcinación de la tierra entre 300°C y 600°C en rangos de 100°C y variando el tiempo de calcinación entre 30 y 180 minutos en lapsos de 30 minutos. Esta tierra reactivada se usó para blanquear ACP a escala laboratorio y se evaluaron los parámetros de control en el aceite blanqueado en concordancia a lo dicho en el numeral 4.1.1.2.3. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

De esta experimentación surgieron los resultados promedio de los parámetros evaluados en los 30 puntos de la matriz experimental. Estos resultados se compararon con respecto al comportamiento de la tierra virgen mediante el porcentaje de reactivación, cuya ecuación de cálculo se muestra a continuación:

$$\% \text{ reactivación}_i = \frac{\text{Parámetro}_{ACPi} - \text{Parámetro}_{muestraa_i}}{\text{remoción esperada}_i} * 100 \quad (2)$$

Donde $\% \text{ reactivación}_i$ es el porcentaje de reactivación en el parámetro i a las condiciones de temperatura y tiempos de calcinación dadas, Parámetro_{ACPi} es resultado del parámetro i en el ACP (Ver numeral 4.1.2.), $\text{Parámetro}_{muestraa_i}$ es el resultado del parámetro i en la muestra a evaluar, y $\text{remoción esperada}_i$ es la remoción obtenida cuando se blanqueó con la tierra virgen (Ver ecuación 1). Consecuencia de lo dicho se obtuvo una matriz experimenta con 30 puntos y cada punto de la matriz se asociaron seis porcentajes de reactivación, uno para cada parámetro evaluado.

Dicha matriz fue usada como entrada para elegir las condiciones óptimas de calcinación a través de la metodología de superficie de respuesta (RSM por sus siglas en ingles). Montgomery (2012) explica en su libro que la RSM es una metodología que reúne una serie de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten modelar y analizar casos donde la respuesta depende de más de una variable. Los objetivos de la RSM es analizar de manera gráfica e intuitiva el comportamiento de una variable de respuesta y encontrar a partir de este comportamiento puntos estacionarios. Los puntos estacionarios son mínimos, máximos y puntos de sillas locales.

El diseño de experimentos fue de tipo matricial o también llamado malla experimental, el cual se seleccionó por las siguientes razones enmarcadas dentro de la literatura (Montgomery, 2012):

- El equipo donde se operan las variables de control, en este caso la mufla, tiene un rango restringido de funcionamiento.
- No se tenía indicio alguno de que alguna variable tuviera mayor influencia que otra para determinar el punto estacionario y es importante no descartar ninguna zona dentro de la malla experimental.
- Se contó con los recursos (tiempo, dinero, etc) necesarios para no obviar ninguna zona experimental

La ventaja de este tipo de diseño de experimentos es que no obvia ninguna zona experimental y muestra las tendencias globales. Además, no se ve afectado por la magnitud de la influencia de las variables de control con respecto a la variable de respuesta (Montgomery, 2012).

Con base en los resultados de la matriz experimental se construyó la matriz de mínimos que es la matriz donde se consignó el valor mínimo de los porcentajes de reactivación obtenidos en cada una de las condiciones de calcinación evaluadas. A partir del consolidado de los mínimos se creó una superficie de respuesta que se usa para tener un estimado de la zona donde se puede encontrar el óptimo de las condiciones de calcinación.

La matriz de mínimos y la gráfica de superficie derivada ayudaron a realizar un acercamiento a las condiciones óptimas en el proceso de calcinación. Sin embargo, para realizar una mejor evaluación se utilizaron aproximaciones matemáticas que expresan el comportamiento óptimo teniendo en cuenta todos los parámetros. Para ello se empleó el módulo de diseño de experimentos (DDE) del software STATGRAPHICS CENTURION XVI.II ®. Se utilizó el análisis de múltiples respuestas del módulo DDE. Este módulo permitió la optimización de varias ecuaciones con variables de control similares valiéndose de una ecuación llamada deseabilidad que varía entre cero y uno y cuya optimización se obtiene con valores cercanos a uno. La ecuación 3 es la ecuación de deseabilidad usada por el software.

$$deseabilidad = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{MIN_i}{parámetro_i} * c_i \right)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (3)$$

Dónde MIN_i es el mínimo experimental del parámetro evaluado, $parámetro_i$ es el parámetro evaluado a las condiciones de temperatura y presión de acuerdo a ecuaciones obtenidas con los resultados de cada variable (Ver tabla 1) y C_i es la calificación de importancia del parámetro que es un número entero entre 1 y 5, siendo 1 una variable de respuesta poco importante y 5 una variable de respuesta de mayor importancia. En la tabla 1 se muestran las calificaciones de importancia para cada uno de los parámetros de control y la justificación de dicha calificación.

Tabla 1. Calificación de importancia de parámetros de control y justificación

Parámetros	C_i	Justificación
Valor de peróxidos (P.V.)	5	Si la remoción no es total, los peróxidos pueden generar radicales libres de difíciles remoción en la desodorización (Asociación Malaya de Refinerías de Aceite de Palma, 1992)
Valor anisidina (A.V)	2	Productos de oxidación secundarios son removidos con relativa facilidad en etapa de desodorización (Cmolik y Pokorny, 2000).
Dienos conjugados	3	Precusores de oxidación primaria. Si se tiene la debida precaución en las etapas de almacenamiento y desodorización no generan cantidades considerables de compuestos de oxidación (De Oliveira et al., 2005)
Color	2	Ensayos internos de planta han demostrado que el color en

(b-carotenos)		el aceite RBD no se ve afectado si la cantidad de betacarotenos en el aceite RB es menor a 500 ppm. Además, se ha establecido según literatura que la desodorización puede reducir el contenido de betacarotenos hasta en un 60%. (Norris, 1985).
Cont. Fósforo	5	La remoción debe ser total dado que en la etapa de desodorización no se eliminan compuestos fosforados (Ruíz-Méndez y Dobarganes, 2011)
Cont. Hierro	4	El contenido final debe ser de máximo 0.5 ppm para cumplir con legislación nacional (Ministerio de la Protección Social, 2012). Si no se llega a este nivel de remoción se acelera significativamente la oxidación del aceite.

4.3.2 Elección del número de reactivaciones.

Una vez elegidas las condiciones de calcinación se procedió a realizar blanqueos con tierras reactivadas en más de una ocasión y así evaluar el número de reactivaciones a las cuales puede ser sometida la tierra de blanqueo desde el punto de vista técnico. Se tomó como límite mínimo de capacidad de remoción el 70%, es decir que si alguno de los parámetros de control tiene un valor menor a este porcentaje se considera que la tierra perdió considerablemente su capacidad de remoción.

4.4. Grupo 4. El grupo cuatro tuvo una única etapa y el entregable es la evaluación económica y ambiental del proceso de blanqueo con las modificaciones propuestas. Este entregable responde al objetivo general del proyecto y lo da por concluido.

4.4.1. Estimación de mejoras y comparación con el proceso actual. Apoyado en los entregables de las anteriores etapas se propuso un proceso de mejora en el blanqueo incluyendo la reactivación de la tierra. Se comparó el proceso actual y el proceso propuesto a través del uso de balances de masa y el uso de la información de proveedores de tecnología. Los resultados de dicha comparación dieron respuesta al objetivo general del proyecto dándolo por concluido.

Como método de comparación se tomó la metodología el análisis de ciclo de vida evaluando únicamente el proceso de blanqueo de ACP. El análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) es una técnica estandarizada que está contenida en la norma NTC-ISO 14040 y que declara en su introducción: “Aporta información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos y procesos)” (ICONTEC, 2007, p.2).

La ventaja de usar el LCA en este caso es la cuantificación de los impactos

ambientales. Al poder cuantificar los impactos ambientales de manera clara, se puede hacer una conversión monetaria para calcular el indicador económico del proceso y al mismo tiempo mediante herramientas de cuantificación ambiental, poder saber si el impacto al entorno es mayor o menor.

Para la cuantificación del impacto ambiental se usó SIMAPRO ®, un software especializado que ayuda a realizar la etapa de interpretación del ciclo de vida y que permite en uno de sus módulos comparar dos procesos incluyendo las etapas de transporte, extracción, ensamblaje y disposición de residuos; apoyado todo con una amplia base de datos y respaldado de varias metodologías de cálculo de LCA (PRé Sustainability, 2019).

Los métodos de obtención de los indicadores ambientales no se encuentran consensuados actualmente y se puede optar por metodologías propias en cada región. Sin embargo, uno de los métodos más usados para la obtención de indicadores es el EcoIndicador 99. El método EcoIndicador 99 fue desarrollado en el 2000 en los Países Bajos por varias consultoras con el apoyo del gobierno para dar cumplimiento a un conglomerado de políticas conocidas como Políticas Integradas de Productos (IPP por sus siglas en inglés), que buscan reducir y controlar el impacto final que tiene el consumo en el medio ambiente (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of Netherlands, 2000).

5. RESULTADOS, DISCUSIÓN E IMPACTO.

Los resultados de la caracterización del ACP se compararon con la norma técnica colombiana y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación entre resultados de la caracterización y rangos dados por la NTC 431.

REQUISITO	RESULTADO CARACTERIZAC IÓN	RANGO SEGÚN NORMA NTC 431.
Índice de Saponificación (mg KOH/g aceite)	194	190 - 209
Perfil de Ácidos Grasos		
C12:0 (Ácido Láurico)	0,2%	No detectable (ND) - 0,5%
C14:0 (Ácido Mirístico)	1,8%	0,5% - 2,0%
C16:0 (Ácido Palmítico)	40,5%	39,3% -47,5%
C18:0 (Ácido Esteárico)	4,1%	3,5% -6,0%
C18:1 (Ácido Oleico)	39,3%	36,0% - 44,0%
C18:2 (Ácido Linoleico)	10,1%	9,0% - 12,0%

Se puede apreciar que la comprobación de identidad arrojó resultados positivos, es decir el aceite de palma utilizado a lo largo de la experimentación se encuentra dentro de las características expresadas en la norma técnica y por tanto los resultados del presente trabajo se enmarcan dentro del contexto del aceite de palma nacional.

Una vez realizada la caracterización se encontraron los valores base para los parámetros de control (Ver tabla 3) los cuales constituyen el entregable del grupo 1. En la tabla 3 se muestra el promedio de los resultados obtenidos en los blanqueos con tierra virgen, además de los valores encontrados para el ACP y la remoción esperada.

Tabla 3. Parámetros de control para ACP, Aceite blanqueado con tierra virgen a escala laboratorio y remoción esperada.

Parámetros	ACP	Aceite RB - Tierra virgen	Remoción esperada
Valor de peróxidos (P.V.) (mEq O ₂ /kg)	8,19	0,00	8,19
Valor anisidina (A.V) (mEq O ₂ /kg)	7,6	1,5	6,1
Dienos conjugados (%)	3,65%	1,33%	2,32%
Color (b-carotenos) (ppm)	646,05	306,70	339,34
Cont. Fósforo (ppm)	18,6	0,0	18,6
Cont. Hierro (ppm)	5,3	0,0	5,3

Según especificaciones internas de planta el aceite blanqueado debe tener como condiciones específicas un valor de peróxidos igual a 0 mEq O₂/Kg, el valor de anisidina menor a 2 mEq O₂/Kg, color como betacaroteno menor a 450 ppm y contenidos de hierro y fósforo iguales a 0 ppm. Se aprecia entonces que los ensayos realizados con tierra virgen son congruentes con lo esperado en planta y por ende se da como validado el método de blanqueo a escala laboratorio.

Para la etapa 3 se dedujo la elección del mejor solvente mediante la comparación parámetro por parámetro de los aceites resultantes de los blanqueos en el laboratorio. Además, se cuantificó la cantidad de materia orgánica extraída por el solvente y la cantidad de masa perdida por la tierra al final de la reactivación. En la tabla 4 se muestran los resultados para la elección de solvente de reactivación.

Tabla 4. Resultados de proceso de reactivación y parámetros de control para Aceite de Palma Blanqueado usando tierras reactivadas con n-Hexano y Acetona como solventes de extracción seguidas de calcinación a 600°C por 120 minutos.

Resultados		n-Hexano	Acetona
PARÁMETROS CONTROL ACEITE BLANQUEADO	Valor de peróxidos (P.V.) (mEq O ₂ /kg)	3,87	4,11
	Valor anisidina (A.V) (mEq O ₂ /kg)	2,2	3,1
	Dienos conjugados (%)	1,63%	1,63%
	Color (b-carotenos) (ppm)	459,39	475,4
	Cont. Fósforo (ppm)	1,6	2,9
	Cont. Hierro (ppm)	0,0	0,4
RESULTADOS PROCESO REACTIVACIÓN	% masa extraída por solvente	25,60%	13,10%
	% Masa perdida en el proceso de reactivación	52,00%	50,70%

Comparando los resultados de esta etapa con los obtenidos por los trabajos anteriores se ven diferencias considerables. La principal diferencia es la capacidad de extracción de los solventes. Al-Zahrani y Daous (2000) en su trabajo enfocado a tierras de blanqueo usadas en la refinación de aceite de maíz calcularon que la cantidad materia orgánica extraída por la acetona fue de alrededor el 60% de la totalidad de masa perdida en el proceso de reactivación y que para el caso del n-hexano fue de solo el 27%. Foletto et al (2002) en su investigación con tierras procedentes de la refinación de aceite de soya obtuvieron porcentajes de extracción de materia orgánica de 60% en el caso de la acetona y del 37% en el caso del hexano.

Por otra parte, los resultados obtenidos en esta etapa de experimentación presentan un mejor desempeño en la extracción con n-hexano en comparación con la acetona. Para el caso del n-hexano, se extrajo un 25.60 % de materia orgánica, es decir el 49% de la masa perdida en el proceso de reactivación se fue efecto de la extracción con el solvente. En el caso de la acetona que extrajo un 13.10% de materia orgánica lo que representa un 25.10% del total de la masa perdida en el proceso de reactivación. Es decir que se extrajo un 96% más de carga orgánica cuando se utilizó n-hexano en comparación con la acetona.

En resumen, contrastando con el estado del arte, la reactivación de tierras de blanqueo procedentes de la refinación de ACP tienen comportamientos muy diferentes, en donde el n-hexano presenta mejores resultados de extracción en contraparte a lo que muestra este mismo solvente cuando se utiliza para la reactivación de tierras procedentes de la refinación de aceite de soya (Foletto et al, 2002) o de aceite de maíz (Al-Zahrani y Daous, 2000).

Como consecuencia de lo anteriormente dicho se pudo establecer mejores

resultados de remoción cuando se blanqueó ACP con la tierra de blanqueo tratada con n-hexano, prueba de esto son los valores de los parámetros de control (Ver tabla 3). También se puede ver que la masa perdida en el proceso de reactivación es similar en ambos casos, lo que permite deducir que la tierra de blanqueo usada perderá aproximadamente un 50% de su masa en el proceso de reactivación. Dicho esto, se escoge como solvente de trabajo el n-hexano, obteniendo de esta manera el entregable del grupo 2.

El extracto orgánico obtenido de la extracción por solvente es un aceite rico en fosfolípidos, sales metálicas y con un alto contenido en compuestos de oxidación, por lo que se recomienda que no sea reingresado al proceso de refinación. En cambio, se plantea como posibilidad su uso como materia prima en la fabricación de jabones, disminuyendo así el impacto del proceso en el medio ambiente.

Seguido a la elección del solvente se realiza la matriz experimental para la selección de las condiciones óptimas de calcinación. En la tabla 5 se muestran los resultados de la malla experimental calculados como porcentajes de reactivación de acuerdo a la ecuación 2.

Tabla 5. Resultados promedio de porcentaje de reactivación para cada parámetro en cada uno de los puntos de la matriz experimental.

Condiciones calcinación		Porcentajes de reactivación (con respecto a tierra virgen)					
Temp. (°C)	Tiempo (minutos)	P.V (+- 0,2%)	A.V (+-0,2%)	Color (b-carotenos) (+- 0,4%)	Cont. Fósforo (+-2%)	Dienos conjugados (+-2%)	Cont. Hierro (+-2%)
300	30	8,7%	0,0%	3,7%	78,8%	27,2%	48,5%
	60	15,8%	0,5%	4,4%	79,6%	39,7%	71,9%
	90	19,6%	8,1%	4,3%	80,6%	51,6%	80,8%
	120	23,3%	36,9%	4,3%	80,8%	57,2%	89,5%
	150	31,4%	51,0%	29,0%	82,2%	72,9%	100,0%
	180	40,5%	59,4%	53,9%	84,1%	77,7%	100,0%
400	30	9,2%	6,7%	2,7%	81,6%	77,2%	54,7%
	60	15,4%	12,0%	15,1%	83,1%	81,3%	70,1%
	90	22,1%	33,9%	27,9%	83,3%	83,0%	89,6%
	120	28,7%	43,7%	40,0%	83,4%	91,7%	100,0%
	150	45,8%	69,5%	47,1%	85,9%	94,9%	100,0%
	180	48,6%	67,9%	56,7%	87,2%	96,9%	100,0%
	30	63,7%	0,0%	79,5%	85,4%	55,7%	69,5%

500	60	64,0%	81,7%	76,1%	84,4%	66,1%	85,5%
	90	69,8%	102,8%	79,2%	87,1%	113,0%	100,0%
	120	87,0%	102,7%	80,0%	88,1%	93,3%	100,0%
	150	55,0%	103,4%	83,1%	85,6%	80,9%	100,0%
	180	55,9%	102,5%	80,4%	86,0%	85,4%	100,0%
600	30	43,1%	-2,9%	30,5%	85,7%	27,9%	81,8%
	60	49,6%	68,2%	35,5%	89,0%	60,9%	91,9%
	90	48,8%	78,3%	40,5%	91,7%	81,2%	100,0%
	120	52,7%	88,8%	55,0%	91,6%	86,7%	100,0%
	150	62,5%	88,2%	72,4%	89,1%	101,2%	100,0%
	180	65,6%	86,8%	88,7%	86,2%	101,7%	100,0%

Según los datos mostrados en la tabla 5 a 500°C y 120 minutos fue el único punto donde se obtuvieron porcentajes de reactivación mayores a 80% para todos los parámetros evaluados. Debido a esto se plantea la hipótesis de que el óptimo de la superficie se encuentra cerca al punto de la matriz 500°C y 120 minutos.

Después de obtener la matriz experimental completa se seleccionaron los porcentajes mínimos de reactivación de acuerdo en lo descrito en la metodología (Ver numeral 4.3.1). En la figura 1 se muestra la superficie de respuesta obtenida a través de la matriz de mínimos.

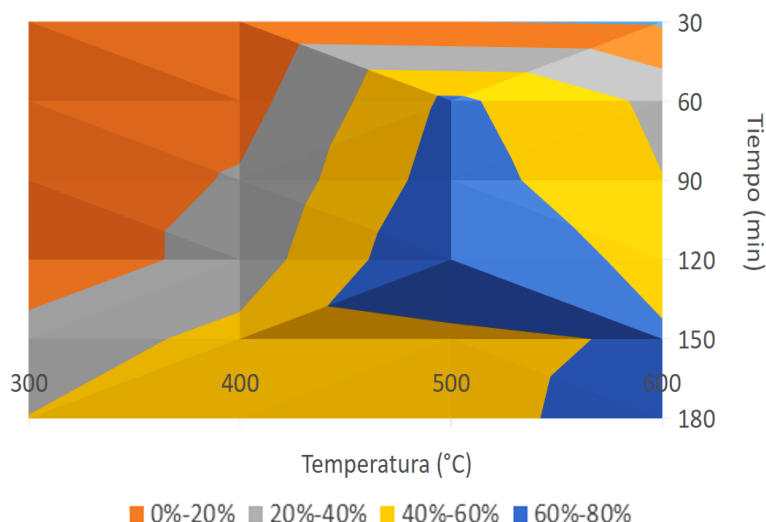


Figura 1. Superficie de respuesta obtenida a partir de los resultados de la matriz de mínimos.

La matriz de mínimos sigue corroborando la misma tendencia mostrada por la totalidad de resultados de la malla experimental y es que las condiciones óptimas

del proceso de calcinación se encuentran en la zona de 500°C y 120 minutos.

Como último paso para la comprobación de las condiciones óptimas se realiza la superficie de respuesta con base en la ecuación de deseabilidad del módulo DDE de STATGRAPHICS® (Ver ecuación 3). A partir de las calificaciones dadas a cada parámetro evaluado (Ver tabla 1) se procedió realizar el análisis sobre la ecuación de deseabilidad. Los resultados de dicha ecuación se grafican en una superficie de respuesta que se muestra en la figura 2.

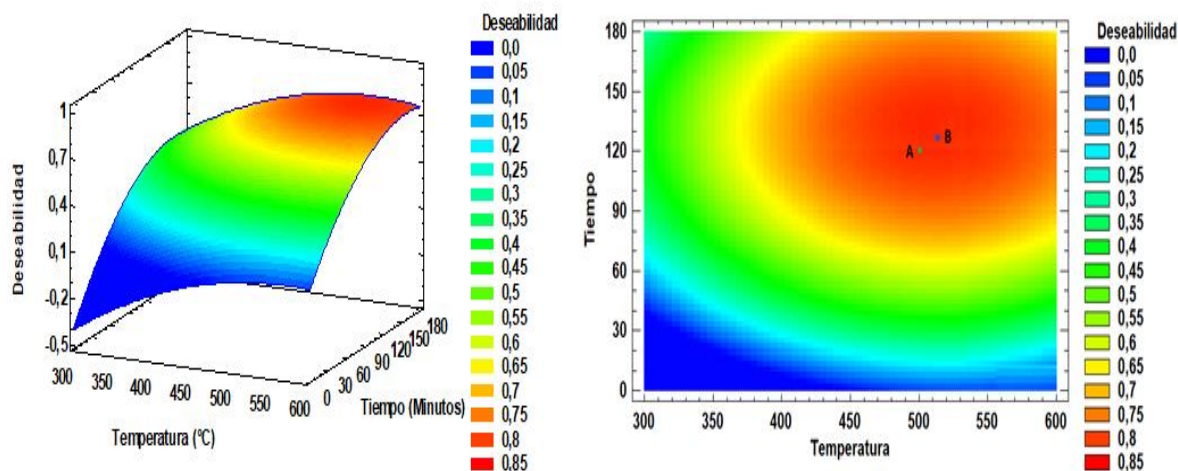


Figura 2. Superficie de respuesta de la ecuación de deseabilidad y contornos de superficie de respuesta.

Nota: El punto A es el óptimo hallado a partir de la matriz de mínimos y el punto B es el óptimo hallado por medio de la ecuación de deseabilidad.

Los resultados de la matriz de mínimos y de la optimización obtenida a través de la ecuación de deseabilidad son muy cercanos (Ver figura 2). Por ende, se concluyó que las condiciones óptimas de calcinación son 500 °C y 120 minutos. Por otra parte, estas condiciones presentan una particularidad, es el único punto de la matriz experimental donde se obtuvieron porcentajes de remoción del 80% o más, dando a entender que la tierra obtenida conservó un alto nivel de remoción asociado a los mecanismos de adsorción, absorción y catálisis química.

La segunda observación es encontrar resultados que van en contra a lo planteado en trabajos previos. Como primera diferencia se encontraron condiciones de reactivación diferentes. Según el trabajo de Al-Zahrani y Daous (2000) las condiciones óptimas de calcinación para tierras procedentes de la refinación de aceite de maíz son 600°C y 45 minutos. Para las tierras procedentes de la refinación de aceite de soya Folleto et al (2002) encontraron como optima la calcinación a 600°C y 40 minutos. Haro et al (2014) encontró que las condiciones óptimas de calcinación cuando utilizó vapor de agua en la extracción de materia orgánica fueron 600°C y 120 minutos.

De los resultados mencionado se desprende una segunda conclusión y es la influencia del proceso de extracción en las condiciones óptimas de calcinación. Se aprecia entonces que con el uso de solventes polares de extracción como es el caso del MEK, Acetona o Vapor de agua, las condiciones óptimas de calcinación son temperaturas más altas (Al-Zahrani y Daous, 2000), (Folletto et al, 2002), (Haro et al, 2014). En este caso, donde en la etapa de selección de solvente se escogió n-hexano, un solvente apolar, la temperatura de calcinación fue menor.

Analizando los procesos de refinación de los demás aceites vegetales, en especial los procesos de refinación de aceite de soya y aceite de maíz podemos destacar las siguientes diferencias: La primera es que se utiliza un tipo de tierra diferente. Mientras que para la refinación de ACP el tipo de tierra no presenta ningún tratamiento químico previo, las tierras utilizadas para el tratamiento de los otros aceites presentan activación con ácido inorgánico fuerte previo a su uso, lo que modifica su estructura cristalina. Esto puede ser uno de los factores que diferencian los resultados obtenidos a lo encontrado en la literatura.

Otro factor es el tipo de refinación que se ha implementado para el ACP. Este tipo de refinación de tipo físico difiere sustancialmente a la refinación química que se implementa comúnmente cuando se trabaja con aceite de soya, maíz y algodón. El proceso de refinación química se basa en el uso de soda caustica para realizar lavados al aceite y así disminuir la concentración de ácidos grasos libres y sustancias hidrosolubles. Sin embargo, se ha demostrado que realizar estos lavados trae consigo el aumento de precursores de oxidación (Cmolik y Pokorny, 2000).

Se concluyó que para el ACP las variables de control críticas son el valor de peróxidos (P.V) y el contenido de fosforo partiendo de la evaluación de criticidad de los parámetros de control (Ver tabla 1), al contrario de lo encontrado en el estado del arte donde se tomó el color del aceite RB como parámetro de control del blanqueo (Al-Zahrani y Daous, 2000), (Boukerroui y Ouali ,2000), (Folletto et al, 2002), (Haro et al., 2014).

Elegidas las condiciones se procedió a realizar blanqueos con tierras reactivadas en más de una ocasión para evaluar a cuántos ciclos puede ser sometido el mineral sin perder significativamente su capacidad de remoción (Ver numeral 4.3.2). En la figura 3 se muestran los resultados de porcentaje de reactivación para cada parámetro cuando se varía el número de reactivaciones

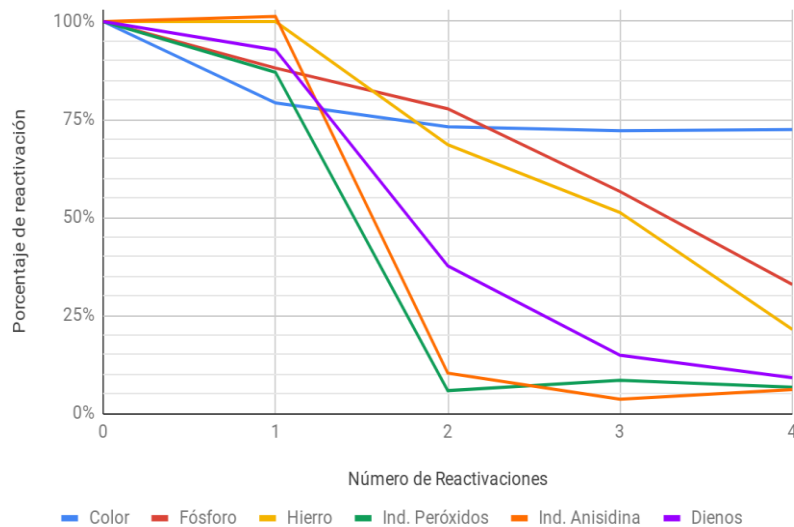


Figura 3. Porcentaje de reactivación para cada parámetro en función del número de reactivaciones. La reactivación 0 se refiere a ensayos hechos con tierra virgen.

Por lo visto en los resultados de remoción mostrados en la figura 3, vale la pena asociarlos a los mecanismos mencionados por Brooks et al., (2015). Dichas asociaciones se mencionan a continuación:

Eliminación por Adsorción. El mecanismo de adsorción se ve reflejado en la remoción de compuestos coloreados, en este caso la remoción de betacarotenos (línea azul en la figura 3). Se ve una variación importante entre el rendimiento de la tierra virgen y el uso de tierras reactivadas. Sin embargo, sus valores son casi constantes al variar el número de reactivaciones. Esto se puede atribuir a que los cambios sufridos por la superficie del gránulo de tierra en los procesos de reactivación no afectan considerablemente su afinidad hacia las sustancias colorantes del aceite y por ende su capacidad de adsorción específica es casi constante. Esto concuerda con los estudios hechos por Lomíc, Kis, Dimíc y Romaníc (2004), los cuales señalan que la sorción de compuestos coloreados en aceites vegetales se debe a un fenómeno meramente de superficie donde los microporos intragranulares no toman acción alguna.

Eliminación por Absorción - adsorción. Según señalan Lin y Yoo (2007) la eliminación de hierro y fósforo en aceites vegetales no está asociada únicamente con la superficie específica del gránulo; también intervienen fenómenos intragranulares de sorción, es decir es un fenómeno simultáneo de absorción - adsorción. En la figura 3 se muestra que el porcentaje de remoción de fósforo e hierro (Línea roja y amarilla respectivamente) tienen comportamientos similares, es decir que se ven afectados de manera similar por los cambios presentados en el gránulo de la tierra.

Por el comportamiento de remoción visto en la adsorción de compuestos coloreados se puede partir de la hipótesis de que al menos la superficie específica de los gránulos de la tierra no se ve afectada por el método de reactivación, por lo que las variaciones en la remoción de hierro y fósforo vienen dadas por cambios en los poros intragranulares de la tierra. Gregg y Sing (1982) clasificaron los poros en las tierras de blanqueo según su tamaño. Los poros con tamaños por debajo de los 2 nm se denominaron microporos, aquellos entre 2 y 50 nm se denominaron mesoporos, y aquellos con tamaños de más de 50 nm se denominaron macroporos. Basados en esta clasificación, Babaki, Salem y Jafarizad (2008) obtienen como primera conclusión que los macroporos en las bentonitas, como la montmorillonita, se encuentran entre los gránulos de la tierra y que los meso y microporos se encuentran dentro de la tierra. Como segunda conclusión la investigación arrojó que la remoción de compuestos con fósforo y metales mejora si aumentan la proporción microporos/mesoporos y que el nivel de contribución de los macroporos en la actividad de absorción es despreciable si se compara con la contribución de los otros dos tipos de poro.

Con respecto a lo anteriormente mencionado, se puede pensar que, como efecto del método de reactivación escogido, la estructura intragranular de la tierra colapsa disminuyendo el número de microporos disponibles y por tanto disminuyendo la capacidad de absorción de la tierra de blanqueo. Esto coincide con lo arrojado por la investigación de Sarikaya, Önal, Baran y Alemdaroglu (2000) en donde se observó que al aumentar la temperatura del tratamiento térmico por encima de los 300°C el volumen específico de los microporos decrece hasta llegar a prácticamente cero a temperaturas de 900°C. En cambio, el volumen de mesoporos permanece prácticamente constante hasta temperaturas cercanas a los 800°C.

Eliminación por catálisis. Falaras, Lezour, Seiragakis y Petrakis (2000) describen que la actividad superficial para la eliminación de compuestos de oxidación se basa en que la superficie se comporta como un ácido de Brønsted intercambiando protones con compuestos oxidados y sus precursores con relativa facilidad. Además de la acidez propia de la superficie, se debe tener en cuenta los cationes propios de la estructura cristalina de la tierra de blanqueo. La montmorillonita presenta una particularidad y es su alto porcentaje de aluminio en comparación con las demás bentonitas. El ion Al^{3+} sustituye en los sitios octaédricos a los iones Fe^{2+} y Mg^{2+} , produciendo que la carga de la celda sea en unas partes positiva y en otras partes negativa. La parte positiva de la celda por su exceso de carga actúa como un sitio activo para la degradación de compuestos oxidados (Matocha, 2016).

Dicho esto, se debe tener en cuenta que la degradación de compuestos ya sea por la acidez de la superficie o por la carga del sitio activos es limitada y depende de su saturación. Es decir, la sustancia es degradada en la superficie y su compuesto de degradación satura dicho sitio inhabilitando como catalizador (Schoonheydt y Johnston, 2006). Para habilitar estos sitios activos se necesita un tratamiento con

ácidos o bases fuertes; si se utilizan solventes se tiene una remoción parcial y si se utiliza tratamiento térmico sucede que en su mayoría los compuestos producto de degradación térmica siguen ocupando estos sitios activos (Ilic, Mitrovic, Milicic, 2010). Como se aprecia en la figura 3, la remoción de peróxidos, dienos y compuestos de oxidación secundaria (Línea verde, morada y naranja respectivamente) presentan comportamientos similares, propios de una remoción parcial en donde a partir de la segunda reactivación se saturan la mayoría de sitios activos y por ende se encuentran porcentajes de reactivación muy bajos.

Teniendo en cuenta los resultados de esta etapa de la parte experimental se deduce que la tierra solo debe tener una etapa de reactivación. La principal desventaja de realizar más de una reactivación de la tierra se encuentra en la remoción parcial de sustancias oxidadas en los sitios activos de la superficie (Ilic et al. 2010). Esto concuerda con una de las conclusiones de la etapa anterior donde se señaló que para este método de reactivación el valor de peróxidos debe ser considerado como uno de los parámetros críticos de control.

En resumen, como entregable del grupo 3 de la metodología se encontró que las condiciones óptimas de calcinación son 500°C y 120 minutos. Además, se concluyó que la tierra solo debe ser sometida a un ciclo de calcinación debido a que se presentan problemas en la remoción de sustancias precursoras de la oxidación cuando se somete a dos o más ciclos.

Como parte de la última etapa en la investigación propuesta se dio a la tarea de modelar desde el punto de vista de la ingeniería de procesos. En esta parte presenta una dificultad y es que se tendrían tierras de blanqueo con diferentes capacidades de remoción, lo que plantearía dificultades de operación en caso de que se mezclaran. Por ello se plantea como solución hacer blanqueos diferenciados, donde en un batch se use tierra de blanqueo virgen y en otro se utilice tierra de blanqueo activada. Para comprobar la viabilidad técnica de esta propuesta se realiza a escala laboratorio blanqueo con tierra reactivada a las condiciones óptimas encontradas, pero usando una proporción de 100 g de aceite por 1,25 g de tierra. Esta proporción se obtuvo a partir del porcentaje mínimo de reactivación obtenido con las condiciones óptimas halladas (Ver figura 1). En la tabla 6 se muestra los resultados de los blanqueos mencionados y su comparación con los resultados de la tierra virgen.

Tabla 6. Comparación de resultados de blanqueo cuando se utilizó tierra virgen y tierra reactivada en proporción 100:1.25.

Resultados	Tierra Virgen (Proporción 100:1)	Tierra Reactivada (Proporción 100:1,25)	
	Valor	Valor	% Reactivación
Valor de peróxidos (P.V.) (mEq O2 /kg)	0,00	0,00	100,0
Valor anisidina (A.V) (mEq O2 /kg)	1,5	1,2	106,7
Dienos conjugados (%)	1,33%	1,25%	103,4
Color (b-carotenos) (ppm)	306,70	300,22	101,9
Cont. Fósforo (ppm)	0,0	0,0	100,0
Cont. Hierro (ppm)	0,0	0,0	100,0
% masa extraída por solvente	---	----	24,14
% Masa perdida en el proceso de reactivación	---	----	47,95

De la tabla 6 se pudo inferir que cuando se utilizó tierra reactivada en proporción 100:1.25 se obtuvieron parámetros similares en comparación a cuando se utilizó tierra virgen en proporción 100:1. Quizá la principal desventaja del proceso propuesto es el aumento de mermas pasando de un 0.4% en masa de aceite cuando se usa proporción 100:1 a un 0.6% cuando se usa una proporción 100:1.25.

Si se compara el porcentaje de reactivación del 80% en comparación con lo obtenido con la literatura se puede ver que es menor en comparación con los trabajos realizados con tierras reactivadas para la refinación de aceite de maíz en donde se lograron porcentajes del 95% (Al Al-Zahrani y Daous, 2000), aceite de soya con un 85% (Folletto et al, 2002), y aceite de palma con extracción usando de vapor de agua con un 95% (Haro et al, 2014).

Una vez analizados todos los resultados hasta el momento se condensa la propuesta de mejora en un diagrama de proceso y balance de masa el cual se muestra en el anexo B. En el anexo A se muestra el diagrama de proceso y balance de masa del proceso actual. Como método de comparación se toma como metodología el análisis de ciclo de vida evaluando únicamente el proceso de blanqueo de ACP (Ver numeral 4.1.1.).

En comparación con lo encontrado en el estado del arte, la inclusión de una metodología de evaluación económica y ambiental es algo novedoso. Debido a que la implementación de mejoras de procesos industriales trae consigo impactos económicos, ambientales y de seguridad y salud, se deben realizar las evaluaciones respectivas de dichos impactos para tener una visión más global y tomar decisiones

más acertadas. El LCA se presenta como una herramienta importante para dichas evaluaciones, teniendo en cuenta la globalidad de su enfoque y el análisis basado en mediciones.

Según la metodología se debe establecer un objetivo para el LCA, su alcance y la unidad funcional. A continuación, se especifican los puntos del LCA mencionados anteriormente.

Objetivo del LCA: comparar en términos económicos y ambientales dos procesos de blanqueo. El primero el proceso actual de la compañía, el segundo el proceso propuesto incluyendo la reactivación de la tierra de blanqueo.

Alcance del LCA: Incluyó la etapa de Slurry (mezclado de Aceite con tierra), el paso por el tanque de blanqueo, el filtrado del aceite y la disposición de la tierra usada para ambos casos. En el proceso propuesto incluyó los procesos de reactivación. Dentro del análisis no se incluyó los efectos ambientales ni económicos relacionados con la mano de obra de la compañía.

Unidad de Análisis (Unidad Funcional): 54000 kg de ACP procesado.

Seguido al establecimiento del objetivo alcance y unidad funcional del LCA se procedió a realizar los diagramas de LCA tanto para el proceso actual como para el proceso propuesto. En la figura 4 se muestra el diagrama LCA del proceso actual.

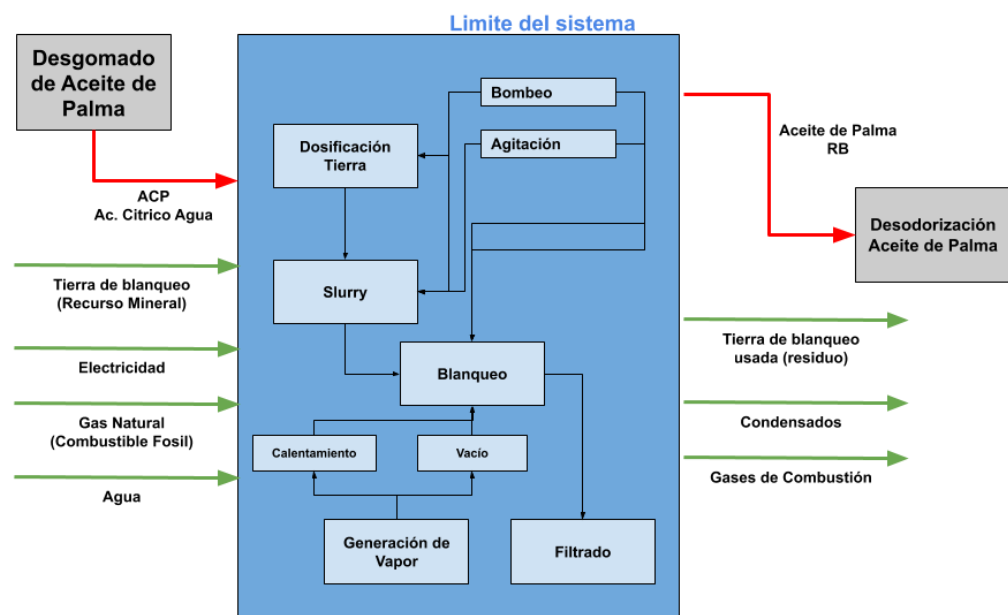


Figura 4. Diagrama de LCA para el proceso actual

Nota: Flechas rojas se relacionan al flujo de producto, y flechas verdes se relacionan a flujos elementales.

Un flujo elemental es definido como “Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente, o materia o energía que sale del sistema de estudio y que es liberado al medio ambiente” (ICONTEC, 2007). Partiendo de esta definición se puede indicar con claridad que las flechas verdes están intrínsecamente relacionadas con los impactos ambientales del proceso. Para el proceso actual (Ver figura 6) se pueden resumir en el uso de recursos minerales, energía eléctrica, quema de combustibles fósiles, aprovechamiento del recurso hídrico, generación de residuos sólidos, generación de condensados, generación de gases de combustión y actividades relacionadas con el transporte de materias e insumos.

En la figura 5 muestra el diagrama LCA para el proceso propuesto.

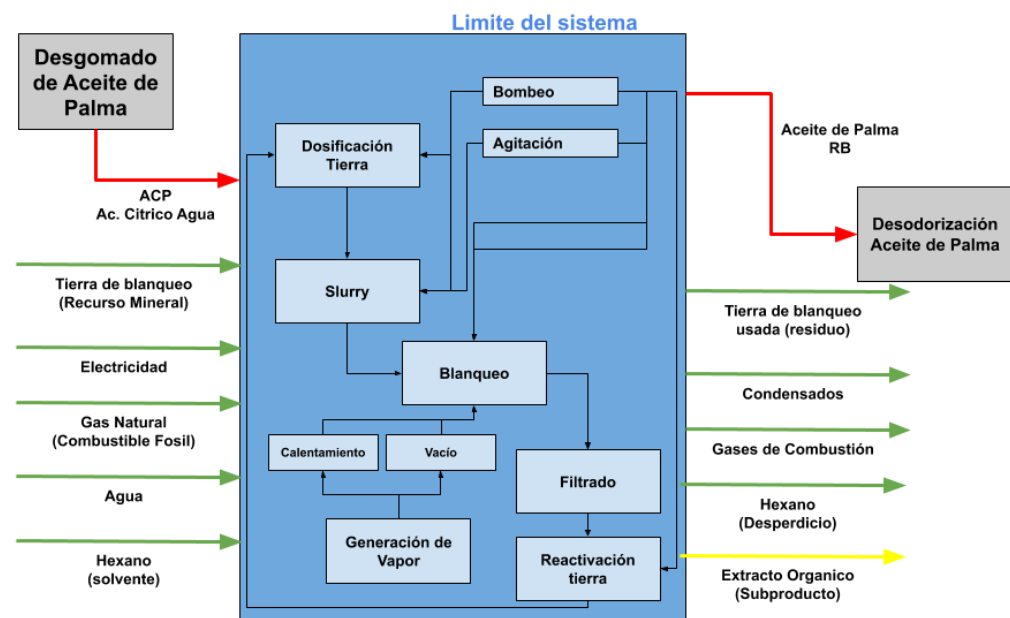


Figura 5. Diagrama de LCA para el proceso propuesto

Nota: Flechas rojas se relacionan al flujo de producto, flechas verdes a flujos elementales flechas amarillas a subproductos.

En el LCA del proceso propuesto aparece un nuevo tipo de flujo elemental que está relacionado al uso del solvente dentro del subproceso de reactivación de tierra. El uso del solvente trae consigo pérdidas dado que su porcentaje de recuperación no es de 100%. Además de esta diferencia, se tiene un nuevo ítem, la generación de un subproducto el cual es el extracto orgánico, el cual puede ser aprovechado por otro tipo de industria como por ejemplo como materia prima en la industria de jabones. Hechos los diagramas y clasificados los flujos se realiza el inventario de impactos. En la tabla 7 se muestra el resumen de inventario tanto para el proceso actual como para el proceso propuesto.

Tabla 7. Resumen de inventario de impactos más importantes del proceso actual y propuesto.

Impacto (Flujo elemental)	Proceso Actual	Proceso Propuesto
Uso recurso Mineral (tierra blanqueo)	540 kg	300 kg
Uso Energía Eléctrica	128,4 Kw-h	185,7 Kw-h
Uso de Combustible Fósil (Gas Natural)	109 m ³	179 m ³
Consumo de Agua	1,46 m ³	9,90 m ³
Desechos no aprovechables (Tierra usada)	856 kg	491 kg
Consumo de Solvente (Hexano)	----	187 L
Extracto Orgánico (Subproducto aprovechable)	----	114 Kg

Una de las posibles mejoras al proceso propuesto se encuentra en el manejo de agua. Actualmente la refinería no cuenta con un sistema de recuperación de condensados y por ende en el proceso propuesto no se tuvo en cuenta sistema alguno para recuperar agua. Cómo se ve en la tabla 7, este ítem es el que presenta mayor diferencia entre los procesos actualizados. Como una posible mejora se puede trabajar una propuesta de recuperación de agua para la etapa de extracción con solvente.

El siguiente paso del análisis de ciclo de vida es la cuantificación y evaluación. La norma estandarizada del análisis de ciclo de vida tiene en cuenta tres áreas de protección ambiental: Salud humana, Recursos y Calidad del ecosistema (ICONTEC, 2007). La mayoría de softwares especializados agrupan los impactos en estas áreas de protección, por lo tanto, su cuantificación está alineada a lo dicho en la norma.

A través del módulo de comparación de SIMAPRO ® se pudo comparar los dos procesos de blanqueo con base en los resultados del EcoIndicador 99, cuyos resultados se muestran en la figura 8.

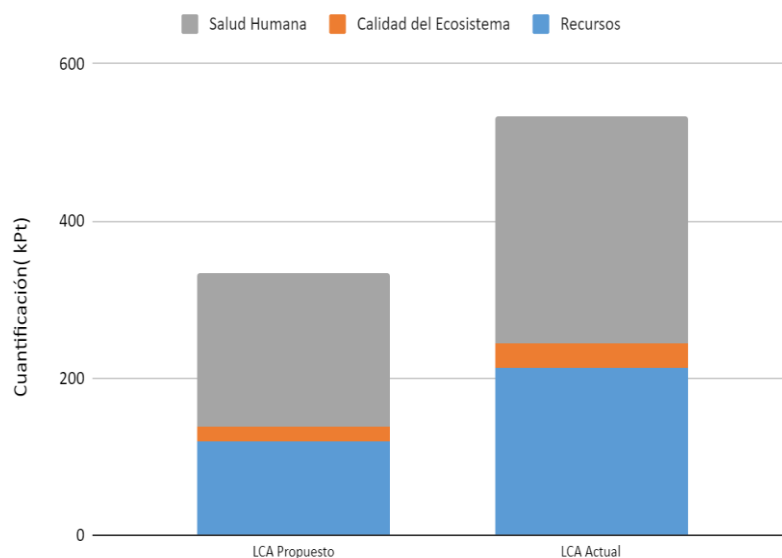


Figura 6. Cuantificación de impactos ambientales evaluados según EcoIndicador 99. Escenarios simulados en SIMAPRO ®.

Como se ve en la figura 6, se aprecia una reducción entre el escenario actual y el escenario propuesto. Para el escenario actual el software asigna una calificación de 532 kPt y para el proceso propuesto el software asigna una calificación de 340 kPt, es decir una reducción del impacto ambiental de alrededor del 36%. En ambos casos los impactos a la salud humana representan alrededor de un 55% del impacto total del proceso, seguido por la utilización de recursos y la calidad del ecosistema.

Con los valores de la tabla 7 se calcularon los costos de producción directos relacionados tanto al proceso actual como al proceso propuesto. Según los cálculos hechos, los costos de producción para el proceso actual ascienden a \$21,88 por kg de aceite blanqueado, mientras que con el proceso propuesto se obtuvo un costo de producción de \$18,95 por kg de aceite blanqueado. En porcentaje, si se implementara el proceso propuesto se reducirían los costos de producción en un 13,4%. En la figura 7 se muestra la distribución de los costos directos de producción, tanto en el escenario actual como en el escenario propuesto.

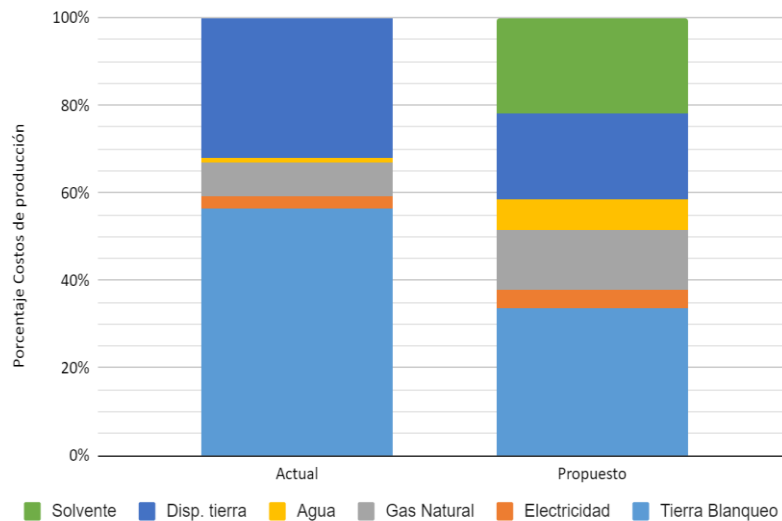


Figura 7. Distribución de los costos directos de producción para el proceso actual y para el proceso propuesto.

Como se aprecia en la figura 9 alrededor del 57% de los costos directos de producción están asociados a la compra de la tierra. Si se suman junto con los costos de disposición de la tierra se llega a 88%. Por ende, una forma de mejorar el proceso desde el punto de vista económico es bajar este rubro, algo que se pensó desde el principio de este proyecto de tesis. En el proceso propuesto, los costos asociados a la compra de tierra de blanqueo disminuyen hasta un 34% aproximadamente, y si se suman con los costos de disposición de la tierra disminuye hasta un 55%. En contra de esto, el costo asociado al Gas Natural aumentó hasta representar el 14% del total. Otro rubro importante es el costo por la reposición del hexano perdido en la extracción con solvente, que llega a representar aproximadamente un 22% del total. Por ende, es de especial cuidado el control de las condiciones de extracción para evitar que el solvente se pierda y de esta manera aumentar el rubro relacionado.

Concluyendo, el proyecto desde el punto de vista del aprovechamiento económico de recursos se presenta como una buena alternativa debido a la reducción de los costos directos de producción en más de un 6%.

Otro de los factores a evaluar es el retorno de la inversión. Para evaluar este ítem se tomó como indicador el tiempo de retorno de inversión basado en las cotizaciones directas hechas a las empresas constructoras y distribuidoras de la tecnología necesaria. En el caso del horno rotatorio, el valor según cotización es de USD 150.000 y en el caso de la planta de extracción con solventes el valor cotizado es de USD 27.500. Al comprar la maquinaria en dólares se realizó un estudio de sensibilidad de acuerdo al valor de la tasa cambiaria debido a la volatilidad de la

misma en el último lapso. En la figura 10 se muestra la relación entre la Tasa Representativa del mercado (TRM) y el tiempo estimado de retorno de la inversión.

El promedio en la tasa representativa de retorno del mes de septiembre de 2019 fue 3397 pesos por dólar. A estas condiciones cambiarias el tiempo de retorno de la inversión se estima en 4 años y 11 meses (Ver figura 10). A principios del año 2019, el promedio de la tasa de cambio en el mes de enero fue de 3033 pesos lo que se traducía en un tiempo de retorno de la inversión de 53 meses, medio año menos que en el escenario actual. Dicho esto, se demuestra que el tiempo de retorno en la inversión está fuertemente relacionado con la actualidad cambiaria que en el año 2019 ha sido volátil (Colprensa, 2019).

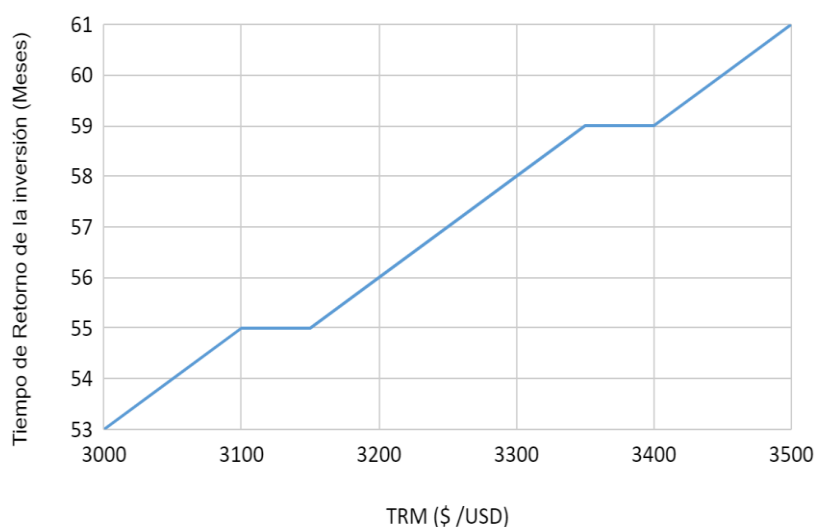


Figura 8. Tiempo de retorno de la inversión y su relación con la tasa interna de retorno (TRM).

6. CONCLUSIONES Y NUEVAS PERSPECTIVAS.

A través del desarrollo de la tesis y de la discusión de resultados se pudo concluir que:

- ✓ Se encontró que para el método propuesto de reactivación de tierras de blanqueo procedentes de la refinación de ACP el solvente con el que se logró mejores resultados fue n-hexano y las condiciones de calcinación que optimizaron la remoción de la tierra reactivada fueron 500°C y 120 min. A estas condiciones la tierra de blanqueo alcanzó un porcentaje de reactivación mínimo del 80% en comparación con el desempeño de la tierra virgen.
- ✓ Desde el punto de vista técnico se comprobó que las tierras reactivadas en más de una ocasión presentan bajos porcentajes de remoción de compuestos

oxidativos. Debido a que el valor de peróxidos es un parámetro de control de alta criticidad, se descarta reactivar dos o más veces la tierra de blanqueo.

✓ A través del uso del análisis de ciclo de vida se concluyó que el proceso propuesto puede presentar mejoras, desde el punto de vista económico reduciendo los costos de producción en un 6,3% y desde el punto de vista ambiental reduciendo el impacto ambiental del proceso de blanqueo hasta en un 38%.

✓ Se determinó que uno de los riesgos a tener en cuenta en la realización del proyecto es la volatilidad cambiaría de los últimos años en Colombia. Por este fenómeno el tiempo de retorno de la inversión del proyecto pasó de 4 años y 5 meses en enero del presente año a 4 años y 11 meses con las condiciones cambiarias actuales.

El proyecto también abre nuevos interrogantes complementarios a lo encontrado a lo largo de su desarrollo. El primero se relaciona con las etapas de viabilidad económica, especialmente en la compra y puesta en marcha de los equipos de extracción con solventes y calcinación. En el estudio económico se debe incluir la logística de importación, tasas arancelarias y los riesgos asociados a la compra de maquinaria extranjera.

También se pueden realizar alianzas con empresas del sector de extracción de aceites que tienen conocimientos en el manejo de plantas de extracción con solventes, o la industria extractiva de minerales, especialmente la industria cementera dado que poseen tecnología de calcinación cercana a lo necesitado.

Dicho esto, y en concordancia con la conclusión más importante se podría realizar una búsqueda dentro de la industria nacional para realizar el proceso de reactivación de tierra a escalas mayores al laboratorio. Así se analizarán las posibles desviaciones y problemas que se presentan con el aumento de escala de producción.

En el desarrollo posterior del proyecto se puede evaluar las distintas formas de recuperación de agua e integración energética, en especial las mejoras que se puedan hacer en la etapa de recuperación del solvente. De esta manera se pueden obtener mejores resultados en los indicadores ambientales del proceso propuesto, en especial en el uso del recurso hídrico.

Por último, y como recomendación relacionada a la metodología usada se plantea el uso del análisis de ciclo de vida como una herramienta en para el análisis y mejoramiento de los procesos actuales de la compañía. El análisis del ciclo de vida permitió evaluar el proceso desde un punto de vista global incluyendo los impactos asociados a la fabricación/extracción de materias primas, los impactos de los procesos y llegar a la disposición final.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd Wafti, N. S., Yoo, C. K., Lin, S. W., Yaw, T. C. S., & Abdullah, L. C. (2011). Regeneration and Characterization of Spent Bleaching Clay. *Journal of Oil Palm Research*, 23(April), 999-1004.
- Al-Zahrani, A. A., & Daous, M. A. (2000). Recycling of spent bleaching clay and oil recovery. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(3), 224-228.
- American Oil Chemists' Society, AOCS (2017a). Official Method Cd7 -58 for the determination of Polyunsaturated Acids. Ultraviolet Spectrophotometric method. *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS. Séptima Edición.*
- American Oil Chemists' Society, AOCS (2017b). Official Method Ca 15 -75 Analyses for Chromium, Copper, Iron, and Nickel in Vegetable Oils by Atomic Absorption Spectrophotometry. *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS. Séptima Edición.*
- Asociación Malaya de Refinerías de Aceite de Palma. (1992). Aceite crudo de palma. Requisitos de calidad para obtener buenos productos refinados. *Revista Palmas*, 13(3), 69-77.
- Babaki, H., Salem, A. and Jafarizad, A. (2008). Kinetic model for the isothermal activation of bentonite by sulfuric acid. *Materials Chemistry and Physics*, 108(2-3), pp.263-268.
- Boukerroui, A., & Ouali, M. S. (2000). Regeneration of a spent bleaching earth and its reuse in the refining of an edible oil. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 75(9), 773-776.
- Brooks, D. D., Berbesi, R., & Hodgson, A. (2015). *Optimization of Bleaching Process*. New York, EEUU. AOCS. Recuperado a partir de <http://lipidlibrary.aocs.org/OilsFats/content.cfm?ItemNumber=40321>
- Cmolik, J., Pokorny, J. (2000). Physical refining of edible oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(7), 472-486.
- Colprensa (11 de agosto de 2019). *Dólar en \$3.400 ¿qué viene para Colombia en el futuro? El colombiano.* Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/negocios/economia/dolar-en-3400-que-viene-para-colombia-en-el-futuro-IK11391584>
- Corvetto, F. (2015). *Conceptos básicos y optimización del proceso de Blanqueo*. Buenos Aires, Argentina. Oil Dri Corp. Recuperado a partir de

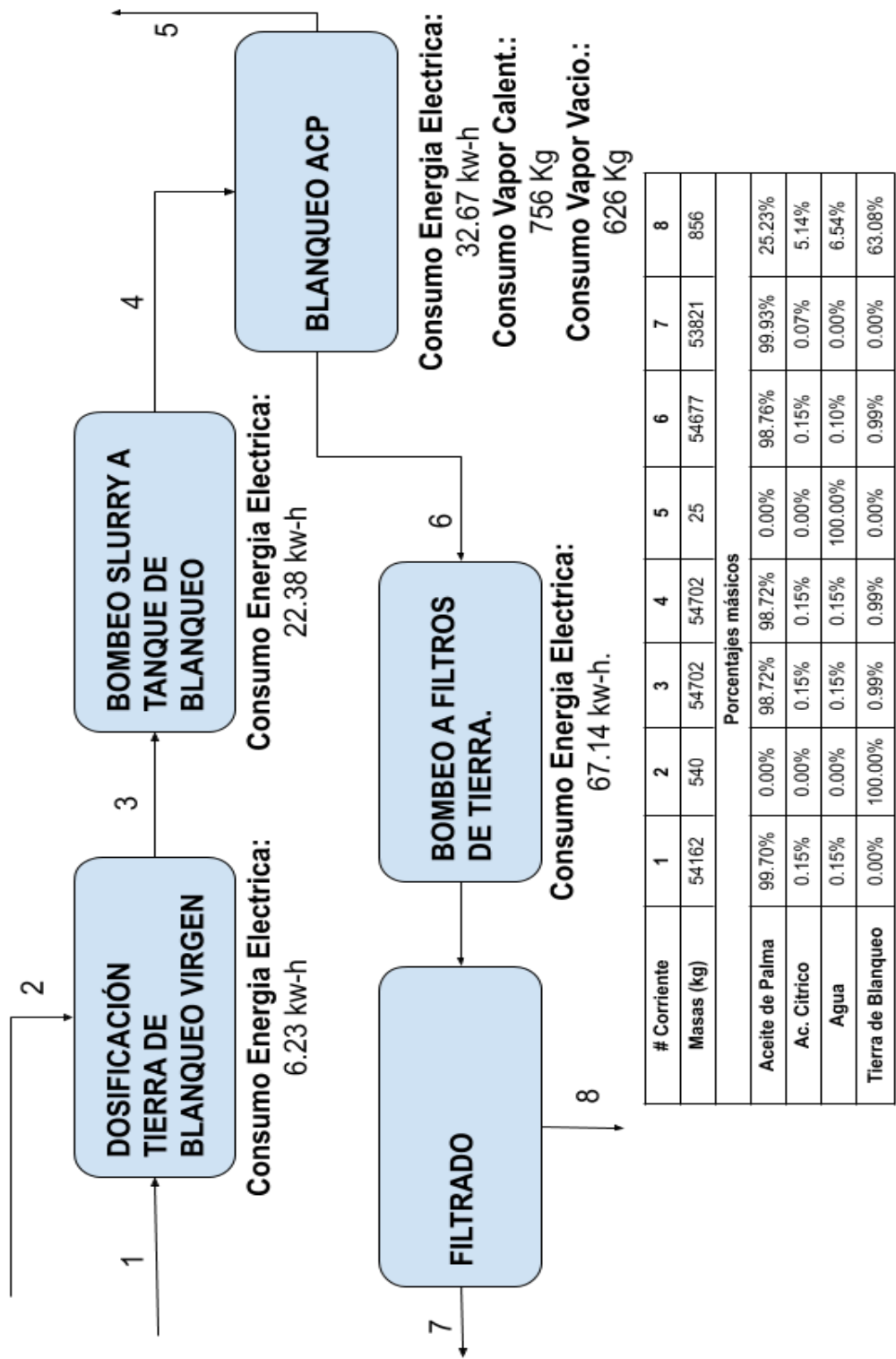
http://asaga.org.ar/descargas/material/CURSO_REFINACION/REF3_Corvetto.pdf

- De Oliveira, M., Arruda, C., Ogliari, P., Meinert, E., Teixeira, E., Barrera-Arellano, D., & Block, J. M. (2005). Efecto de la adición del absorbedor UV (Tinuvín 234) sobre la calidad del aceite de soja en envases de polietileno tereftalato (PET). *Grasas y Aceites*, 56(4), 245-253.
- European Palm Oil Alliance. (2016). *El Consumo De Aceite De Palma*. Recuperado a partir de <http://www.palmoilandfood.eu/es/el-consumo-de-aceite-de-palma>.
- Falaras, P., Lezou, F., Pomonis, P. and Ladavos, A. (2000). Al-pillared acid-activated montmorillonite modified electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 486(2), pp.156-165.
- Foletto, E. L., Alves, C. C. A., Sganzerla, L. R., & Porto, L. M. (2002). Regeneration and utilization of spent bleaching clay. *Latin American Applied Research*, 32(2), 205-208.
- Gregg, S.J., Sing, K.S.W. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity, 2, *Academic press*, London.
- Haro, C., De la Torre., Aragón, C., Guevara, A. (2014). Regeneración de Arcillas de Blanqueo Empleadas en la Decoloración de Aceites Vegetales Comestibles. *Revista EPN Politécnica*, 34(1)
- Housin, F., Aroua, M., Daud, W. (2011). Textural characteristics, surface chemistry and activation of bleaching earth: A review. *Chemical Engineering Journal*, 170 (1), 90-106.
- Ilic, B., Mitrovic, A. Milicic, L. (2010). Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijaska industrija*, 64(4), pp.351-356.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2006). *Norma NTC 4790: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de fósforo. Primera Actualización*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2007). *Norma NTC-ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida, Principios y Marco de Referencia. Segunda Actualización*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2011). *Norma NTC 236: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de peróxido. Segunda Actualización*.

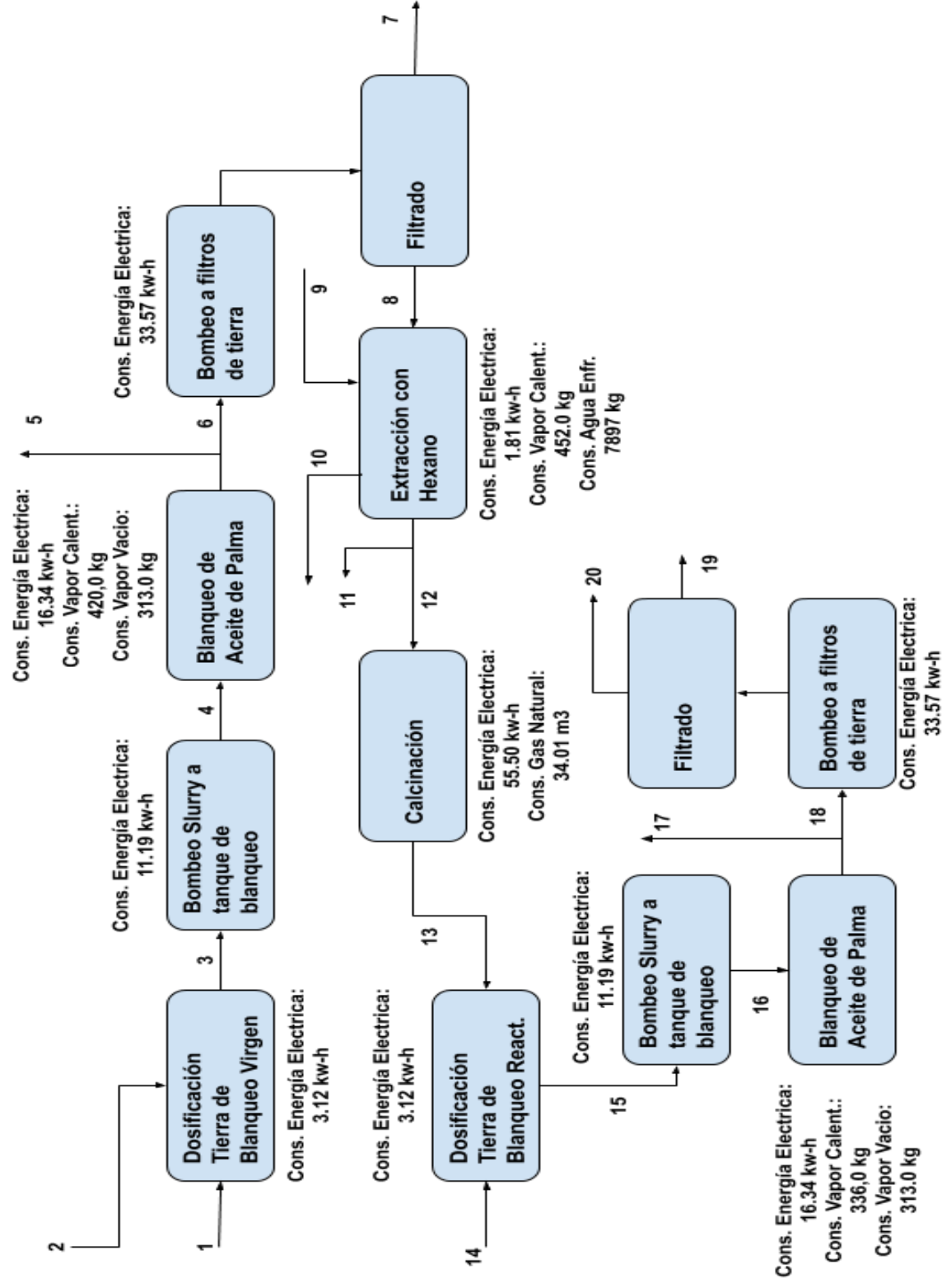
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2014). *Norma NTC 4197: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de anisidina. Cuarta Actualización.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2017). *Norma NTC 431: Grasas y aceites vegetales y animales. Aceite Crudo de Palma Africana. Segunda Actualización.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2018). *Norma NTC 6261: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación de ácidos grasos en aceites y grasas comestibles mediante cromatografía Gas-Líquido. Primera Edición.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC (2019). *Norma NTC 335: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de Saponificación. Segunda Actualización.*
- Kheoh, S. (1987). Reino Unido. *Patente N° GB2189233A*. Londres. Intellectual Property Office.
- Lin, S.W., Yoo, C.K. (2007). Adsorption isotherms for removal of iron, copper, phosphorus and oxidation products from crude palm oil using natural and acid-activated clays, *Journal of Oil Palm Research*. 19 356–363.
- Lomic, G., Kis, E., Dimic, E. and Romanic, R. (2004). Investigation of activated Al-pillared clay efficiency in vegetable oil purification. *Acta periodica technologica*, (35), pp.31-36.
- Matocha, C.J. (2016). Clay: charge properties, En R. Lal (Ed.): *Encyclopedia of Soil Science*, Boca Raton, EEUU. CRC Press
- Mba, O. I., Dumont, M.-J., & Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – A review. *Food Bioscience*, 10, 26-41.
- Ministerio de la Protección Social (2012). *Resolución 2154 de 2012 por la cual se establece el reglamento técnico sobre 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*. Bogotá, Colombia, Ministerio de la Protección Social de Colombia.
- Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands. (2000). Eco-indicador 99. Manual for Designers. *A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. Recuperado de https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf

- Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments. 8th Edition*. New Jersey. EEUU. John Wiley and Sons, Inc.
- Nock, A. (2010). *Silica Hydrogel and its Use in Edible Oil Processing*. Joliet, IL, EEUU. AOCS. Recuperado a partir de <http://lipidlibrary.aocs.org/OilsFats/content.cfm?ItemNumber=40336>
- Norris, F.A. (1985). Deodorization. En T.H. Applewhite (Ed.) *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, primera edición. New York, EE.UU. Jhon Wiley and Sons.
- Ooi, C. K., Choo, Y. M., Yap, S. C., & Ma, A. N. (1996). Refining of red palm oil. *Journal of Oil Palm Research*, 8(1), 18-20.
- PRé Sustainability (2019). *SIMAPRO*. Amersfoort, Países Bajos. PRé Consultants. Recuperado de <https://simapro.com/>
- Ruíz-Méndez, M. V., Dobarganes, M. C. (2011). Oil Refining. *En AOCS Lipid Library* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.21748/lipidlibrary.39212>
- Sarikaya, Y., Önal, M., Baran, B., Alemdaroglu, T., (2000). The effect of thermal treatment on some of the physicochemical properties of a Bentonite. *Clays and Clay Minerals*. 48 (5) 557–562
- Schoonheydt, R.A., Johnston, C.T. (2006) Developments in clay science: handbook of clay science, En: R.A. Schoonheydt, C.T. Johnston (Eds.), *Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals*, 1, Elsevier, Oxford, 2006, p. 87
- Silva, S. M., Sampaio, K. A., Ceriani, R., Verhé, R., Stevens, C., De Greyt, W., & Meirelles, A. J. A. (2014). Effect of type of bleaching earth on the final color of refined palm oil. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2P2), 1258-1264

ANEXO A. DIAGRAMA DE PROCESO Y FLUJO MÁSSICO DEL PROCESO ACTUAL DE BLANQUEO.



ANEXO B. DIAGRAMA DE PROCESO Y FLUJO MÁSICO DEL PROCESO DE BLANQUEO.



#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa (Kg)	30090	300	30390	30390	13.89	30376.11	29900	476.11	124.7	124.7
Porcentajes máxicos										
Aceite de Palma	99,70%	0,00%	98,72%	98,72%	0,00%	98,76%	99,93%	25,20%	0,00%	0,00%
Ac. Cítrico	0,15%	0,00%	0,15%	0,15%	0,00%	0,15%	0,07%	5,25%	0,00%	0,00%
Agua	0,15%	0,00%	0,15%	0,15%	100,00 %	0,10%	0,00%	6,53%	0,00%	0,00%
Tierra de blanqueo	0,00%	100,00 %	0,99%	0,99%	0,00%	0,99%	0,00%	63,01%	0,00%	0,00%
Hexano	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00 %	100,00 %
#	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Masa (Kg)	114	362,11	300	24072	24372	24372	14	24358	23866	492
Porcentajes máxicos										
Aceite de Palma	100,00 %	1,66%	0,00%	99,70%	98,47%	98,47%	0,00%	98,53%	99,93%	30,49%
Ac. Cítrico	0,00%	6,90%	0,00%	0,15%	0,15%	0,15%	0,00%	0,15%	0,07%	4,07%
Agua	0,00%	8,59%	0,00%	0,15%	0,15%	0,15%	100,00 %	0,09%	0,00%	4,47%
Tierra de blanqueo	0,00%	82,85%	100,00 %	0,00%	1,23%	1,23%	0,00%	1,23%	0,00%	60,98%
Hexano	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%