

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Propuesta de un sistema para el tratamiento de aceites vegetales desechados  
para su posterior reutilización

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Kevin Wilson Calle Morejón

Elías Fabián Chávez Guerrero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año 2021

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a Dios por darme salud y fortaleza para seguir adelante.

A mi familia, especialmente a mi madre por brindarme su constante apoyo y motivación para alcanzar mis metas, así también como a mis abuelos y mi tío por estar junto a mí en todo momento.

**Kevin Calle**

El presente proyecto va dedicado a Dios todopoderoso por encaminarme en la senda del bien y del saber durante mi vida y carrera profesional.

A mi familia por su amor y contante apoyo en los momentos que más los necesitaba durante mi vida y formación profesional.

**Elías Chávez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido con Dios por dotarnos de fuerza para lograr con la finalización de una de las etapas más importantes de nuestra vida, la carrera universitaria.

A nuestras familias por apoyarnos de forma incondicional.

Al tutor Ph. D. César Moreira quien con sus conocimientos ayudó con el desarrollo de este proyecto.

**Elías Chávez y Kevin Calle**

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kevin Wilson Calle Morejón* y *Elías Fabián Chávez Guerrero* damos nuestro consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Kevin Wilson Calle Morejón



---

Elías Fabián Chávez Guerrero

# EVALUADORES

---

**MSc. Nadia Flores**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Ph. D. César Moreira**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El aceite vegetal es considerado un producto de consumo masivo utilizado en la preparación de varios alimentos, principalmente frituras, donde una inadecuada gestión de aceites vegetales usados (AVU) genera daños al medio ambiente como por ejemplo 1 litro de este residuo puede contaminar 10000 litros de agua. Por ende, en este trabajo tiene como objetivo la propuesta de un sistema de recuperación AVU caracterizando mediante métodos físicos y químicos. Este proyecto se dividió en 4 etapas: La primera etapa consistió en la caracterización de AVU considerando los siguientes parámetros: acidez, turbidez, viscosidad cinemática, sólidos suspendidos, contenido de humedad, poder calorífico, densidad y pH. Se procedió con la segunda etapa la cual fue el tratamiento de AVU mediante procesos de filtración, desgomado, neutralización, decantación, centrifugación, lavado, calentamiento y decoloración. Posteriormente en la tercera etapa se procedió a caracterizar el aceite tratado verificando que cumplan con normativas para su reutilización. En la última etapa consistió en la propuesta a escala piloto a partir del proceso de recuperación a nivel de laboratorio y se realizó el análisis económico mediante el uso de la herramienta CAPCOST para saber si es factible económicamente. El resultado de este proceso de recuperación a nivel de laboratorio fue un AVU libres de sólidos, inoloro, con una baja acidez y con una turbidez baja. Por último, se concluye mediante análisis económico los valores de VAN y TIR fueron \$5160000 y 47.80% respectivamente lo que nos indica que el proyecto es rentable y genera ganancias a la empresa.

**Palabras claves:** Aceite vegetal usado, caracterización, tratamiento, planta piloto, análisis económico

## **ABSTRACT**

*Vegetable oil is considered a product of mass consumption used in the preparation of several foods, mainly fried foods, where an inadequate management of used vegetable oils (UVO) generates damage to the environment such as 1 liter of this waste can contaminate 10000 liters of water. Therefore, in this work he aims to propose an UVO recovery system characterized by physical and chemical methods. This project was divided into 4 stages: The first stage consisted of the characterization of UVO considering the following parameters: acidity, turbidity, kinematic viscosity, suspended solids, moisture content, calorific value, density and pH. We proceeded with the second stage which was the treatment of UVO through filtration, degumming, neutralization, decantation, centrifugation, washing, heating and discoloration processes. Later in the third stage, the treated oil was characterized, verifying that they comply with regulations for reuse. In the last stage it consisted of the proposal on a pilot scale from the recovery process at the laboratory level and the economic analysis was carried out through the use of the CAPCOST tool to know if it is economically feasible. The result of this recovery process at the laboratory level was a solid-free, odorless, low acidity and low turbidity UVO. Finally, it is concluded through economic analysis the values of NPV and IRR were \$ 5160000 and 47.80% respectively which indicates that the project is profitable and generates profits to the company.*

*Keywords: Used vegetable oil, characterization, treatment, pilot plant, economic analysis.*

## ABREVIATURAS

AVU	Aceites vegetales usados
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American Petroleum Institute
BCE	Banco Central del Ecuador
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EN	European Norm
FOB	Free on Board
HHV	Higher heating value
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
IRR	Internal rate of return
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
ISO	International Organization for Standardization
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
NPV	Net present value
NTC	Norma Técnica Colombiana
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
M	Peso molecular de ácido oleico
PFD	Process Flow Diagram
RPM	Revoluciones por minuto
RUC	Registro Único de Contribuyentes
SRI	Servicio de Rentas Internas



TIR	Tasa interna de retorno
ton	Tonelada
USD	United States Dollar
UVO	Used vegetable oil
VAB	Valor agregado bruto
VAN	Valor actual neto

## SIMBOLOGÍA

$\text{NaHCO}_3$	Bicarbonato de sodio
Ca	Calcio
C	Carbono
cSt	centiStokes
SS	Contenido de sólidos suspendidos
$\rho_{\text{muestra}}$	Densidad de la muestra
$\rho_{\text{referencia}}$	Densidad de sustancia referencia
°C	Grados Celsius
g	Gramo
$Sg_{\text{muestra}}$	Gravedad específica de muestra
KOH	Hidróxido de potasio
NaOH	Hidróxido de sodio
kg	Kilogramo
L	Litro
max.	Máximo
Mg	Magnesio

$m_{\text{muestra}}$	Masa de muestra de aceite vegetal usado
$m_0$	Masa de vaso de precipitado seco y vacío
$m_1$	Masa de vaso de precipitado con la muestra de aceite vegetal usado antes del calentamiento
$m_2$	Masa de vaso de precipitado con la muestra de aceite vegetal usado después del calentamiento
MJ	Mega Joule
mg	Miligramo
mL	Mililitros
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
min.	Mínimo
N	Normalidad
$N_{\text{KOH}}$	Normalidad de hidróxido de potasio
N.º	Número
O <sub>2</sub>	Oxígeno
P	Pérdida por calentamiento
M	Peso molecular de ácido oleico
$PM_{\text{KOH}}$	Peso molecular de hidróxido de potasio
% m/m	Porcentaje masa/masa
% v/v	Porcentaje volumen/volumen
pH	Potencial de Hidrógeno
s	Segundo
$V_{\text{consumido}}$	Volumen consumido de hidróxido de potasio
$V_{\text{sólidos}}$	Volumen de sólidos recolectado

$V_{muestra}$       Volumen de muestra

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Cambios físico y químicos de aceite durante proceso de fritura .....	7
Figura 2. 1 Diagrama de experimentación del proyecto .....	12
Figura 3. 1 Diagrama de bloques para proceso de recuperación de aceites de restaurantes a nivel de laboratorio .....	25
Figura 3. 2 Diagrama de bloques para proceso de recuperación de aceite de domicilios a nivel de laboratorio .....	26
Figura 3. 3 Diagrama PFD a escala piloto para recuperación de AVU.....	29
Figura 3. 4 Diagrama de flujo caja de planta piloto para un tiempo de vida de 12 años .....	30
Figura 3. 5 Análisis económico (VAR, TIR, período de recuperación) .....	<b>¡Error!</b>

**Marcador no definido.**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Ácidos grasos de los aceites .....	3
Tabla 1. 2 Propiedades de aceites vegetales usados .....	7
Tabla 2. 1 Normas empleadas para la caracterización de aceite vegetal usado .....	11
Tabla 2. 2 Factores para convertir en cSt los segundos obtenidos en los viscosímetros CANNON - FENSKE .....	19
Tabla 3. 1 Caracterización de aceite vegetal usado .....	23
Tabla 3. 2 Caracterización de aceite vegetal usado considerando la humedad	23
Tabla 3. 3 Caracterización de aceites vegetales usados de domicilios .....	23
Tabla 3. 4 Caracterización de aceites vegetales usados de restaurantes.....	24
Tabla 3. 5 Rendimientos obtenidos en cada proceso de recuperación a escala laboratorio .....	26
Tabla 3. 6 Rendimiento global en recuperación de aceite a nivel de laboratorio .....	27
Tabla 3. 7 Caracterización de aceite vegetal usado aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio .....	27
Tabla 3. 8 Caracterización de aceite vegetal usado de domicilios aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio.....	27
Tabla 3. 9 Caracterización de aceite vegetal usado de restaurantes aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio.....	28
Tabla 3. 10 Costo de equipamiento de la planta piloto de recuperación de AVU .....	30
Tabla 3. 11 Análisis económico.....	30



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

El uso continuo y masivo de aceite vegetal para la elaboración de alimentos como frituras por parte de industrias alimenticias y restaurantes ha ocasionado problemas en su disposición final, sin embargo, en la elaboración de este tipo de alimentos no existe un control y una gestión adecuada que regule la reutilización de aceites vegetales de forma responsable, y no como lo han venido haciendo de forma irresponsable el cual es un atentado contra la salud a las personas que ingieren dichos alimentos. Se conoce que el Ecuador no cuenta con un proceso de tratamiento definido para la recuperación de aceite vegetal usado (AVU), lo cual niega la oportunidad para la introducción de dicho aceite tratado de nuevo como materia prima para la elaboración de un nuevo producto. De modo que se propone un proceso a escala piloto para el tratamiento de AVU.

### 1.2 Justificación del problema

El proceso de desecho de AVU es considerado como uno de los causantes de problemas hacia el medio ambiente puesto que existen casos donde es arrojado hacia el sistema de alcantarillado público produciendo graves problemas hacia fuentes de agua (Katre et al., 2018), 1 litro de este residuo puede contaminar 10000 litros de agua (Restrepo, 2012).

Este trabajo consiste en la propuesta de un proceso que permita recuperar y tratar el aceite vegetal usado proveniente de elaboración de alimentos, con el fin de evitar la contaminación de cuerpos de agua. El producto final de este proceso es un aceite vegetal tratado que se puede dar un nuevo uso como ejemplo en la elaboración de jabones, resinas, velas, también se lo puede utilizar como reactivo para la elaboración de biocombustibles como es en el caso de biodiesel.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Proponer un sistema para la recuperación de aceite vegetal usado utilizando métodos físicos y químicos que permitan su reutilización en la industria de biodiesel.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- 1) Caracterizar el aceite proveniente de actividades destinadas a la preparación de comida rápida en la ciudad de Guayaquil.
- 2) Comparar los parámetros obtenidos antes y después del tratamiento del aceite vegetal para su posterior aplicación en el mercado europeo como materia prima en la producción de biodiesel.
- 3) Analizar las ventajas ambientales y económicas que conlleva la reutilización de aceite vegetal usado como materia prima en la producción de otro producto
- 4) Aplicar métodos de recuperación de nivel laboratorio de aceites vegetales usados a través de revisión bibliográfica para la propuesta de un proceso en un piloto industrial.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Aceite vegetal**

Los aceites que son adquiridos por plantas y animales son destinados comúnmente al consumo humano como también materia para la elaboración o subproducto de derivados (Nielsen, 2003). Entre la variedad de aceites que se producen están los de palma, soja, colza, girasol, almendra de palma, algodón, maní, maíz, oliva, coco y sésamo; además, cabe aclarar que los aceites de palma y de soja abarcan el 60% del total de la producción mundial de aceites vegetales (Sánchez, 2018).

### 1.4.2 Composición de aceite vegetal

El aceite es una materia de origen vegetal para este caso los componentes principales para el aceite son los ácidos grasos a los que se le debe la acidez del producto (León & Domínguez, 2015).

El aceite se lo considera como una grasa en estado líquido a temperatura ambiente por tal motivo se da a entender que los aceites y grasas tienen composiciones muy semejantes entre ellos (IUPAC, 1987).

**Tabla 1. 1 Ácidos grasos de los aceites (Valenzuela & Morgado, 2005)**

Ácido graso	N.º de C	Enlaces dobles	Estructura
Láurico	12	-	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$ (coco y semillas de palma)
Mirístico	14	-	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$ (nuez moscada, coco y semillas de palma)
Palmítico (s)	16	-	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$ (animales, casi todos los aceites vegetales)
Estearico (s)	18	-	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$ (animales, cacao y casi todos los aceites vegetales)
Araquidónico	20	-	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{18}-\text{COOH}$ (cacahuete)
Palmitoleico	16	1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_5-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ (animales y vegetales)
Oleico	18	1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ (aceituna y almendra)
Linoleico	18	2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ (aceituna, girasol, soja)
Linolénico	18	3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ (lino)
Araquidónico	20	4	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-(\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_3-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_3-\text{COOH}$ (vegetales)
Erúxico	22	1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_{11}\text{COOH}$ (colza, uva)



### 1.4.3 Características fisicoquímicas de aceite vegetal

- **Índice de acidez**

El índice de acidez es la cantidad de KOH (mg) que se necesitarán para neutralizar todos los ácidos grasos libres que se encuentren en el aceite (Nielsen, 2003).

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad en un aceite nos proporciona un índice de estabilidad a la hora de utilizar el aceite ya que esta humedad podría interferir en algunos procesos. Un método muy concurrente para hallar la humedad de aceite es analíticamente a través de la pérdida de peso mediante el método de secado de una estufa, en el cual se pone el aceite en la estufa a una temperatura de 105 °C el cual se evapora el agua presente en el aceite posteriormente se lo pesa y el cambio de peso al inicio y después del horno es la humedad que estaba presente en el aceite (Czyhrinciw et al., 1966).

- **Sólidos suspendidos**

Los sólidos suspendidos son identificados como pequeñas partículas que se encuentra en el aceite, estos sólidos suspendidos son los principales responsables de la turbiedad en el aceite, una de las formas de eliminar estos sólidos es por medio de filtración. Por otro lado, el método que se aplica comúnmente para determinar el porcentaje de solidos suspendidos que se encuentra en el aceite es mediante una centrifuga a una velocidad de 1000 RPM en un periodo de 20 minutos en el cual se queda en el fondo de los tubos de la centrifuga los sólidos que se encuentra en la muestra y se procede a pesar dicho tubo con los sólidos y se determina por medio de la siguiente ecuación (Garcés, 1966):

$$\% \text{ sólidos suspendidos} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (1.1)$$

En donde:

M<sub>1</sub> es la masa de la muestra inicial en gramos,

M<sub>2</sub> es la masa de la muestra final en gramos

- **Poder calorífico**

Es la cantidad energía el cual se libera en el caso de quemar a una temperatura dada hasta que alcance o esté cerca de su punto de ebullición de la muestra (Jones & Peterson, 2002).

- **Viscosidad**

Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción interna en aceites y grasas. Es una propiedad asociada con la estructura molecular del triacilglicerol y los ácidos grasos que lo componen (Bockisch, 1998). La determinación de la viscosidad se realiza mediante la medición del tiempo en que un volumen de aceite fluye bajo efecto de la gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio (Freedman et al., 2003).

#### **1.4.4 Datos acerca de producción y consumo de aceite vegetal**

La producción de aceite de origen vegetal es una industria que actualmente viene desarrollándose de manera creciente en el Ecuador. Actualmente las cifras que manejan el Banco Central del Ecuador (BCE) da a conocer sobre un crecimiento a través de los años dando como resultado que las industrias de aceites se encuentren en el puesto 42 de las 47 industrias a nivel nacional. Con un ingreso o aporte de \$362.8 millones de dólares en 2018. Cabe mencionar que en 2018 el 98.9% de VAB (valor agregado bruto) de esta industria lo generan las provincias de Manabí, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas y Los Ríos. Ecuador exportó \$162,2 millones de dólares FOB (Free on Board) de extractos y aceites vegetales durante el 2019 (0.7% del total de exportaciones), lo que equivale a 221000 toneladas métricas (Cultural Survival, 2009).

Según la información del Ministerio de Producción y Comercio Exterior el Ecuador produce en su mayoría aceite de palma esto originando que sea el séptimo producto agrícola de exportación del país. También se menciona que el 58% de la producción de aceite de palma se destina a su exportación colocándose así con el séptimo puesto a nivel mundial (FAOSTAT, 2008).

Los datos que manejan el Servicios de rentas internas (SRI) indican que existen 142 números de RUC activos dedicados a la elaboración de aceites y grasas de origen vegetal en el país (Servicios de Rentas Internas).

#### **1.4.5 Aceite vegetal usado**

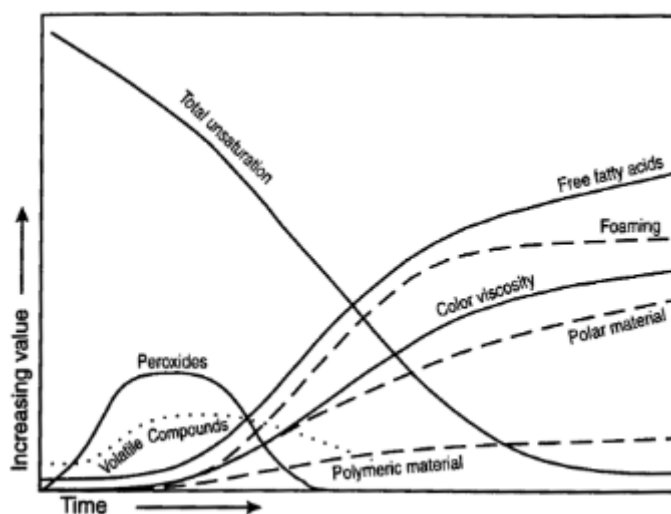
El aceite vegetal después de su utilización es considerado como un residuo o desecho biodegradable debido a que se lo utiliza más en la producción de frituras comestibles mencionando que los establecimientos de comida son los que más generan este aceite residual en todo el mundo (López et al.,2019).

En Ecuador no hay un número exacto de establecimientos de comida por tal motivo no se sabe con exactitud la cantidad de aceite residual que se genera en el país y tampoco se cuenta con un manejo adecuado de este residuo. Hay que mencionar que el manejo de los residuos o desechos están a cargo o bajo la supervisión de los gobiernos municipales, sin embargo, este no sería el caso ya que todavía se depositan estos residuos en vertederos, alcantarillados de agua residual, ríos etc. Además, se conoce que en el Ecuador el 54% de la gente desecha el aceite en la basura, el 24% lo botan en desagües, el 21% lo utiliza como alimentos de animales y solo el 1% lo deposita en un contenedor especial o se lo entrega a una persona encargada en la recolección de este producto utilizado dictado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2016.

#### **1.4.6 Caracterización de aceites vegetales usados**

La composición de los aceites vegetales se basa principalmente en ácidos grasos saturados e insaturados, pero cuando es llevado a altas temperaturas durante la cocción de alimentos los aceites experimentan cambios en su composición alterando sus propiedades organolépticas (González & González, 2015), estos cambios son cambios en su coloración, mientras que propiedades como viscosidad, material polimérico y polar, ácidos grasos libres aumenten aumente con el tiempo de uso. Por otro lado, se tiene que las propiedades como el índice de peróxidos y

componentes volátiles pueden aumentar o disminuir y las insaturaciones totales disminuyan con el pasar del tiempo (Choe & Min, 2007).



**Figura 1. 1 Cambios físicos y químicos de aceite durante proceso de fritura (Choe & Min, 2007)**

De acuerdo con datos proporcionados por Rafrinor S.L., empresa española autorizada y que se encarga de recolectar aceites usados provenientes de restaurantes, establece que la composición de 1 litro de aceite vegetal usado contiene 85% de aceite, 10% agua y residuos orgánicos y el 5% corresponde a sólidos (González & González, 2015).

**Tabla 1. 2 Propiedades de aceites vegetales usados**

Parámetro	Valor	Fuente
Acidez (% m/m ácido oleico)	1.87	(Ordoñez et al., 2013)
Índice de yodo (% m/m)	99.585	(Ordoñez et al., 2013)
Índice de saponificación (mg KOH /g)	185.6	(Ordoñez et al., 2013)
Índice de refracción	1.459	(Ordoñez et al., 2013)
Humedad y materia volátil (% m/m)	0.0899	(Ordoñez et al., 2013)
Impurezas insolubles (% m/m)	0.052	(Ordoñez et al., 2013)
Peso específico a 20 °C y 34 °C	0.911	(Ordoñez et al., 2013)
Índice de peróxidos (mg O <sub>2</sub> /g)	1.7	(López et al., 2015)
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	38.40	(Mustapha et al., 2020)
Poder calorífico (MJ/kg)	38.314	(Panadare & Rathod, 2015)

### **1.4.7 Métodos aplicados para la reutilización y recuperación de aceite vegetal usado**

Existen varios productos que se pueden elaborar con el aceite usado los cuales pueden ser biodiesel, velas, ceras y jabones, entre otros derivados, de los cuales el biodiesel es el que más demanda tiene debido a que se lo consideraría como un combustible alternativo, más económico en su producción y menos contaminante que los combustibles actuales, siendo este un factor importante para el medio ambiente (de Mora et al., 2015), pero previo a la producción de estos productos mencionados se debe aplicar un tratamiento a estos aceites residuales o usados, de manera que cumplan con algunos parámetros establecidos por la norma INEN (INEN 1640 , NTE INEN 34:1985), estos son:

#### **1.4.7.1 Filtración**

Los AVU presentará sólidos provenientes de preparación de alimentos de modo que se necesita su completa remoción mediante filtración simple o al vacío mediante una bomba de succión (Moazeni et al., 2019), pero al tener altos valores de viscosidad se dificulta la filtración, para ello se recomienda el filtrado a temperaturas comprendidas entre 20 y 60 °C. También se utilizan filtros con placas ubicadas en serie, de modo que el filtrado es eficaz y garantiza una filtración suficiente (Sidibé et al., 2010).

#### **1.4.7.2 Desgomado**

Tiene como objetivo la remoción de sólidos tales como fosfatos y gomas polares (Rincón et al., 2021) así también como la remoción de sales de magnesio y calcio (Igbum et al., 2012). Se emplea agua, ácido fosfórico o ácido cítrico para lograr la precipitación de los fosfolípidos al volverlos insolubles en sustancias grasas. Este proceso inicia con el calentamiento del aceite seguido de la adición ácido fosfórico o cualquier otro reactivo, posteriormente se realiza una centrifugación para lograr la separación de las gomas (Vega, 2016).

#### **1.4.7.3 Neutralización**

Se realiza después del proceso de desgomado y es conocido como desacidificación debido a que se neutraliza los ácidos grasos libres (Quispe & Adaniya, 1984).

Se utilizan KOH, NaOH o NaHCO<sub>3</sub> que al mezclarse con los ácidos grasos presentes en el aceite se forma jabón y glicerina, mediante esta reacción se neutraliza los ácidos grasos libres. El jabón al ser insoluble se puede separar mediante decantación o centrifugación y el aceite neutralizado se recupera para su posterior tratamiento (Vega, 2016).

#### **1.4.7.4 Lavado y secado**

El lavado se realiza posterior al proceso de neutralización con la finalidad de lograr la remoción de jabones producidos mediante la adición de agua, donde el jabón y el agua se puede separar mediante centrifugación o decantación (Vega, 2016).

El secado se realiza para eliminar la humedad contenida en el aceite el cual se realiza luego del lavado en una torre de secado que funciona mediante vacío (Vega, 2016).

#### **1.4.7.5 Decoloración**

Se realiza para reducir la presencia de pigmentos que se producen durante la cocción de alimentos donde se obtiene su coloración característica de marrón o café (Parra et al., 2018). Este proceso ocurre mediante adsorción que es una operación unitaria donde uno o más componentes presentes en una corriente líquida se separan y quedan retenidas sobre la superficie de un sólido poroso o adsorbente (Geankoplis, 1998).

Los agentes decolorantes utilizados en este proceso pueden ser carbón activado, arcillas naturales o también arcillas activadas con ácidos (Haro et al., 2014).

#### **1.4.7.6 Decantación**

Se separa los componentes más densos de una mezcla líquida. La decantación de residuos de aceites vegetales consiste en reposar por varias horas de manera que los sólidos se depositan en el fondo y por lo general este proceso se realiza en tanques cónicos que tienen una válvula para lograr la salida de los sólidos. La decantación se repite mediante el uso de tanques ubicados en serie para lograr la máxima separación. También se puede realizar en otros procesos como en la neutralización y lavado (Sidibé et al., 2010).

#### **1.4.7.7 Centrifugación**

Se utilizan en procesos como el desgomado, neutralizado y lavado. A nivel industrial puede operar de forma continua en el cual el aceite ingresa por eje hueco localizado en la parte inferior del equipo y asciende a través del interior del rotor. Durante su funcionamiento la fuerza centrífuga logra la separación de los componentes de la mezcla, la cual provoca que los componentes más pesados se dirijan hacia los lados y la fase ligera se desplaza hacia el centro del equipo. La fase ligera pasa a los siguientes procesos para el tratamiento respectivo, mientras que la fase pesada va al respectivo lugar de almacenamiento (Vega, 2016).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

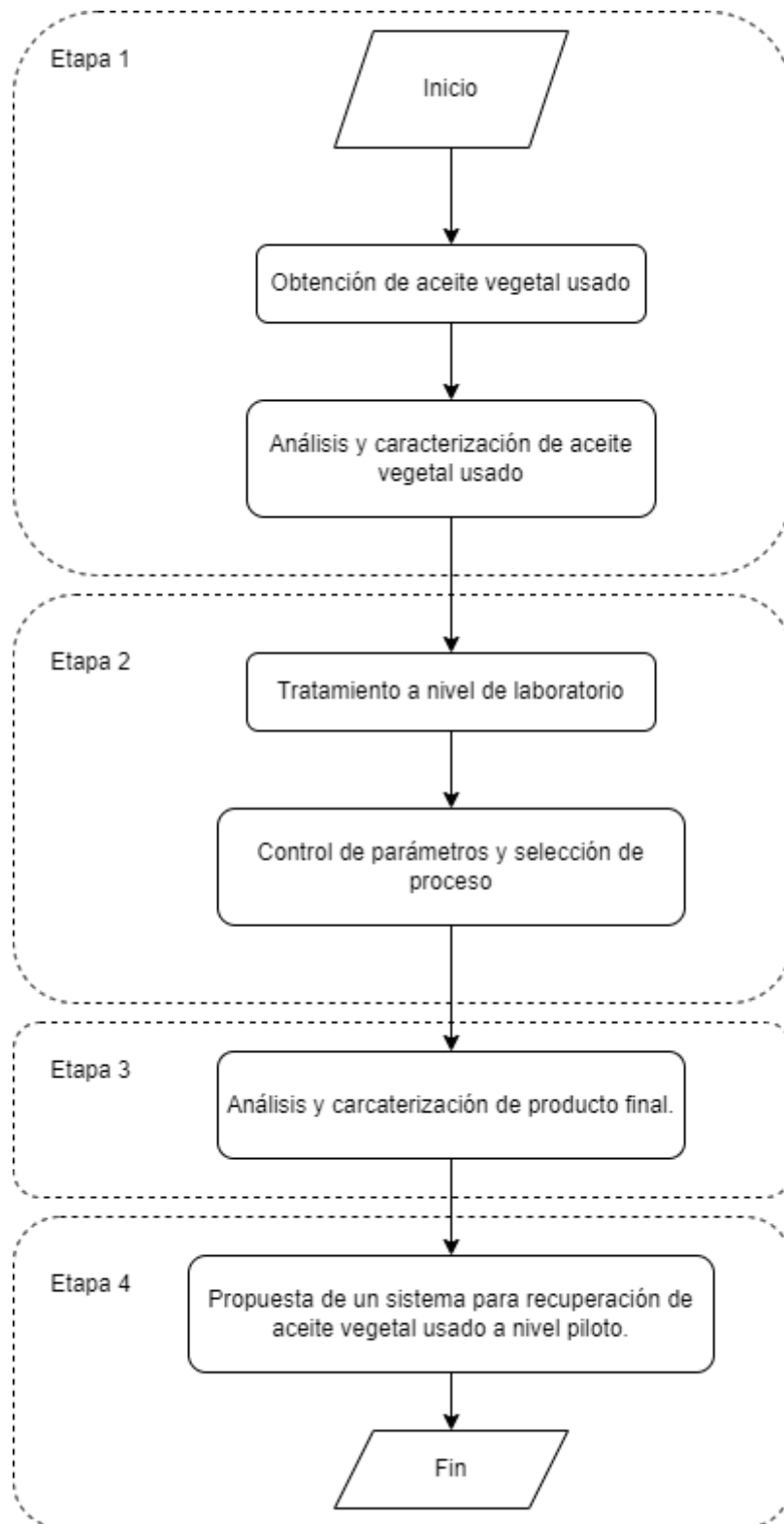
El presente trabajo consistió en primer lugar caracterizar muestras de aceites vegetales usados, una vez que se han realizado los respectivos análisis se procedió a conocer los parámetros los cuales fueron controlados durante el proceso de tratamiento y recuperación tales como filtración, desgomado, neutralización, decantación, centrifugación, lavado, calentamiento indirecto y decoloración a nivel de laboratorio. Una vez que el aceite tratado ha presentado los parámetros indicados se planteó un proceso de recuperación a escala piloto basados en los resultados obtenidos durante el proceso de recuperación a escala laboratorio. El producto final de este proceso fue un aceite vegetal usado refinado o tratado el cual puede ser utilizado como materia prima en la elaboración de diversos productos como resinas, jabones y biodiesel. En la tabla 2.1 se muestran las normas utilizadas para la caracterización de aceite vegetal usado AVU.

**Tabla 2. 1 Normas empleadas para la caracterización de aceite vegetal usado**

Análisis	Norma aplicada
pH	INEN-ISO 10523
Acidez	NTC 218
Contenido de humedad	INEN 39
Densidad	INEN 2903
Turbidez	INEN 971
Sólidos suspendidos	INEN 1494
Viscosidad cinemática	ASTM D445
Poder calorífico	ASTM 240

Las muestras fueron recolectadas de aceites vegetales usados provenientes de diversos restaurantes y domicilios de la ciudad de Guayaquil, las cuales fueron almacenadas en bidones con capacidad de 20 L previamente rotulados. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Hidrocarburos de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas en E.S.P.O.L.





**Figura 2. 1 Diagrama de experimentación del proyecto. Elaborado por autores**

## **2.1 Metodología aplicada para la caracterización de aceite vegetal usado antes y después del proceso de recuperación aplicado a nivel de laboratorio**

Los métodos realizados para la caracterización de aceites vegetales usados recolectados de domicilios y restaurantes se detallan a continuación y estos fueron:

### **2.1.1 Determinación de pH**

Se determinó el valor de pH aplicando el método establecido según la norma INEN-ISO 10523. El potenciómetro empleado para este análisis fue ORION STAR A211 y el procedimiento fue el siguiente:

1. En un vaso de precipitación de 100 mL se agregó la muestra de aceite vegetal usado y con un agitador de vidrio se procedió a agitar lentamente con la finalidad de homogenizar la muestra.
2. Luego se encendió el equipo medidor de pH y se procedió a conocer el valor de pH sumergiendo el electrodo en el vaso de precipitado con la muestra, asegurándose que éste no toque las paredes o el fondo del recipiente.
3. Finalmente se registró el valor de pH cuando en la pantalla del potenciómetro indicó la palabra “Listo” o cuando el valor de pH se mantenga constante.

Nota: En caso de que el equipo medidor de pH no esté calibrado se procede a utilizar las respectivas soluciones tampones o buffer a temperatura ambiente.

### **2.1.2 Determinación de densidad**

Se determinó la densidad aplicando el método establecido según la norma INEN 2903, el procedimiento fue el siguiente:

1. En una probeta de 500 mL se agregó la muestra de aceite vegetal usado.
2. Con mucho cuidado se sumergió el hidrómetro en la probeta con la muestra de aceite y se registró el valor donde la parte baja del menisco marcó en la escala del hidrómetro.

3. Una vez obtenido dicho valor se procedió con la rectificación de valor obtenido anteriormente con la temperatura del entorno mediante el uso de tablas de corrección.
4. El hidrómetro está en escala de °API, para ello se determinó la densidad específica y la densidad mediante las siguientes ecuaciones:

$$Sg_{muestra} = \frac{141.5}{API + 131.5} \quad (2.1)$$

$$Sg_{muestra} = \frac{\rho_{muestra}}{\rho_{referencia}} \quad (2.2)$$

Donde  $Sg_{muestra}$  representa la gravedad específica de la muestra que para este caso es el aceite vegetal usado y  $\rho_{referencia}$  es la densidad de la sustancia de referencia la cual es agua a una temperatura de 4°C y a una presión de 1 atm, valor que se puede conocer a partir de tabla de propiedades de agua saturada.

### 2.1.3 Determinación de poder calorífico

Se empleó el calorímetro IKA C200 y la normativa ASTM 240 para conocer el poder calorífico de ambas muestras de aceites residuales, el procedimiento fue el siguiente:

1. En un crisol de cuarzo se agregó aproximadamente 0.5 g de aceite vegetal usado.
2. Una vez tomada la muestra, se colocó el crisol en el soporte y se sumergió el hilo de algodón en la muestra. Posteriormente se agregó el soporte en el interior del recipiente de disgregación y se selló con su respectiva tapa. Luego se inyectó oxígeno a una presión de 30 bar al recipiente de disgregación.
3. Se llevó el recipiente de disgregación al calorímetro y se agregó agua fría a una temperatura de 10 °C.
4. En el calorímetro se registró la masa de la muestra de aceite extraído y se procedió con el ensayo.
5. Finalmente se registró el valor de poder calorífico de la muestra de aceite residual.

#### 2.1.4 Determinación de sólidos suspendidos

Se utilizó la normativa INEN 1494 para conocer el contenido de sólidos suspendidos presente en las muestras de aceite vegetal usado. Los pasos fueron los siguientes:

1. En un tubo de vidrio para centrifuga se agregó 100 mL de aceite vegetal usado, luego se colocó los tubos en los respectivos contenedores metálicos propios de la centrífuga universal. Se recomienda agitar el recipiente donde se almacena las muestras de aceites con la finalidad de homogenizarla antes de proceder con el ensayo.
2. Una vez listas las muestras se comenzó con el proceso de centrifugación encendiendo la centrífuga durante 1 hora a 1100 RPM.
3. Transcurrido dicho tiempo se apagó el equipo y se procedió a retirar los tubos para la observación de la cantidad de sólidos depositados en el tubo de vidrio, para ello se observó la escala rotulada en mL.
4. Finalmente se determinó el contenido de sólidos suspendidos en % v/v con la siguiente ecuación.

$$SS = \frac{V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{muestra}}} * 100\% \quad (2.3)$$

Donde  $V_{\text{sólidos}}$  es el volumen de sólidos sedimentados en el tubo de vidrio y  $V_{\text{muestra}}$  es el volumen de muestra de aceite vegetal usado, ambos en mL.

#### 2.1.5 Determinación de contenido de humedad

Para conocer el contenido de agua presente en ambas muestras de aceites usados se aplicó la norma INEN 39 y se realizó 2 ensayos: cualitativo y cuantitativo.

Para el análisis cualitativo se procedió de la siguiente manera:

1. En una sorbona se preparó el sistema de calentamiento con la ayuda de un mechero a gas.
2. Una vez que el recipiente metálico esté caliente se agregó la muestra de aceite en pequeñas cantidades. El contenido de agua se detectó

mediante siseo, burbujeo o un calentamiento irregular de la muestra, este ensayo se lo conoce crepitación.

Una vez conocido el resultado del ensayo de crepitación el cual puede ser positivo, se procede de acuerdo con la normativa INEN 39, los siguientes pasos fueron:

1. En un vaso de precipitado seco de 100 mL se pesó en la balanza analítica y se registró su valor.
2. Al mismo vaso de precipitado se agregó aproximadamente 5 g de muestra de aceite vegetal usado y se llevó a una balanza analítica para registrar su peso.
3. En una estufa se llevó el vaso de precipitado con la muestra y se calentó a una temperatura de 105 °C durante 1 hora.
4. Transcurrido el tiempo se retiró el vaso de precipitado con una pinza sujetadora y se lo llevó a un desecador durante 10 minutos.
5. Pasado los 10 minutos se retiró el vaso de precipitado de desecador para pesar el vaso de precipitado en una balanza analítica y se registró el valor de masa obtenido.
6. Para conocer el contenido de humedad se empleó la siguiente ecuación:

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

Donde:

P representa la pérdida por calentamiento en %m/m.

$m_0$  es la masa del vaso de precipitado seco y vacío en g.

$m_1$  es la masa del vaso de precipitado y la muestra de aceite vegetal usado en g.

$m_2$  es la masa de vaso de precipitado y la muestra de aceite vegetal usado posterior al calentamiento y enfriamiento en g.

### **2.1.6 Determinación de turbidez**

Para la medición de turbidez se empleó un turbidímetro de marca HACH modelo 2100Q y en base a la norma INEN 971 se procedió de la siguiente manera:

1. En un vaso de precipitado se agregó 100 mL de la muestra a analizar. Se recomienda agitar el recipiente donde se almacena la muestra con la finalidad de homogenizarla antes de llevarla al vaso de precipitado.
2. Antes de realizar el ensayo de turbidez se encendió el turbidímetro y se calibró con los respectivos patrones.
3. Una vez listo el turbidímetro se agregó una pequeña cantidad de muestra al recipiente de vidrio o celda. Se recomienda limpiar la superficie externa antes de introducir en el turbidímetro.
4. Posteriormente se seleccionó el modo de medición para determinar la turbidez de la muestra.
5. Finalmente se registró el valor de turbidez en unidades NTU una vez que el equipo haya finalizado la determinación de turbidez. Esto se reconoció mediante la emisión de un sonido del equipo.

### **2.1.7 Determinación de acidez**

Para la determinación de acidez de aceites vegetales usados se basó en la norma NTC 218, los pasos fueron los siguientes:

1. En una balanza analítica se pesó la respectiva cantidad de KOH para la preparación de 250 mL de solución de KOH 0.1 N.
2. En una probeta se agregó 50 mL de alcohol etílico, luego se lo agregó a un matraz Erlenmeyer donde se calentó a ebullición.
3. Una vez que el alcohol etílico comenzó a ebullición se retiró de la plancha de calentamiento donde se agregó 3 gotas de fenolftaleína para neutralizar con la solución de hidróxido de potasio preparada anteriormente. La neutralización finalizó cuando la solución haya tomado una coloración rosa pálida.
4. En un segundo matraz Erlenmeyer pesar aproximadamente 7 g de muestra de aceite vegetal usado, luego se adicionó el alcohol

neutralizado y agitar para homogenizar la mezcla y se llevó a calentamiento el matraz con la mezcla hasta ebullición.

5. Se agregó 3 gotas de fenolftaleína a la mezcla calentada y se procedió a titular con KOH 0.1 N. La titulación finalizó cuando la mezcla presentó un ligero cambio en su coloración, de amarillo a un rosa pálido.
6. Finalmente se registró el volumen consumido de KOH 0.1 N al alcanzar el viraje. Para la determinación de la acidez y el índice de acidez se procedió mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{PM_{\text{KOH}} N_{\text{KOH}} V_{\text{consumido}}}{m_{\text{muestra}}} \quad (2.5)$$

$$\text{Acidez} = \frac{N_{\text{KOH}} V_{\text{consumido}} M}{10m_{\text{muestra}}} \quad (2.6)$$

Donde:

$PM_{\text{KOH}}$  es el peso molecular de KOH, 56.1 g/gmol.

$N_{\text{KOH}}$  es la normalidad de KOH.

$V_{\text{consumido}}$  representa el volumen de KOH en mL consumido durante la titulación.

$m_{\text{muestra}}$  es el contenido de muestra de aceite en g utilizado para el ensayo.

$M$  es el peso molecular el ácido graso, para este caso fue ácido oleico siendo 282 g/gmol.

### 2.1.8 Determinación de viscosidad cinemática

La obtención de viscosidad cinemática se realizó mediante el uso de un viscosímetro de marca Koehler y 2 viscosímetros de tubo capilar para ambas muestras de aceites. El procedimiento fue el siguiente:

1. Se encendió el equipo y se ajustó la temperatura en la cual se va a realizar el ensayo, la cual fue de 40°C.
2. En un vaso de precipitado se colocó la muestra de aceite de vegetal residual.

3. En un viscosímetro de tubo capilar se agregó la muestra de aceite residual hasta la mitad de la capacidad del bulbo grande y se lo colocó en el interior de viscosímetro Koehler el cual contenía glicerina.
4. Con la ayuda de una bomba succión se logró que el contenido de la muestra a analizar ascienda desde el bulbo grande al primer bulbo pequeño del viscosímetro de tubo capilar.
5. Se registró el tiempo con un cronómetro el recorrido realizado por la muestra desde la primera marca grabada hasta la segunda marca del viscosímetro de tubo capilar.
6. Para obtener un valor promedio se repitió el mismo procedimiento desde el paso 5 para la misma muestra.
7. Una vez obtenido el tiempo se procedió a obtener la viscosidad dinámica multiplicando por el respectivo factor del viscosímetro de tubo capilar empleado. Las unidades son  $\text{mm}^2/\text{s}$ , por lo tanto, las unidades para el tiempo transcurrido deben ser reportados en segundos.

**Tabla 2. 2 Factores para convertir en cSt los segundos obtenidos en los viscosímetros empleados CANNON - FENSKE**

Viscosímetro ASTM No.	Factor en cSt/s a 40 °C
350	0.4665
400	1.1532

## **2.2 Metodología aplicada para el proceso de recuperación de aceite vegetal usado**

La propuesta de recuperación a nivel laboratorio constó de lo siguientes procesos:

### **2.2.1 Filtración primaria**

Una vez obtenida las muestras de aceites se procedió a remover los sólidos e impurezas producidos durante la cocción de alimentos, presentes en aceite vegetal usado, para ello se realizó mediante filtración simple y al vacío, el cual se utilizó 2 tipos de papel filtro: uno grueso y uno fino. Se recolectó el aceite residual en 2 recipientes plásticos con su respectiva rotulación, la capacidad del envase plástico es de 1 litro.



### **2.2.2 Desgomado**

Una vez recolectadas las muestras de aceites filtradas se procedió con el desgomado, para ello se utilizó ácido fosfórico al 85%. El desgomado se realizó tomando 500 mL de aceite residual filtrado y calentándolo hasta alcanzar una temperatura de 80 °C. Una vez que las muestras alcanzaron dicho valor de temperatura se procedió a agregar ácido fosfórico en una proporción de 1% m/m, luego se agregó el agitador magnético y se lo dejó en calentamiento controlando la temperatura y en constante agitación durante 30 minutos.

Transcurrido los 30 minutos se dejó reposar la muestra de aceite residual para proceder con la separación de los fosfolípidos, para ello primero se llevó a un proceso de centrifugación durante 30 minutos a 1100 RPM seguido de una separación en un embudo de decantación para la recuperación del aceite.

### **2.2.3 Neutralización**

Se procedió primero calentando la muestra de aceite vegetal usado hasta que alcanzó una temperatura de 80 °C. Luego se agregó KOH de acuerdo al valor promedio de índice de acidez y al valor de masa total de aceite obtenido. Se mantuvo en calentamiento y agitación constante durante 2 horas controlando que la temperatura se mantenga a 80 °C.

Transcurrido dicho tiempo se dejó en reposo para enfriar la muestra, posteriormente se procedió con la separación de los jabones formados en la que se realizó por centrifugación seguido de una decantación para la recuperación de aceite.

### **2.2.4 Lavado**

Una vez que las muestras de aceites fueron neutralizadas se procedió con el lavado. Esto se realizó con agua destilada con una proporción de 1% v/v.

Primero se procedió calentar en un vaso de precipitado el agua destilada y en otro vaso la muestra de aceite, hasta que alcanzó una temperatura de 80 °C. Luego se agregó lentamente el agua al vaso que contenía el aceite

y se dejó en constante agitación controlando la temperatura a 80 °C durante 5 minutos. Transcurrido dicho tiempo se retiró de calentamiento para que sea enfriado a temperatura ambiente.

Luego se procedió con la separación de las 2 fases llevando el aceite a un embudo de decantación y se dejó reposar durante 30 minutos, luego se separó el aceite de la fase acuosa.

#### **2.2.5 Secado**

Para la eliminación del remanente de agua de las muestras de aceites se procedió a calentarlo a una temperatura de 100 °C durante 5 minutos.

#### **2.2.6 Decoloración**

Para la decoloración de aceites se realizó a través de adsorción mediante el uso de carbón activado en una proporción de 25:1 de aceite y carbón activado a agitación lenta y se retiró de la plancha de calentamiento hasta que alcanzó una temperatura de 80°C.

#### **2.2.7 Filtración secundaria**

Cuando el proceso de decoloración finalizó, se procedió con la separación del agente adsorbente la cual se realizó mediante una filtración simple utilizando papel filtro fino.

La filtración se realizó de manera inmediata al finalizar la decoloración, puesto que el aceite al estar a temperaturas altas la filtración es favorecida y sucede de forma rápida.

### **2.3 Propuesta a nivel piloto para la recuperación de aceites vegetales usados**

Para la propuesta a nivel piloto para la recuperación de aceites vegetales se consideró datos recolectados por la empresa Arc & Pieper Recolectora y Exportadora S.A., el cual al año recolecta y exporta a Holanda 2.3 millones de litros de aceite de cocina usado, además por cada litro de este residuo paga USD 0.10 (Reciclan aceite de cocina para generar biodiesel, 2018).

## **2.4 Metodología aplicada para el planteamiento a nivel piloto para la recuperación de aceite vegetal usado**

En los procesos de recuperación de AVU realizados a nivel de laboratorio se lo llevó a una escala piloto mediante el uso del software *draw.io* para la elaboración del diagrama de flujo de procesos (PFD) en el cual consta los procesos realizados a nivel de laboratorio con los equipos industriales que se han de emplear. Este proceso industrial consta de 6 áreas, estas son:

- 1) Proceso de filtración de aceite vegetal usado.
- 2) Proceso de desgomado.
- 3) Proceso de neutralizado.
- 4) Proceso de lavado y secado.
- 5) Proceso de decoloración y filtración.
- 6) Generador de vapor.

## **2.5 Análisis de costos**

Para estimar los costos de los equipos empleados para la planta a nivel piloto se utilizó la herramienta CAPCOST versión 2017 pero considerando el valor de CEPCI de 596.2 correspondiente al año 2020 (Cost índices, 2020), el cual nos arrojó el capital de inversión que se necesita para el funcionamiento de la planta para recuperación de aceites vegetales usados. De igual manera se determinó su rentabilidad a través de indicadores económicos como el valor actual neto, tasa interna de retorno y año de recuperación de inversión.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Resultados

Los resultados de caracterización al inicio para los 2 tipos de aceites vegetales usados fueron:

**Tabla 3. 1 Caracterización de aceite vegetal usado**

Parámetros	Unidades	Domicilios	Restaurantes
Pérdida por calentamiento	% m/m	0	0
Poder calorífico	J/g	37780	37544
Sólidos suspendidos	% v/v	0.15	0.05
Gravedad específica	-	0.9254	0.9248
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	925.35	924.74

Nota: Estos valores corresponden para muestras en ausencia de contenido de humedad.

**Tabla 3. 2 Caracterización de aceite vegetal usado considerando la humedad**

Parámetros	Unidades	Domicilios	Restaurantes
Pérdida por calentamiento	% m/m	0.17	0.09
Poder calorífico	J/g	0	0
Sólidos suspendidos	% v/v	2.2	2.6

Nota: Estos valores corresponden para muestras de aceites considerando el contenido de humedad presente.

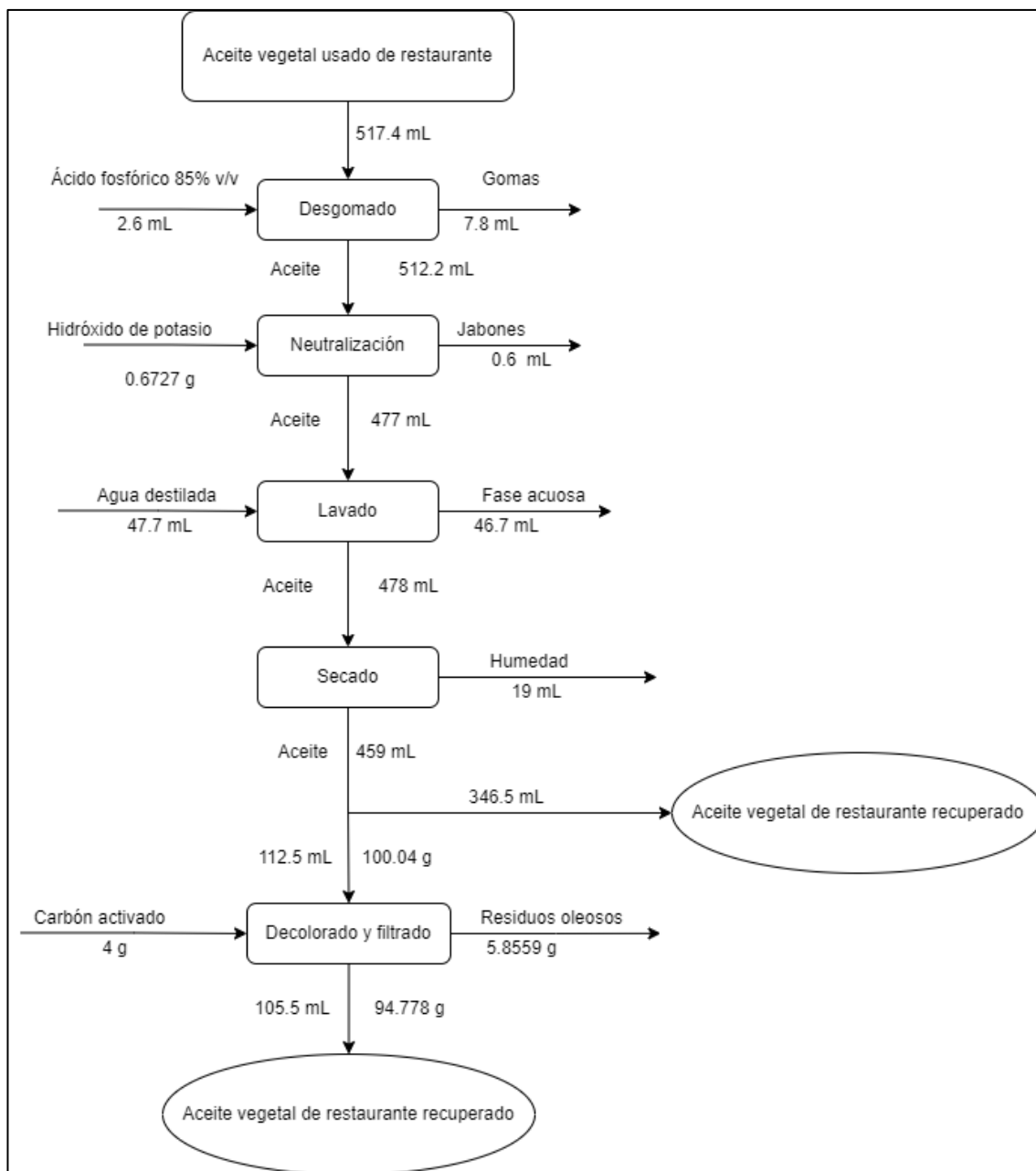
**Tabla 3. 3 Caracterización de aceites vegetales usados de domicilios**

Parámetros	Resultado	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación %
pH	6.29	6.12	0.098	1.60
	6.31			
	6.14			
	6.13			
	6.1			
Turbidez (NTU)	589	625.7	30.76	4.92
	672			
	640			
	620			
	617			
	0.68			

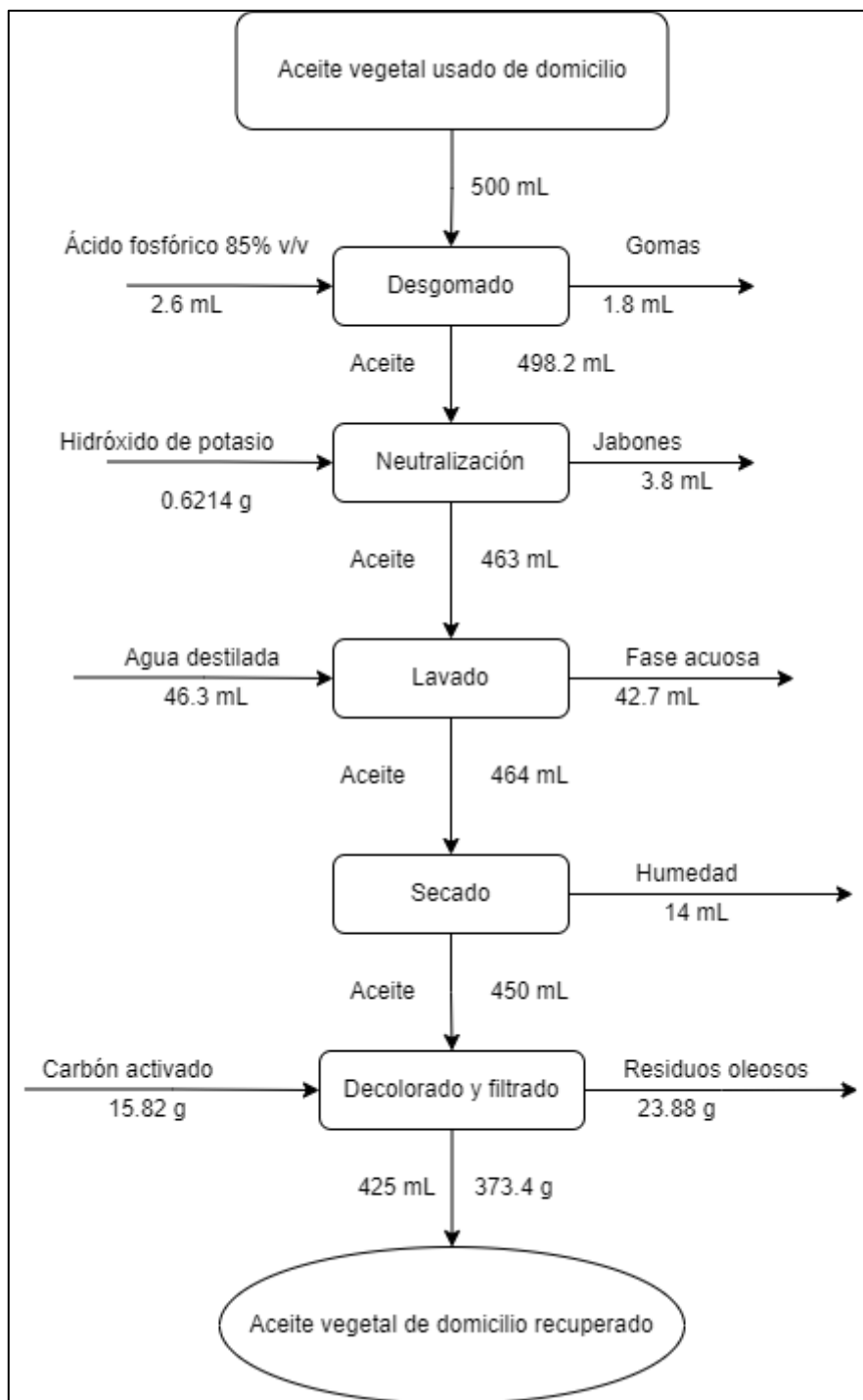
% de acidez	0.60	0.74	0.17	22.97
	0.92			
	1.36			
Índice de acidez (mg KOH/g de aceite)	1.19	1.46	0.33	22.60
	1.84			
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	49.33	48.50	1.024	2.11
	49.42			
	47.76			
	47.47			

**Tabla 3. 4 Caracterización de aceites vegetales usados de restaurantes**

Parámetros	Resultado	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación %
	3.58			
	3.73			
pH	3.7	3.69	0.060	1.63
	3.69			
	3.63			
	589			
	607			
Turbidez (NTU)	574	592	29.79	5.03
	648			
	580			
	0.56			
% de acidez	0.76	0.79	0.25	31.65
	1.07			
	1.11			
Índice de acidez (mg KOH/g de aceite)	1.51	1.58	0.51	32.28
	2.12			
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	47.96	47.45	0.55	1.15
	47.81			
	46.76			
	47.27			



**Figura 3. 1 Diagrama de bloques para proceso de recuperación de aceites de restaurantes a nivel de laboratorio**



**Figura 3. 2 Diagrama de bloques para proceso de recuperación de aceite de domicilios a nivel de laboratorio**

**Tabla 3. 5 Rendimiento en cada proceso de recuperación a nivel de laboratorio**

Tipo \ Proceso	Desgomado	Neutralizado	Lavado	Secado	Decolorado
Restaurante	98.50 %	93.12 %	91.09 %	96.03 %	93.78 %
Domicilio	99.12 %	92.93 %	91.10 %	96.98 %	92.59 %

**Tabla 3. 6 Rendimiento global en recuperación de aceite a nivel de laboratorio**

Tipo de aceite	Rendimiento
Restaurante	88.71 % *
Domicilio	85.00 %

\*Se consideró a partir del proceso de desgomado hasta el proceso de secado, puesto que para el decolorado solamente se tomó aproximadamente 100 g de aceite.

**Tabla 3. 7 Caracterización de aceite vegetal usado aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio**

Parámetros	Unidades	Domicilios	Restaurantes
Pérdida por calentamiento	% m/m	0.34	0.28
Poder calorífico	J/g	37853	37228
Sólidos suspendidos	% v/v	0.00	0.00
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	876	882

**Tabla 3. 8 Caracterización de aceite vegetal usado de domicilios aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio**

Parámetros	Resultado	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación %
Turbidez (NTU)	32.4	36.25	2.66	7.32
	38.2			
	37.8			
	36.6			
% de acidez	0.79	0.89	0.14	15.3
	0.98			
Índice de acidez (mg KOH/g de aceite)	1.96	1.77	0.27	15.3
	1.58			
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	43.28	43.35	0.12	0.27
	43.48			
	43.29			



**Tabla 3. 9 Caracterización de aceite vegetal usado de restaurantes aplicando proceso de recuperación a nivel de laboratorio**

Parámetros	Resultado	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación %
Turbidez (NTU)	21.5	22.8	1.04	4.56
	23.3			
	22.5			
	23.9			
% de acidez	0.91	0.97	0.09	9.64
	1.04			
Índice de acidez (mg KOH/g de aceite)	1.80	1.93	0.19	9.64
	2.07			
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	49.03	48.68	0.40	0.82
	49.02			
	48.36			
	48.30			

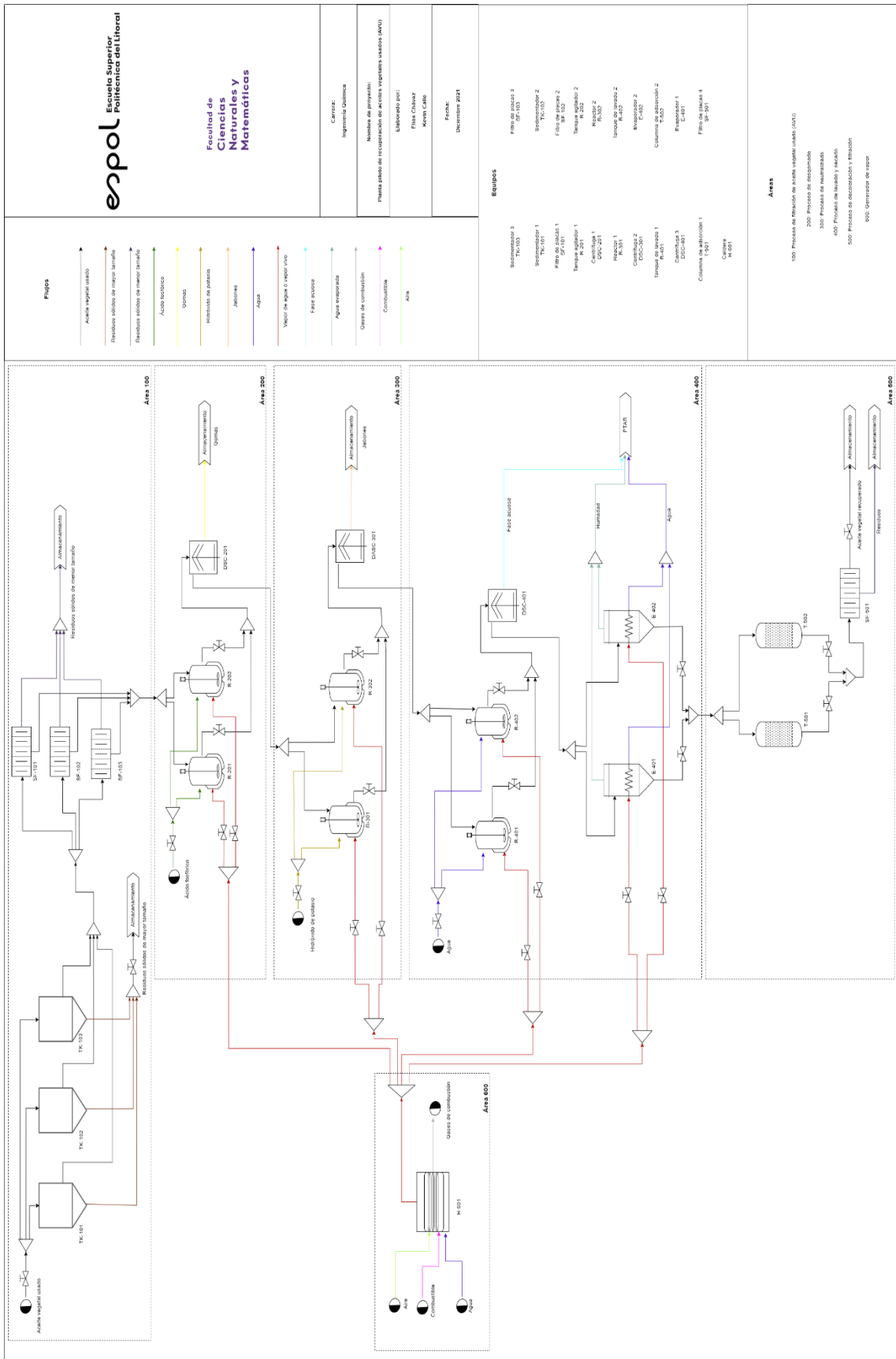
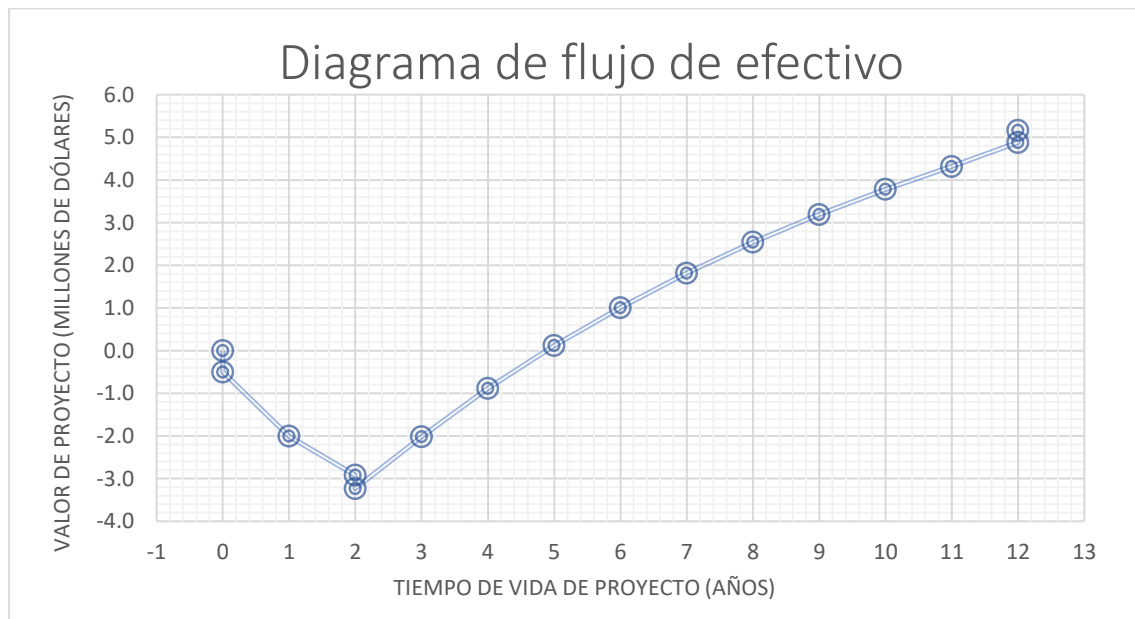


Figura 3. 3 Diagrama PFD a escala piloto para recuperación de AVU

**Tabla 3. 10 Costo de equipamiento de la planta piloto de recuperación de AVU  
(CAPCOST, 2017)**

Equipo	Tipo	Material	Costo de equipo	Cantidad	Costo total de equipo
TK-101,102, 103	Sedimentador	Revestido de acero inoxidable	\$17,800	3	\$53,400
SF-101,102,103, 501	Filtro de prensa	-	\$19,800	4	\$79,200
DASC-201, 301, 401	Centrifuga	-	\$34,500	3	\$103,500
R-201, 202, 301, 302, 401, 402	Reactor	-	\$40,000	6	\$240,000
E-401, 402	Evaporador de película descendente	Acero al carbono	\$338,000	2	\$676,000
T-501, 502	Columna de adsorción	Acero inoxidable	\$12,200	2	\$24,400
H-601	Caldero		\$263,000	1	\$263,000
				Total	\$1,439,500



**Figura 3. 4 Diagrama de flujo caja de planta piloto para un tiempo de vida de 12 años  
(CAPCOST, 2017)**

**Tabla 3. 11 Análisis económico (CAPCOST, 2017)**

Indicador económico	Valor
VAN	\$ 5160000
TIR	47.80%
Período de retorno	1.7 años

## 3.2 Análisis de resultados

### Caracterización de aceite vegetal usado

En el Ecuador no existe una normativa que regule los parámetros de los aceites vegetales usados, por lo tanto, para comparar los resultados de la caracterización de aceite vegetal usado se tomó como referencia los parámetros de aceite de palma (Apéndice B Tabla B-5) puesto que es el más utilizado. En el cual se especifica que la acidez tiene un valor máximo de 0.10 % utilizando el método de ensayo NTE INEN 38 ISO 660 y que el contenido de humedad y materia volátil debe tener un valor máximo de 0.05 % utilizando el método de ensayo NTE INEN 39 ISO 662. Según la caracterización al inicio realizado en ambas muestras de aceites se tiene que para los aceites de restaurantes se obtuvo la acidez fue de 0.79 %, en cambio que para los aceites de domicilios se obtuvo que la acidez fue de 0.74%, con lo cual se evidencia que ambas muestras de aceites no cumplen con los parámetros de calidad para un aceite comestible y esto se debe a que contienen una cantidad elevada de ácidos grasos libres que superan el rango permitido para un aceite. Otro parámetro que se analizó fue el humedad y materia volátil para ambas muestras de aceites de domicilios y restaurantes en el cual se obtuvieron los siguientes valores 0.17 % y 0.09 % respectivamente, con lo cual se evidenció que tampoco cumple con el parámetro de calidad que se muestra en la normativa NTE INEN 2421 (Apéndice B Tabla B-5). En base a los resultados expuestos se procedió a realizar un tratamiento a estos aceites a nivel de laboratorio, los cuales fueron: filtrado, desgomado, neutralizado, lavado, secado y decoloración.

En el primer proceso de recuperación de aceite el cual fue filtrado se separaron el contenido de sólidos presentes en las muestras de aceites, en este proceso fue el método de filtración simple el cual arrojó mayor volumen de aceite recolectado en comparación al filtrado por vacío en la cual el porcentaje de recuperación de aceite de domicilio fue del 98% mientras que para el aceite de restaurante fue del 96%.

Siguiendo con el segundo proceso de desgomado en el cual consiste en la separación de fosfolípidos mediante la adición de ácido fosfórico, tomando como muestra inicial 500 mL para el aceite de domicilios y 517.4 mL para el aceite de restaurante en el cual se evidenció que en el aceite de domicilios contenía menor cantidad fosfolípidos en comparación que el de restaurantes, donde el porcentaje

de recuperación fue de 99.12% y 98.5% para aceites de domicilios y de restaurantes respectivamente.

Continuando con el proceso de recuperación el cual fue neutralizado que consiste en eliminar los ácidos grasos libre mediante la adición de una base fuerte que para este caso fue hidróxido de potasio tomando en cuenta el parámetro de índice de acidez. El porcentaje de recuperación fue de 92.93% y 93.12% para aceites de domicilios y de restaurantes respectivamente.

Para aumentar la efectividad de la eliminación de jabones se procedió a realizar un lavado con agua destilada, debido a que los jabones presentan una ligera solubilidad en aceites neutralizados, posterior a ello se realizó el proceso de secado mediante calentamiento indirecto a una temperatura de 100 °C para la remoción de agua que el aceite contenía al momento de realizar el lavado. La tasa de recuperación para el aceite de domicilio al finalizar los procesos de lavado y secado fueron de 91.10% y 96.98% respectivamente, mientras que para el aceite de restaurante fueron de 91.09% y 96.03% respectivamente también para el proceso de lavado y de secado.

Finalmente, para el proceso de decoloración el cual se basa en la adsorción de pigmentos con carbón activado y además de la eliminación de los olores que presentaba al inicio los aceites vegetales usados de domicilios y de restaurantes. El producto final de este proceso fue un aceite claro, inoloro y libre de sólidos suspendidos.

Al finalizar el proceso de tratamiento de aceites tanto de domicilios como de restaurantes se obtuvo una recuperación global de 425 mL y 459 mL en la cual se comenzó con una muestra inicial de 500 mL y 517.4 mL respectivamente para cada uno. La diferencia del valor al inicio con el final recuperado se debe que durante el proceso se pierde contenido de aceite en las parades de cada uno de los recipientes empleados, lo cual al momento de determinar la tasa de recuperación global fue del 85%, mientras que para el aceite de restaurante la tasa de recuperación de 88.71%.

Una vez terminado el proceso de tratamiento a nivel de laboratorio se procedió a realizar la caracterización final de ambas muestras en el cual los parámetros

analizados fueron humedad y materia volátil los cuales fueron 0.34% y 0.28% para domicilios y restaurantes, siendo estos mayores al inicio y que puede representar la pérdida componentes volátiles presentes en las muestras de aceite mas no de agua puesto que al momento de realizar el ensayo para determinar el poder calorífico si se obtuvieron valores de poder calorífico. Si las muestras de aceites contenían humedad, el ensayo de poder calorífico no se podía efectuar.

Otro parámetro analizado el cual de viscosidad cinemática realizado a 40 °C se obtuvo que para el aceite de restaurante fue de 48.68 mm<sup>2</sup>/s mientras que para el inicio fue de 47.45 mm<sup>2</sup>/s y para el aceite de domicilio fue de 43.35 mm<sup>2</sup>/s mientras que al inicio fue de 48.50 mm<sup>2</sup>/s, estos altos valores se deben a los aceites durante el proceso de cocción de alimentos los materiales poliméricos aumentan ligeramente y por ende la viscosidad aumenta en comparación de los aceites vegetales tales como girasol y de soya cuya viscosidad cinemática a 40 °C fueron de 28 y 32.40 mm<sup>2</sup>/s (Rodríguez et al., 2012). Otro parámetro analizado fue el de la turbidez el cual nos arrojó un valor de 36.25 NTU y 22.8 NTU para aceites de domicilios y de restaurantes respectivamente, mientras que al inicio previo al proceso de recuperación se obtuvieron valores de 625.7 NTU y de 592 NTU para aceites de domicilios y de restaurantes respectivamente, esto se debe a que al inicio ambas muestras de aceites contenían una cantidad alta de sólidos suspendidos. También se determinó el poder calorífico de ambas muestras y estos fueron 37853 J/g y de 37228 J/g para las muestras de aceites de domicilios y de restaurantes, en cuanto al inicio se registraron valores de 37780 J/g y de 37544 J/g para aceites de domicilios y de restaurante respectivamente, indicando que se encuentra en el rango permitido siendo este el valor mínimo de 36000 J/g para aceite de colza (Apéndice B Tabla B.2). Para ambos casos tanto al inicio y al final los valores obtenidos corresponden al poder calorífico superior (HHV) puesto al finalizar el ensayo se comprobó la presencia de agua en estado líquido como producto de la combustión completa del aceite.

Otro parámetro para la caracterización de aceite fue el índice de acidez el cual después del tratamiento aplicado se obtuvieron valores de 1.77 mg KOH/g y de 1.93 mg KOH/g y para el porcentaje de acidez fueron de 0.89 % y de 0.97 % para las muestras de aceites de domicilio y de restaurante respectivamente, ambos

reportados como ácido oleico. El porcentaje de acidez resultó ser más elevado que al principio puesto que se realizó los análisis unos días después del tratamiento aplicado, pero cabe señalar que el índice de acidez se encuentra en el rango adecuado para el uso como materia prima para elaboración de biocombustible puesto que este parámetro debe ser menor a 2.

### **Análisis de rentabilidad de proceso de recuperación de AVU a escala piloto**

Con el objetivo de conocer si el proyecto es factible económicamente, se realizó una aproximación para un tiempo de vida de 12 años, donde se evidenció que en el año cero comienza el arranque de la planta, es decir la inversión inicial. Hasta el año dos la planta genera pérdidas de aproximadamente 3 millones de dólares. Posteriormente, después del segundo año se evidencia una ligera reducción de los ingresos negativos de la planta, eso se prolonga hasta el quinto año donde la planta recién registra ganancias positivas y estos van en constante aumento hasta alcanzar los 12 años de la vida de la planta el cual registra un valor de ingresos de aproximadamente 5.16 millones de dólares valor actual neto (VAN) cuyo valor es mayor que cero el cual nos indica que es rentable y que genera ingresos económicos estables. Por otro lado, se analizó la tasa interna de retorno (TIR) el cual es la tasa de rentabilidad que ofrece una inversión lo cual indica el porcentaje de beneficio que tiene la planta. Tomando en cuenta eso en nuestro proyecto el TIR resultó ser 47.80 % siendo este mayor que cero por lo que se puede concluir que el proyecto analizado devuelve el capital invertido más una ganancia adicional y por ende el proyecto propuesto es rentable.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Al realizar la caracterización del aceite recolectado de domicilios y de restaurantes de la ciudad de Guayaquil se procedió con la homogenización de ambas muestras, el cual posteriormente hicimos el análisis de sólidos suspendidos y nos arrojó un valor para el aceite de domicilio y de restaurante de 2.2 %v/v y 2.6 %v/v respectivamente, lo cual nos da a entender que el mismo aceite de restaurante se lo empleaba en diversas ocasiones. Posteriormente se realizó ensayo de índice de acidez donde se obtuvieron valores 1.46 y 1.58 mg de KOH/g de aceite y el porcentaje de acidez resultaron ser de 0.74% y 0.79% para las muestras de aceite de domicilios y de restaurantes respectivamente. Se determinó la turbidez donde arrojaron valores de 592 NTU para aceite de restaurante y de 625.7 para los de domicilio lo que nos da entender que el aceite de domicilio es más turbio y eso se debe a que contenía más sólidos suspendidos y disueltos que el otro aceite.

Se aplicaron métodos de recuperación a nivel de laboratorio usado tales como filtrado, desgomado, neutralizado, lavado, secado y decolorado para la depuración de aceite vegetal a nivel de laboratorio donde se obtuvieron valores de rendimiento de 85% y de 88.71% para las muestras de aceites domicilios y de restaurantes respectivamente.

Para la propuesta de recuperación de aceite vegetal usado se inició a partir de aproximadamente 1 litro por ambas muestras de aceites y según revisión bibliográfica, se conoce que 1 litro de aceite puede contaminar 10000 litros de agua, por lo tanto, en este proyecto se evitó la contaminación de dicho volumen de agua y a su vez la contaminación del suelo por destrucción de la capa fértil al entrar en contacto el aceite con el suelo.

Después del análisis expuesto del aceite usado realizado a nivel laboratorio se lo llevó a escala piloto como se lo muestra en la figura 3.3 en donde se implementaron los mismos procesos de tratamiento con equipos industriales en donde se determinó el costo de los equipos con la ayuda de la herramienta digital de



CAPCOST, la inversión inicial para el funcionamiento de la planta fue de \$1439500 y luego se realizó el flujo de caja como se muestra en la figura 3.4 para determinar la rentabilidad del proyecto el cual se obtuvo valores de VAN y TIR positivos de \$5160000 y 47.8% respectivamente lo que nos da a entender que el proyecto presentado es rentable y genera ganancias para el dueño de la industria.

Respecto a la comparación entre propiedades al inicio y al final del proceso de recuperación a nivel de laboratorio se comprobó que el producto final no presentaba sólidos suspendidos y era inodoro, además su turbidez se redujo hasta aproximadamente 26 veces.

#### **4.2 Recomendaciones**

Para la obtención de la viscosidad cinemática se recomienda que las muestras no presenten sólidos, puesto en este método se utilizan viscosímetro de tubo capilar de modo que obstruye el paso del fluido a analizar lo que provocaría errores durante el ensayo. Una alternativa es el uso de muestras previamente filtradas.

Para facilitar el proceso de filtrado de aceite se recomienda un precalentamiento o también el uso de filtro de placa con una alternativa al filtrado simple y de succión.

En la determinación del poder calorífico de los aceites vegetales usados se recomienda que éste se encuentre libre de humedad, de lo contrario el calorímetro mostrará error al momento de realizar el ensayo.

Analizar el efecto de las propiedades como índice de acidez y viscosidad del aceite vegetal usado respecto al tiempo de almacenamiento.

# BIBLIOGRAFÍA

Araújo, C., de Andrade, C., de Souza E., & Dupas, A. (2013). Biodiesel production from used cooking oil: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 27, pp. 445–452). <https://doi.org/10.1016/j.rsr.2013.06.014>

Bockisch, M. (1998). *Fats and Oils Handbook*, AOCS Press, Champaign, IL.

CAPCOST 2017, *Analysis Synthesis and Design of Chemical Processes 5th Edition*.  
Accedido el 27 de diciembre, 2021, desde <https://richardturton.faculty.wvu.edu/publications/analysis-synthesis-and-design-of-chemical-processes-5th-edition>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, cuarta edición. McGraw-Hill Interamericana.

Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of deep-fat frying oils. In *Journal of Food Science* (Vol. 72, Issue 5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>

Cost índices by Charles Maxwell. Accedido el 28 de enero, 2022 desde <https://www.toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/>

Cultural Survival (2009). “Aceite de Palma Africana: Impactos en Ecuador de la Amazonia”. Última visita 27 de enero de 2010. En <http://www.culturalsurvival.org/print/4503>

Czyhrnciw, N., Baragaño, M., & Garcés, M. (1966). *Análisis Industrial en la Fabricación de Alimentos*. UCV, Caracas.

De la Rosa, L., Henríquez, E., Sánchez, E., & Ojeda, K. A. (2015). Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* L. en el departamento de Bolívar. *Revista Ion*, 28(1), 73-85..

de Mora, F., Torres, C., & Valero, A. (2015). Thermo-economic analysis of biodiesel production from used cooking oils. *Sustainability* (Switzerland), 7(5), 6321–6335. <https://doi.org/10.3390/su7056321>

FAOSTAT (2008). “Inicio de producción, Ecuador 2008”. Visita el 25 de mayo de 2011 en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

- FAO / Banco Mundial (2006). Los países andinos: Una estrategia para el sector forestal. Estudios de caso. Vol. III de V: Ecuador
- Geankoplis, C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. México D.F.: Continental S.A.
- González, I., & González, J. (2015). Problemática Ambiental, Incidencias en Redes de Saneamiento y Coste del Tratamiento en Depuradoras de los Aceites Usados en Cocina. *Aguaresiduales*. info.
- Haro, C., Aragon, C., de la Torre, E., & Guevara, A. (2014). Regeneración de Arcillas de Blanqueo Empleadas en la Decoloración de Aceites Vegetales Comestibles. In *OCTUBRE* (Vol. 34, Issue 1).
- Igbum, O., Leke, L., Ande, S., Okoronkwo, M. , & Nwadinigwe, C. (2012). Effects of Transesterification Variables on the Characteristics of the Methyl Esters Obtained from Four Virgin Tropical Seed Oils in Nigeria. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2(4), 230–246. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2014/2081>
- IUPAC. (1987). Standard methods for the analysis oils and fats and derivates. 7th edition, Pergamon Press, Oxford, England.
- Jones, S., & Peterson, C. L. 2002. Using unmodified vegetable oils as a diesel fuel extender- a literature review. In: *Memorias de la Conference Bioenergy*. Idaho, USA. 9 p.
- Karmakar, A., Karmakar, S., & Mukherjee, S. (2010). Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. In *Bioresource Technology* (Vol. 101, Issue 19, pp. 7201–7210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.079>
- Katre, G., Raskar, S., Zinjarde, S., Kumar, V., Kulkarni, B., & RaviKumar, A. (2018). Optimization of the in situ transesterification step for biodiesel production using biomass of *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 grown on waste cooking oil. *Energy*, 142, 944–952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.082>

- López, K., Rojas, J., & Bogantes, J. (2019). Integral management of residual vegetable cooking oil from restaurants on the Omar Dengo campus of the Universidad Nacional, Costa Rica. *Uniciencia*, 33(1), 18–28. <https://doi.org/10.15359/ru.33-1.2>
- López, L., Bocanegra, P., & Malagón, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ingeniería y Universidad*, 19(1), 155-172
- Moazeni, F., Chen, Y. C., & Zhang, G. (2019). Enzymatic transesterification for biodiesel production from used cooking oil, a review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 216, pp. 117–128). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.181>
- Mustapha, A., Amodu, T., & Adepoju, R. (2020). Effects of Degumming Waste Cooking Oil on the Physicochemical and Fuel Properties of Biodiesel. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 24(5), 749–753. <https://doi.org/10.4314/jasem.v24i5.3>
- Nielsen, S. (2003). *Análisis de los Alimentos*. Editorial Acribia, S. A. 3ª Edición, Zaragoza España, p 275-276.
- Ordoñez, B., Chaves, L., Rodríguez, W., Murcia, M., & Alvarado, E. (2013). Biodiesel de aceite residual de cocina Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina Characterization of Biodiesel obtained from waste cooking oil. In *Rev. Colomb. Biotecnol* (Issue 1).
- Ortiz, H., Rössel, D., & Schümann, U. (2012). Potencial para el uso directo de los aceites vegetales en los motores de combustión. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(SPE4), 650-658.
- Panadare, D. C., & Rathod, V. K. (2015). Applications of Waste Cooking Oil Other Than Biodiesel: A Review. In *Iranian Journal of Chemical Engineering* (Vol. 12, Issue 3).
- Parra, T., Marín, F., Jácome, G., & Sinche, M. (2018). Clarificación de aceite de cocina usado y decoloración de aceite rojo de palma con el uso de ozono, carbón activado y peróxido de hidrógeno (Clarification of used cooking oil and discoloration of red palm oil with the use of ozone, activated carbon and hydrogen peroxide). 2, 77–88. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>

- Plúas, A., & Portés, J. (2017). Caracterización de aceite no comestible de *Jatropha Curcas* para la obtención de biocarburante. (Tesis de pregrado). ESPOL, Guayaquil, Ecuador.
- Proceso de recolección y aprovechamiento de aceite de cocina usado. Accedido el 6 de noviembre, 2021, desde <https://www.arc.ec/2186/0/photos/arc>
- Quispe, V., & Adaniya, B. (1984). Evaluación de los aceites vegetales y de pescado como diesel 2.
- Reciclan aceite de cocina para generar biodiesel. (2018). <https://www.revistalideres.ec/lideres/reciclan-aceite-cocina-biodiesel-holanda.html>
- Restrepo, J. (2012). El desarrollo sostenible y el reciclaje del aceite usado de cocina a la luz de la jurisprudencia y el ordenamiento jurídico colombiano. *Producción + Limpia*, 7(1), 109-122. Retrieved January 11, 2022, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552012000100011&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100011&lng=en&tlng=es).
- Rincón, L., Ramírez, C., & Orjuela, A. (2021). Assessment of degumming and bleaching processes for used cooking oils upgrading into oleochemical feedstocks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104610>
- Rodríguez, C., Lafargue, F., & Sotolongo, J. (2012). Determinación de las propiedades físicas y carga crítica del aceite vegetal *Jatropha curcas* L//Determination of physical properties and critical load of *Jatropha curcas* L vegetable oil. *Ingeniería Mecánica*, 15(3), 170–175. <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- Schwab, A. W. Bagby, M., & Freedman, B. (2003). Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils. *Fuel*. 66(10):1372-1378.
- Sidibé, S., Blin, J., Vaitilingom, G., & Azoumah, Y. (2010). Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 9, pp. 2748–2759). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.018>

TULSMA. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. Libro VI Anexo 1. Accedido el 23 de noviembre, 2021, desde <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

Valenzuela, A. & Morgado, N. (2005). Las grasas y aceites en la nutrición humana: algo de su historia. *Rev. Chilena Nutr.* 32, 2.

Vega, A. (2016). Obtención de aceites de oliva refinados. Ediciones Paraninfo, SA.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

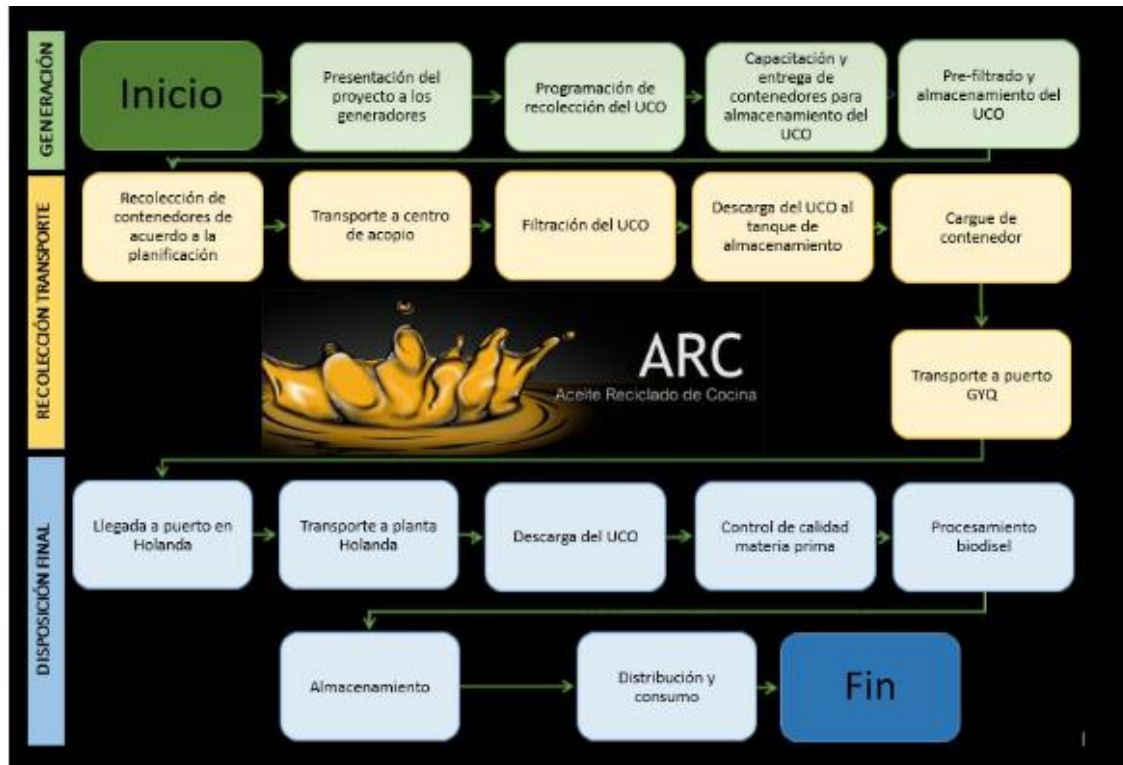


Figura A. 1 Proceso de recolección y reutilización de aceites vegetales usados (Arc & Pieper, 2021).

## APÉNDICE B

Tabla B. 1 Comparación de costos de aceites de diferentes tipos (Araújo et al., 2013)

Tipo de aceite	Costo USD/ton
Aceite comestible usado	224
Aceite crudo de palma	703
Aceite de soya	771
Aceite de colza	824

Tabla B. 2 Parámetros de aceite de colza para la elaboración de biocombustible según la norma DIN 51605:2010 (Ortiz et al., 2012)

Parámetros	Valor límite	Unidades	Norma empleada
Calidad de ignición	40 min.	--	DIN EN 15195
Contenido de agua	0.075 max.	% m/m	DIN EN ISO 12937



Contenido de azufre	10 max.	mg/kg	DIN EN ISO 20846 DIN EN ISO 20884
Contenido de calcio	1 max.	mg/kg	DIN 51627-6
Contenido de cenizas	0.01 max.	% m/m	DIN EN ISO 6245
Contenido de fósforo	3 max.	mg/kg	DIN 51627-6
Contenido de magnesio	1 max.	mg/kg	DIN 51627-6
Densidad a 15 °C	910 a 925	kg/m <sup>3</sup>	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Estabilidad a la oxidación	6 min.	H	DIN EN 14112
Índice de acidez	2 max.	mg KOH/g	DIN EN 14104
Índice de yodo	125 max.	g yodo/100g	DIN EN 14111
Poder calorífico	36 min.	MJ/kg	DIN 51900-1,2 DIN 51900-1,3
Punto de inflamación	101 min.	°C	DIN EN ISO 2719
Suma de contenido de Ca y Mg	20	mg/kg	DIN EN 14538 DIN 51627-6
Viscosidad cinemática a 40 °C	36 max.	mm <sup>2</sup> /s	DIN EN ISO 3104

**Tabla B. 3 Límites de descargar de aceites y grasas a diferentes cuerpos de aguas (TULSMA, 2015)**

Destino a descargar	Límite máximo permisible	Unidad
Sistema de alcantarillado público	100	mg/L
Cuerpo de agua dulce	0.3	mg/L
Cuerpo de agua marina	0.3	mg/L

**Tabla B. 4 Especificaciones de aceites y grasas comestibles reutilizados NTE INEN 2678**

Requisito	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Ácidos grasos libres	%	-	3	AOAC.940.28
Componentes polares	%	-	24	NTE INEN UNE-EN ISO 8420

**Tabla B. 5 Especificaciones de aceite comestible de palma NTE INEN 2421**

Requisito	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Acidez (como ácido oleico)	%	-	0.10	NTE INEN 38 ISO 660
Humedad y materia volátil	%	-	0.05	NTE INEN 39 ISO 662

**Tabla B. 6 Propiedades físicas de diversos aceites (Karmakar et al., 2010)**

Aceite	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad cinemática a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Poder calorífico superior (MJ/kg)
Canola	911.5	34.72	39.7
Soya	913.8	28.87	39.6
Girasol	916.1	35.84	39.6
Palma	918.0	44.79	39.74*
Jatropha	940	33.90	38.65

\*Fuente: (De la Rosa et al., 2015)

## APÉNDICE C

### Caracterización de aceite vegetal usado

#### Ensayo de contenido de humedad



Figura C. 1 Ensayo de crepitación



Figura C. 2 Determinación de pérdida por calentamiento de ambas muestras

#### Poder calorífico



Figura C. 3 Determinación de poder calorífico

## Sólidos suspendidos



**Figura C. 4 Determinación de sólidos suspendidos**



**Figura C. 5 Determinación de sólidos suspendidos posterior al proceso de recuperación de AVU a nivel de laboratorio**

## Turbidez



Figura C. 6 Equipo utilizado para la determinación de turbidez

## pH



Figura C. 7 Potenciómetro empleado

## Densidad



**Figura C. 8 Muestras de aceites para la determinación de densidad**

TABLE 5B. GENERALIZED PRODUCTS  
API CORRECTION TO 60 F

Z-0

TEMP. F	API GRAVITY AT OBSERVED TEMPERATURE CORRESPONDING API GRAVITY AT 60 F											TEMP. F
	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	
50	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.3	23.4	23.5	50	
51	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.3	23.4	23.5	51	
52	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.3	23.4	52	
53	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.3	53	
54	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.3	54	
55	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	55	
56	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	56	
57	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	57	
58	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	58	
59	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23.0	59	
60	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	60	
61	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	61	
62	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	22.8	62	
63	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	63	
64	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	22.7	64	
65	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	22.6	65	
66	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	66	
67	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	22.5	67	
68	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4	68	
69	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	69	
70	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	70	
71	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	71	
72	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	72	
73	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	73	
74	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	74	
75	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	75	
76	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	76	
77	21.0	21.1	21.2	21.3	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	77	
78	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	78	
79	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	79	
80	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	80	
81	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	81	
82	20.7	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	82	
83	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	83	
84	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.4	84	
85	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	21.3	85	
86	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	21.3	86	
87	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	87	
88	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.2	88	
89	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	89	
90	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.8	20.9	21.0	90	
91	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	91	
92	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	92	
93	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	93	
94	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	94	
95	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.4	20.5	20.6	20.7	95	
96	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	96	
97	19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	97	
98	19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	98	
99	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	99	
100	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	100	

\* DENOTES EXTRAPOLATED VALUE

API GRAVITY = 22.0 TO 22.9

Figura C. 9 Factores de corrección para la determinación de la densidad

Temp., T °C	Presión de saturación, P <sub>sat</sub> , kPa	Densidad, ρ kg/m <sup>3</sup>	
		Líquido	Vapor
0.01	0.6113	999.8	0.0048
5	0.8721	999.9	0.0068
10	1.2276	999.7	0.0094

Figura C. 10 Propiedades de agua saturada (Çengel & Ghajar, 2011)

## Viscosidad



Figura C. 11 Determinación de viscosidad cinemática

FACTORES PARA CONVERTIR EN cSt  
LOS SEGUNDOS OBTENIDOS EN LOS  
VISCOSÍMETROS CANNON - FENSKE

VISCOSÍMETRO ASTM No.	FACTOR* EN cSt / s		VISCOSIDAD CINEMÁTICA RANGO, cSt
	40°C	100°C	
25	0,002020	0,002011	0,5 A 2
50	0,004112	0,004095	0,8 A 4
100	0,0150	0,0150	3 A 15
150	0,04174	0,04156	7 A 35
200	0,1023	0,1019	20 A 100
300	0,2766	0,2754	50 A 250
350	0,4665	0,4645	100 A 500
400	1,1532	1,1484	240 A 1200

Figura C. 12 Tabla de factores para la determinación de viscosidad cinemática



## Acidez

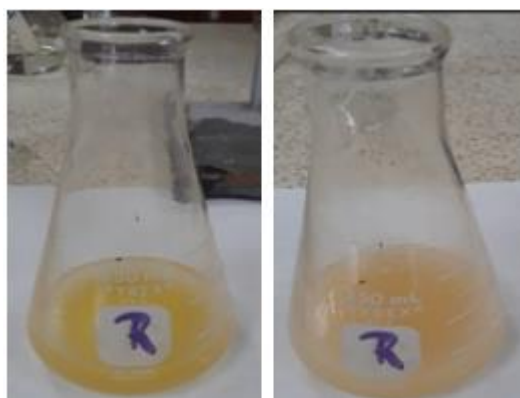


Figura C. 13 Determinación de acidez de aceites vegetales usados de restaurantes



Figura C. 14 Determinación de acidez de aceites vegetales usados de domicilios

## APÉNDICE D

### Proceso de recuperación y tratamiento de AVU a nivel de laboratorio

#### Almacenamiento de aceites vegetales usado



Figura D. 1 Almacenamiento de aceites vegetales usados de restaurantes y domicilios

#### Filtración



**Figura D. 2 Separación de sólidos mediante filtración simple de ambas muestras de aceites**



**Figura D. 3 Separación de sólidos mediante filtración al vacío de aceites vegetales usados de restaurantes**



**Figura D. 4 Recolección de aceite filtrado de muestras de domicilios y de restaurantes**

**Desgomado de aceite de restaurantes y de domicilios**



**Figura D. 5 Proceso de desgomado**



**Figura D. 6 Recolección y almacenamiento de aceite desgomado**

## Neutralización



Figura D. 7 Proceso de neutralizado



Figura D. 8 Recolección de aceite de domicilio neutralizado

## Lavado

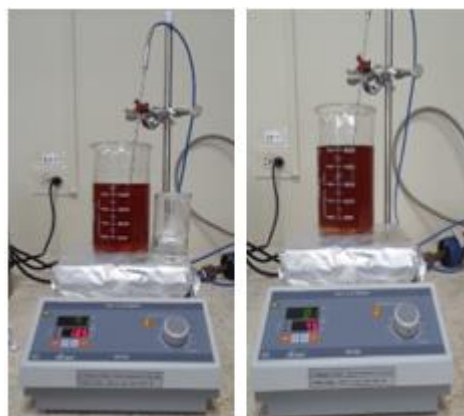


Figura D. 9 Proceso de lavado

## Secado



Figura D. 10 Proceso de secado y recolección de aceite de domicilios

## Decoloración



Figura D. 11 Proceso de decoloración de aceite de domicilio con carbón activado con una de proporción de 25:1

**Filtración secundaria**



**Figura D. 12 Filtración de aceite de domicilio decolorado**



**Figura D. 13 Aceites de domicilios (D) y de restaurantes (R) obtenidos posterior al proceso de decoloración**

## APÉNDICE E

2020	596.2
2019	607.5
2018	603.1
2017	567.5
2016	541.7
2015	556.8
2014	576.1
2013	567.3
2012	584.6
2011	585.7
2010	550.8
2009	521.9
2008	575.4
2007	525.4
2006	499.6
2005	468.2
2004	444.2
2003	402.0
2002	395.6
2001	394.3

**Figura E. 1 Valores de CEPCI para su uso en CAPCOST (Maxwell, 2020)**



Material Name	Classification	Price (\$/kg)	Flowrate (kg/h)	Annual Cost
AVU	Raw Material	\$ -	285.74	\$ -
Agua	Raw Material	\$ 0.00	1000.00	\$ 8,322
NaOH	Raw Material	\$ 1.50	1.00	\$ 12,483
Carbón activado	Raw Material	\$ 5.80	1.00	\$ 48,268
Ácido fosfórico	Raw Material	\$ 3.15	0.10	\$ 2,621
AVU final	Product	\$ (3.00)	230.78	\$ (5,761,653)

Figura E. 2 Costo de materia prima y de producto final (CAPCOST, 2017)

**Economic Options**

Cost of Land	\$	500,000
Taxation Rate		15%
Annual Interest Rate		10%
Salvage Value	\$	276,000
Working Capital	\$	377,000
FCI <sub>L</sub>	\$	2,760,000
Total Module Factor		1.18
Grass Roots Factor		0.50

**Economic Information Calculated From Given Information**

Revenue From Sales	\$	5,761,653
C <sub>RM</sub> (Raw Materials Costs)	\$	71,694
C <sub>UT</sub> (Cost of Utilities)	\$	643,000
C <sub>WT</sub> (Waste Treatment Costs)	\$	-
C <sub>OL</sub> (Cost of Operating Labor)	\$	936,740

Figura E. 3 Datos económicos (CAPCOST, 2017)

Year	Investment	d <sub>k</sub>	FCI <sub>L</sub> -Sd <sub>k</sub>	R	COM <sub>d</sub>	(R-COM <sub>d</sub> -d <sub>k</sub> )*(1-t)+d <sub>k</sub>	Cash Flow (Non-discounted)	Cash Flow (discounted)	Cumulative Cash Flow (discounted)	Cumulative Cash Flow (Non-discounted)
0	0.00		2.76				0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.50		2.76				(0.50)	(0.50)	(0.50)	(0.50)
1	1.66		2.76				(1.66)	(1.51)	(2.01)	(2.16)
2	1.10		2.76				(1.10)	(0.91)	(2.92)	(3.26)
2	0.38		2.76				(0.38)	(0.31)	(3.23)	(3.64)
3		0.55	2.21	5.76	3.96	1.61	1.61	1.21	(2.02)	(2.02)
4		0.88	1.32	5.76	3.96	1.66	1.66	1.14	(0.88)	(0.36)
5		0.53	0.79	5.76	3.96	1.61	1.61	1.00	0.12	1.25
6		0.32	0.48	5.76	3.96	1.58	1.58	0.89	1.01	2.83
7		0.32	0.16	5.76	3.96	1.58	1.58	0.81	1.82	4.40
8		0.16	-	5.76	3.96	1.55	1.55	0.73	2.54	5.96
9			-	5.76	3.96	1.53	1.53	0.65	3.19	7.49
10			-	5.76	3.96	1.53	1.53	0.59	3.78	9.02
11			-	5.76	3.96	1.53	1.53	0.54	4.32	10.55
12			-	5.76	3.96	1.76	1.76	0.56	4.88	12.31
12							0.88	0.28	5.16	13.19

Figura E. 4 Datos ingreso de flujo de caja (CAPCOST, 2017)

