

**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCION DE BIODIESEL DE
BORRA DE CAFÉ**

STEFANNY KATHERINE MONROY CARDONA

JULIETH KATERINE RODRÍGUEZ MANTILLA

Proyecto integral para optar el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Director

CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS

Ing. Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA

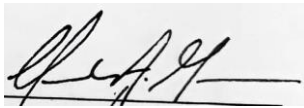
BOGOTA D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del
presidente Jurado



Claudio Alberto Moreno Arias

Firma directo

Nombre
Jurado

Nombre
Jurado

Nombre
Presidente Jurado

Bogotá D.C., agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luís Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingeniería

I.n.g Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del programa de Ingeniería de química

I.n.g Nubia Becerra

AGRADECIMIENTOS.

Quiero dar gracias a la vida y Dios por permitirme llegar a este punto final de otra etapa de mi vida, por ponerme obstáculos y aprendizajes para conocer mis capacidades en esta batalla.

Mi familia que siempre han sido los que más han apoyado en mis estudios, mi mami por siempre estar en mis días tristes y felices por ser mi mejor amiga también y compañía; mi papi por siempre buscar soluciones en las dificultades de mi vida; mi hermano por ayudarme en todas mis cosas y necesidades, mi hermana por ser la confidente y por haberme dado su hogar en un tiempo para volver a unirnos como hermanas; a mi sobrino Santiago por hacerme sentir una niña siempre y los extraño mucho a los dos; a mi cuñado Javier Cruz por ayudarme en momentos difíciles para mi carrera y poder terminarla y a mi perrito Federico por acompañarme en las noches en vela cuando realizaba todos mis trabajos de la universidad. A ellos que luchó para demostrarles cuan agradecida estoy por todo el apoyo.

Mi novio Daniel, que ha estado conmigo 5 años de carrera, siendo mi hombro de lágrimas y mi lugar de paciencia; sus palabras me motivan y reflexionan siempre para seguir luchando y aprendiendo de mi confianza y capacidades. Que a pesar de las dificultades que hemos vivido siempre me ha apoyado y ha creído en mí.

A mis amigas Erika Fajardo y Daniela Melo por aguantar mis días tristes de no confianza y siempre diciéndome lo mucho que confían en mí y en que lo iba a lograr. A ellas por ser mis confidentes y mi lugar de distracción en hablar de nuestros mayores gustos. A todos los compañeros y colaboradores de la universidad que me ayudaron en este proceso de aprendizaje; a mi compañera de tesis Julieth por ser paciente y guerrera en todo, que a pesar de nunca habernos conocido es una gran persona y sacar juntas adelante esto.

Por último, a 5 personas especiales en mi vida que a pesar de estar a miles kilómetros de distancia y nunca conocernos, me ayudaron a tener ánimos y seguir cada día luchando por este logro con su música inspiradora y mensajes motivadores, gracias Tomorrow x Together por ser los guardianes y felicidad de mi vida.

Stefanny Katherine Monroy Cardona

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento de este proyecto va dirigido a mi amada familia quienes me han apoyado desde el principio en este camino de convertirme en ingeniera química. A mi padre, a mis hermanas y Samuelito por todos sus sacrificios, sus enseñanzas, su amor incondicional el cual es mi mayor motivación; a mi mamá por su tenacidad, sus palabras de aliento, sus constantes ejemplos de voluntad y superación que me han brindado fortaleza. A mi amor quien ha sido mi compañía durante todo este tiempo y me ha dado su apoyo incondicional.

A mi compañero de vida simón quien me reconforta en los momentos de oscuridad, a mi compañera de tesis que gracias a su apoyo fue posible el desarrollo del proyecto y a mis amigos quienes compartieron sus conocimientos y alegrías sin esperar nada a cambio.

Julieth Katerine Rodríguez Mantilla

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los Criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
OBJETIVOS	16
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1. Generalidades del biodiesel	18
1.2. Biodiesel	21
<i>1.2.1. Fuentes de obtención</i>	21
<i>1.2.2. Usos</i>	22
<i>1.2.3. Impacto ambiental</i>	23
1.2.4. Normatividad	23
<i>1.2.5. Propiedades del biodiesel</i>	24
1.3. Materia prima	26
<i>1.3.1. Café</i>	26
<i>1.3.2. Borra de café</i>	27
<i>1.3.3. Características químicas</i>	27
<i>1.3.4. Consumo del café a nivel nacional</i>	31
<i>1.3.5. Empresas productoras de café</i>	31
<i>1.3.6. Empresa proveedora de la borra de café</i>	32
1.4. Dióxido de Carbono	33
<i>1.4.1. Características fisicoquímicas</i>	34
<i>1.4.2. Ficha de seguridad del dióxido de carbono</i>	34
<i>1.4.3. Normatividad colombiana</i>	36
<i>1.4.4. Impacto ambiental del dióxido de carbono</i>	37
1.5. Metanol	37
<i>1.5.1. Características fisicoquímicas</i>	37
<i>1.5.2. Ficha de seguridad del metanol</i>	39
<i>1.5.3. Normatividad colombiana</i>	39
<i>1.5.4. Impacto ambiental</i>	39
2. SELECCIÓN DEL PROCESO	41
2.1. Métodos de extracción	41
<i>2.1.1. Extracción por solventes orgánicos</i>	41
<i>2.1.2. Extracción a condiciones supercríticas</i>	44
2.2. Obtención del biodiesel: Transesterificación	48
<i>2.2.2. Transesterificación catalítica</i>	50

2.2.3. <i>Transesterificación con metanol supercrítico</i>	54
2.2.4. <i>Tipo de reactores</i>	56
2.3. Selección del proceso	57
2.3.1. <i>Método de extracción.</i>	1
2.3.2. <i>Método de obtención de biodiesel.</i>	1
3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO	5
3.1. Distribución de la planta piloto	5
3.1.1 <i>Descripción del proceso productivo</i>	5
3.2. Diagrama BFD	7
3.3. Diagrama PFD	7
3.4. Plano de la planta	8
3.5. Descripción de equipos	9
3.5.1. <i>Adecuación de materia prima</i>	9
3.5.2. <i>Extracción</i>	10
3.5.3. <i>Producción biodiesel</i>	15
3.5.4. <i>Almacenamiento</i>	22
3.6. Ubicación de la planta	25
3.6.1. <i>Ubicación geográfica</i>	26
3.6.2. <i>Condiciones climáticas</i>	26
3.6.3. <i>Vías de acceso</i>	27
3.6.4 <i>Centros de acopio de la materia prima</i>	30
3.6.5. <i>Acceso y transporte de materia prima</i>	32
3.6.6. <i>Recolección y almacenamiento materia prima</i>	33
3.6.7. <i>Transporte de producto</i>	33
3.6.8. <i>Servicios disponibles</i>	33
3.6.9. <i>Accesibilidad mano de obra</i>	33
3.6.10. <i>Estructura productiva</i>	34
3.6.11. <i>Incentivos</i>	34
3.6.12. <i>Venta de residuos</i>	34
4. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO	35
4.1. Aspen Plus	35
4.2. Descripción del proceso	35
4.3. Separación del CO ₂	39
4.4. Reacción de transesterificación	40
4.5. Análisis de resultados	43
4.6. Análisis de sensibilidad	45

4.6.1 <i>Análisis de sensibilidad separación de la trilooleina con el CO2 supercrítico</i>	45
4.6.2 <i>Análisis de sensibilidad del proceso de transesterificación.</i>	46
4.7. Análisis de ahorro energético	47
4.7.1. <i>Proceso de separación</i>	47
4.7.2. <i>Proceso de transesterificación</i>	49
4.8. Flujo volumétrico de los equipos	51
4.8.1. <i>Proceso de separación</i>	51
4.8.2. <i>Proceso de transesterificación</i>	52
4.9. Capacidad y especificaciones de los equipos	52
4.9.1. <i>Adecuación de la materia prima</i>	52
4.9.2. <i>Extracción por fluidos supercríticos</i>	53
4.9.3. <i>Transesterificación por fluidos supercríticos</i>	54
5. ANÁLISIS FINANCIERA	56
5.1. Costos de equipo de producción	56
5.2. Nómina y costos de mano de obra.	57
5.3. Depreciación equipos	1
5.4. Costos por unidad	2
5.4.1. <i>Estudio de mercado</i>	2
5.4.2. <i>Precio unitario materia prima</i>	3
5.5. Presupuesto CIF	3
5.6. Proyección de unidades para producir y vender	4
5.6.1. <i>Costos variables por unidad</i>	5
5.7. Ventas nacionales	6
5.8. Resumen general	7
5.9. Flujo de caja	8
5.9.1. <i>Inversión</i>	8
5.9.2. <i>Indicadores financieros</i>	8
6. CONCLUSIONES	10
BIBLIOGRAFÍA	12
ANEXOS	1

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Plantas productoras de biodiesel	19
Tabla 2. Propiedades del biodiesel	25
Tabla 3. Composición química en base seca del grano de café almendrado	28
Tabla 4. Composición química en base seca del grano de café tostado	29
Tabla 5. Composición química de la borra de café	30
Tabla 6. Participación en ventas de diferentes sectores	32
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas del dióxido de carbono	34
Tabla 8. Tarifa de los impuestos de CO ₂ para cada combustible determinado	36
Tabla 9. Características fisicoquímicas del metanol	38
Tabla 10. Clasificación de disolventes orgánicos	41
Tabla 11. Propiedades críticas de los FSC	46
Tabla 12. Velocidades de esterificación	50
Tabla 13. Fuentes bibliográficas de referencia para la implementación de los criterios de calificación	1
Tabla 14. Referencias bibliográficas para la calificación de los criterios en las matrices de selección	1
Tabla 15. Matriz de calificación para la selección del método de extracción	1
Tabla 16. Comparación del método convencional y el método a condiciones supercríticas con metanol en la producción del biodiesel	2
Tabla 17. Matriz de calificación método obtención de biodiesel	4
Tabla 18. Recolección de café	36
Tabla 19. Balance de materia en la unidad de secado 1	37
Tabla 20. Balance de materia en la unidad de secado 2	37
Tabla 21. Balance de materia en el extractor	38
Tabla 22. Balance de materia en la separación del CO ₂	40
Tabla 23. Flujo masico del aceite de borra de café y metanol	41
Tabla 24. Composición del biodiesel obtenido	43
Tabla 25. Algunas propiedades del biodiesel	43
Tabla 26. Producción de biodiesel de aceite de borra de café	44
Tabla 27. Resumen del consumo y ahorro de energía del proceso de separación	48
Tabla 28. Resumen del consumo y ahorro de energía del proceso de transesterificación	50
Tabla 29. Flujo volumetrico de cada equipo en la separación del aceite	51
Tabla 30. Flujo volumetrico de cada equipo en el proceso de transesterificación	52
Tabla 31. Flujo masico y tiempo de los secadores	53

Tabla 32. Capacidad masica de los secadores	53
Tabla 33. Tiempos de operación de cada equipo	54
Tabla 34. Plan de inversion de equipos para la obtención de biodiesel de borra de cafe	56
Tabla 35. Nomina de empleados	1
Tabla 36. Depreciación de equipos	1
Tabla 37. Estudio de mercado del proceso	2
Tabla 38. Costo unidad para materia prima	3
Tabla 39. Presupuesto CIF	4
Tabla 40. Crecimiento de la demanda	4
Tabla 41. Unidades a producir ventas nacionales	5
Tabla 42. Costo de variables por unidad	5
Tabla 43. Ventas nacionales por año	6
Tabla 44. Resumen general del proyecto	7
Tabla 45. Flujo de caja resumen	8
Tabla 46. Inversion	8
Tabla 47. Indicadores financieros	9

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución mundial de producción de etanol y biodiesel	18
Figura 2. Demanda del biodiesel en Colombia 2020	20
Figura 3. Demanda del biodiesel en Colombia en 2021	21
Figura 4. Sistema de extracción Soxhlet	43
Figura 5. Diagrama de fases para un FSC	45
Figura 6. Reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel	48
Figura 7. Reacciones reversibles y consecutivas de transesterificación	49
Figura 8. Diferencias de catalizadores básicos en la reacción de transesterificación	52
Figura 9. Esquema de obtención de biodiesel mediante catalisis homogénea básica	53
Figura 10. Diagrama de flujo para la transesterificación supercrítica de aceites vegetales a biodiesel	55
Figura 11. Secador al vacío industrial	9
Figura 12. Equipo de extracción de fluidos supercríticos	10
Figura 13. Esquema separador ciclónico	11
Figura 14. Separadores ciclónicos equipo fluidos supercríticos	12
Figura 15. Intercambiador de calor	13
Figura 16. Funcionamiento condensador	14
Figura 17. Mezclador	15
Figura 18. Reactor tubular de flujo continuo	16
Figura 19. Compresor de alta presión	17
Figura 20. Intercambiador de calor de placas	18
Figura 21. Separador de glicerina	20
Figura 22. Columna destiladora	21
Figura 23. Tanque criogénico	22
Figura 24. Tanque de almacenamiento criogénico	24
Figura 25. Tanque de almacenamiento del biodiesel	25
Figura 26. Ubicación geográfica de la planta de producción	26
Figura 27. Vía de acceso Bogotá	27
Figura 28. Vía de acceso Cota, Cundinamarca	28
Figura 29. Vía de acceso Tenjo, Cundinamarca	29
Figura 30. Puntos de centro de acopio de la materia prima	31
Figura 31. Vía de acceso a centros de acopio	32
Figura 32. Análisis de sensibilidad del flujo molar de CO ₂ vs fracción molar de trioleína	45

Figura 33. Analisis de sensibilidad del flujo masico del emtanol vs. La fracción molar de palmitato de metilo	46
Figura 34. Ahorro energetico del proceso de separación	47
Figura 35. Ahorro energetico del proceso de transesterificación	49

LISTA DE ABREVIATURAS

AGL: Ácidos grasos libres

B10: mezcla de 10% biodiesel 90% Diesel

BFD: diagrama de bloques de proceso

CO₂: dióxido de carbono

CIF: costos indirectos de fabricación

E10: mezcla de 10% bioetanol 90% etanol

EM: Ester metílicos

FSC: fluidos super críticos

Gly: glicerina

M.O.D: mano de obra directa

MeOH: metanol

M.O.I: mano de obra indirecta

PFD: diagrama de flujo de proceso

TG: Triglicéridos

TIR: tasa interna de retorno

VAN: valor actual neto

RESUMEN

Con el objetivo de diseñar una planta piloto de biodiesel a partir de la borra de café y aprovechar este residuo en una nueva alternativa; se realiza inicialmente una serie de investigaciones bibliográficas del uso de la borra de café en la producción de biodiesel, encontrando resultados en los diferentes métodos para la extracción del aceite y en la transesterificación de esta. Al conseguir por medio de la bibliografía datos como las condiciones de operación, las etapas del proceso, los solventes a utilizar, entre otras, se realizó una matriz para seleccionar el método de ambos procesos; dando como resultado el método de fluidos supercríticos tanto para la extracción del aceite como para la transesterificación. Los siguientes pasos fueron en realizar el estudio a nivel geográfico de la implementación de la planta piloto por medio de diferentes factores que determinaron la viabilidad de aplicar la planta piloto en Colombia; por otro lado, se realizó la simulación del proceso de producción de biodiesel a condiciones supercríticas usando datos basados en sistemas experimentales de las búsquedas bibliográficas. La simulación se realizó en el programa Aspen Plus, en donde en la primera parte se asume que se ha realizado ya la adecuación de la borra de café y se separa el agua del aceite por medio de CO₂ supercrítico para llevarla a la producción del biodiesel, y la segunda parte es llevar el aceite de borra de café a la transesterificación con metanol supercrítico en un reactor PFR continuo a 190 °C y 250 bar con una relación molar de 40:1 [43]. Resultando al final, una producción de biodiesel de 533,622 kg/año con una pureza del 94%. Finalmente, se estudió la rentabilidad económica teniendo en cuenta factores financieros que ayuden a estimar la factibilidad del proyecto en la implementación de una planta piloto de producción de biodiesel de borra de café en Colombia, obteniendo así un proceso rentable tanto económicamente como ambiental.

Palabras claves: Biodiesel, borra de café, extracción, transesterificación

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar una planta piloto para la producción de biodiesel de borra de café.

Objetivo específico

1. Identificar los métodos para la obtención del biodiesel a nivel teórico.
2. Seleccionar el proceso con los mejores rendimientos para la obtención del biodiesel a partir de la borra de café.
3. Desarrollar la simulación de una planta piloto para la producción del biodiesel
4. Realizar la evaluación económica del proceso de obtención del biodiesel.

INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles ha sido un gran debate en los últimos años. Factores como el abastecimiento, su accesibilidad, las bajas y altas del petróleo y las consecuencias negativas del uso de este como lo son la contaminación del medio ambiente; han generado la toma de conciencia y la búsqueda de soluciones en la aplicación de alternativas sostenibles por medio de estudios e investigaciones desarrollados a lo largo de los años.

El biodiesel es un biocombustible que se produce a partir de aceites vegetales o grasas animales, al igual que, al contar con propiedades similares al Diesel es capaz de realizar mezclas con el gas oil. Por eso mismo, esto surge como una solución a la problemática de los combustibles fósiles utilizando materias primas renovables, como el aprovechamiento de los residuos sólidos tales como la borra de café, que en muchas ocasiones se suele botar sin darle un segundo uso y usarla se estaría contribuyendo a la reducción de residuos en los rellenos sanitarios. La producción y consumo de café en Colombia es muy alta, por lo que su disponibilidad no llega a interferir en la obtención de la materia prima.

La producción de biodiesel a partir de la borra de café a condiciones supercríticas es una propuesta para llegar a obtener una energía más limpia en la utilización de residuos aprovechables, generando así oportunidades en empleo, desarrollo social, económico y ambiental.

1. MARCO TEÓRICO

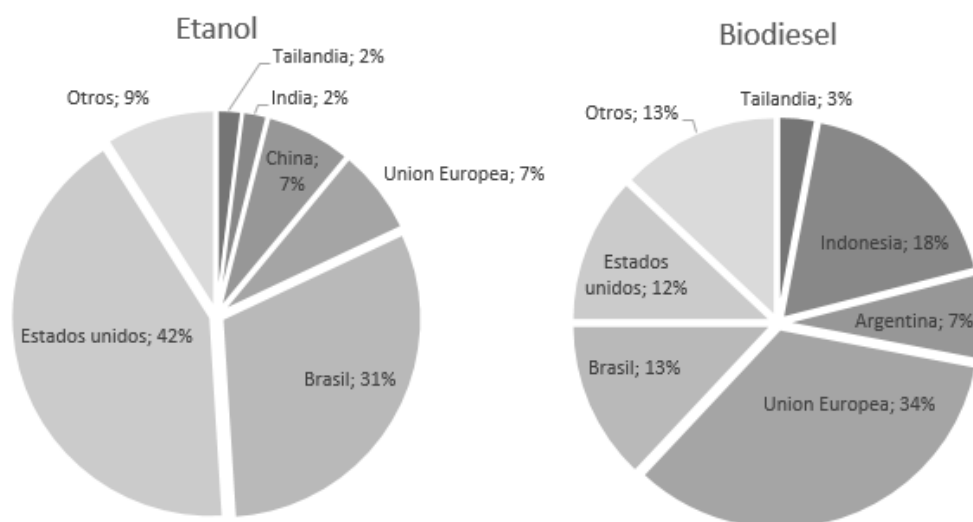
1.1. Generalidades del Biodiesel

Se ha evidenciado a lo largo del tiempo que la demanda en el aumento de energías renovables ha sido más significativa en referencia a los Biocombustibles, en especial al biodiesel. Esta nueva alternativa ha generado un mercado potencial en diversificación, sostenibilidad y seguridad ambiental y energética.

Según la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, la producción mundial de biodiesel se estima en 39 mil millones en el 2024 con un incremento del 27% respecto al 2014 [1], esto con la unión de varios países proveedores que se muestran en la figura 1 en donde los mayores proveedores de etanol y biodiesel son estados unidos (42%) y la unión europea (34%) respectivamente.

Figura 1.

Distribución mundial de producción de etanol y biodiesel.



Nota. La figura representa la distribución mundial de la producción del etanol y biodiesel en 2024. Tomada de: Fedebiocombustibles “biocombustibles, la alternativa verde”. [En línea] Disponible: https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2780-titulo-biocombustibles__la_alternativa_verde.htm

En Colombia, los biocombustibles han tomado más fuerza gracias a la aprobación de ley 939 del 2004, permitiendo ampliar el espectro en el uso de los biocombustibles generando las condiciones para estimular la producción y comercialización de biocombustibles no solo de

origen vegetal, sino de origen animal [2]. En la tabla 1 se encuentran las empresas productoras de biodiesel en Colombia actualmente en funcionamiento, donde se evidencia la alta capacidad y área de cultivo que tienen las empresas y el país para generar el biodiesel.

Tabla 1.

Plantas productoras de biodiesel.

región	Empresa	Capacidad (T/Año)	Área sembrada (ha)	Empleos directos	Empleos indirectos	Fecha entrada en operación
Norte, Codazzi	Oleoflores	70000	15555	2222	4444	ene-08
Norte, Santa Marta	Odín Energy	38000	8000	1142	2284	jun-08
Norte, Santa Marta	Biocombustibles, sostenibles del caribe	100000	22222	3174	6348	mar-08
Oriental, Facatativá	Bio D	100000	22222	3174	6348	feb-09
Central, B/bermeja	Ecodiesel de Colombia	100000	22222	3174	6348	jun-10
Oriental, San Carlos de Guarcá, Meta	Aceites Manuelita	100000	22222	3174	6348	jul-09
Total		506000	112443	16060	32120	

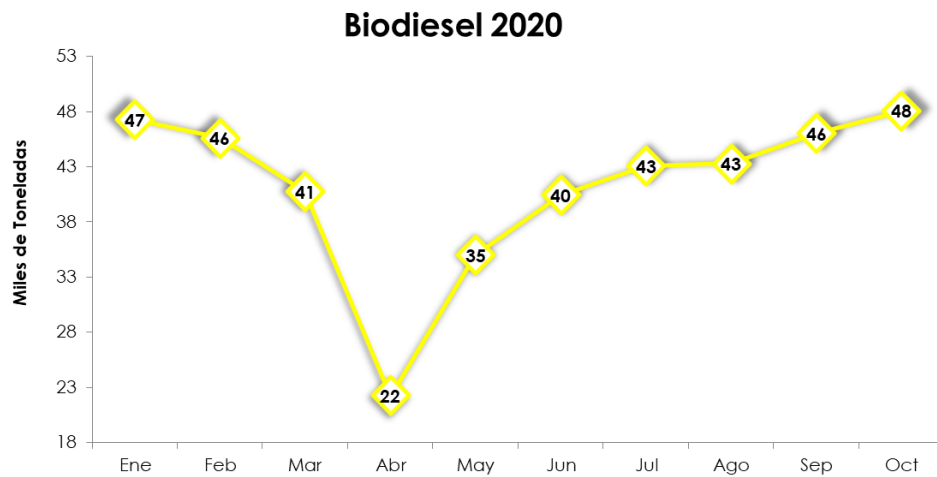
Nota. Esta tabla muestra las plantas productoras de biodiesel en funcionamiento (2011). Tomado de: Fedebiocombustibles “Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento” [En línea] Disponible: <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-271.htm>.

En el boletín 209 de la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, reportan un descenso en la demanda de biocombustibles en el mes de abril del 2020 consecuente al aislamiento por la enfermedad del Covid-19, se redujo un 70% en E10 y un 50% en B10 [3]. Luego de pasar el descenso, la reactivación del comercio en el mes de mayo generó el ascenso de la demanda de biocombustibles en Colombia como se observa en la figura 2. Aun así, en la

figura 3 se muestra que al llegar al año 2021 se mostro nuevamente un descenso considerable en la demanda de biodiesel.

Figura 2.

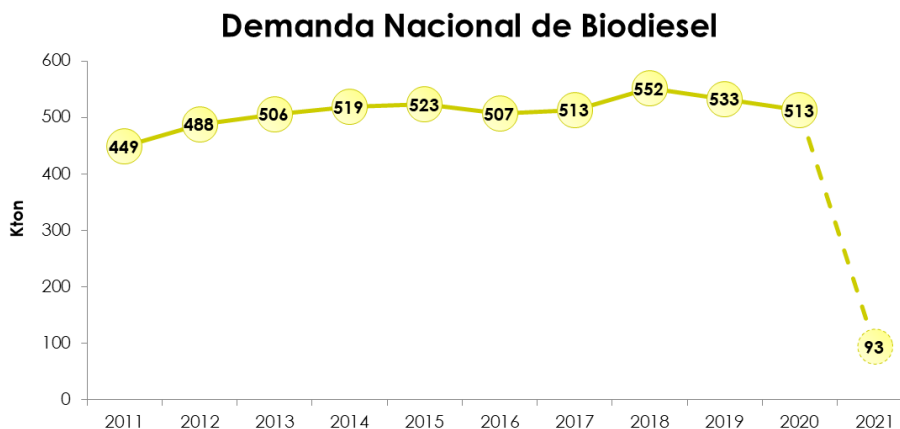
Demanda del biodiesel en Colombia 2020.



Nota. La figura representa la demanda que tuvo el biodiesel en Colombia en el año 2020. Tomado de: Fedebiocombustibles, “Demanda de los biocombustibles en Colombia”. [En línea] Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3297.htm>

Figura 3.

Demanda del biodiesel en Colombia en 2021.



Nota. La figura representa la demanda del biodiesel en Colombia para el año 2021. Tomado de: Fedebiocombustibles, “Demanda nacional de Biocombustibles en Colombia 2021”. [En línea] Disponible: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3308.htm>.

1.2. Biodiesel

Según la ASTM el biodiesel son ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de fuentes renovables. El biodiesel es empleado 100% puro o como una mezcla con Diesel convencional, la terminología usada consiste en nombrarla como Bx, donde x es el porcentaje de biodiesel que se usa en la mezcla; por ejemplo, una mezcla de B12 (12% biodiesel y 88% Diesel) y un B100 para definir el biodiesel puro.

Las propiedades de combustión del biodiesel son similares a las de los combustibles fósiles y se puede utilizar en motores existentes sin ninguna alteración. La selección de la materia prima es una tarea importante ya que más del 70% del costo de producción de biodiésel se atribuye a la materia prima [4].

1.2.1. Fuentes de obtención

La obtención del biodiesel se da por el proceso de transesterificación desde los triglicéridos de los aceites en presencia de un catalizador y con un alcohol como el metanol. Los aceites vegetales como el girasol, la soja y la palma son las materias primas más usadas para la

producción de biodiesel, pero también el biodiesel se puede obtener a partir de grasas animales y residuales. Actualmente, se ha realizado estudios e investigaciones donde se han podido hacer uso de fuentes alternativas clasificadas en 4 generaciones [5]:

- **Materia prima de primera generación:** son aquellas fuentes de alimento de maíz, trigo, cebada y caña de azúcar provenientes de la biomasa y generan una disminución en las emisiones de dióxido de carbono.
- **Materia prima de segunda generación:** provienen de materias primas ricas en celulosa y hemicelulosa, las cuales se encuentran en la pared de las células vegetales. Estas proporcionan un rendimiento energético alto para la producción de biodiesel.
- **Materia prima de tercera generación:** esta generación es proporcionada por las algas. Su producción es sostenible en todo el año teniendo control en sus condiciones, se puede cultivar en lagunas no tan profundas y estanques (cerrados o abiertos)
- **Materia prima de cuarta generación:** las fuentes de esta cuarta generación son modificadas genéticamente. La más común es la modificación metabólica de las algas, donde se altera el metabolismo de los ácidos grasos de las algas realizando una serie de procesos para llegar a la producción del biocombustible.

Desde el inicio de los biocombustibles en Colombia, el aceite de palma se convirtió en la principal materia prima a utilizar. Esto se debe a que el país es el mayor productor de aceite de palma por sus extensas áreas en cultivo y generar mejores rendimientos en la eficiencia energética [6] [7].

1.2.2. Usos

Los principales usos del biodiesel los podemos encontrar en los automóviles con motor Diesel como el combustible para el transporte de este. Haciéndola una de las alternativas más limpias a comparación con el petróleo que es utilizado en la mayoría de las veces.

El biodiesel se puede utilizar para la generación de energía eléctrica, como fuente de calor, para carga electrónicas por medio de pilas creadas para ser utilizadas a base de este combustible. Siendo esta una tecnología todavía en desarrollo pero que a futuro podrá convertirse en una opción inteligente sin muchas repercusiones al medio ambiente.[8]

Además de los usos energéticos que tiene el biodiesel también lo podemos utilizar para dar solución a otras problemáticas como en la limpieza de derrames de grasas, por ejemplo, con los derrames de petróleo. Asimismo, como disolvente para la limpieza de metales, retiro de pinturas y adhesivos [8].

1.2.3. Impacto ambiental

A pesar de su origen versátil como lo son las diferentes grasas vegetales y animales al ser un combustible generará emisiones de CO₂ las cuales son contaminantes para el medio ambiente generando el efecto invernadero, sin embargo, el porcentaje para el biodiesel de emisión de estos gases está alrededor del 60% a comparación con los combustibles de origen fósil. Según la empresa Biocombustibles sostenibles del Caribe, el biodiesel por su punto de inflamación (150°C) es más seguro de transportar que con el Diesel generando mejores ventajas y seguridades ambientales [9].

Cuando se comenzó a fabricar biodiesel se presentó la problemática de la utilización de cultivos como el maíz, la caña de azúcar, entre otros los cuales corresponden a materia prima de primera generación lo que implicaría utilizar recursos que directamente son alimentos como resultado estaría agravando la problemática de hambruna que existe. Por esta razón se plantea la producción a base de desechos de algunas industrias, en este caso la del café.

1.2.4. Normatividad

Estas son las diferentes normas que se deben tener en cuenta para la producción de biodiesel en Colombia y a nivel mundial.

Norma ASTM D6751. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for middle distillate fuels. Fue establecida en Estados Unidos y especifica las propiedades de calidad del Biodiesel (B100) en los grados 15 ppm azufre y 500 ppm azufre, para uso como componente de mezcla con combustibles Diésel definidos por la Norma ASTM D975.

Resolución 40666 del 20 de agosto de 2019. Por el cual se establece el contenido máximo de biocombustibles en motores Diesel del 12% en mezcla con el Diesel fósil dictadas en algunas zonas del país.

Resolución 40619 del 30 de junio de 2017. Por la cual se modifica el artículo 4° de la Resolución 898 de 1995, en relación con los criterios de calidad del combustible Diesel (ACPM) y los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla de procesos de combustión.

Resolución 40730 del 20 de septiembre del 2019. Por la cual se establece el contenido máximo de biocombustible para uso en motores Diesel en la mezcla con combustible Diesel fósil en algunas zonas de Colombia.

Norma NTC 5444. Biodiesel para motores diésel. Especificaciones. Esta norma determina los parámetros que debe cumplir el Biodiesel (B100) en Colombia y las especificaciones para los *aquil* ésteres para uso de combustible o como componentes de mezcla con combustible Diesel

1.2.5. Propiedades del biodiesel

En la tabla 2 se tiene las propiedades del biodiesel usado en motores, siguiendo la norma técnica Colombiana NTC 5444 y la norma internacional ASTM [7].

Tabla 2.*Propiedades del biodiesel.*

Propiedad	Unidades	Requisito	Métodos de ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	860-900	ASTM D4052 ISO 12185 ISO 3675 (3)
Numero de cetano	Cetanos	55 mínimo	ASTM D613 ISO 5165
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,5-5,0	ASTMD445 ISO 12937
Contenido de agua	mg/kg	24 máximo	ASTM E203 ISO 12937
contaminación total	mg/kg	24 máximo	En 12662
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ISO 2719 (4,5) ISO 3679 (6)
Contenido de metanol	% en masa	0,2 máximo	En 14110
corrosión en lámina de cobre	Unidad	clase 1	ASTM D130 ISO 2160
Estabilidad a la oxidación	Horas	12 mínimo	En 14112 En 15751
Cenizas sulfatadas	% en masa	0,02 máximo	ASTM D874 ISO 3987
Numero de acido	mg de KOH/g	0,5 máximo	ASTM D664 En 14104
índice de yodo	g yodo/ g muestra	120 máximo	En 14111
Punto de fluidez	°C	Reportar (1)	ASTM D97
Punto de nube/enturbiamiento	°C	Reportar (1)	ASTMD2500 ISO 3015

Tabla 2. (Continuación)

Contenido de fosforo	mg/kg	4,0 máximo	ASTM D4951 ISO 14107
Carbón residual	% en masa	0,3 máximo	ASTM D 4530 ISO 10370 (5)
Contenido de sodio y potasio	mg/kg	5 máximo	ASTM D 5853 En 14109 En 14108
Contenido de calcio y magnesio	mg/kg	5 máximo	ASTM D 5853 En 14109 En 14108
Contenido de monoglicéridos	% en masa	0,70 máximo	ASTM D6584 ISO 14105
Contenido de diglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de triglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105
Glicerina libre y total	% en masa	0,02/0,25	ASTM D 6584 ISO 14105 ISO14106
Contenido de metanol o etanol	% en masa	0,2 máximo	ISO 14110
Contenido de Ester	% en masa	96,5 mínimo	En 14103

Nota. En la tabla 2 se muestra las propiedades del biodiesel. tomado de: c. castro, “evaluación del biodiésel producido a partir de aserrín de café bajo un proceso de transesterificación a nivel laboratorio como fuente de energía alternativa,” *j. chem. inf. model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.

1.3. Materia prima

1.3.1 Café

Es el fruto proveniente del cafeto, la planta llega a medir entre 4 y 6 metros de altura, aunque mayormente la cortan para que los granos no se produzcan a tanta altura. Por su parte, el grano del café mide aproximadamente 1 centímetro [10]. Esta se utiliza para la preparación de una

bebida generalmente caliente de sabor intenso con la que se puede combinar con diferentes bebidas como la leche; además de que se puede preparar postres, dulces, panes entre otras para disfrutar de su gran sabor. Existen muchas variedades y es una de las bebidas preferidas en el mundo

1.3.2. Borra de café

Se conoce como borra del café al residuo proveniente de la preparación del mismo, en el que se encuentran muchos de los beneficios y propiedades del café ya que en el momento de preparar el café solo se aprovecha el 1% de estos. Como consecuencia podemos encontrar en la borra de café grasas que nos permitirán llevar a cabo el proceso de producción de biodiesel.

Según, Deligiannis, A. Papazafeiropoulou, G. Anastopoulos, y F. Zannikos, en su trabajo “Waste Coffee Grounds as an Energy Feedstock”, el contenido de grasas en la borra del café varía de 10 a 15%. Además, el café tiene un alto contenido de antioxidantes, lo que proporciona alta estabilidad a las grasas extraídas evitando su descomposición [11]. El aceite que contiene la borra de café tiene una composición química similar a muchos aceites vegetales como el algodón, soya, maíz, coco, entre otros [12].

1.3.3. Características químicas

1.3.3.a. Composición química del grano de café. Se presenta en la tabla 3 la composición química en base seca del grano de café almendra de variedades cultivadas en Colombia. Se observa que existe gran variedad en esta especie de café, teniendo mayor contenido en fibra, lípidos y proteínas; dependiendo de lo que se quiera obtener con el grano de café, se escogerá el más indicado.

Tabla 3.*Composición química en base seca del grano de café almendrado*

Variedad de Café	Fibra (%)	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Cafeína (%)	Ácidos clorogénicos (%)	Cenizas (%)
Borbón	21,75	15,27	13,9	1,15	7,37	3,78
Caturra	18,85	13,98	14,79	1,13	6,97	3,39
Colombia fruto amarillo	18,45	13,07	14,45	1,16	7,55	3,49
Colombia fruto rojo	16,69	14,27	13,92	1,19	7,42	3,52
Típica	19,71	13,99	14,5	1,2	6,66	3,43
Robusta (cultivos experimentales)	15,53	11,42	15,66	2,1	8,08	3,96

Nota. La tabla representa la composición química en base seca del grano de café almendrado de variedades de café cultivadas en Colombia. Tomado de: G. Puerta, “Composición química de una taza de café,” *Av. en Química*, no. 414, pp. 1–12, 2011, [En línea]. Disponible en: http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/publicaciones_avt0414composicion_quimica_de_una_taza_de_cafe.

La tabla 4 presenta la composición química en base seca del grano de café tostado de variedades cultivadas en Colombia. Como en el café almendrado, también existe gran variedad con el café tostado teniendo más contenido de fibra en cada una de ellas.

Tabla 4.

Composición química en base seca del grano de café tostado

Variedad de Café	Fibra (%)	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Cafeína (%)	Cenizas (%)
Caturra	21,71	12,09	13,8	1,27	3,95
Colombia fruto amarillo	20,96	11,4	13,77	1,28	3,84
Colombia fruto rojo	21,54	11,18	13,84	1,39	3,88
Típica	21,08	12,78	13,96	1,29	3,76

Nota. La tabla representa la composición química en base seca del grano de café tostado de variedades de café cultivadas en Colombia. Tomado de: G. Puerta, “Composición química de una taza de café,” *Av. en Química*, no. 414, pp. 1–12, 2011, [En línea]. Disponible en: http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/publicaciones_avt0414composicion_quimica_de_una_taza_de_cafe.

1.3.3.b. Composición química de la borra de café. La tabla 5 muestra la composición química de la borra de café utilizada como combustible.

Tabla 5.*Composición química de la borra de café.*

Componente	%	Componente	%	Componente	%
Humedad	7-8	Ácido tánico	0,90	Aminoácidos (%proteína)	
Proteína Cruda	10-12	Ácido palmítico	43,2	Alanina	6,2
Fibra cruda	35-44	Ácido palmitoleico	0,40	Valina	9,0
Nitrógeno libre	13-18	Ácido esteárico	9,70	Metionina	2,0
Ceniza	0,25-1,0	Ácido oleico	14,0	Isoleucina	6,3
Calcio	0,08	Ácido linoleico	37,0	Leucina	13,4
Magnesio	0,01	Ácido araquídico	3,8	Tirosina	4,2
Potasio	0,04	Ácido gadoleico	0,4	Fenilalanina	8,3
Sodio	0,03	Ácido behénico	0,2	Lisina	2,9
Fósforo	0,01	Ácidos grasos libres	7,6	Histidina	2,2
Manganeso	26,8ppm	Valor de yodo	85-93	Arginina	Trazas
Zinc	10ppm	No. de saponificación	185-193	Hidroxiprolina	1,0
Cobre	35ppm	Valor de peróxido	11-17	Glicina	7,6
Cloruros	(-)	-	-	Serina	1,9
Selenio	0,26ppm	-	-	Ácido Glutámico	18,6

Nota. La tabla muestra la composición química de la borra de café utilizada como biocombustible. tomado de: f. a. Angarita Daza, “borra de café como material absorbente para la remoción de cromo (III),” *univ. libr.*, no. iii, pp. 1-43, 2013.

1.3.4. Consumo del café a nivel nacional

En un artículo por la revista Semana, en el año 2020 el 99% de los hogares colombianos consume café. Además, “el gasto en la compra del grano fue de \$712.000 millones en el último año, cerca de 8.409 tazas de café, con un aumento del 7% y 6% respectivamente, comparados con 2019” [13]. Según el estudio realizado por la consultora Kantar sobre el consumo de café de los colombianos, “en cada hogar se gasta \$98.336 en café y se consumen 1.160 tazas anualmente, comportamiento que continúa en ascenso” [13].

1.3.5. Empresas productoras de café

En Colombia existen varias empresas con certificación productoras de las cuales encontramos 22 que son exportadoras, 11 cooperativas, fábricas de café, operador logístico, operador portuario, operador ferroviario; entre estas se encuentran Carcafé LTDA, Alma de huila, Cafexcoop S.A, Descafecol, Federación nacional de cafeteros de Colombia, Cooperativa de Caficultores de Andes Ltda, Cooperativa de Caficultores del Sur del Tolima Ltda, Descafecol S.A.S, Cofco Colombia International S.A.S, Trillacoop Ltda, Cooperativa de Caficultores de Salgar y entre otras. Además también empresas como BBI Colombia SAS – Tostao se encuentran en proceso de certificación, junto con Comercializadora Cumbres S.A.S, Coodecafec, Trilladora de Café de Cundinamarca, Inversiones Echeverri Barsa [14]; lo cual demuestra que el café es un producto muy importante en Colombia puesto que hay variedad de productos que se pueden ofrecer en los diferentes establecimientos de venta, generando así la posibilidad de crear franquicias en caso de que se ofrezca un servicio de novedoso y de calidad lo que por ende traerá oportunidades de empleo para la sociedad. Además Colombia es mundialmente reconocida por tener un café de excelente calidad y delicioso sabor, lo que podría llegar aprovechar para sembrar cultivos con semillas de mejor calidad que permitan aumentar el precio de ventas del mismo, beneficiando así a los caficultores los cuales tendrán un incentivo en el desarrollo de su labor y quizás más personas quieren aprender de la siembra para así fomentar la agricultura; la cual es de suma importancia en nuestro país debido a la condiciones climáticas que permiten gran variedad de cosechas en todo el año.

1.3.6. Empresa proveedora de la borra de café

Según la revista Portafolio, Procafécol, la empresa que maneja las tiendas Juan Valdez tuvo un crecimiento del 9,7% en ventas en el año 2019 con una utilidad de más de \$8.000 millones [15].

En el año 2019, Juan Valdez operó con 318 tiendas a nivel nacional y obtuvo alianzas estratégicas con marcas grandes para obtener un 25% de aumento en sus ventas. Al igual que, se realizaron 17 proyectos que fortalecieron la innovación en tiendas, la calidad del producto premium colombiano, el reconocimiento del gran trabajo de los caficultores y en programas de ayuda social. En la tabla 6 se muestra la participación en ventas que tuvo el sector de las tiendas que conforma las propias, las franquicias y las aperturas; el sector de consumo masivo como lo son los puntos de ventas y los clientes; y para el sector institucional se tiene los aeropuertos, restaurantes, distribuidores, corporativos y hoteles [16]. Cabe destacar que las tiendas tienen el mayor consumo de café del país por su alto porcentaje en ventas.

Tabla 6.

Participación en ventas de diferentes sectores.

Sector	Participación en venta
Tiendas	69,9%
Consumo masivo	12,5%
Institucional	3.5%

Nota. En la tabla se muestra la participación en ventas en diferentes sectores que tuvo la compañía Juan Valdez en el 2019. Tomado de: Juan Valdez, “Informe de Gestión 2019,” Rev. PH, 2019, <https://www.juanvaldezcafe.com/sites/default/files/InformeGestionProcafécolS.A.2019.pdf>.

Juan Valdez ha sido una de las empresas que ha promovido el desarrollo sostenible en las buenas prácticas ambientales y sociales en conjunto con los colaboradores, accionistas y

caficultores. Estas prácticas constan de restauración de la zona de descarga, la calidad en los procesos y en la reducción de carga contaminante; como en programas sociales en fortalecer la labor de los jóvenes caficultores que viven en zonas de conflicto armado y en el empoderamiento social y económico de las mujeres [16].

El punto más importante está en el aprovechamiento de los residuos orgánicos y reciclables; en tiendas como Bogotá, Medellín y la planta de Frezquísimos se obtuvieron alrededor de 348 toneladas de residuos en todo el año 2019 [16]. Donde, a cada uno de estos residuos se dispusieron en programas para aprovecharlos en productos alternos, como en los orgánicos la mayoría se volvieron abono o en diseño de piezas artesanales con la borra de café, y para los reciclables se realizó el rediseño de sillas y muebles.

Por esto, Juan Valdez es una de las empresas más grandes a nivel nacional en el consumo de café y en promover iniciativas sostenibles, fortaleciendo los negocios para la fácil obtención de la materia prima necesaria en la producción de biodiesel.

1.4. Dióxido de Carbono

Es un gas incoloro y poco reactivo, lo podemos encontrar en la atmósfera puesto que se involucra en varios procesos como lo son la fotosíntesis, la respiración celular, combustión de combustibles, fermentación entre otros.

1.4.1. Características fisicoquímicas

Tabla 7.

Propiedades fisicoquímicas del dióxido de carbono

Propiedades fisicoquímicas del dióxido de carbono	
Formula molecular	CO ₂
Masa molecular	44,01 g/mol
Forma molecular	Lineal O=C=O
Estructura	Cristalina, tipo cuarzo
Estabilidad	Alta
Color gas	Incoloro
Color solido	Blanco
Estado	Gas, líquido y solido
Numero CAS	124-38-9
Densidad en fase gaseosa	1,98 kg/m ³
Densidad en fase solida	1600 kg/m ³
Solubilidad en agua	1,45 kg/m ³
Punto de fusión	-57 °C (216 K) presurizado
Punto de ebullición	-78 °C (195 K) sublimación
Calor latente de vaporización	23,13 KJ/mol (1 atm)
Viscosidad	0,07 cP a -78 °C
Conductividad térmica	0,02546 W/m °C
Acidez	6,35 y 10,33 pKa
Temperatura crítica	304,21 K (31,06 °C)

Nota. Esta tabla muestra las propiedades fisicoquímicas que presenta el dióxido de carbono. Tomado de: New jersey department of health. “Hoja informativa sobre sustancias peligrosas, dióxido de carbono”. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0343sp.pdf>

1.4.2 Ficha de seguridad del dióxido de carbono

- Límites de exposición laboral

OSHA: El PEL (límite de exposición) es de 5000 ppm durante una jornada laboral.

NIOSH: El REL (límite de exposición a corto plazo) es de 5000 ppm como promedio durante una jornada de 10 horas y de 30000 ppm, que nunca debe excederse durante ningún periodo de trabajo de 15 minutos.

ACGIH: El TLV (valor límite de exposición) es de 5000 ppm como promedio durante una jornada de 8 horas y de 30000 ppm como STEL.

Se debe utilizar implementos de seguridad para el trabajo con esta sustancia como lo son guantes, gafas y prendas de protección; además de informar a las personas encargadas de su manipulación sobre los riesgos de esta. Tener un plan de evacuación caso de derrames o algún otro accidente y contar con el equipo necesario como extintores especiales para esta sustancia, zonas de ventilación, entre otras que permitan atender la emergencia correctamente.

La manipulación y almacenamiento del dióxido es de suma importancia pues si no se hace correctamente este puede reaccionar con algunos elementos tales como:

- El polvo de varios metales (como Mg, Zr, Cr y Ti) puede inflamarse o explotar cuando esté suspendido en dióxido de carbono.
- El dióxido de carbono reacciona con agua para formar ácido carbónico.
- El dióxido de carbono no es compatible con agentes oxidantes (percloratos, peróxidos, permanganatos cloratos nitratos, cloro, bromo y flúor); agentes reductores (litio, sodio, aluminio y los correspondientes a hidruros); carburos metálicos, sales metálicas, ni bases fuertes (hidróxido de sodio e hidróxido de potasio).
- Almacene en un área fresca y bien ventilada en recipientes bien cerrados, alejados de materiales combustibles.
- El dióxido de carbono puede acumular electricidad estática, incluso si se envasa en recipientes debidamente puestos a tierra. [17]

1.4.3 Normatividad colombiana

- Decreto 926 del 1 de junio del 2017, considera el impuesto nacional al carbono una herramienta adicional y costo efectiva para disminuir la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
- resolución 1447 del 1 de agosto del 2018, establece que el estado planificara el aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar el desarrollo sostenible y la disminución de gases de efecto invernadero
- Ley 629 del 2000, donde aprueban el protocolo de Kioto de la Convención Marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, que los países se comprometen a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Ley 1819 de 2016, establece los impuestos al carbono en una tarifa fija especifica junto con el factor de emisión de dióxido de carbono por cada combustible.

Tabla 8.

Tarifa de los impuestos de CO2 para cada combustible determinado.

Combustible fósil	Unidad	Tarifa/unidad
Gas natural	Metro cubico	\$ 29
Gas licuado de petróleo	Galón	\$ 95
Gasolina	Galón	\$ 135
Kerosene y Jet Fuel	Galón	\$ 148
ACPM	Galón	\$ 152
Fuel Oil	Galón	\$ 177

Nota. La tabla muestra las tarifas de impuestos del CO2 para diferentes combustibles. Tomado de: Régimen Legal de Bogotá D.C. “Ley 1819 de 2016 nivel nacional” [En línea] Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=68189>

1.4.4 Impacto ambiental del dióxido de carbono

Como consecuencia de las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles o de cualquier sustancia que contenga carbono, las cantidades de CO₂ en el ambiente han aumentado de manera drástica llegando a tener consecuencias negativas sobre el medio ambiente a pesar de que este gas sea parte del proceso de respiración de los seres vivos. Al darse este aumento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, trae consigo algunos efectos en la tierra entre los más notables son el deterioro de la capa de ozono provocando el efecto invernadero, el cual retiene parte de los rayos solares haciendo que la superficie de la tierra se caliente provocando cambios climáticos desfavorables para el funcionamiento normal de la vida; afectando así los cultivos, dando pie a catástrofes naturales y al derretimiento de las placas de hielo de los polos.

1.5 Metanol

Es un compuesto químico resultado de la unión de un grupo hidroxilo (OH) con una cadena carbonatada, el metanol es un alcohol no bebible y en condiciones ambientales normales se presenta como un líquido incoloro, volátil e inflamable[18]. Generalmente se utiliza para la elaboración de combustibles, disolventes y anticongelantes. El metanol se produce sintéticamente derivado del gas natural pero también hace parte de algunos procesos metabólicos.

1.5.1 Características fisicoquímicas

En la siguiente tabla se especificaron las características fisicoquímicas del metanol.

Tabla 9.*Características fisicoquímicas del metanol*

Propiedad	Valor
Peso molecular (g/mol)	32.04
Punto de ebullición (°C)	67,4 ; 760 mmhg
Punto de fusión (°C)	-97,8
Presión de vapor (mmhg)	92; 2°C 126; 25°C 160; 30°C
Gravedad específica (Agua =1)	0,7915; 20/4°C 0,7866; 25°C
Densidad del vapor (Aire =1)	1,11
pH	No reportado
Solubilidad en agua	Miscible
Log kow	-0,67
Límites de inflamabilidad (% vol)	5,5 - 44
Temperatura de autoignición (°C)	470
Punto de inflamación	15,6 ; copa abierta 12,2; copa cerrada

Nota. Esta tabla muestra las propiedades físicas del metanol. Tomado de: Documentación ideam. “Guía Metanol 2019”. [En línea] Disponible en:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia19.pdf>

El metanol participa en reacciones de deshidrogenación, esterificación, carbonización entre otras dependiendo del catalizador que se utilice en el proceso.

1.5.2. Ficha de seguridad del metanol

El metanol es muy inflamable y al contacto con el aire puede tener reacciones explosivas lo cual hace que su manejo sea potencialmente peligroso, además es tóxico por inhalación.

Niveles permisibles de exposición laboral

- TLV (TWA; 8 horas; ACGIH): 200 ppm. Valor límite umbral.
- PEL (TWA; 8 horas; OSHA para la industria general): 200 ppm, 260 mg/m³. Límite permisible de exposición.
- PEL (TWA; OSHA para la industria de la construcción): 200 ppm, 260 mg/m³.
- STEL (TWA; 10 horas; NIOSH): 250 ppm. Límite de exposición en periodos cortos y consumo.
- STEL (ACGIH): 250 ppm.

Es obligatorio el uso de implementos de protección y seguridad como guantes, caretas, gafas y ropa que evite el contacto directo. [19]

1.5.3. Normatividad colombiana

- Ley 693 de 2001, las gasolinas que se utilicen en el país deben contener la cantidad y calidad establecida por el Ministerio de Minas y Energía de los componentes oxigenados como los alcoholes carburantes.
- Decreto 2272 de 1991, se estipula la adquisición y transporte del metanol o el alcohol metílico, al igual, mencionando que el metanol que se use para biodiesel debe ser comercializado a empresas certificadas con una autorización.

1.5.4. Impacto ambiental

Según la guía sobre el metanol de documentación IDEAM, “el metanol se degrada fácilmente en el medio ambiente mediante procesos de foto oxidación y biodegradación. La vida media para el metanol en la atmósfera se ha reportado entre 7 y 18 días para la reacción atmosférica

con radicales hidroxilos. Además, hay muchos géneros y cepas de microorganismos capaces de utilizar el metanol como sustrato de crecimiento degradándose por completo hasta anhídrido carbónico y agua. El Metanol es fácilmente biodegradable en condiciones tanto aerobias como anaerobias en una amplia variedad de medios naturales, entre ellos agua dulce y salada, sedimentos y suelos, agua freática, material de acuíferos y aguas residuales industriales; el 70% del metanol de los alcantarillados se suele degradar en un plazo de 5 días” [19].

2. SELECCIÓN DEL PROCESO

2.1. Métodos de extracción

2.1.1. Extracción por solventes orgánicos

La extracción con solvente orgánico es el método de extracción de lípidos más utilizado. Un disolvente adecuado debería poder hacer contacto físico directo y disolver los lípidos penetrando en la pared celular de la biomasa. Además, el disolvente debe ser insoluble en agua, tener una densidad diferente a la del agua y tener un punto de ebullición bajo para una fácil separación después de la extracción [20]. En la tabla 9 se muestran los disolventes orgánicos más usados en esta extracción.

Tabla 10.

Clasificación de disolventes orgánicos.

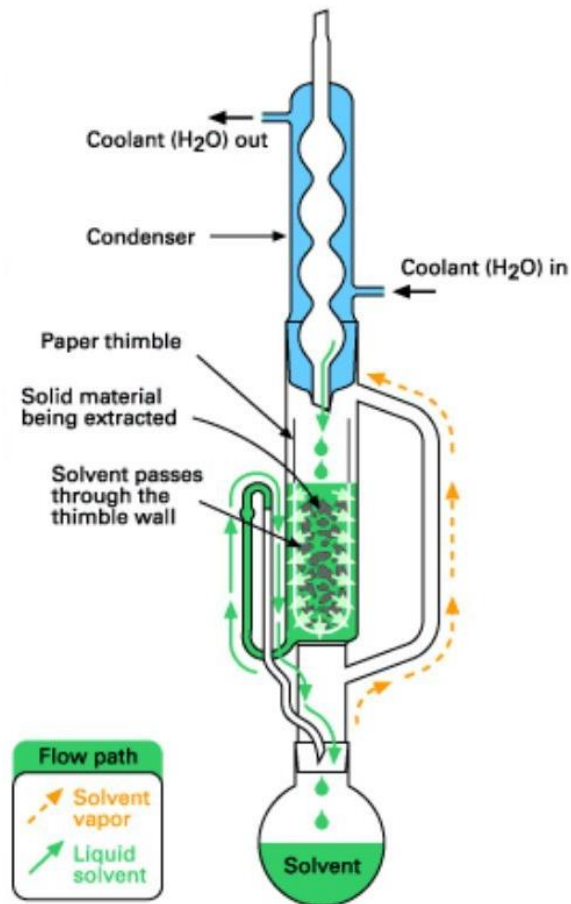
Clasificación de los disolventes	
Clases de disolventes	Ejemplos de los disolventes más utilizados
Hidrocarburos alifáticos	Pentano, hexano, heptano, decano
Hidrocarburos alicíclicos	Ciclohexano, metilciclohexano, (alfa-Pineno)
Hidrocarburos aromáticos	Benceno, tolueno, xileno, etilbenceno, estireno
Hidrocarburo halogenados	Cloruro de metileno, cloroformo, tricloroetileno, tetracloruro de carbono, 1,2-dicloroetano, freones, 1,1,1-tricloroetano, tetracloroetileno
Alcoholes	Metanol, etanol, i-propanol, butanol
Glicoles	Etilenglicol, dietilenglicol
Eteres	2-metoxietanol, etoxietanol, butoxietanol, p-dioxano
Esteres	Acetato de metilo, acetato de etilo, acetato de i-propilo, acetato de n-butilo, acetato de i-butilo, acetato de 2-etoxietilo, metacrilato de metilo
Cetonas	Acetona, butanona-2, 4-Metil-pentanona-2, hexanona-2, ciclohexanona
Otros	Nitroparafinas, disulfuro de carbono

Nota. En la tabla se muestra la clasificación de los disolventes orgánicos más utilizados en el proceso de extracción donde se muestran algunos ejemplos. Tomado de: Proyecto Fittema. “disolventes”. [En línea]. Disponible en: <http://istas.net/descargas/Doc%20de%20FITTEMA%20-%20DISOLVENTES.pdf>

2.1.1.a. Procedimiento de extracción por solventes orgánicos. Para la obtención de biodiesel de borra de café por medio de solventes orgánicos a escala laboratorio se inicia con el secado de la materia prima utilizando el calor del sol para eliminar la humedad presente en esta y así evitar el crecimiento de microorganismos [11]. Seguido a esto se realiza la medición del contenido de humedad, la cual se puede llevar a cabo en una balanza para la medición de humedad tomando una pequeña muestra del lote que se va a utilizar. Después de comprobar el contenido de humedad se realiza el montaje para la extracción con solventes orgánicos; generalmente por medio de la extracción Soxhlet que consiste en colocar la materia prima dentro de un papel filtro que permitirá contener la muestra impidiendo que se mezcle con el aceite arrastrado por el solvente para que no se mezclen las dos fases, en este caso la sólida de la materia prima con la líquida del aceite-solvente; se utiliza agua como refrigerante en el montaje para mantener una temperatura constante unos cuantos grados mayor al punto de ebullición del solvente en este caso alrededor de los 70°C para asegurar el arrastre de las grasas [11].

Figura 4.

Sistema de extracción Soxhlet.



Nota. En la figura se observa el sistema de extracción Soxhlet con solventes orgánicos. Tomado de: Analitek. “la importancia de un sistema de extracción soxhlet en tu laboratorio”. [En línea] Disponible en: <http://blog.analitek.com/la-importancia-de-un-sistema-de-extraccion-soxhlet-en-tu-laboratorio-0-1>

Esta extracción es constante con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material permitiendo alcanzar un buen porcentaje de extracción con una menor cantidad de solvente, a diferencia de otros montajes en los que es necesario contar con una buena cantidad de solvente ya que este se va evaporando a medida que va realizando ciclos

y además también se va saturando a medida que entra en contacto con la borra lo que hace que la eficiencia de la extracción sea muy baja por lo cual se necesita alimentar la extracción constantemente de solvente limpio. Los solventes que se han utilizado para la extracción de grasas de la borra del café son hexano, éter de petróleo, isopropanol y metanol puesto que estos debido a su solubilidad permiten la extracción de las grasas de la borra, después extraer las grasas de la borra se procede a separar el solvente de las grasas; esta separación se lleva a cabo en un proceso de ebullición constante en el que no varían las condiciones de temperatura y presión, pasado el proceso de destilación se calienta un poco más el aceite a 65°C para terminar de limpiar la mayoría de rastro del solvente para después filtrar al vacío el aceite para retirar cualquier impureza [21] y pasar al proceso de transesterificación. En la industria podemos encontrar equipos como el de Extracción Sólido-Líquido, Controlado desde Computador (PC), "UESLC" que se basa en un proceso continuo en contracorriente.

2.1.1.b. Ventajas y desventajas. Esta extracción es un método eficiente para semillas oleaginosas o materias primas con contenido bajo de aceite y recupera la mayoría del aceite, dejando entre 0,5% a 0,7% de aceite residual [23]. Manejar esta extracción a gran escala maximiza los rendimientos y costos económicos, pero este método trae consigo importantes desventajas.

Una de esas desventajas son los solventes para utilizar, el más conocido como el hexano, es un compuesto muy tóxico generando problemas de salud y al medioambiente. Para esta extracción al usar una mayor cantidad de solvente puede llegar a contaminar el aceite y obtener un producto tóxico, por lo que se debe requerir de más tiempo de postratamiento, purga del aceite y en demoras en la producción final [24].

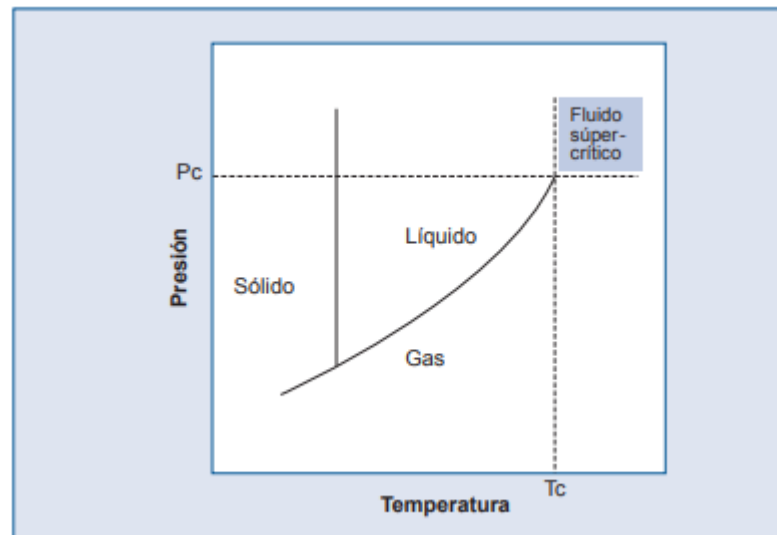
2.1.2. Extracción a condiciones supercríticas

La extracción con FSC es una operación unitaria de transferencia de masa, una nueva alternativa para la extracción de aceites vegetales utilizando aplicaciones de alta presión y temperaturas más allá de su punto crítico. Esta extracción permite controlar y manipular propiedades como la difusividad, viscosidad y densidad del fluido; generando una variación en la selectividad de solvencia del proceso. El fluido supercrítico se somete a condiciones por encima de su punto crítico, en el cual la temperatura y la presión del gas y el líquido son indistinguibles [24]. En la figura 5 se muestra el diagrama de fases de los fluidos super críticos

donde se detalla la fase crítica que es alcanzada en una determinada presión y temperatura llamadas P_c (presión crítica) y T_c (Temperatura crítica).

Figura 5.

Diagrama de fases para un FSC.



Nota. Esta figura muestra el diagrama de fases y la sección donde actúan los FSC. Tomado de: A. Esquivel F. and P. Vargas Aguilar, “Uso de aceites esenciales extraídos por medio de fluidos supercríticos para la elaboración de alimentos funcionales,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 20, no. 4, p. 7, 2007.

El fluido más utilizado es el CO_2 debido a que presenta unas constantes críticas de 73,8 bares de presión y 31 °C de temperatura. La utilización de CO_2 supercrítico como disolvente permite obtener productos con propiedades mejoradas aproximadas de su estado natural y sin restos de disolvente [25].

Tabla 11.

Propiedades críticas de los FSC.

Fluido	Tc (oC)	Pc (oC)	ρ (Kg/m³)
Cetileno	36	62,47	232,14
Acetona	235	47	278
Agua	374	220,9	322,6
Dióxido de carbono	31	73,86	467,6
Etano	32	48,71	135,75
Etanol	240,4	61,4	276
Etileno	9	50,4	195,8
Metano	-83	45,95	161,43
Metanol	239,4	80,9	272
Propano	97	42,47	225,64
Propileno	97,8	46	232

Nota. Esta tabla muestra las propiedades críticas de los FSC. Tomado de: “Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria,” Inf. Tecnol., vol. 18, no. 1, pp. 53–66, 2007, doi: 10.4067/s0718-07642007000100009.

Como se observa en la tabla 10, hay gran variedad de solventes y compuestos que se pueden usar como fluidos supercríticos y son capaces de llevarlos a su punto más crítico en temperatura y presión.

2.1.2.a. Etapas de la extracción por FSC. Existen 4 etapas básicas del proceso de extracción con fluidos supercríticos:

1. Etapa de presurización: esta etapa tiene como función el alcanzar la presión necesaria del solvente para la extracción, se puede hacer uso de compresores o por medio de bombas.
2. Etapa de ajuste de temperatura: para llegar a la temperatura requerida, el solvente se somete a una remoción o adición de energía térmica, haciendo uso de intercambiadores de calor o resistencias eléctricas.
3. Etapa de extracción: luego de alcanzar los puntos críticos, es llevada a un recipiente extractor, en donde entrará en contacto con la matriz y arrastra el soluto.

4. Etapa de separación: la última etapa tiene como función separar la sustancia extraída que está mezclada con el solvente.

2.1.2.b. Ventajas y desventajas. Esta extracción posee grandes ventajas en comparación con la extracción de solventes orgánicos; la más importante es la utilización de solventes no tóxicos, como el CO₂, que no dejan residuos en el aceite resultante, calidad del aceite, se retira fácilmente y se consigue en diferentes grados de pureza [26]. Este a no tener un proceso postratamiento genera eficiencias y rendimientos mayores por lo que su proceso de extracción es mucho más rápido. También cabe agregar que, al no mezclarse con la materia prima, esta se podrá utilizar en otros procesos o para la creación de otros subproductos puesto que solo se le retirará los aceites. Al igual que sus ventajas, este tiene una desventaja de importancia y es la alta inversión inicial de equipos y mantenimiento que se debe tener en el proceso, llegando a tener altos costos [24].

2.1.2.c. Aplicaciones de los FSC. Actualmente se ha intensificado y ampliado la aplicación de los FSC en diferentes campos industriales, como en la agroindustria, alimentaria, farmacéutica, nanotecnología, cosmética, entre otras. Han sido investigadas aplicaciones nuevas que usan este tipo de proceso, como el desengrase de lecitina bruta, obtención de proteína de germen de maíz, separaciones químicas y purificación, procesamiento de polímeros, cromatografía de fluidos supercríticos e investigaciones para usar disolventes diferentes del CO₂ [23].

En Colombia la aplicación de los FSC es muy prometedora por la gran biodiversidad y materias primas aprovechables que se pueden utilizar con esta tecnología para obtener productos nuevos y de calidad. Por ejemplo, investigaciones sobre la extracción de plantas nativas para obtener los compuestos bioactivos [26].

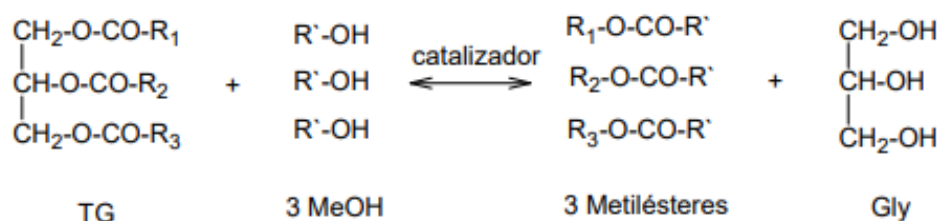
Otra aplicación, es usar esta tecnología en el análisis de los plaguicidas, teniendo resultados rápidos, sencillos y con un buen panorama para el medioambiente. Inicialmente en los años setenta, los fluidos supercríticos tomaron fuerza en la industria en una planta para la producción de café descafeinado [70]. Usando el dióxido de carbono como FSC para extraer la cafeína de los granos de café, resultando un desarrollo potente en la aplicación a escala analítica en esos tiempos.

2.2. Obtención del biodiesel: Transesterificación

La transesterificación también llamada alcoholólisis es la reacción principal, mostrada en la figura, de la producción de biodiesel. Es un proceso donde la grasa o el aceite se mezcla con un alcohol de cadena corta, reaccionando mediante un catalizador (básico o ácido) para producir un éster (biodiesel) y un glicerol (glicerina) [7]. La figura 6 nos muestra la reacción de transesterificación global en la obtención del biodiesel, teniendo una molécula de triglicérido (TG) que reacciona con tres moléculas de metanol (MeOH) produciendo 3 moléculas de metilésteres y el subproducto glicerina (Gly), esta reacción se hace presente de un catalizador.

Figura 6.

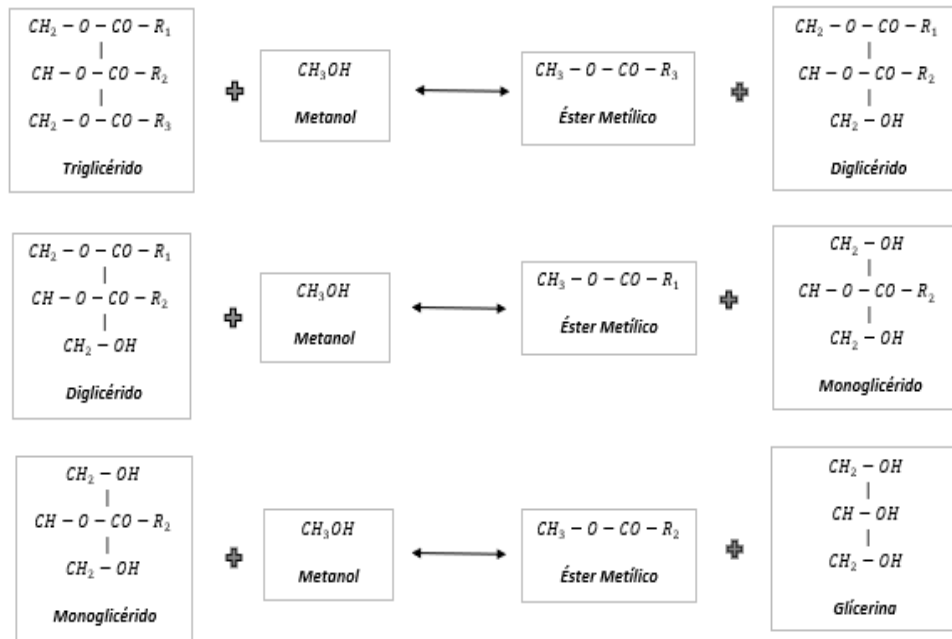
Reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel.



Nota. Esta figura muestra la reacción global de transesterificación para la obtención de biodiesel. Tomado de: D. Manuale, “Obtención de biodiésel en condiciones supercríticas,” *Univ. Nac. Litoral*, vol. 1, pp. 37–45, 2010.

Figura 7.

Reacciones reversibles y consecutivas de transesterificación



Nota. En esta figura se muestra las reacciones en cadena para la obtención del éster metílico que es el producto de interés del proceso. Tomado de: Universidad de Palermo, “Conferencia Biodiesel”. [En línea] Disponible en: https://www.palermo.edu/economicas/pdf_economicas/Presentacion_biocom_Steinberg.pdf.

En la figura 7 ya se muestra las reacciones en cadena y consecutivas, en donde se tiene los productos intermedios del diglicérido y el monoglicérido. La mezcla de Ester metílicos que se producen en la secuencia de la reacción es lo que se conocen como el biodiesel.

De acuerdo con Pablo Albaro De La Cruz Liza es necesario que los ácidos grasos libres (AGL), que están presente en el aceite, deben estar por debajo del 3% [22], porque los AGL altos afectan la reacción provocando la formación de jabón y agua cuando está presente con catalizador, por ende, dificultando la separación del glicerol con el producto de interés. Por lo tanto, si el aceite tiene AGL mayores al 3% se necesitará realizar una esterificación previa para reducir los niveles de este y asegurar un producto estable en su pureza.

Este proceso de esterificación se lleva a cabo con un alcohol generalmente el metanol con un ácido carboxílico con presencia de un catalizador ácido el cual aumenta la velocidad de

reacción. La fase inferior formada (ésteres metílicos y grasas sin reaccionar) se pasa al proceso de transesterificación, mientras que la fase superior (agua obtenida en el proceso de esterificación, catalizador regenerado y exceso de metanol) se calentó a 65°C en un evaporador rotatorio para recuperar el metanol [26].

Tabla 12.

Velocidades de esterificación.

Alcohol	% de/1 hora	conversión/equilibrio	Ko
Metanol	55,59	69,59	5,24
Etanol	46,95	66,57	3,96
Propanol	46,92	66,85	4,07
Butanol	46,85	67,3	4,24
Alílico	35,72	59,41	2,18
Bencilico	38,64	60,75	2,39
Dimetilcarbinol(isopropanol)	26,53	60,52	2,35
Metiletilcarbinol(2-butanol)	22,59	59,28	2,12
Dietilcarbinol(3-pentanol)	16,93	58,66	2,01
Metilhexilcarbinol(2-octanol)	21,19	62,03	2,67
Dialilcarbinol	10,31	50,12	1,01
Mentol	15,29	61,49	2,55
Trimetilcarbinol(terbutanol)	1,43	6,19	0,005
Dimetilpropilcarbinol(2-metil2pentanol)	2,15	0,83	
Fenol	1,45	8,64	0,008
Timol	0,55	9,46	0,019

Nota. En esta tabla se muestra diferentes alcoholes usados en el proceso de esterificación con sus respectivas velocidades. Tomado de: F. Sánchez y G. Rodríguez, “esterificación”. [En línea] Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/20904/21811>

2.2.2. Transesterificación catalítica

Los catalizadores son sustancias que disminuyen o aumentan la energía de activación de la reacción, al igual, que aumenta la velocidad de la reacción favoreciendo el proceso. En el proceso de la transesterificación para la producción de biodiesel los catalizadores a utilizar pueden ser homogéneos (ácidos o bases), heterogéneos o enzimáticos.

2.2.2.a. Catalizadores homogéneos. Estos catalizadores son mayormente usados en la industria por sus varias ventajas, como lo son el obtener una velocidad de reacción elevada, condiciones moderadas de presión y temperatura y los rendimientos alcanzados son altos dependiendo del aceite que se utilice en el proceso. Pero, hay ciertas desventajas que hay que tener en cuenta para al momento de hacer uso de esta y que no haya complicaciones en el proceso; como la formación de jabones por los AGL puede generar dificultad al usar este catalizador, al igual que problemas de corrosión [28].

Para este catalizador se tiene dos tipos:

- **Catalizadores ácidos**

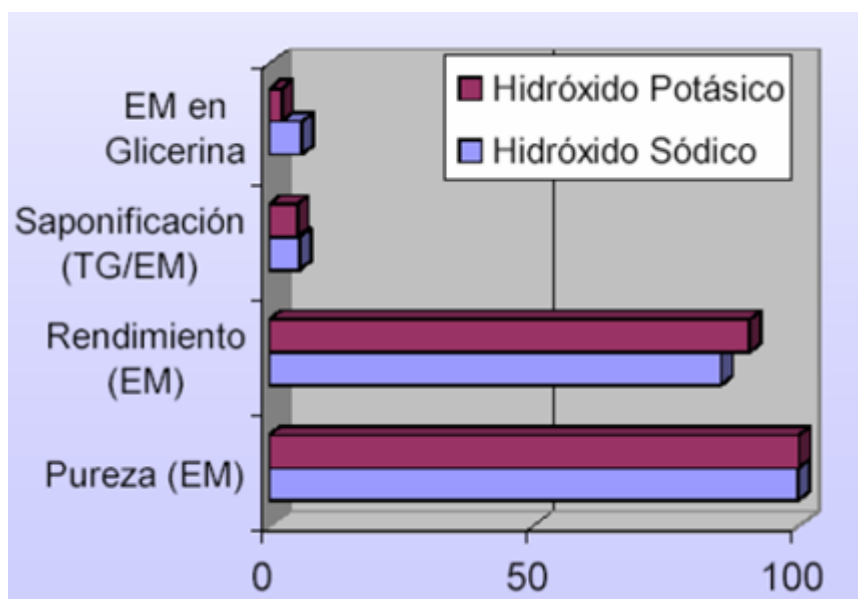
Los compuestos más usados para este catalizador son el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido sulfónico (HSO_3) y ácido fosfórico. Según la bibliografía, estos catalizadores presentan más tolerancia a las altas concentraciones de los AGL y su reacción requiere una relación molar de metanol a aceite vegetal de 30 a 1 [23]. En el trabajo de grado titulado “Transesterificación de aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea usando CaO Y Fe_2O_3 como catalizadores” indica que al realizar este mecanismo en la transesterificación se debe llevar a cabo en ausencia de agua y así “evitar la formación competitiva de los ácidos carboxílicos, reduciendo la producción de esteres alquílicos” [29].

- **Catalizadores básicos**

Para estos catalizadores los compuestos más usados son el hidróxido de sodio ($NaOH$), hidróxido de potasio (KOH), metóxido de sodio (CH_3ONa) y metóxido de potasio (CH_3OK). El $NaOH$ y el KOH proporcionan estabilidad económica por ser más baratos, pero son menos activos en la reacción, pero estos pueden proporcionar conversiones similares a los otros compuestos [28]. En la figura 8 se muestra las diferencias al usar los catalizadores KOH y $NaOH$, en donde TG son los triglicéridos y EM los Ester metílicos que participan en la reacción. Se puede observar que al usar hidróxido de Potasio como catalizador hay una disminución mínima en la formación de jabones con respecto al Hidróxido de Sodio, así mismo, un mayor rendimiento y menos perdidas en Ester metílicos.

Figura 8.

diferencias de catalizadores básicos en la reacción de transesterificación.

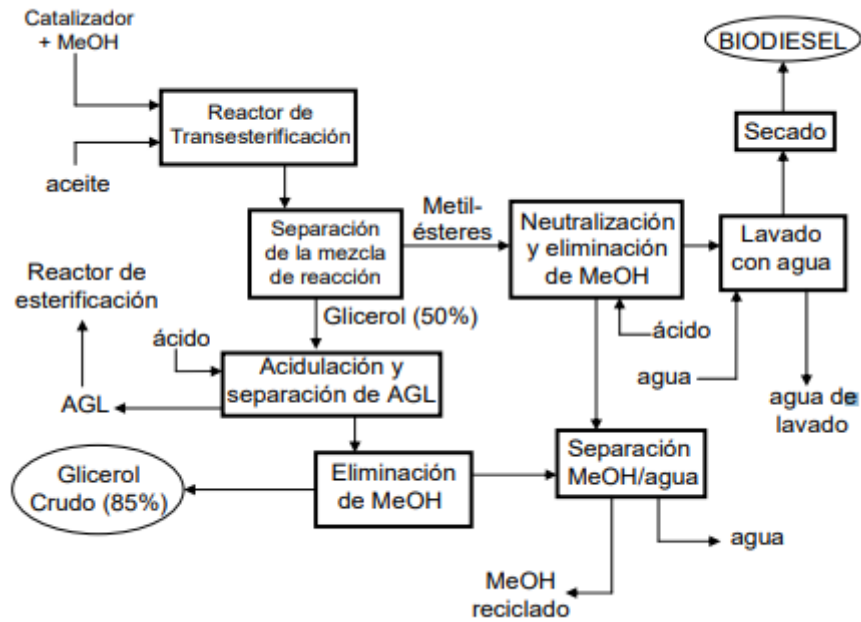


Nota. En esta figura se muestra las diferencias e influencia que tiene los dos catalizadores básicos más utilizados para el proceso de transesterificación. Tomado de: A. Arbeláez and M. Rivera, “Diseño Conceptual De Un Proceso Para La Obtención De Biodiesel a Partir De Algunos Aceites Vegetales Colombianos,” Eng. Thesis, vol. 1, pp. 1–119, 2007.

Al emplear catalizadores básicos se obtiene una reacción más rápida y con alcances de rendimientos más altos utilizando temperaturas menores a 100 °C [28]. Una de las desventajas en el uso de este catalizador consiste en utilizar materias primas libres o bajas de humedad y de ácidos grasos libres menores del 5% [29], ya que esto puede causar la reacción secundaria de la saponificación, siendo un compuesto indeseable para la producción de biodiesel, al igual, que utilizar varias etapas de purificación y limpieza del producto final.

Figura 9.

Esquema de obtención de biodiesel mediante catálisis homogénea básica



Nota. En la figura se muestra el esquema básico del proceso de obtención de biodiesel empleando un catalizador homogéneo básico. Tomado de: D. Manuele, “Obtención de biodiesel en condiciones supercríticas”, Universidad nacional de litoral. Facultad de ingeniería química, Pág. 39,2011. [En línea], Disponible en: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/277/tesis.pdf>

2.2.2.b. Catalizadores heterogéneos. Estos catalizadores se encuentran en diferentes fases y con una superficie de contacto; deben ser preparados con especial cuidado en los compuestos a utilizar para proporcionar estabilidad en el catalizador, por ello se debe cumplir con todas las características en las especies activas, promotores físicos y químicos [28].

Las ventajas presentes en la utilización de este catalizador se encuentran en la viabilidad económica en el proceso de purificación y la fácil separación de los productos y reactivos; esto lleva a desventajas como el difícil control de la temperatura para reacciones que sean altamente exotérmicas y las altas resistencias mecánicas.

2.2.2.c. Catalizadores enzimáticos. Los catalizadores enzimáticos no son comúnmente usados en la industria por tener costos muy elevados y obtener eficiencias menores [22]. Las lipasas son las más utilizadas para su proceso, siendo eficaz en las reacciones de transesterificación; esta recupera la glicerina con mayor facilidad y se puede obtener conversiones altas en el producto final.

2.2.3. Transesterificación con metanol supercrítico

Una nueva alternativa y tecnología desarrollada en los últimos años, es la transesterificación a condiciones supercríticas. Para este proceso el metanol se lleva condiciones supercríticas de $T = 239,45\text{ °C}$ y $P = 80,9\text{ bar}$ [31] y a diferencia del proceso convencional, la transesterificación con metanol forma una sola fase con los triglicéridos reduciendo costos de potencia por agitación. Además, esté en condiciones críticas es un potente reactivo favoreciendo la cinética de la reacción. Para este proceso, el metanol y etanol pueden usarse como fluidos supercríticos; mayormente y para este trabajo se usa el metanol por la facilidad de obtener en sus condiciones aptas en la producción de biodiesel, ya que el etanol debe ser usado en su forma pura y totalmente deshidratado por lo que es más costoso de obtener [32].

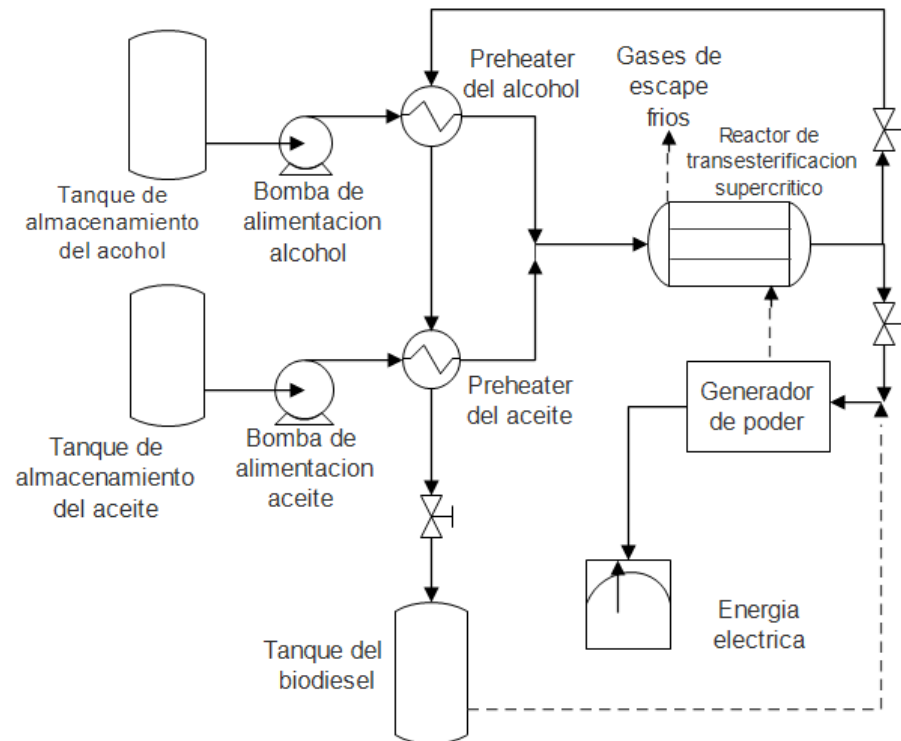
En varias investigaciones se ha evidenciado el estudio de esta nueva tecnología. El artículo “*Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol*” de los autores S. Saka y D. Kusdiana, estudiaron la reacción de transesterificación del aceite de colza en metanol supercrítico sin el uso de un catalizador. Se demostró que el proceso a condiciones críticas fue suficiente para convertir el aceite en ésteres metálicos y su rendimiento era mayor; asimismo, de encontrar que el tiempo de reacción fue mucho más corto que en el proceso convencional.

El artículo “*Integrated technology for supercritical biodiesel production and power cogeneration*” de los autores Anitescu, G., Deshpande, A., y Tavlarides, L., postulan la tecnología de los fluidos supercríticos combinada con la cogeneración de energía para producir el biodiesel sin usar los pasos convencionales de separación/purificación, además, el motor ayuda a generar la potencia para presurizar el sistema. Al igual que en la anterior investigación, obtuvieron una conversión casi completa. En la figura 10 muestra el sistema propuesto por los autores, donde, se muestra el uso de la energía eléctrica y la generación de poder para realizar la reacción dentro del reactor. Este generador ayuda también a recibir señales para controlar otros equipos, por ejemplo, el tanque de biodiesel da una señal al generador para ser recibida

por el reactor y así este que está conectado por medio de válvulas controla el nivel de biodiesel en el tanque.

Figura 10.

Diagrama de flujo para la transesterificación supercrítica de aceites vegetales a biodiesel.



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo propuesto para el proceso de transesterificación de aceites vegetales a biodiesel. Tomado de: G. Anitescu, A. Deshpande, and L. L. Tavlarides, “Integrated technology for supercritical biodiesel production and power cogeneration,” *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 2, pp. 1391–1399, 2008, doi: 10.1021/ef700727p.

2.2.3.a. Ventajas y desventajas. La producción de biodiesel por fluidos supercríticos trae consigo varias ventajas. Una de ellas es el no uso de un catalizador reduciendo las etapas de lavado y purificación, al igual que, evitar el uso repetitivo del catalizador arriesgando la calidad del biodiesel y ayudando significativamente al medio ambiente. Otra ventaja, es que al ser insensible a la acidez de la materia grasa evita realizar la etapa de eliminación de ácidos grasos libres, por lo que se reduce la producción de productos indeseados en la reacción y trabaja con una relación molar metanol: aceite de 43:1 [32], lo que logra la conversión total en un menor

tiempo, una gran ventaja a comparación del método convencional que trabajaba en tiempos largos. La gran desventaja de este método, son sus elevados costos en inversión en materia prima, por la gran cantidad de solvente a utilizar [33].

2.2.4. Tipo de reactores

El empleo de reactores es de uso indispensable en el proceso de la transesterificación y en la industria los reactores más utilizados son el Batch, Continuos o Tubulares.

- **Reactor Batch o Discontinuo:** El proceso batch es el método más antiguo y simple en la industria del biodiesel y las reacciones se emplean mayormente a nivel laboratorio. Su trabajo se basa en someter el aceite en un tanque agitado en presencia del alcohol y el catalizador a usar, funcionando por lotes y en agitaciones intensivas para proporcionar una buena mezcla.
- **Reactor CSTR o Continuo:** Este proceso es el más utilizado en la industria por su trabajo a baja presión y poder alimentar continuamente el reactor, que permite obtener mayores tiempos de residencia y aumentar los rendimientos de la reacción [34]. Este reactor es de uso a gran escala industrial por su trabajo a grandes volúmenes.
- **Reactor PFR o Tubular:** este opera en estado estacionario y se usa para modelar transformaciones químicas de compuestos que se transportan en un sistema parecido a una tubería, a medida que los reactivos que trabajan dentro del reactor se consumen a medida que estos fluyen a lo largo de todo el reactor [35]. Usar este tipo de reactor para el proceso de transesterificación genera una disminución en la mezcla de los reactivos y esto representaría que el costo de la planta, de equipos y mantenimiento también disminuiría [36].

En la investigación “Diseño de un proceso continuo de producción de biodiesel” de los autores A. Evangelista-Flores, F. S. Alcántar-González, N. Ramírez de Arellano Aburto, A. Cohen Barki, J. M. Robledo-Pérez, M. J. Cruz-Gómez, proponen un proceso continuo utilizando un reactor tubular usando aceite vegetal, metanol y con presencia de catalizador para producir biodiesel. Realizaron experimentos en un reactor industrial diseñado para una producción mensual de biodiesel de 500 toneladas, obteniendo así conversiones del 70% en un tiempo menos de 10 minutos [36].

2.3. Selección del proceso

Para la selección del método de extracción y el método de obtención de biodiesel se realizó una matriz de calificación tomada como base del trabajo de grado *“Evaluación técnico-financiera de la obtención de biodiesel, partiendo de aceite de tilapia proveniente de la empresa todo pez de Huila”*. Los criterios de calificación usados para la selección del método de extracción y el método de transesterificación fueron referenciados con artículos o trabajos de grado mostrados en la tabla 12.

Tabla 13.

Fuentes bibliográficas de referencia para la implementación de los criterios de calificación.

		Artículo o trabajo de grado		
Criterio	Valor del criterio (%)	Título	Autor	Aporte al criterio
Costo	30%	Los costos y procesos de producción, opción estratégica de productividad y competitividad en la industria de confecciones infantiles de Bucaramanga	Ofelia Gómez Niño	El artículo nos aporta la importancia de implementar un sistema de costos en una empresa o planta industrial. Por lo que, se debe tener en cuenta un sistema de costos para suministra información y tomar decisiones para la productividad de la empresa.
Toxicidad	35%	Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales	Jorgue Loayza Pérez Vicky Silva Meza	La importancia de obtener un producto más limpio y amigable con el medio ambiente hace que la toxicidad sea el criterio más alto. En el artículo nos habla de garantizar, en los procesos industriales, el desarrollo sostenible para satisfacer la necesidad de las personas y elevar su calidad de vida. además, el diseño tradicional en la ingeniería química debe apoyarse con la química verde para desarrollar productos que no sean peligrosos en el ciclo de la vida.
Rendimiento	25%	Factores que influyen en el rendimiento y eficiencias para la extracción de aceite de palmiste	Orlandi Tafurth Yunda	Este criterio va en unión con obtener actualmente productos más sostenibles. Por lo que, al desarrollar estas nuevas tecnologías se empezó a optimizar los procesos para mejorar y acondicionar plantas industriales ya existentes, y así obtener mejores rendimientos para realizar un producto con mejor calidad y ser competitivas en el mercado.

Tabla 13. (Continuación)

Facilidad de operación	10%	Propuesta para el mejoramiento de los procesos productivos de la empresa servioptica LTDA	Eliana Maroa González Neira	Este criterio va ligado a la productividad del proceso, por lo que en este trabajo de grado nos aporta información sobre los puntos que afectan la mano de obra en la empresa. Una de las técnicas que presentan es reducir la cantidad de trabajo, lo que quiere decir eliminar materiales o paso de trabajadores que no sean necesarios en el lugar del trabajo. Por lo que una facilidad en la operación ayuda a aumentar la productividad y obtener un proceso exitoso.
------------------------	-----	---	-----------------------------	---

Nota. La tabla muestra las fuentes bibliográficas de referencia para la implementación de los criterios de evaluación en el método de extracción.

Para poder calificar los diferentes criterios se tuvo en cuenta las fuentes bibliográficas consultadas en la tabla 13.

Tabla 14.

Referencias bibliográficas para la calificación de los criterios en las matrices de selección

Calificación de la matriz	método de extracción	Título	Autor (es)	Aporte a la calificación
0: Muy malo 1: Malo 2: Moderado 3: Bueno 4: Muy bueno	Por solventes orgánicos	Technoeconomic and environmental assessment of a process for biodiesel production from spent coffee grounds (SGGs)	I.K. Kookos	Realizaron un estudio económico con capacidad de planta para conocer la viabilidad de usar borra de café en la producción de biodiesel con el método convencional. Se puede llegar a capacidades viables dependiendo de la materia prima que se recolecta, concluyen que el proceso puede ser viable si se hace una producción centralizada, pero, aun así, es difícil de lograr y se generaría dificultades para ser un proceso económicamente estable.
		Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine	Kamil Mohammed, Khalid Mustafa Ramadan, Omar I. Awad, Thamir K. Ibrahim, Abrar Inayat, Xiao Ma	El uso de solventes orgánicos obtuvo rendimiento de aceite de borra de café de 14,12% y concluye que es un rendimiento bueno comparado con otras materias primas. Si la capacidad de producción es mayor a 10000 toneladas/año el proceso es viable y rentable. Por último, aunque las emisiones son bajas en CO ₂ , CO y HC se detectan niveles altos en NO _x .
		Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production	Oliveira Leandro, Franca Adriana, Camargos Rodrigo, Ferraz Vany	Con el aceite de grano de café se realizó una transesterificación con metanol y etanol con catalizador alcalino, así, obtuvieron con éxito esteres alquílicos de ácidos grasos. Recomiendan usar mejor grano de café sanos para obtener mejores rendimientos que granos de café defectuosos, al igual que realizar un proceso antes de la transesterificación para evitar saponificación de los productos.

Tabla 14. (Continuación)

<p>0: Muy malo 1: Malo 2: Moderado 3: Bueno 4: Muy bueno</p>	<p>Por fluidos supercríticos</p>	<p>Technoeconomic study of supercritical biodiesel production plant</p>	<p>Marchetti J.M. y Errazu A.F.</p>	<p>Desde vista técnica, usar fluidos supercríticos para la producción de biodiesel en una alternativa buena, pero si se ve por el lado económico no es una buena opción por sus altos costos en operación y producto. Aunque, es una gran ventaja en costos ambientales, ya que se obtiene menos efluentes y un subproducto como la glicerina de mejor calidad que usando el método convencional.</p>
		<p>Uso de aceites esenciales extraídos por medio de fluidos supercríticos para la elaboración de alimentos funcionales</p>	<p>Angelica Esquevil F. y Pedro Vargas</p>	<p>Brinda información sobre el proceso de extracción con fluidos supercríticos con sus etapas. Con esto se ve la facilidad de operar con este método, pero igual de tener cuidado con los parámetros de temperatura, presión y flujo del solvente.</p>
		<p><i>Wet in situ</i> transesterification of spent coffee grounds with supercritical methanol for the production of biodiesel</p>	<p>Son Jeesung, Kim Bora, Parck Jeongseok, Yang Jeongwoo y Lee Jae W.</p>	<p>Usan borra de café sin ningún proceso de secado para realizar transesterificación con fluidos supercríticos. Los resultados de su experimento dieron resultados satisfactorios en la producción de biodiesel, con una mejora en la eficiencia de la extracción y la conversión de lípidos. Concluye con un rendimiento de biodiesel de 10,17% en peso de la materia prima y ven este proceso como simple y ecológico reduciendo los problemas ambientales.</p>

Tabla 14. (Continuación)

0: Muy malo 1: Malo 2: Moderado 3: Bueno 4: Muy bueno	Por fluidos supercríticos	Producción de biodiesel en condiciones supercríticas	Mariana Isabel De Lucca, María Cristina Gely y Ana María Pagano	Este trabajo nos proporciona información sobre las altas conversiones y reacciones que se obtiene al usar metanol supercrítico en la producción de biodiesel con aceites vegetales. Por medio de simulación con diferentes procesos, concluyen que la simulación donde usan un paso de reacción con el fluido supercrítico por su menos número de equipos, lo que genera viabilidad económica por los costos que involucran en el proceso.
---	---------------------------	--	---	--

Nota. La tabla muestra las referencias bibliográficas para realizar la calificación de los criterios usados en las matrices de selección.

2.3.1. Método de extracción.

La selección del método de extracción se hizo entre el método de solvente orgánico y el método de fluidos supercríticos. Los criterios tenidos en cuenta fueron: costo, rendimientos y toxicidad, los cuales son sustentados en la tabla 12 y tabla 13.

Las calificaciones son:

0: Muy malo

1: Malo

2: Moderado

3: Bueno

4: Muy bueno

Tabla 15.

Matriz de calificación para selección del método de extracción

Criterio	Valor del criterio (%)	método de extracción	
		Por solventes orgánicos	Por fluidos supercríticos
Costo	30%	3	1
Toxicidad	35%	2	4
Rendimiento	25%	3	4
Tiempo de extracción	10%	2	3
Total, puntaje	100%	2,55	3

Nota. La tabla muestra la matriz de calificación y porcentaje del criterio, que se usó para la selección del método de extracción.

Entre el método de extracción por solventes orgánicos y el método supercrítico, el costo tuvo una calificación de 3 a 1 respectivamente, ya que, en temas de inversión inicial y recuperación de esta, el primer método tiene un alcance viable económicamente en comparación a los costos altos de los supercríticos. La toxicidad obtuvo una calificación de 2 a 4 respectivamente, al no usar un alcohol toxico en la extracción supercrítica proporciona una extracción más limpia y

usando menos equipos para su purificación. El rendimiento tiene una calificación de 3 a 4 respectivamente, en los dos métodos tienen una calificación cercana, ya que se presenta un resultado del rendimiento bueno para ambos, pero con experimentos en la bibliografía más altos para la nueva tecnología de fluidos supercríticos lo que le da la mayor calificación. Por último, el tiempo de extracción con una calificación de 2 a 3 respectivamente, en el que el método supercrítico muestra tiempos más cortos en la extracción con respecto al convencional, que se necesita de más etapas y ciclos para obtener el producto final.

Finalmente, se realiza los cálculos respectivos entre las calificaciones con los porcentajes de criterio, obteniendo un puntaje final para el método de solventes orgánicos y fluidos supercríticos de 2,55 a 3 respectivamente. Con este resultado, se escoge el método de extracción por fluidos supercríticos para obtener el aceite de borra de café.

2.3.2. Método de obtención de biodiesel.

Para la selección se hizo entre el método de transesterificación catalítica (ácida o básica) y por condiciones críticas con metanol. Se realiza una comparación entre los dos métodos en la tabla 15 que es tomado de la bibliografía.

Tabla 16.

Comparación del método convencional y el método a condiciones supercríticas con metanol en la producción del biodiesel.

	Método convencional (catalítica)	Método condiciones supercríticas con metanol
Tiempo de reacción	1-8 h	120-240 s
Condiciones de reacción	0.1 MPa, 30-65 °C	>8.09MPa, >239.4 °C
Catálisis	Ácido o Alcalino	No se usa
Ácidos grasos libres	Saponificación	Ester metílicos
Rendimiento	Normal	Alto
Remoción para el	Metanol, catalizador y saponificados	Metanol
Purificación	Productos	-
Proceso	Complicado	Simple

Nota. En esta tabla se muestra la comparación de condiciones entre el método convencional y el método a condiciones supercríticas con metanol en la producción de biodiesel. Tomado de: S. Saka and D. Kusdiana, "Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol," *Fuel*, vol. 80, no. 2, pp. 225–231, 2001, doi: 10.1016/S0016-2361(00)00083-1.

En la anterior tabla, tenemos una comparación entre el método convencional (uso de catalizador) y el método de metanol supercrítico es diferentes aspectos. Analizando los diferentes aspectos a continuación:

- El tiempo de reacción es significativo entre las dos, teniendo un tiempo mucho menor en el proceso de fluidos supercríticos, siendo así un proceso rápido en su reacción comparado con el método convencional

- En las condiciones de reacción se observa que se necesita de un buen manejo del método supercrítico para llevar el fluido a su punto más crítico y realizar el proceso que se necesita.
- A comparación del método convencional, el método de fluidos supercríticos no se necesita de un catalizador, ya que este es capaz de reaccionar usando las condiciones críticas, lo que lo hace un proceso limpio sin dejar trazas de catalizador y así mismo, de evitar más procesos de limpieza.
- Al realizar la reacción de los ácidos grasos libres, si no se tiene cuidado en su adecuación este puede llegar a producir jabones con la presencia del catalizador. Así que, al no usar catalizador en el método supercrítico le da una gran ventaja en producto con mejor calidad.
- En el rendimiento, para el método convencional los autores lo clasifican como normal, ya que es el rendimiento que se obtiene normalmente en este método para producir el biodiesel con diferentes materias primas, pero, con la tecnología nueva de los fluidos supercríticos el rendimiento de biodiesel en pruebas experimentales es alto a comparación del método convencional.
- En la transesterificación por solventes orgánicos, se debe realizar una remoción del metanol, del catalizador y los jabones que se puedan formar, haciendo el proceso más complicado en el manejo de sus equipos. En cambio, a condiciones supercríticas solo se debe realizar la remoción del metanol después de la reacción.
- En la purificación del producto final, al usar catalizador se necesita de una limpieza de las trazas que quedan en la reacción, a diferencia del otro método, que al no usar catalizador no es necesario realizar una purificación de su producto sino una separación del metanol supercrítico y el subproducto glicerol.
- En temas de proceso, para el método convencional el manejo de este es complicado ya que se debe tener un buen manejo en la mezcla del catalizador y el alcohol, se debe tener extremos cuidados con las cantidades y no sobrepasar los requeridos, además, de usar más etapas de limpieza y purga. En el método de fluidos supercríticos al no usar catalizador, su proceso de reacción es más sencillo de manejar, al igual, que separar el alcohol y subproductos del producto final.

Con este análisis por medio de la bibliografía sustentada en la tabla 12, tabla 13 y tabla 15 se realiza la matriz de selección con los criterios y la escala de calificaciones de la matriz anterior.

Tabla 17.

Matriz de calificación método obtención de biodiesel

Criterio	Valor del criterio (%)	método obtención de biodiesel	
		método convencional (catalítica)	método condiciones supercríticas con metanol
Costo	30%	3	1
Tiempo de reacción	35%	2	4
Rendimiento	25%	3	4
Facilidad de operación	10%	2	4
Total, puntaje	100%	2,55	3,1

Nota. La tabla muestra la matriz de calificación y el porcentaje del valor de criterio según su importancia para el método de obtención de biodiesel usado en el proceso.

Para esta matriz de selección, el costo tuvo una calificación 1 para el método a condiciones supercríticas, ya que al llevar a condiciones supercríticas el proceso conlleva a tener inversiones altas en costo de equipos y producción, pero, teniendo unos buenos costos ambientales. Por el contrario, el método convencional tuvo un puntaje de 3, porque tienen un bajo costo de inversión inicial en equipos y producción, pero con costos ambientales altos por las trazas de catalizador y alcohol. Para el tiempo de reacción, se calificó con 2 a 4 respectivamente, porque a condiciones supercríticas al ser un proceso continuo y sin necesidad de agitación genera tiempos más cortos en la reacción dentro del reactor. En temas de rendimiento, los dos métodos están con calificaciones altas por sus buenos rendimientos, pero resultando bibliográficamente mejor en el método a condiciones supercríticas. La facilidad de operación en los fluidos supercríticos es más factible porque al no usar catalizador en el proceso no genera etapas para manejar su purificación, por lo que recibe una calificación de 4. A comparación del método convencional que se debe tener mucho más cuidado en el manejo de la mezcla alcohol/catalizador y en su posterior purificación. Finalmente, se obtuvo un puntaje final de 2,55 para el método convencional y de 3,1 para el método supercrítico.

3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO

Para el desarrollo de la distribución de la planta piloto se hizo en base al proceso de obtención elegido según la matriz de selección, el proceso corresponde a la extracción con CO₂ supercrítico y la transesterificación con metanol supercrítico. Se dará una descripción detallada de donde se partirá para el desarrollo del diagrama BFD y PFD, la descripción y especificaciones de los equipos, el plano de la planta y la distribución geográfica de esta.

3.1. Distribución de la planta piloto

3.1.1 Descripción del proceso productivo

3.1.1.a. Adecuación de la materia prima. Para la producción de biodiesel a partir de la borra de café se tendrán en cuenta la cantidad de borra de café que se recolecta de las 8 tiendas Juan Valdez en la ciudad de Bogotá en la zona de chapinero, esta ubicación se justificará más adelante en el documento. Las 8 tiendas producen en total al día 200 kg de borra de café, a la semana 1400 kg, mensuales 6083.34 kg y al año 73000 kg de los cuales se tomarán como base para el balance de materia.

Para comenzar con el proceso de extracción del aceite de borra de café se debe realizar un secado para retirar la mayoría del contenido de humedad que corresponde del 65 al 20% dependiendo del tipo de café [23] de la muestra de borra. Se pretende llegar a un contenido de humedad del 3% [60], puesto que si es mayor puede llegar a bajar los rendimientos de producción e impedir la reacción de transesterificación debido a que el solvente no penetra el aceite [59]. El secado es una operación inmediata a la recolección de la borra de café debido a la degradación de esta, este secado se lleva a cabo en un secador al vacío horizontal durante 5 horas a 105°C [61] además tiene una eficiencia del 77.1% [62] por esto es necesario realizar dos secados para alcanzar el contenido de humedad del 3%. Una vez se ha llevado a cabo el secado se puede llevar la borra a un almacenamiento provisional si es que no se va a realizar en seguida la extracción con CO₂ supercrítico, este almacenamiento es hermético y alrededor de los 10°C para evitar la descomposición y proliferación de hongos.

3.1.1.b. Extracción del aceite de borra de café con CO₂ supercríticos. El siguiente paso del proceso es extraer el aceite de la borra del café, para esto se utilizará como disolvente el CO₂ el cual se encuentra almacenado en un cilindro de aluminio a prueba de fugas, el CO₂ se

encuentra 49.9 bar y 20°C [43]. Del cilindro sale para pasar por una bomba de alta presión que elevará la presión a 74 bar, después de esto pasa por un intercambiador de calor que calentará el CO₂ hasta los 31°C alcanzando así las condiciones críticas para poder empezar la extracción.

Para el proceso de extracción por la parte de arriba ingresa la borra de café puesto que se encuentra en estado sólido se debe cargar el extractor de manera manual, la borra es transportada por una banda hasta el extractor; el extractor cuenta con una canastilla donde se ubicará la borra y así no habrá posibilidades de que se arrastre material sólido de gran tamaño en el proceso. El CO₂ ingresa en una proporción de 6 a 1 [23], como fluido supercrítico por la parte de abajo del extractor y entra en contacto con la borra permitiendo bajo esta condición extraer el aceite para el proceso de producción del biodiesel, el extractor tiene una eficiencia del 97% [70]. La borra de café tiene un contenido en ácidos grasos del 18% [61] correspondiente a la muestra, como ventaja de extraer el aceite con CO₂ supercrítico son que se puede separar fácilmente del aceite. La extracción se lleva a cabo en condiciones de presión 100 - 350 bar y temperatura 40-100 °C, para este proceso se hará a una temperatura de 40 °C y 100 bar [63].

Seguido al proceso de extracción se encuentran dos separadores ciclónicos, en el primer separador se reduce la presión hasta alcanzar los 50 bar y 30 °C de temperatura de manera que el soluto deja de ser soluble en el solvente y precipita [64], por diferencias de densidades se separan los ácidos grasos libres con pequeñas partículas de la biomasa residual, la mezcla de triglicéridos y CO₂ por la cima pasando al segundo separador. Al salir del primer separador la corriente del extracto pasa a un intercambiador de calor el cual enfriará hasta los 20°C a la corriente que va a alimentar la segunda separación, el segundo separador opera a una presión de 10 bar para separar el CO₂ en su mayor totalidad por las cimas y los triglicéridos por fondos para llevarlo al proceso de transesterificación, estos dos separadores permiten obtener rendimientos mayores al 90% de separación, además se utiliza a la salida de la cima del segundo separador un condensador que recupera el CO₂ para poder ser reutilizado en el proceso de extracción siendo un proceso continuo. La extracción y separación de los aceites de la borra de café al ser por supercríticos es un proceso rápido que dura 1 hora y 30 minutos [23], una vez realizado el proceso de separación el aceite pasa por una bomba para aumentar su presión hasta alcanzar los 250 bar para pasar al reactor donde se llevará a cabo el proceso de transesterificación.

3.1.1.c. Reacción de transesterificación con metanol supercrítico. La producción del biodiesel se dará en un reactor PFR que soporta altas temperaturas y presiones puesto que se trabajará con metanol en condiciones supercríticas, la transesterificación se lleva a cabo con el alcohol metanol al 98%. A su vez la cantidad de metanol dependerá de la cantidad de aceite que se le proporcione al reactor, es decir el flujo del metanol será igual a una relación de 42 a 1 donde 1 corresponde al flujo del aceite [37], se utiliza una relación alta para asegurar y aumentar el área de contacto entre el alcohol y los triglicéridos. El reactor opera en condiciones de temperatura 250- 350 °C y de presión mayores a 80 bar. Estas condiciones aseguran mayores rendimientos en los productos [37].

Después de 30 minutos de reacción [23] para finalmente obtener el biodiesel la corriente resultante del reactor pasa a un separador flash durante 15 minutos donde por las cimas saldrá la mayoría del flujo del metanol y por los fondos una mezcla de glicerol, metanol, triglicéridos y esteres metílicos, la corriente de los fondos pasa a un decantador donde lo compuesto claves para la separación serán el glicerol y el ester metílico, esta operación tiene una duración de 50 minutos gracias a la baja solubilidad del glicerol en los esteres metílicos [23]. La separación y la decantación suceden a condiciones de temperatura de 60 - 50 °C y 1 bar de presión. Del decantador se obtienen dos corrientes una con un alto contenido en glicerol y metanol, la otra con mayor concentración en esteres de metilos, el restante de la mezcla metanol y triglicéridos. Por último, esta corriente ingresa a una columna de destilación que hace la función de purificación del biodiesel obteniéndose un 93% de pureza, este proceso tiene un tiempo aproximado de 30 minutos [43].

3.2. Diagrama BFD

El diagrama BFD se encuentra en el anexo 1

3.3. Diagrama PFD

El diagrama PFD se encuentra en el anexo 2

3.4. Plano de la planta

Por medio de las especificaciones técnicas de los equipos, la planta consta de un área de 22x45 m de un total de área cuadrada de 990m² que se aproximan a 1000 m².

Los planos en diferentes ángulos de la planta piloto se encuentran en los anexos 3,4,5 y 6

La planta va a contar con las siguientes zonas:

1. **Parqueadero:** Es en donde se llevará control y registro del ingreso del personal, transporte de materia prima y producto terminado. En esta zona de la planta los empleados podrán estacionar sus vehículos y contará con un lugar designado para ambulancias.
2. **Recepción:** En esta zona se llevará control de las materias primas que ingresan y salida del producto terminado, se hará un control de calidad para asegurar que todo ingrese y salga en condiciones óptimas.
3. **Almacenamiento:** En esta zona se almacenará la borra de café que se recolectaron semanalmente, debe permanecer fresco, limpio y con condiciones de temperatura no mayores a 15 °C para evitar la proliferación de hongos.
4. **Acondicionamiento:** En esta zona de la planta se llevará a cabo la operación de secado que permitirá tener lista la borra para iniciar al proceso de extracción.
5. **Producción:** En esta zona se desarrollarán todos los procesos necesarios para la obtención de biodiesel.
6. **Almacenamiento de producto terminado.** En esta zona de la planta se va a almacenar el biodiesel en tanques para su posterior distribución.
7. **Área de servicios industriales**
8. **Área administrativa:** Es la zona de oficinas donde se encuentra el gerente, director administrativo, secretaría, logística, recursos humanos, contabilidad. Cuenta con los espacios necesarios para el buen desarrollo de las actividades.
9. **Zonas sociales:** Cuenta con comedor, cafetería, enfermería, baños y zonas de descanso.

3.5. Descripción de equipos

3.5.1. Adecuación de materia prima

- **Secador al vacío**

Los secadores al vacío utilizan un proceso de varias etapas, los gránulos se ponen en un recipiente sellado de acero inoxidable mientras giran entre tres estaciones. La primera estación, los gránulos son calentados para liberar las moléculas de la humedad, en la segunda estación se somete en un fuerte vacío para eliminar esa humedad liberada y finalmente en la tercera estación donde los gránulos ya secos son descargados [63].

Estos secadores se pueden usar en diferentes aplicaciones como lo son, la industria química, la industria farmacéutica, agroalimentaria, textil, granel y la industria del embalaje. Como ejemplo, se tiene la figura 11 que muestra un equipo de secador al vacío con una camisa de calefacción y un diseño al vacío; y se puede aplicar a materias primas con un contenido máximo de humedad del 70% [64].

Figura 11.

Secador al vacío industrial



Nota. La figura muestra un secador al vacío usado en la industria. Tomado de: Direct Industry, “Secador de vacío LDHJ series” [En línea] Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/shuanglong-group-ltd-co/product-120867-1991235.html>

3.5.2. Extracción

- **Extractor de fluidos supercríticos**

Este equipo tiene la función principal de extraer el aceite de la borra de café utilizando CO₂ supercrítico. La materia prima es ingresada por la parte de arriba del equipo, el CO₂ es ingresado por uno de los costados del extractor y el aceite es extraído por la parte de abajo. Como ejemplo de un equipo de extracción super crítica, se muestra la figura 11, el equipo posee elementos de control de presión y temperatura, sistemas de lecturas de flujos, accesorios de servicios como válvulas, intercambiadores de calor y condensadores, y viene incluido los separadores ciclónicos necesarios para el proceso.

Figura 12.

Equipo de extracción de fluidos supercríticos



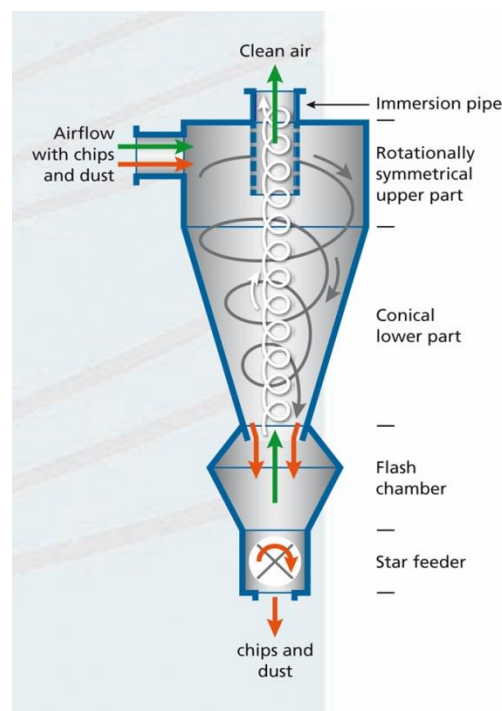
Nota. La figura muestra el equipo de extracción industrial por fluidos supercríticos. Tomado de: Sinoped international company, “Máquina extractora de CO₂, supercrítica, cbd” [En línea]. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/hot-in-usa-super-critical-co2-extractor-cbd-extraction-machine-62243102575.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.4cd31507ViAm4t

- **Separadores**

Dentro del equipo de extracción viene incluido el sistema de separación, dos separadores (Figura 13) de forma ciclónica cuyo objetivo es crear un movimiento rotativo al fluido supercrítico y así durante la descompresión las partículas pesadas vayan al exterior y el fluido al interior [37]. En la figura 12 se ilustra el trabajo interno del separador.

Figura 13.

Esquema separador ciclónico



Nota. La figura muestra el esquema que compone los separadores ciclónicos utilizados en los sistemas de fluidos supercríticos. Tomado de: IBERMAQ. G. GRUPO IBERMAQ, 14 diciembre 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ibermaq.es/producto/separadoresciclonicos/>.

En la figura 13 se muestra el sistema de separación en el extractor de fluidos supercríticos.

Figura 14.

Separadores ciclónicos equipo fluidos supercríticos



Nota. La figura muestra los separadores ciclónicos del equipo de extracción con fluidos supercríticos. Tomado de: Sinoped international company, “Máquina extractora de CO₂, supercrítica, cbd” [En línea]. Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/hot-in-usa-super-critical-co2-extractor-cbd-extraction-machine-62243102575.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.4cd31507ViAm4t

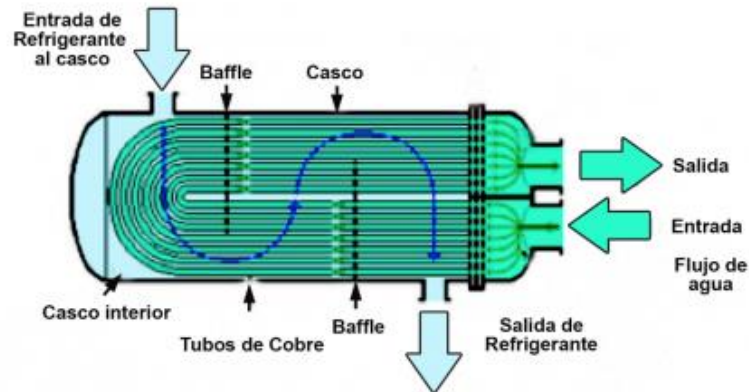
- **Intercambiador de calor**

Al igual que los separadores, el intercambiador de calor viene incluido en el equipo de FSC. Este equipo cumple la función de transferir el calor de un fluido a otro por medio de placas o tubos que favorece este intercambio de calor sin necesidad de que los fluidos se mezclen [38].

Para este proceso de extracción del aceite, ayuda a aumentar la temperatura del CO₂ para llevarlo a sus condiciones supercríticas.

Figura 15.

Intercambiador de calor



Nota. La figura muestra el esquema de funcionamiento de un intercambiador de calor. Tomado de: Comercial Foisa. Anónimo. [En línea]. Disponible en: <https://comercialfoisa.com/intercambiador-de-calor-funcionamientotipos-y-eficiencia/>

- **Compresor (Bomba de alta presión)**

Este equipo incluido en el sistema de FSC, cumple la función de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y así aumentar la presión del fluido o del gas [39].

Para el proceso este equipo ayuda a aumentar la presión del CO₂ para llevarlo a sus condiciones supercríticas, a su vez de impulsar los fluidos presentes en el proceso.

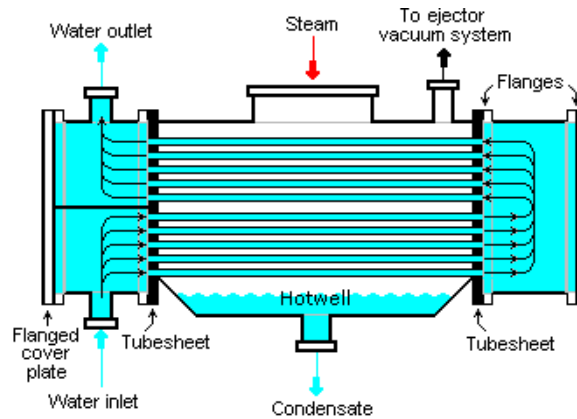
- **Condensador**

Este equipo está igualmente equipado en el sistema de extracción supercrítica, su función consta de una técnica de separación donde “los componentes volátiles de una mezcla de vapor son separados de los vapores restantes por medio de la saturación, seguido por un cambio de fase” [40] y este cambio de fase es de gas a líquido.

En este proceso, el uso del condensador ayuda en el cambio de fase del CO₂ (gas a líquido) para poder así recircular a la alimentación.

Figura 16.

Funcionamiento condensador



Nota. La figura muestra el funcionamiento del condensador. Tomado de: Thermal Engineering. Nick Connor. 19 de septiembre 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-condensador-principal-condensador-de-vapor-definicion/>

- **Mezclador CO2**

Los mezcladores cumplen con la función de mezclar sólidos o líquidos para diferentes campos en la industria; garantiza la homogeneización de los componentes a trabajar.

Para el proceso, este equipo ayuda a mezclar el CO2 puro con el CO2 recirculado de la extracción del aceite. Como ejemplo, tenemos la figura 17 que muestra un mezclador industrial que posee su panel de control y el agitador.

Figura 17.

Mezclador



Nota. La figura muestra el mezclado usado en la industria para diferentes aplicaciones. Tomado de: Yangzhou Hill Intelligent Equipment. Jiangsu, China, “tanque de mezcla de acero inoxidable químico”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/100l-500l-chemical-stainless-steel-mixing-tank-liquid-jacketed-electric-heating-agitator-homogenizing-mixer-mixing-equipment-1600240233284.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.36e1188clBgWUp&s=p

3.5.3. Producción biodiesel

- **Reactor tubular**

Para la producción del biodiesel la utilización de un reactor PFR es vital para obtener el rendimiento deseado del producto de interés y a su vez, manejar las altas presiones deseadas para la producción de biodiesel a condiciones supercríticas. Este equipo cumple la función de reaccionar las grasas extraídas de la borra de café con metanol supercrítico, para obtener los

Ester metílicos necesarios. Como ejemplo de un reactor continuo, la figura 18 muestra el equipo industrial conformado por el reactor, sus elementos de control de temperatura y presión, y un separador flash para el metanol supercrítico.

Figura 18.

Reactor tubular de flujo continuo.



Nota. La figura muestra el equipo de reactor tubular para realizar la reacción de transesterificación y obtener el biodiesel. Tomado de: Parr Instrument Company, “Reactores tubulares de flujo continuo 5400”. [En línea] Disponible en:

<https://www.parrinst.com/es/products/tubular-reactor-systems/5400-continuous-flow-tubular-reactors/>

- **Separador gas/líquido**

Dentro del sistema del reactor tubular, se encuentra un separador de gas/líquido, donde se coloca corriente abajo del reactor. La función que cumple es la de separar el líquido en el fondo y el gas en la parte superior, que este podrá pasar por el condensador para poder ser recirculado.

- **Compresor**

En la producción de biodiesel a condiciones supercríticas, se necesita de dos compresores. Uno para aumentar la presión del aceite extraído y mezclarlo con el metanol supercrítico; y así realizar la reacción de transesterificación en el reactor tubular y otro para utilizar es para aumentar la presión del metanol y llevarlo a sus condiciones supercríticas. En la figura 19 se muestra un ejemplo de compresor industrial que podría ser usado para el proceso.

Figura 19.

Compresor de alta presión



Nota. La figura muestra el equipo de compresor para aumentar la presión de los fluidos. Tomado de: Shanghai Davey Machinery CO. China, “compresor de alta presión para el llenado de cilindros”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/amazon-hot-sale-2651-min-high-pressure-compressor-for-filling-cylinders-at-home-on-boats-or-on-dive-trips--60648150893.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2cf66f97TZN821

- **Intercambiador de calor**

Para el proceso se hará uso de dos intercambiadores de calor, un Cooling y un Heating. El heating se usará para llevar el metanol a su temperatura crítica utilizando vapor de agua como servicio y el cooling para condensar el metanol en un cambio de fase de gas a líquido, así poder recircular el fluido para volver a utilizarlo.

El equipo es un intercambiador de calor de placas, ampliamente utilizados en la industria química debido a su alta eficiencia y ahorro de energía [41].

Figura 20.

Intercambiador de calor de placas



Nota. La figura muestra el intercambiador de calor para el metanol. Tomado de: Liaoning Succes Thermal Technology CO. Liaoning, China, “intercambiador de calor de placa líquida industrial”. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/success-industrial-liquid-plate-heat-exchanger-condenser-1600239791094.html?spm=a2700.details.0.0.66711efaRC5AjU>

La figura 20 muestra un ejemplo del equipo industrial donde se evidencia las placas en el intercambiador de calor por donde pasara el fluido.

- **Mezcladores**

Para la producción de biodiesel se necesitará de dos mezcladores, uno para la mezcla del aceite y metanol y el segundo para la mezcla del metanol puro y el metanol recirculado del separador gas/líquido.

El equipo ya visto anteriormente en la figura 17 del mezclador industrial para los procesos necesarios.

- **Decantador**

El funcionamiento de estos equipos es por el método físico de decantación que consiste en separar componentes de mayor densidad en el fondo y menor densidad en la superficie [42].

Para este proceso, se utiliza un decantador que ayude a la separación de la glicerina del biodiesel. La figura 21 muestra un ejemplo de un decantador industrial, con el motor incluido para realizar el proceso de separación.

Figura 21.

Separador de glicerina



Nota. La figura muestra el separador de glicerina. Tomado de: Liaoyang Wintech Industrial Co. Liaoning, China, “aceite de biodiesel personalizado y separador de disco de glicerina”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/2021-hot-sales-customized-biodiesel-oil-and-glycerin-disc-centrifuge-separator-1600221030230.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.5f113f736lyhom

● Torre de destilación

Para dar finalidad al proceso y llegar a una pureza mayor o igual al 90% [43] en la obtención del biodiesel, se usará una torre de destilación para eliminar gran parte del metanol que queda en el biodiesel y así obtener el biodiesel con un grado de pureza alto.

El funcionamiento de este equipo consiste en un vapor que asciende por la columna donde, al mismo tiempo se encuentra con un líquido que desciende para generar una transferencia de materia y energía en cada etapa gracias a la ayuda de un hervidor y condensador [44]

Figura 22.

Columna destiladora



Nota. La figura muestra la columna destiladora modelo YFT-50 para la purificación del biodiesel. Tomado de: Shanghai Yuanhuai Industrial Co. Shanghai, China, “de alta calidad de vidrio de alcohol olla YFT-5 rectificación columna destilera”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-quality-glass-alcohol-moonshine-pot-still-yft-5-rectification-column-distillery-equipment-1600163756582.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.6a9f67e7qloLJO

Un ejemplo para este equipo se muestra en la figura 22, donde está equipado con sus controladores y sistemas de servicios para el proceso.

3.5.4. Almacenamiento

- **Contenedor de CO₂**

Según la ASM, el dióxido de carbono en estado líquido se almacena en recipientes a presiones entre 245 psig y 305 psig [45]. Los contenedores deben ser fabricados de metales de alta calidad que proteja contra la corrosión y tener una cantidad mínima de mantenimiento [46].

El contenedor que se muestra en la figura 23 como ejemplo, cuenta con las certificaciones ASM y ISO9001:2008 utilizando materiales de calidad para garantizar un buen almacenamiento y trabajos de presión acordes a la norma.

Figura 23.

tanque criogénico



Nota. La imagen muestra el contenedor para almacenar CO₂ líquido. Tomado de: Jianyang Greenfir New Energy Equipment. Sichuan, China, “tanque criogénico de argón, nitrógeno líquido estándar, CO₂, oxígeno.”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/hot-selling-standard-liquid-nitrogen-argon-co2-oxygen-lng-cryogenic-tank-container-1600086210369.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.750d1498CiaQfr

- **Contenedor de Glicerina y metanol**

El metanol al ser catalogado como tóxico, venenoso e inflamable se debe tener cuidados extremos en su almacenamiento. Debe ser almacenado en recipientes con materiales de buena calidad y una cantidad máxima de 200 litros, el lugar de almacenamiento debe estar correctamente ventilado para evitar la acumulación de vapores [47].

La glicerina al no ser un productor de extremo peligro no requiere medidas especiales de almacenamiento, aun así, debe evitarse estar cerca de fuentes de calor, radiaciones, electricidad y contacto con alimentos; se debe almacenar a una temperatura de 5 y 35 °C en un lugar seco y bien ventilado [48].

Para el almacenamiento de estas dos sustancias, el tanque de almacenamiento mostrado en la figura 24 cuenta con certificaciones ASME y con sus condiciones aptas para almacenar las sustancias.

Figura 24.

Tanque de almacenamiento criogénico



Nota. La figura muestra el tanque de almacenamiento para el metanol y la glicerina. Tomado de: Guangzhou Fuluke Cosmetics. Jiangsu, China, “FLK tanque de almacenamiento de metanol de alta calidad, tanque de almacenamiento criogénico, tanque de almacenamiento de gasolina”. [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/flk-high-quality-methanol-storage-tank-cryogenic-storage-tank-gasoline-storage-tank-60368828152.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.3e4a1f40FmX0o2

● **Contenedor de Biodiesel**

El almacenamiento del biodiesel se debe realizar en contenedores de acero inoxidable manteniendo una temperatura de 6 °C, se debe tener en cuenta realizar mantenimientos y limpiezas de fondos del tanque. El contenedor de almacenamiento debe estar en un lugar ventilado y se recomienda distribuirse en el menor tiempo posible [49].

Como ejemplo se tiene un tanque de almacenamiento para el biodiesel mostrado en la figura 25 que cuenta con certificaciones ISO9001, CE y GMP, y fabricado con los materiales propios para el buen almacenamiento del biodiesel.

Figura 25.

Tanque de almacenamiento del biodiesel



Nota. La figura muestra el tanque de almacenamiento para el biodiesel. Tomado de: Hangzhou Huihe Machine Equipment. Zhejiang, China, “El biodiesel de tanques de almacenamiento” [En línea] Disponible en: https://spanish.alibaba.com/product-detail/biodiesel-storage-tanks-1861901819.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2f52c85cdCPZVn

3.6. Ubicación de la planta

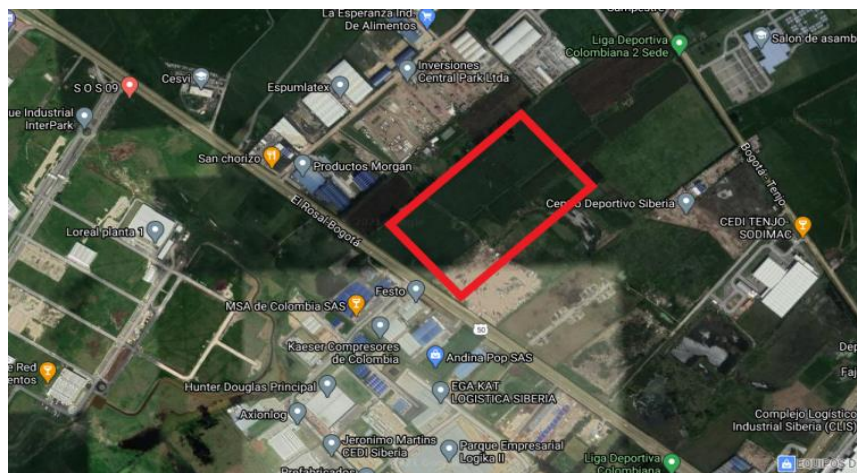
Para llevar a cabo el diseño de la planta piloto se requiere seleccionar una localización adecuada para la producción del biodiesel a partir de la borra de café, estudiando como posibilidad por sus óptimas condiciones de la vereda al municipio de Tenjo, La Isla por la vía Rosales-Bogotá. Se realizará mediante los siguientes parámetros.

3.6.1. Ubicación geográfica

Para la ubicación de la planta, el sitio adecuado es en la vereda del municipio de Tenjo, La Isla por la vía Rosales-Bogotá; ya que esta cuenta con vías de acceso factibles desde la ciudad de Bogotá, Cota y Tenjo; al igual que es una zona donde se observa diversos parques industriales como el parque industrial Siberia Real, parque industrial InterPark, entre otros. Como punto más específico mostrado en la figura 26, se observa el terreno seleccionado.

Figura 26.

Ubicación geográfica de la planta de producción.



Nota. En esta imagen se muestra donde es más adecuado ubicar la planta de producción de biodiesel de borra de café. Tomado de: Google maps. (s.f.). [Municipio de cota con la ubicación de la planta de producción de biodiesel a partir de borra de café, a sus alrededores se encuentran parques industriales]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/@4.7669095,74.16519,1800m/data=!3m1!1e3?hl=es>

3.6.2. Condiciones climáticas

El departamento de Cundinamarca presenta una precipitación variada en volúmenes de lluvia, Tenjo ubicada en la franja central cerca de la sabana de Bogotá cuenta con una precipitación anual menores a los 1000 mm. Posee dos temporadas secas en diciembre-marzo y junio agosto. La temperatura en el municipio de Cundinamarca permanece a pisos térmicos fríos y en la zona central su clima es de un frio semiárido [50].

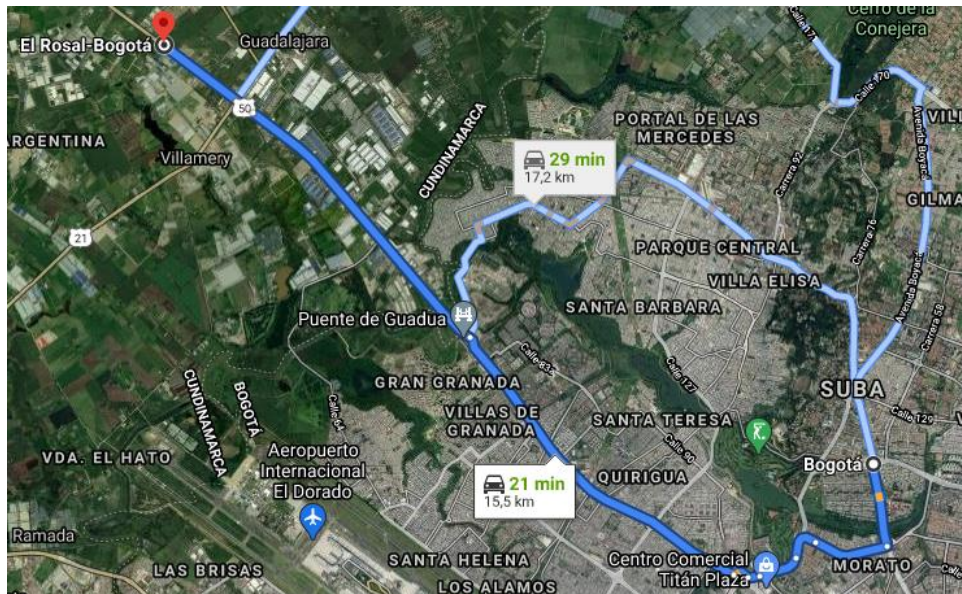
3.6.3. Vías de acceso

Debido a que la planta estará localizada en las cercanías de la ciudad de Bogotá, Cota y Tenjo, se tendrá acceso a diferentes redes viales terrestres para la distribución del producto y el arribo de la materia prima; al igual que el acceso de los trabajadores a la planta.

Desde la ciudad de Bogotá cuenta aproximadamente con 17,3 km de distancia se puede acceder por la vía de la calle 80 llegando a la vía los Rosales-Bogotá donde estará ubicada la planta. También, se cuenta con rutas alternativas llegado el caso en que la ruta inicial presenta inconvenientes. Se presenta el camino de la vía en la figura 27.

Figura 27.

Vía de acceso Bogotá



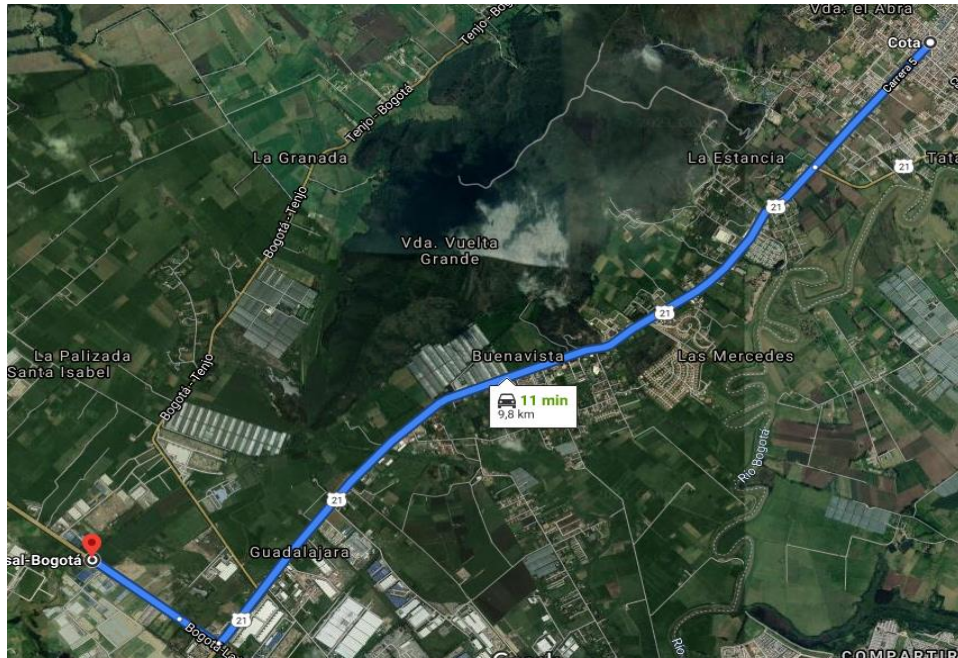
Nota. Esta imagen muestra la vía de acceso que se tendrá desde la ciudad de Bogotá hasta donde estará ubicada la planta de producción. Tomada de: Google maps. (s.f).

[Vías de acceso de la ciudad de Bogotá para el desplazamiento hacia la planta de biodiesel de borra de café]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/dir/4.7647087,74.1642561/Bogot%C3%A1/@4.723058,74.1554886,14400m/data=!3m1!1e3!4m9!4m8!1m0!1m5!1m1!1s0x8e3f9bfd2da6cb29:0x239d635520a33914!2m2!1d-74.072092!2d4.7109886!3e0?hl=es>

Otra vía de acceso que podemos encontrar es a Cota. Cuenta con aproximadamente 9,8 km de distancia, accediendo por la vía Siberia-Cota en el cruce de la vía Rosales- Bogotá. Se observa el camino más específico en la figura 28.

Figura 28.

Vía de Acceso Cota, Cundinamarca.

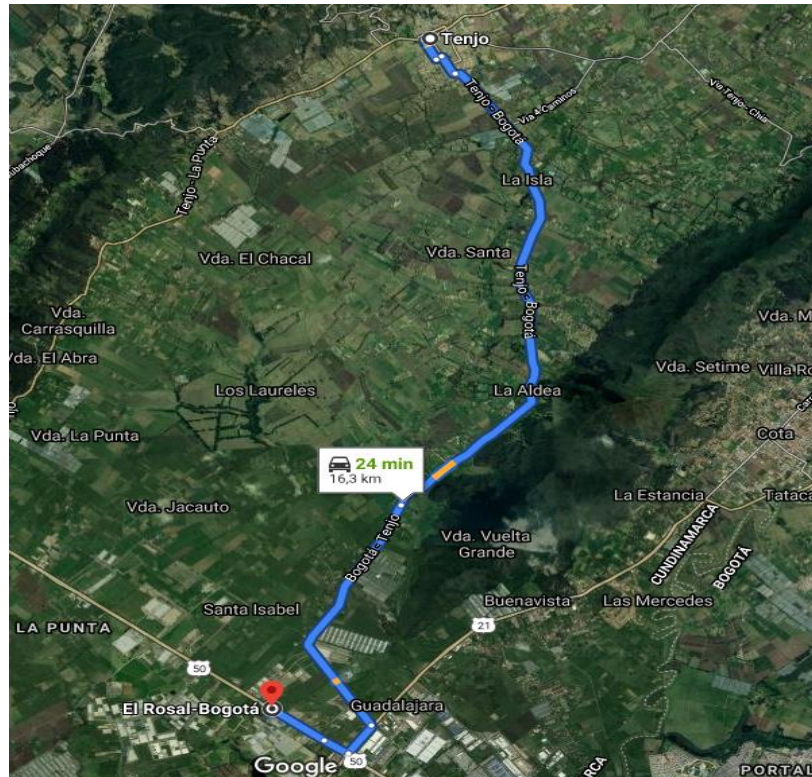


Nota. Esta imagen muestra la vía de acceso que se tendrá desde el municipio de Cota, Cundinamarca hasta donde estará ubicada la planta de producción. Tomada de: Google maps. (s.f). [Vía de acceso desde el municipio de Cota]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/dir/4.7647087,-74.1642561/Cota,+Cundinamarca/@4.7842228,74.15055,7200m/data=!3m2!1e3!4b1!4m9!4m8!1m0!1m5!1m1!1s0x8e3f86e804531fdd:0x38359f1d01fd914a!2m2!1d-74.1018383!2d4.8098502!3e0?hl=es>.

Por último, para Tenjo se accede por la vía Bogotá-Tenjo contando con aproximadamente 16,3 km de distancia. Se observa el camino especificado en la figura 29.

Figura 29.

Vía de acceso Tenjo, Cundinamarca.



Nota. Esta imagen muestra la vía de acceso que se tendrá desde el municipio de Tenjo, Cundinamarca hasta donde estará ubicada la planta de producción. Tomada de: Google maps. (s.f) [Imagen mas detalla de la vía de acceso desde el municipio de Tenjo hasta la planta de producción]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/dir/4.7647087,74.1642561/Tenjo,+Cundinamarca/@4.8155811,74.1829595,14399m/data=!3m2!1e3!4b1!4m9!4m8!1m0!1m5!1m1!1s0x8e407f5e90ebf197:0x8700278ba6062aea!2m2!1d-74.1457699!2d4.872476!3e0?hl=es>.

3.6.4 Centros de acopio de la materia prima

La materia prima, borra de café, provendrá de la ciudad de Bogotá de diferentes tiendas de la marca Juan Valdez. La recolección se centrará en la zona norte de la ciudad, específicamente en la localidad de Chapinero entre la calle 80 hasta la calle 94. En esta zona se centra la mayoría de las tiendas Juan Valdez, al igual que un gran flujo de personas ya que se encuentran oficinas, instituciones educativas superiores y centro de turismos. En la figura 30 se observa las tiendas Juan Valdez en la localidad de Chapinero.

Figura 30.

Puntos de centro de acopio de la materia prima.



Nota. En la imagen se muestra los diferentes centros de acopio de las tiendas Juan Valdéz que se tendrán para recolectar la materia prima utilizada en el proceso. Tomada de: Google maps. (s.f). [Imagen del mapa de la zona de chapinero en donde se ubican las tiendas Juan Valdéz para la recolección de borra de café]. [En línea]. Disponible:

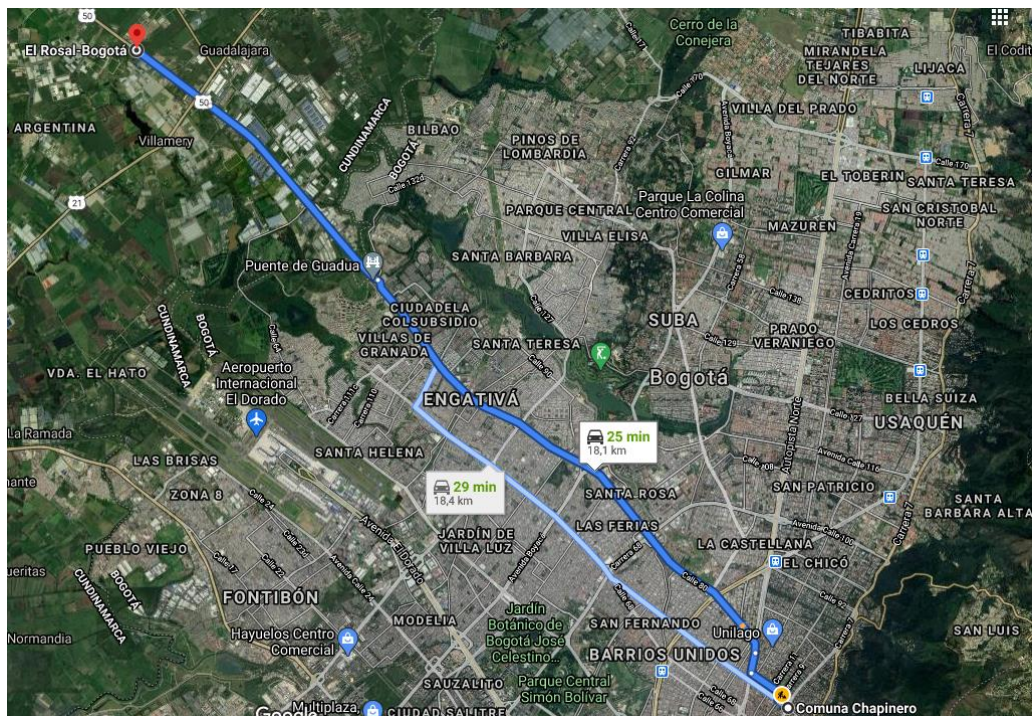
<https://www.google.com/maps/place/Juan+Valdez+Caf%C3%A9/@4.6698869,74.0603443,15z/data=!4m5!3m4!1s0x8e3f9b4bdbce0505:0x6b3f6dc7ec7934d3!8m2!3d4.6701435!4d74.0550335?hl=es>

3.6.5. Acceso y transporte de materia prima

Para acceder al punto de acopio de la materia prima que se encuentra en la ciudad de Bogotá, localidad de Chapinero, se realizará por la vía principal de la calle 80; fácil acceso desde la vía Rosales-Bogotá donde estará ubicada la planta. Se muestra con más detenimiento la ruta en la figura 31.

Figura 31.

Vía de acceso a centros de acopio.



Nota. En la figura se observa la vía disponible de acceso de la planta de producción hasta los centros de acopio de las diferentes cafeterías Juan Valdez. Tomado de: Google Maps. (s.f). [En la figura se muestra la ruta desde la planta de producción de biodiesel de borra de café hasta la zona de las tiendas Juan Valdéz para la recolección de la materia prima]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/dir/La+Isla,+Tenjo,+Cundinamarca/Calle+85,+Cl.+85,+Comuna+Chapinero,+Bogot%C3%A1/@4.7191694,74.1498542,14401m/data=!3m2!1e3!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x8e3f83b4e8418dab:0x1f6a1c9e9be3858f!2m2!1d74.16939!2d4.76558!1m5!1m1!1s0x8e3f9af3e231259b:0xc7007408137f728!2m2!1d-74.0619151!2d4.6729158?hl=es>.

El transporte de la materia prima se realizará por medio de contenedores sellados herméticamente, para así proporcionar el control de la temperatura y humedad de la borra de café. Estos contenedores serán llevados en camiones aislados para asegurar las condiciones en el interior de este.

3.6.6. Recolección y almacenamiento materia prima

La borra de café será almacenada en contenedores herméticos en una bodega con refrigeración de 3 a 5 °C. Es importante usar la borra de café antes de 6 días para evitar alguna afectación microbiológica [51], para ello se hará la recolección de la borra de café cada 8 días obteniendo 4200 kg semanales de borra de café. Con esta recolección se realizará las pruebas en la simulación para saber si la producción de biodiesel al final se justifica o se necesitaría de mas centro de acopio.

3.6.7. Transporte de producto

El biodiesel puro (B100) será transportado desde la planta de producción por medio de carrotanques, con todas las medidas de seguridad, a las estaciones de distribución mayorista, en estas se realizará la mezcla autorizada por la norma con ACPM (Diesel petrolero) y luego ser distribuidas a las estaciones de servicios [52].

Los lugares de distribución, como ya nombrados anteriormente, serán en la ciudad de Bogotá, Cota y Tenjo.

3.6.8. Servicios disponibles

Debido a que la planta estará ubicada en un municipio y en una zona industrial se tendrá acceso a los servicios que se requiera. Se contará con instalaciones de redes de acueducto proporcionados por la empresa Emsertenjo SA EPS y redes de electricidad por la empresa ENEL-Codensa. En caso de emergencia se tendrá un generador eléctrico para suplir las tareas de la operación.

3.6.9. Accesibilidad mano de obra

Se obtendrá accesibilidad a mano de obra de calidad, ya que se tiene vías de acceso directas en donde los empleados llegaran con facilidad a la planta desde los municipios más cercanos.

Además, según el DANE “Para el mes de enero de 2021, la tasa de desempleo del total nacional fue 17,3%” [53]; por lo que esto será un gran potencial en el empleo de los habitantes.

3.6.10. Estructura productiva

El municipio de Tenjo cuenta con una extensión de 108 kilómetros cuadrados y está conformado por 15 veredas con un número de 14.867 habitantes [54].

Las principales actividades en la economía del municipio de Tenjo se basan en la agricultura y ganadería, este representa el trabajo del 86% de las diferentes veredas y el generador del PIB municipal [55].

3.6.11. Incentivos

Como el municipio de Tenjo se centra en actividades de agricultura y ganadería, la implementación de esta planta y nueva actividad en la zona ayudará a incentivar a la población a realizar otro tipo de trabajo y, así fomentar mayor su experiencia laboral en innovación y seguridad ambiental. Para el municipio traerá la atención a nuevos clientes interesados en el producto, ayudando a la economía de este mismo.

3.6.12. Venta de residuos

Cuando la borra de café se somete a la extracción de su aceite, al final del proceso el residuo sólido o biomasa que queda puede ser aprovechado energéticamente en la industria.

Según Cenicafe, el residuo puede ser utilizado como combustible en las calderas que generan vapor [56]. Es una gran ventaja en la venta a este residuo ya que a los alrededores de donde será ubicada la planta, hay varias industrias que utilizan calderas o algún tipo de proceso de quema. Otro proceso aprovechable que contiene esta biomasa es el compostaje, generando beneficios al suelo como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, cobre y, además, es un buen repelente para plagas y alimento para las hormigas [57]. Este sería aprovechable para las fincas que se encuentran en los alrededores y para tiendas que sean para jardinería o agroindustriales.

4. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO

4.1. Aspen Plus

“Aspen Plus fomenta el desempeño de procesos químicos usando el mejor software de simulación en su clase para las industrias de químicos a granel, productos químicos de especialidad y farmacéutica. Esta poderosa tecnología de modelado permite la optimización de la cantidad de material procesado, la calidad del producto y en uso de energía en operaciones por lote, continuas y combinadas”. [58].

4.2. Descripción del proceso

Según la descripción previa al capítulo de la simulación, la borra de café debe tener un pretratamiento previo a la extracción que es la operación de secado puesto que tiene un contenido de humedad del 65% y se debe reducir a un porcentaje menor al 10%. En el desarrollo de la simulación no se representará la operación de secado puesto que el simulador no cuenta con la borra de café en su biblioteca de compuesto y tampoco fue posible ingresar la borra como un nuevo componente, ya que no se encontraron los suficientes datos teóricos para poder definirla, como lo son las entalpías de formación, presión de saturación, energía de Gibbs, entre otras. Por esta razón el balance de materia de esta operación no está apoyada en el simulador si no que se realizó de manera manual y la base de cálculo de la materia prima se estableció según la información suministrada por las tiendas Juan Valdez de la zona de chapinero.

Tabla 18.

Recolección de borra de café.

Tiendas	Borra	Unidad
1	25	Kg/día
1	175	Kg/semana
1	760	Kg/mes
1	9125	Kg/año
8	200	Kg/día
8	1400	Kg/semana
8	6083	Kg/mes
8	73000	Kg/año

Nota. La tabla muestra la recolección de la borra de café en las tiendas de Juan Valdez según la información brindada por las tiendas de la zona de chapinero y se muestra los respectivos valores diarios, semanales, mensuales y anuales.

En la tabla 18 se informa la cantidad de borra de café que se recoge en una tienda de Juan Valdez diariamente, mensual y anual, y en las ocho tiendas de centro de acopio que se tiene para la recolección. Así, se establece una base de cálculo de la materia prima para la producción de biodiesel de aceite de borra de café.

Con base a la tabla anterior se establece una base de cálculo anual de 73000kg de borra de café para llevar a cabo la operación de secado. Se hace de esta manera para determinar en la extracción cuanto se logra extraer de ácidos grasos para poder ingresar esta información al simulador.

Tabla 19.*Balance de materia en la unidad de secado 1*

Unidad 1 - Secador							
Compuesto	Xi	X1	X2	Entrada (kg/año)	Salida (kg/año)	Salida 2 (Kg/año)	T (°C)
Ácidos grasos	0,18	0,43	0	13140	13140	0	105
Biomasa	0,17	0,42	0	12410	12410	0	P (bar)
H2O	0,65	0,15	0	47450	10914	0	1,013
Borra	1	1	0	73000	36464	0	n del secado
Vapor de agua	0	1	1	0		36537	77%
Total	1	1	1	73000	36464	36537	

Nota. La tabla muestra el balance de materia de la unidad 1 del secado usado en el proceso.

Tabla 20.*Balance de materia en la unidad de secado 2*

Unidad 2 - Secador							
Compuesto	Xi	X1	X2	Entrada (kg/año)	Salida (kg/año)	Salida 2 (Kg/año)	T (°C)
Ácidos grasos	0,43	0,49	0,00	13140	13140	0	105
Biomasa	0,42	0,48	0,00	12410	12410	0	P (bar)
H2O	0,15	0,03	0,00	10914	2510	0	1,013
Borra	1	1	0	36464	28060	0	n del secado
Vapor de agua	0	0	1	0	0	8404	77%
Total	1	1	1	36464	36464	8404	

Nota. La tabla muestra el balance de materia en la unidad de secado 2 para la borra de café.

Se puede observar en las tablas 19 y 20 la operación de secado que se debe realizar 2 veces para alcanzar un contenido de humedad del 3% puesto que con un solo secado solo se logra reducir la humedad hasta el 15%. La fracción molar está representada por la letra X, es decir Xi corresponde a la fracción molar de la corriente de entrada al secador, X1 y X2 corresponden a las fracciones molares de la salida 1 y la salida 2 del secador. Además, se indican las condiciones de operación de temperatura, presión y eficiencia del mismo. También en las tablas se presenta como se divide la borra de café, para este trabajo se propone que se compone de biomasa un 17%, ácidos grasos un 18% y el 65% en agua. Una vez se ha retirado la mayoría del contenido de humedad las proporciones en la borra aumentan para los ácidos grasos y la biomasa.

La corriente de salida 1 del secador 2 se tomará como base de cálculo para la extracción con CO2 supercrítico, es decir que al extractor ingresará 28060 Kg de borra de café al extractor y como la relación con el CO2 es de 6 a 1 ingresan 168361 kg. Esta relación permite que la extracción del aceite sea más rápida y asegura que se alcancen la eficiencia del extracto. En esta operación pretende extraer todo el contenido de ácidos grasos que corresponde al 18% de la borra del café puesto que son la materia prima para el proceso de producción de biodiesel.

Tabla 21.

Balance de materia en el extractor

Unidad 3 - Extractor								
Compuesto	Xi	X1	X2	Entrada (kg/año)	Salida 1 (Kg/año)	Salida 2 (Kg/año)	T (°C)	P (bar)
Ácidos grasos	0,49	0	0,02	13140	0	12746	40	100
Biomasa	0,48	0,97	0	12410	16171	0	%n del extractor	%perdidas CO2
H2O	0,03	0,03	0	2510	2510	0	0,97	0,02
Borra	1	1	0	28060	18682	0		
CO2	1	0	0,98	168361	0	164994		
Total	2	1	1	196422	18682	177740		

Nota. La tabla muestra el balance de materia en el extractor del aceite de borra de café.

El proceso de extracción tampoco se representará en la simulación puesto que al no reconocer el sólido no se puede plantear la extracción de este, por esto en la tabla 21 se desarrolla el balance manual para tomar como base para la simulación la salida 2 del extractor y se parte a representar la separación del CO2 de los ácidos grasos.

4.3. Separación del CO₂

Los ácidos grasos más representativos de la borra son el ácido palmítico y el ácido linoleico los cuales se reparten con una fracción molar 0.52 para la tripalmitina y 0.39 para la trilinoleina. Con base a los resultados obtenidos del balance de materia de extractor se toma como base un flujo de 12746 kg de ácidos grasos y 164994 kg de CO₂ anuales, estos datos se ingresan a la simulación. La corriente de los ácidos grasos y el CO₂ inician por separado y luego pasan un mezclador previo para ingresar a los separadores puesto que el simulador no lee la corriente previamente mezclada.

Como el proceso de extracción se asume que ya se realizó, las condiciones de separación se reducen para promover la separación entre los ácidos grasos y el CO₂ puesto que al disminuir las condiciones críticas la solubilidad disminuye. El diagrama de procesos de la simulación que se encuentra en el anexo 7, inicia con la corriente 1 la cual es el CO₂ que ingresa a la válvula de expansión V-101 para disminuir la presión a 50 bar, seguido de esto pasa al intercambiador de calor E-101 que disminuye la temperatura hasta los 30°C y opera a 50 bar de presión, esta corriente corresponde a la 3 la cual ingresara al mezclador M-101. La corriente 4 ingresa a una bomba que opera a 50 bar con el fin de desplazar esta corriente hasta el mezclador M-101 para juntarse con la corriente del CO₂. Del mezclador M-101 sale la corriente 6 que ingresa al separador flash S-101 con condiciones de operación de 50 bar de presión y 30°C. Del separador S-101 salen dos corrientes, la corriente 7 corresponde a la cima del separador la cual sale como vapor rico en CO₂ con un flujo de 18,53 kg/h. Por el fondo del separador sale la corriente 8 que se encuentra en estado líquido y es una mezcla de los ácidos grasos y el CO₂. La corriente 8 sale con un flujo másico de 1.75 kg/h que se reparten para el CO₂ 0.29 Kg/h y para los ácidos grasos 1.45 kg/h que corresponderían casi a la totalidad de los ácidos previamente extraídos. Se podría parar el proceso con el primer separador S-101, pero la corriente 8 todavía tiene un alto contenido de CO₂ y es mejor para la calidad del biodiesel reducirlo, por esta razón la corriente 8 pasa a una válvula de expansión V-102 la cual disminuye la presión hasta 10 bar. La corriente 9 que sale de la válvula pasa un intercambiador de calor E-102 el cual calienta la corriente hasta alcanzar los 60°C esto con el fin de aumentar el grado de separación y obtener una corriente con mejor contenido de CO₂ para los ácidos grasos. Una vez se ha calentado la corriente 10 pasa al separador flash S-102 que opera a 60°C y 10 bar de presión. De esta separación se obtendrán las corrientes 11 y 12, la corriente 11 con un flujo másico de 0.28 kg/h

rico en CO₂ y la corriente 12 con un flujo másico de 1.47 kg/h del cual les corresponde a los ácidos grasos 1.45 kg/h y obteniendo entonces una corriente rica en ácidos grasos.

Una vez se desarrolla la simulación se obtienen los datos de la tabla 22 y con esto se puede corroborar que se logra separar la misma cantidad de aceite extraído con una pequeña composición de CO₂ el cual no interfiere en la reacción de transesterificación y se puede continuar con el proceso con la corriente 12 que sale del separador S-102.

Tabla 22.

Balance de materia en la separación del CO₂.

Balance de masa para la separación del CO ₂								
	CO ₂	Ácidos grasos	Mezcla CO ₂ / ácidos grasos	Productos de la separación 1		Mezcla CO ₂ / ácidos grasos	Productos de la separación 2	
Número de corriente	3	5	6	7	8	10	11	12
Fracción másica								
Tripalmitina	-	0,571	0,002	2,16E-10	0,117	0,117	7,64E-15	0,468
Trilinoleina	-	0,428	0,001	2,11E-10	0,088	0,088	1,66E-15	0,351
CO ₂	1	-	0,993	1	0,794	0,794	1	0,181
Flujo molar Kmol/h	0,434	0,002	0,434	0,421	0,008	0,008	0,006	0,002
Flujo másico Kg/h	18,82	1,454	20,276	18,528	1,749	1,749	0,278	1,471
Temperatura °C	30	48	68	30	30	60	60	60
Presión bar	50	50	50	50	50	10	10	10

Nota. La tabla muestra el balance de materia en la separación de CO₂.

4.4. Reacción de transesterificación

Para el proceso de producción de biodiesel a partir de los ácidos grasos de la borra de café, se llevó a cabo la simulación con la corriente 12 simulación de la separación de CO₂. En esta se obtiene una corriente de 536.915 kg anuales de aceite de borra de café y se trabajará con una

relación de 42 a 1 del metanol [37] entonces corresponderá un flujo másico de 22550.4 kg anuales.

Tabla 23.

Flujo másico del aceite de borra de café y metanol.

Compuesto	Flujo	Unidades
CO2	0,02	Kg/h
Tripalmitina	0,8	Kg/h
Trilinoleina	0,7	Kg/h
CO2	0,4	Kg/día
Tripalmitina	19,2	Kg/día
Trilinoleina	15,7	Kg/día
CO2	6,205	Kg/año
Tripalmitina	292	Kg/año
Trilinoleina	238,7	Kg/año
Metanol	22550	Kg/año

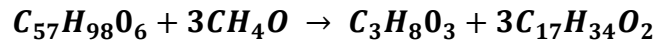
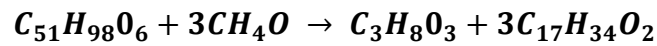
Nota. La tabla muestra los flujos masicos del aceite de borra de café y metanol en la producción del biodiesel.

En la tabla 23 tenemos los tres compuestos que se utilizan en la transesterificación con sus valores de flujo másico por hora, día y año.

Partiendo de los flujos másicos se desarrolla la simulación y con base a la bibliografía consultada el proceso inicia con la corriente 1 la cual está compuesta por metanol que se encuentra a 15 °C y una presión de 1.013 bar pasa a un intercambiador de calor E-101 que enfría la corriente a 9 °C y una bomba P-101 a 250 bar para comenzar a alcanzar las condiciones críticas del proceso. La corriente 4 es la que corresponde a la corriente 12 del proceso de separación de CO2 y se encuentra a 60°C y 10 bar de presión, pasa a una bomba para elevar la presión hasta los 250 bar para mezclarse en el mezclador M-101 con la corriente de metanol para luego pasar a un intercambiador de calor que calienta la corriente hasta los 190°C alcanzando las condiciones críticas de proceso [43].

La reacción de transesterificación se lleva a cabo en un reactor estequiométrico y se da la siguiente reacción. Se utiliza un reactor estequiométrico porque maximiza la conversión y la

selectividad de la reacción [65] y en este proceso la reacción es exotérmica debido a que la entalpía es menor a 0, con un valor de -52828 cal/mol.



El reactor opera a las condiciones de 250 bar y 190°C, la corriente 8 resultante del reactor pasa a una válvula de expansión llegando a la presión de 1 bar lo cual facilitará la siguiente operación de separación. La separación se lleva a cabo en un separador flash que opera a 60°C y 1 bar de presión [43], en este separador se obtendrá en las cimas la mayoría del metanol utilizado en el proceso y en los fondos el glicerol con el éster metílico. La corriente 10 con un flujo másico de 2.41 kg/h ingresa a un intercambiador para enfriar la corriente a 10 °C para que así sea más fácil su almacenamiento y su posible recirculación en el proceso.

La corriente 12 entra a un decantador para separar el glicerol y los esteres metílicos, este equipo opera a 1 bar y 40 °C. Obteniendo en la corriente 13 rica en el glicerol y metanol con un flujo másico de 0,01 kg/h; en la corriente 14 se obtiene los esteres metílicos todavía con contenido en metanol y algunas trazas de los ácidos grasos puesto que es una reacción reversible. Para terminar de separar el biodiesel del metanol ingresa a una columna de separación que cuenta con un condensador total que opera a 2 bar y un rehervidor que opera a 3 bar, la columna es de 8 platos y el plato de alimentación es el 3 [43]. Obteniendo finalmente en la corriente 16 un flujo másico de 0.061 kg/h rico en esteres metílicos. Para el desarrollo de la simulación se tomó de base el proyecto “Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales en condiciones supercríticas” [43] en el cual se hacen diferentes comparaciones con varios tipos de aceite vegetal como de maíz, linaza, girasol entre otros.

El diagrama y el balance de materia del proceso de la transesterificación con metanol supercrítico se encuentra en el anexo 8

4.5. Análisis de resultados

Tabla 24.

Composición del biodiesel obtenido.

Compuesto	Composicion	Unidades
Palmitato de metilo	0,55	%
Linoleato de metilo	0,41	%
Metanol	0,01	%
Glicerol	0,001	%
Pureza	0,96	%

Nota. La tabla muestra la composición del biodiesel obtenido al final de la simulación.

Tabla 25.

Algunas propiedades del biodiesel.

Propiedad	EN14214 Método	Valores permitidos
contenido de esteres, %	EN 14103	96 (mín)
contenido de metanol, %	EN 14110	0,2 (máx)
Glicerol %	EN 14105	0,02 (máx)

Nota. la tabla muestra las propiedades importantes de los biodiesel establecidos por norma. tomado de: f. a. angarita daza, “borra de café como material absorbente para la remoción de cromo (III),” *univ. libr.*, no. iii, pp. 1–43, 2013.

Tabla 26.

Producción de biodiesel de aceite de borra de café

Producción de biodiesel	Unidad
0,061	kg/h
1,461	kg/día
533,622	kg/año

Nota. La tabla muestra la producción por hora, diaria y anual del biodiesel de aceite de borra de café obtenido al final de la simulación.

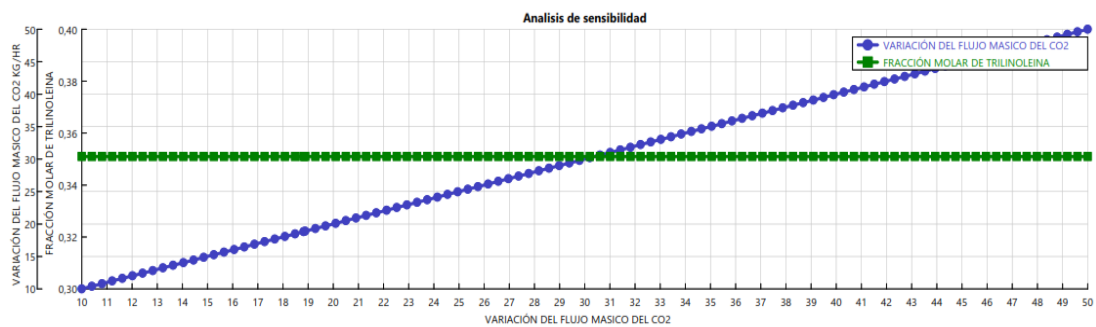
Se puede observar en los resultados de las tablas 25 y 26 que el biodiesel obtenido en la simulación cumple con los parámetros en lo que se puede comparar puesto que en la simulación no se ingresaron todos los componentes que puede llegar a tener la borra, esto por practicidad al momento de desarrollar la simulación. En la tabla 26 se puede observar cuanto será la cantidad de biodiesel producido anual con la borra que se recolecta de las 8 tiendas de chapinero. Si se desea producir más biodiesel se debe mirar la posibilidad de recoger toda la borra de las demás tiendas de la ciudad de Bogotá.

4.6. Análisis de sensibilidad

4.6.1 Análisis de sensibilidad separación de la trioleína con el CO₂ supercrítico

Figura 32.

Análisis de sensibilidad del flujo másico de CO₂ vs fracción molar de trioleína.



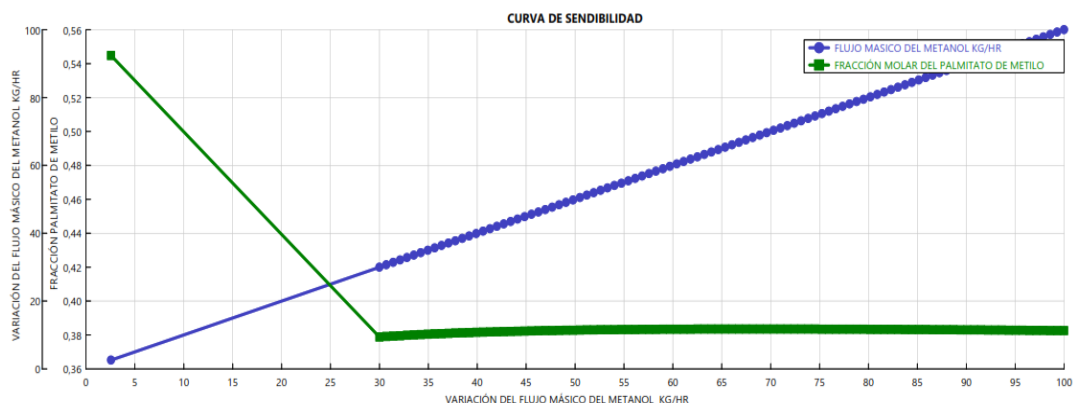
Nota. La figura muestra la variación del flujo masico de CO₂ vs la fracción molar de trioleína.

Se puede observar en la figura 32 que la cantidad de flujo másico que se ingresa de CO₂ al proceso de separación no afecta la fracción molar de la trioleína puesto que esta estará dada por la cantidad de borra de café que se procese. Además, para obtener mayor fracción molar de tripalmitina la borra de café deberá tener un contenido más alto en triglicéridos y teóricamente solo tiene un 18% en contenido en ácidos grasos entonces la cantidad de CO₂ sólo afectará la velocidad del proceso de extracción que en la simulación no está representado. La azul corresponde a la variación del flujo másico del CO₂ y la línea verde corresponde a la fracción molar de la trioleína.

4.6.2 Análisis de sensibilidad del proceso de transesterificación.

Figura 33.

Análisis de sensibilidad del flujo másico del metanol Vs la fracción molar del palmitato de metilo.



Nota. La figura muestra el análisis de sensibilidad del flujo masico del metanol vs la fracción molar del palmitato de metilo presentes en el proceso.

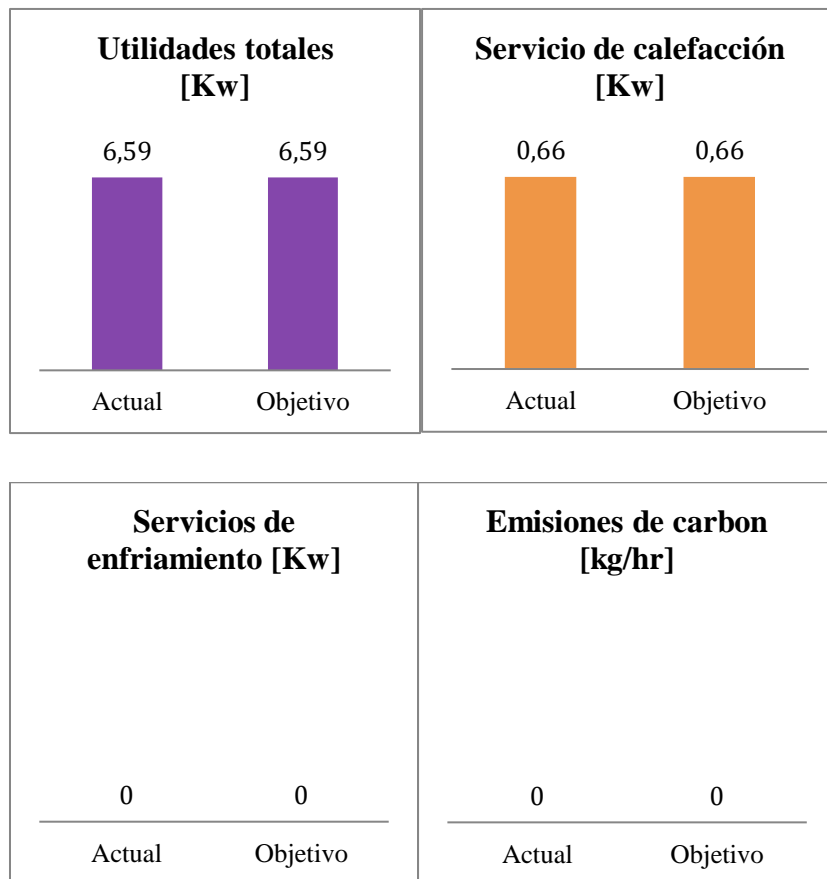
Se puede observar en la figura 33 que la cantidad de flujo másico del metanol si afecta a la fracción molar de la producción de palmitato de metilo puesto que, si se supera la relación de 42 a 1 metanol y ácidos grasos respectivamente, la conversión de productos tiende a disminuir; se trabaja con esta relación de 42 a 1 porque permite desplazar la reacción de transesterificación a la derecha favoreciendo la formación de productos y además acelera el proceso. Esta reacción es reversible por lo que explica el efecto de aumentar demasiado la corriente de metanol. También se puede ver que es posible trabajar con una relación más pequeña y se lograrían conversiones mayores de la fracción molar de tripalmitina.

4.7. Análisis de ahorro energético

4.7.1. Proceso de separación

Figura 34.

Ahorro energético del proceso de separación.



Nota. La figura muestra el ahorro energético del proceso de separación arrojado por la simulación realizada.

Tabla 27.

Resumen del consumo y ahorro de energía del proceso de separación

Tabla resumen				
Propiedades	Actual	Objetivo	Ahorros disponibles	% Actual
Utilidades totales [kW]	6,59	6,59	0	0
Servicio de calefacción [kW]	0,66	0,66	0	0
Servicios de enfriamiento [kW]	0	0	0	0
Emisiones de carbon [kg/hr]	0	0	0	0

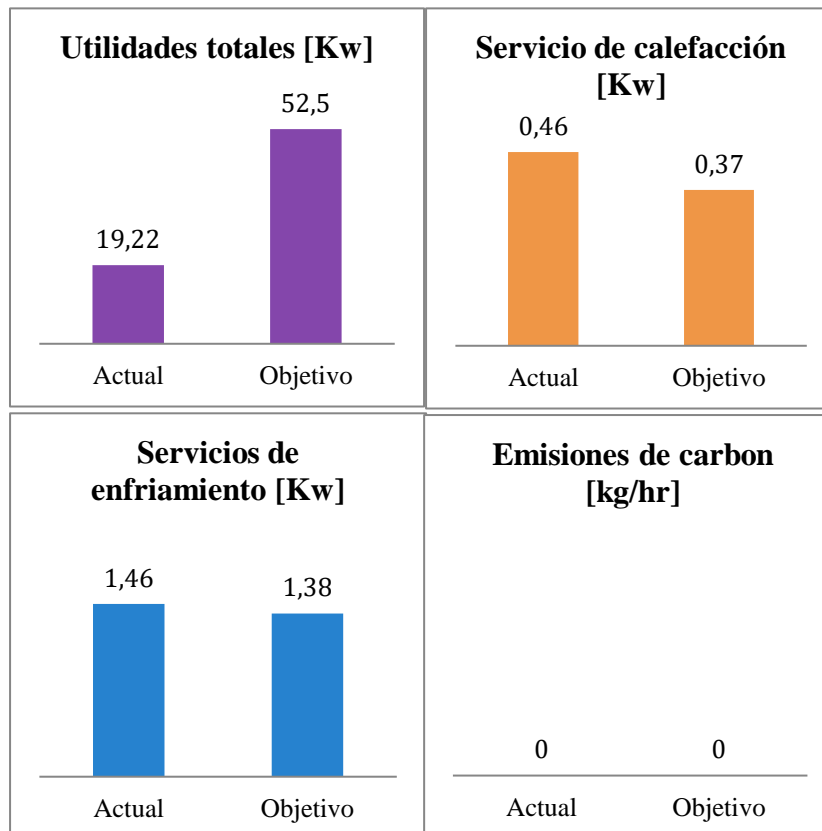
Nota. La tabla muestra el resumen del consumo y ahorro energético del proceso de separación arrojados por la simulación

Estas gráfica y tablas fueron obtenidas por el simulador y se puede observar que para el proceso de separación del CO₂ se está cumpliendo con el objetivo para el gasto energéticos puesto que el gasto actual y el objetivo son los mismos para los servicios de calefacción y las utilidades totales de proceso, por esto el programa no calcula un ahorro disponible lo que quiere decir que el proceso está utilizando el gasto mínimo de energía.

4.7.2. Proceso de transesterificación

Figura 35.

Ahorro energético del proceso de transesterificación.



Nota. La figura muestra el ahorro energético del proceso de transesterificación arrojado por la simulación realizada.

Tabla 28.

Resumen del consumo y ahorro de energía del proceso de transesterificación

Tabla resumen				
Propiedad	Actual	Objetivo	Ahorros disponibles	% de actual
Utilidades totales [kW]	19,22	52,5	-33,27	7,88
Servicio de calefacción [kW]	0,46	0,37	-34,03	16,39
Servicios de enfriamiento [kW]	1,46	1,38	0,76	5,19
Emisiones de carbon [kg/hr]	0	0	0	0

Nota. La tabla muestra el resumen del consumo y ahorro energético del proceso de separación arrojados por la simulación

Estas gráficas y tabla fueron obtenidas del simulador Aspen plus, en la tabla resumen se puede observar el gasto actual y el objetivo que corresponde a la meta que propone el simulador mostrar si es posible un ahorro energético de los diferentes servicios de proceso. Para el proceso de transesterificación es posible un pequeño ahorro energético puesto que el gasto actual solo supera por 0.8 kW al objetivo, esto podría llegar a significar que es posible en el decantador o columna de separación trabajar con temperaturas un poco más altas como por ejemplo para el decantador trabajar a los 60° C para no tener que disminuir tanto la temperatura puesto que las corrientes vienen del reactor el cual opera a 190°C que es una temperatura muy elevada a comparación de las temperaturas de operación de los procesos de separación que siguen en el proceso. Para los servicios de calefacción el proceso de transesterificación está utilizando un consumo energético menor al del objetivo del simulador, esto podría indicar que es posible aumentar la temperatura de algún equipo para así aumentar el rendimiento del proceso.

4.8. Flujo volumétrico de los equipos

4.8.1. Proceso de separación

Tabla 29.

Flujo volumétrico de cada equipo en la separación del aceite

Separación del CO2			
Unidad	Volumen l/hr		
	Entrada	Salida	
V-101	33,43	65,78	
E-101	65,78	148,10	
P-101	1,61	1,62	
M-101	149,72	56,32	
S-101	56,32	145,78	4,53
V-102	4,53	16,45	
E-102	16,45	18,95	
S-102	18,95	16,79	2,16

Nota. La tabla muestra los flujos volumétricos de cada equipo que participa en el proceso de separación del CO2.

Las variaciones en los flujos volumétricos con respecto a las entradas y salidas de algunos se deben a los cambios de fases y aumentos y/o disminuciones de temperatura, como ocurre en la unidad E-101 donde ingresa la corriente de CO2 en fase gaseosa y sale en fase líquida por la presión y temperatura a la que se somete esta corriente.

4.8.2. Proceso de transesterificación

Tabla 30.

Flujo volumétrico de cada equipo en el proceso de transesterificación

Transesterificación			
Unidad	Volumen (l/hr)		
	Entrada	Salida	
E-101	4,26	4,23	
P-101	4,23	4,29	
M-101	4,52	4,52	
P-102	0,23	0,23	
E-102	4,52	5,97	
R-101	5,97	5,75	
V-101	5,75	993,83	
S-101	993,83	2172,24	0,14
E-103	2172,24	4,22	
D-101	0,14	0,01	0,12
S-102	0,12	0,74	0,157

Nota. La tabla muestra los flujos volumétricos de cada equipo en el proceso de transesterificación para producir el biodiesel.

Como en la tabla 26 también se observa variaciones en algunos flujos volumétricos debidos a cambios de la presión y temperatura de los equipos.

4.9. Capacidad y especificaciones de los equipos

En esta sección se realizará la capacidad volumétrica de los equipos descritos en el capítulo 3, sección 3.5. Los cálculos de cada equipo están puestos en el anexo 9 y las especificaciones de cada uno de ellos en el anexo 10

4.9.1. Adecuación de la materia prima

- **Secador**

La capacidad de los dos secadores que se usaran para la borra de café se calculara con el flujo masico y el tiempo de secado descrito en la sección 3.1.1. por la bibliografía.

Tabla 31.

Flujo masico y tiempo de los secadores.

Equipo	Flujo masico (kg/hr)	Tiempo (hr)
Secador 1	8,33	5
Secador 2	4,16	5

Nota. La tabla muestra los flujos masicos y el tiempo de los dos secadores usados para la borra de café.

Se observa en la tabla 31, que el tiempo para cada secador es de 5 horas y los flujos masicos son tomados del capítulo 4 sección 4.2 del balance de materia convertidos a horas. Al realizar los cálculos se obtiene la capacidad másica de los secadores presentadas en la tabla 32.

Tabla 32.

Capacidad másica de los secadores

Equipo	Capacidad másica calculada (kg)	Capacidad másica arreglada (kg)
Secador 1	42	45
Secador 2	21	25

Nota. La tabla muestra la capacidad másica de los secadores usados para la borra de café.

Observamos en la tabla que se arregló la capacidad másica calculada, por temas de desbordamiento y darles más capacidad a los equipos.

4.8.2. Extracción por fluidos supercríticos

- **Equipo extractor**

Para calcular la capacidad del equipo de extracción, se tomó como referencia el trabajo “Diseño de una planta piloto de extracción del aceite esencial de limón usando CO₂ como fluido supercrítico” del autor Carlos Quevedo Morocho. Se calcula el aceite que se produce en una corrida y la cantidad de CO₂ necesario para extraer el aceite de la borra de café.

De acuerdo con el capítulo 3, sección 3.6.6., la materia prima recogida es de 73000 kg al año de borra de café húmeda (28060 kg de borra de café seca al año) y la cantidad de CO₂ es de

una relación de 6 kg de CO₂ por cada kg de borra de café [23]. La densidad del aceite de borra de café es 896 kg/m³ [51] y la densidad del CO₂ es de 815,38 kg/m³ [66]. Con estos datos se realizan los cálculos dando como resultado una capacidad de extractor de 27L y por temas de desbordamiento del equipo, el equipo tendrá una capacidad de 35L.

Teniendo esta capacidad se generó las especificaciones del equipo con la empresa proveedora Equipxa, por lo que la capacidad del primer separador es de 20L y del segundo separador de 15L.

4.8.3. Transesterificación por fluidos supercríticos

En esta sección se calculan los volúmenes de los equipos de la transesterificación usando los flujos volumétricos de la tabla 27 y los tiempos de operación de la tabla 30 tomados del capítulo 3 sección 3.1.1. tomados de la bibliografía.

Tabla 33.

Tiempos de operación de cada equipo

Equipo	Tiempo de operación
Reactor	30 minutos
Separador flash	15 minutos
Decantador	50 minutos
Columna de destilación	30 minutos

Nota. La tabla muestra los tiempos de operación de cada equipo presente en la transesterificación.

Con la formula mostrada a continuación, se realiza los cálculos que se necesitan.

$$V = Q * t$$

Donde,

V = Volumen del equipo (L)

Q = Caudal del equipo (L/hr)

t = Tiempo de operación (hr)

- **Reactor flujo continuo**

Para calcular el volumen del reactor se usa su flujo volumétrico tomado de la tabla 27 y el tiempo de operación de la tabla 30, dando como resultado una capacidad de 6 L y por temas de desbordamiento se tomará una capacidad de 10L.

Estos equipos por las empresas proveedoras vienen diseñados con el separador flash. Por lo que, con las especificaciones del reactor, la proveedora Equioxa nos da una capacidad del separador de 5L.

- **Decantador**

Para el decantador se tuvo una capacidad muy baja, pero en la industria los equipos utilizados para este proceso tienen una capacidad de 50L/hr, por lo que se toma esta capacidad para realizar las especificaciones.

- **Columna de separación**

En la columna de destilación pasa lo mismo que el decantador, como el flujo volumétrico por hora es bajo, la capacidad da baja. La empresa proveedora ofrece una capacidad de 10L para este equipo.

5. ANÁLISIS FINANCIERA

5.1. Costos de equipo de producción

Para el plan de inversión los precios de los equipos que se utilizan en el proceso fueron consultados por el proveedor Equipxa que brinda los costos con importaciones de empresas chinas para las especificaciones y cotización en el anexo 10.

Tabla 34.

Plan de inversión de equipos para la obtención de biodiesel de borra de café

MAQUINARIA Y EQUIPO	UNIDADES	VALOR UNITARIO (COP) \$	VIDA UTIL AÑOS	VALOR TOTAL (COP) \$
ADECUACION MATERIA PRIMA				
Secador al vacío JY-50	1	\$ 13.762.000	10	\$ 13.762.000
Secador al vacío JY-30	1	\$ 9.830.000	10	\$ 9.830.000
Total, Equipo adecuación	1	\$ 23.592.000		\$ 23.592.000
EXTRACCION				
Extractor fluidos supercríticos WT-50	1	\$ 350.200.000	15	\$ 350.200.000
Mezclador MH-500	1	\$ 7.540.000	20	\$ 7.540.000
Total, Equipo extracción	2	\$ 357.740.000		\$ 357.740.000
OBTENCION DE BIODIESEL				
Reactor tubular 5402	1	\$ 8.620.000	20	\$ 8.620.000
Compresor SCU200	2	\$ 10.500.000	10	\$ 21.000.000
Intercambiador de calor de placas	2	\$ 2.100.000	10	\$ 4.200.000
Mezclador MH-50	2	\$ 7.540.000	20	\$ 15.080.000
Separador de glicerina GQ/GF45	1	\$ 13.557.250	15	\$ 13.557.250
Torre de destilación YFT-10	1	\$ 13.000.000	20	\$ 13.000.000
Total, Equipo obtención de biodiesel	9	\$ 55.317.250		\$ 75.457.250
ALMACENAMIENTO				
Tanque criogénico CO2 VC2/16	1	\$ 10.000.000	6	\$ 10.000.000
Contenedor líquidos Chart industries	1	\$ 1.500.000	6	\$ 1.500.000
Contenedor biodiesel	1	\$ 2.100.000	6	\$ 2.100.000
Total, Equipo almacenamiento	3	\$ 13.600.000		\$ 13.600.000
MUEBLES Y ENSERES				
Computadoras	5	\$ 1.500.000	5	\$ 7.500.000
Impresora	2	\$ 2.000.000	5	\$ 4.000.000
Total, muebles y enseres	7	\$ 3.500.000		\$ 11.500.000
Total, plan de inversión (COP)				\$ 458.297.250
Imprevistos (COP)				\$ 100.000.000
Total (COP)				\$ 558.297.250

Nota. La tabla muestra el plan de inversión de los equipos usados en el proceso.

5.2. Nómina y costos de mano de obra.

Se propuso una nómina con los empleados que conforman en los trabajos y funciones de la planta piloto. Los salarios de cada uno de los empleados se calcularon en la página CompuTrabajo dependiendo de su rol en la planta piloto.

Tabla 35.

Nomina empleados.

							Seguridad social							
			Devengado				Salud		Pensiones		ARL	Total deducción		
ADMINISTRATIVO	básico mensual	días liquidados	básico devengado	Sub. Transporte	Horas extras	Total devengado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Total a pagar
Gerente general	\$ 4.500.000	30	\$ 4.500.000			\$ 4.500.000	\$ 382.500	\$ 180.000	\$ 540.000	\$ 180.000	\$ 15.300	\$ 937.800	\$ 360.000	\$ 4.140.000
Gerente administrativo	\$ 3.000.000	30	\$ 3.000.000			\$ 3.000.000	\$ 255.000	\$ 120.000	\$ 360.000	\$ 120.000	\$ 10.200	\$ 625.200	\$ 240.000	\$ 2.760.000
Contador	\$ 2.500.000	30	\$ 2.500.000			\$ 2.500.000	\$ 212.500	\$ 100.000	\$ 300.000	\$ 100.000	\$ 8.500	\$ 521.000	\$ 200.000	\$ 2.300.000
Secretaria	\$ 1.016.851	30	\$ 1.016.851	\$ 102.854		\$ 1.119.705	\$ 86.432	\$ 40.674	\$ 122.022	\$ 40.674	\$ 3.457	\$ 211.912	\$ 81.348	\$ 1.038.357
Conductor	\$ 1.097.080	30	\$ 1.097.080			\$ 1.097.080	\$ 93.252	\$ 43.883	\$ 131.650	\$ 43.883	\$ 3.730	\$ 228.631	\$ 87.766	\$ 1.009.314
														\$ 11.247.671

MANUFACTURA														
	básico mensual	días liquidados	básico devengado	Sub. Transporte	Horas extras	Total devengado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Empleado	Total a pagar
Jefe de operación	\$ 2.500.000	30	\$ 2.500.000			\$ 2.500.000	\$ 212.500	\$ 100.000	\$ 300.000	\$ 100.000	\$ 108.750	\$ 621.250	\$ 200.000	\$ 2.700.000
Operario 1	\$ 965.931	30	\$ 965.931	\$ 102.854		\$ 1.068.785	\$ 82.104	\$ 38.637	\$ 115.912	\$ 42.751	\$ 42.018	\$ 240.034	\$ 81.389	\$ 1.150.174
Operario 2	\$ 965.931	30	\$ 965.931	\$ 102.854		\$ 1.068.785	\$ 82.104	\$ 38.637	\$ 115.912	\$ 42.751	\$ 42.018	\$ 240.034	\$ 81.389	\$ 1.150.174
														\$ 5.000.347

Tabla 35. (Continuación)

provisión			
Prima servicios	Censantias	Interes censantias	Vacaciones
\$ 374.985	\$ 374.985	\$ 3.750	\$ 187.650
\$ 249.990	\$ 249.990	\$ 2.500	\$ 125.100
\$ 208.325	\$ 208.325	\$ 2.083	\$ 104.250
\$ 93.305	\$ 93.305	\$ 933	\$ 42.403
\$ 91.420	\$ 91.420	\$ 914	\$ 45.748
\$ 1.018.025	\$ 1.018.025	\$ 10.180	\$ 505.151

\$ 208.325	\$ 208.325	\$ 2.083	\$ 104.250
\$ 89.062	\$ 89.062	\$ 891	\$ 40.279
\$ 89.062	\$ 89.062	\$ 891	\$ 40.279
\$ 386.449	\$ 386.449	\$ 3.864	\$ 184.809

Nota. La tabla muestra la nómina de los trabajadores de la planta.

5.3. Depreciación equipos

Tabla 36.

Depreciación de equipos

MAQUINARIA Y EQUIPO	UNIDADES	VALOR UNITARIO (COP) \$	VIDA UTIL AÑOS	VALOR TOTAL (COP) \$	DEPRECIACION	
					MENSUAL	ANUAL
ADECUACION MATERIA PRIMA						
Secador al vacío JY-30	1	\$ 13.762.000	10	\$ 13.762.000	\$ 114.683	\$ 1.376.200
Secador al vacío JY-50	1	\$ 9.830.000	10	\$ 9.830.000	\$ 81.917	\$ 983.000
Total, Equipo adecuación	1	\$ 23.592.000		\$ 23.592.000	\$ 196.600	\$ 2.359.200
EXTRACCION						
Extractor fluidos supercríticos	1	\$ 350.200.000	15	\$ 350.200.000	\$ 1.945.556	\$ 23.346.667
Mezclador MH-2000	1	\$ 7.540.000	20	\$ 7.540.000	\$ 31.417	\$ 377.000
Total, Equipo extracción	2	\$ 357.740.000		\$ 357.740.000	\$ 1.976.972	\$ 23.723.667
OBTENCION DE BIODIESEL						
Reactor tubular	1	\$ 8.620.000	20	\$ 8.620.000	\$ 35.917	\$ 431.000
Compresor	2	\$ 10.500.000	10	\$ 21.000.000	\$ 175.000	\$ 2.100.000
Intercambiador de calor de placas	2	\$ 2.100.000	10	\$ 4.200.000	\$ 35.000	\$ 420.000
Mezclador MH-50	2	\$ 7.540.000	20	\$ 15.080.000	\$ 62.833	\$ 754.000
Separador de glicerina	1	\$ 13.557.250	15	\$ 13.557.250	\$ 75.318	\$ 903.817
Torre de destilación	1	\$ 13.000.000	20	\$ 13.000.000	\$ 54.167	\$ 650.000
Total, Equipo obtención de biodiesel	9	\$ 55.317.250		\$ 75.457.250	\$ 438.235	\$ 5.258.817
ALMACENAMIENTO						
Tanque criogénico	1	\$ 10.000.000	6	\$ 10.000.000	\$ 138.889	\$ 1.666.667
Contenedores líquidos	1	\$ 1.500.000	6	\$ 1.500.000	\$ 20.833	\$ 250.000
Contenedor biodiesel	1	\$ 2.100.000	6	\$ 2.100.000	\$ 29.167	\$ 350.000
Total, Equipo almacenamiento	3	\$ 13.600.000		\$ 13.600.000	\$ 188.889	\$ 2.266.667
MUEBLES Y ENSERES						
Computadoras	5	\$ 1.500.000	5	\$ 7.500.000	\$ 125.000	\$ 1.500.000
Impresora	2	\$ 2.000.000	5	\$ 4.000.000	\$ 66.667	\$ 800.000

Tabla 26. (Continuación)

Total, muebles y encerres	7	\$ 3.500.000		\$ 11.500.000	\$ 191.667	\$ 2.300.000
VEHICULOS						
Camion biodiesel	1	\$ 255.000.000	20	\$ 255.000.000	\$ 1.062.500	\$ 12.750.000
TOTAL (COP)					\$ 4.054.863	\$ 48.658.350

Nota. La tabla muestra la depreciación de los equipos usados en el proceso.

5.4. Costos por unidad

5.4.1. Estudio de mercado

Tabla 37.

Estudio de mercado del proceso.

CLIENTES	COMPETENCIA
Industrias de Diesel	BioD
Gasolineras	Odin Energy
Industrias de detergentes	Ecodiesel de Colombia
Consumidor final	Oleoflores

Nota. La tabla muestra el estudio de mercado del proceso de obtención de biodiesel.

- **Producto**

El biodiesel obtenido a partir de la borra de café por el método de fluidos supercríticos se ofrece con un grado de pureza del 93% comprobado por el simulador, por lo cual brinda beneficios en mezclas con Diesel, bajas emisiones de contaminación, un gran poder calorífico en motores de carros y general aprovechamiento de residuos sólidos. Además, de usar el biodiesel para la producción de detergentes químicos, estos ayudan a limpiar derrames de petróleo y grasas [69].

5.4.2. Precio unitario materia prima

Teniendo en cuenta que la borra de café es un residuo sólido generado por el consumo de café, este no cuenta con un precio fijo en el mercado por lo que su costo es \$0 COP. Los solventes de metanol y CO2 se cotizaron por la tienda virtual Mercado Libre y se usó la cantidad que se necesita para producir el biodiesel en un día de producción.

Tabla 38.

Costo unidad para materia primas

COSTO UNITARIO MATERIA				
Materia prima	Unidad	Cantidad	Valor unidad (COP) \$	Valor total (COP) \$
Borra de café húmeda	Kg/día	200	0	0
CO2	litro/diario	166,36	\$ 38.000	\$ 6.321.680
Metanol	litro/diario	1958,3	\$ 10.000	\$ 19.583.000
Valor total (COP)				\$ 25.904.680

Nota. La tabla muestra el costo unidad para las materias primas usadas en el proceso.

5.5. Presupuesto CIF

Para calcular el presupuesto CIF se debe tener en cuenta la inflación anual para ser proyectada en los 5 años, la cual para el 2021 está a una inflación del 3,3% [67].

Tabla 39.*Presupuesto CIF*

DETALLE	MES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
PERSONALES			3,30%	3,30%	3,30%	3,30%
Gerente general	\$ 4.500.000	\$ 54.000.000	\$ 55.782.000	\$ 57.622.806	\$ 59.524.359	\$ 61.488.662
Gerente administrativo	\$ 3.000.000	\$ 36.000.000	\$ 37.188.000	\$ 38.415.204	\$ 39.682.906	\$ 40.992.442
Contador	\$ 2.500.000	\$ 30.000.000	\$ 30.990.000	\$ 32.012.670	\$ 33.069.088	\$ 34.160.368
Secretaria	\$ 1.016.851	\$ 12.202.212	\$ 12.604.885	\$ 13.020.846	\$ 13.450.534	\$ 13.894.402
Conductor	\$ 1.097.080	\$ 13.164.960	\$ 13.599.404	\$ 14.048.184	\$ 14.511.774	\$ 14.990.663
Jefe de operación	\$ 2.500.000	\$ 30.000.000	\$ 30.990.000	\$ 32.012.670	\$ 33.069.088	\$ 34.160.368
Operario 1	\$ 965.931					
Operario 2	\$ 965.931					
SUBTOTAL	\$ 16.545.793	\$ 175.367.172	\$ 181.154.289	\$ 187.132.380	\$ 193.307.749	\$ 199.686.904

Nota. La tabla muestra el presupuesto CIF del proceso.

5.6. Proyección de unidades para producir y vender

En esta sección se tuvo en cuenta los incrementos de la demanda del producto a obtener, estos se encontraron en la página del DANE del PIB para secciones y divisiones CIU Rev. 4 A.C. [68].

Tabla 40.*Crecimiento de la demanda*

2021	2022	2023	2024	2025
	6,88%	8,88%	9,56%	9,8%

Nota. La tabla muestra el crecimiento de la demanda en 5 años. Tomado de: Dane.gov.co. 2021. *Sistema de Consulta CIU Rev. 4.A.C.* [En línea] Disponible en: <<https://www.dane.gov.co/index.php/138-espanol/1933-sistema-de-consulta-ciu-rev-4ac>>

Tabla 41.

Unidades a producir vender nacional

UNIDADES A PRODUCIR Y VENDER NACIONAL					
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
		6,88%	8,88%	9,65%	9,80%
Biodiesel	56174950	60039787	65371320	71679652	78704258
TOTAL	56174950	60039787	65371320	71679652	78704258

Nota. La tabla muestra las unidades a producir para vender nacional.

5.6.1. Costos variables por unidad

Tabla 42.

Costos de variables por unidad

COSTO VARIABLE UND	
	BIODIESEL
COST MP UND	\$ 25.904.680
MOD UND	\$ 3
MOI UND	\$ 1
CIF UND	\$ 2
TOTAL	\$ 25.904.685

Nota. La tabla muestra los costos de las variables por unidad del producto.

5.7. Ventas nacionales

Tabla 43.

Ventas nacionales por año

VENTAS NACIONALES				
AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
	6,88%	8,88%	9,65%	9,80%
\$ 1.746.233.279. 392	\$ 1.866.374.129. 015	\$ 2.032.108.151. 671	\$ 2.228.206.588. 307	\$ 2.446.570.833. 962

Nota. La tabla muestra las ventas nacionales por año del producto.

5.8. Resumen general

Tabla 44.

Resumen general del proyecto

	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		3,30%	3,30%	3,30%	3,30%
Biodiesel	\$ 1.746.233.286.992	\$ 1.866.374.137.137	\$ 2.032.108.160.515	\$ 2.228.206.598.005	\$ 2.446.570.844.609
TOTAL, ING.VTAS NAL	\$ 1.746.233.286.992	\$ 1.866.374.137.137	\$ 2.032.108.160.515	\$ 2.228.206.598.005	\$ 2.446.570.844.609
EGRESOS					
M.P					
Biodiesel	\$ 1.455.194.103.766	\$ 1.555.311.458.105	\$ 1.693.423.115.585	\$ 1.856.838.446.239	\$ 2.038.808.613.970
TOTAL, M.P	\$ 1.455.194.103.766	\$ 1.555.311.458.105	\$ 1.693.423.115.585	\$ 1.856.838.446.239	\$ 2.038.808.613.970
M.O.D	\$ 145.809	\$ 155.840	\$ 169.679	\$ 186.053	\$ 204.286
M.O.I	\$ 56.175	\$ 60.040	\$ 65.371	\$ 71.680	\$ 78.704
CIF	\$ 100.077	\$ 106.962	\$ 116.461	\$ 127.699	\$ 140.214
PROVISION SERVICIOS	\$ 8.426.840	\$ 8.704.926,15	\$ 8.992.188,71	\$ 9.288.930,94	\$ 9.595.465,66
CESANTIAS	\$ 16.853.681	\$ 17.409.852,29	\$ 17.984.377,42	\$ 18.577.861,87	\$ 19.190.931,32
INTERESES CESANTIAS	\$ 168.537	\$ 174.098,52	\$ 179.843,77	\$ 185.778,62	\$ 191.909,31
VACACIONES	\$ 8.279.515	\$ 8.552.738,81	\$ 8.834.979,19	\$ 9.126.533,50	\$ 9.427.709,11
TOTAL, EGRESOS	\$ 1.455.228.134.400	\$ 1.555.346.622.563	\$ 1.693.459.458.485	\$ 1.856.876.010.775	\$ 2.038.847.443.190
I-E	\$ 291.005.152.592	\$ 311.027.514.574	\$ 338.648.702.030	\$ 371.330.587.229	\$ 407.723.401.419
variación	17%	17%	17%	17%	17%

Nota. La tabla muestra el resumen general del proyecto de inversion.

5.9. Flujo de caja

Tabla 45.

Flujo de caja resumen

FLUJO DE CAJA				
AÑO	INVERSION	INGRESOS	EGRESOS	FCA
0	\$ 591.889.250	0	0	-\$ 591.889.250
1		\$ 1.746.233.286.992	\$ 1.455.179.375.972	\$ 291.053.911.020
2		\$ 1.866.374.137.137	\$ 1.555.297.857.251	\$ 311.076.279.886
3		\$ 2.032.108.160.515	\$ 1.693.410.683.674	\$ 338.697.476.841
4		\$ 2.228.206.598.005	\$ 1.856.827.224.726	\$ 371.379.373.278
5		\$ 2.446.570.844.609	\$ 2.038.798.644.626	\$ 407.772.199.983

Nota. La tabla muestra el resumen del flujo de caja del proyecto.

5.9.1. Inversión

Tabla 46.

Inversión

INVERSION	
Terreno	\$ 100.000.000
Construcción	\$ 10.000.000
Maq y equip	\$ 470.389.250
Muebles y enseres	\$ 11.500.000
TOTAL, INVERSION	\$ 591.889.250

Nota. La tabla muestra la inversión que se tiene en el proyecto.

5.9.2. Indicadores financieros

Los indicadores financieros para saber la viabilidad del proyecto son los siguientes:

- TIR
- VPN
- I (B/C)
- TIO 19% [70]

Tabla 47.

Indicadores financieros

INVERSION	\$ 591.889.250
TIR	464,30%
VPN	\$ 574.061.647.546
TASA DE DESCUENTO (TIO)	19%
SUMA DE INGRESOS	\$ 381.995.963.726
SUMA EGRESOS	\$ 318.326.784.663
COSTO-INVERSION	\$ 318.918.673.913
C/B	1,2

Nota. La tabla muestra los indicadores financieros que se usan para la rentabilidad del proyecto.

Con los resultados de los indicadores financieros se observa que el proyecto es rentable. La TIR dio mayor a la TIO por lo que indica que la rentabilidad de la inversión es aceptable, por otro lado, el VPN siendo un valor positivo respalda esa rentabilidad buena del proyecto con un valor de \$ 574.061.647.546 y como análisis final el indicador costo beneficio dio un valor de 1, con un valor de 1,2 lo que significa los beneficios serán mayores que los costos a obtener del proyecto.

6. CONCLUSIONES

Con base a la revisión bibliográfica realizada se identifica que existen varios métodos para la obtención de biodiesel a partir de un residuo aprovechable como es la borra de café, aunque todos los métodos son viables un factor determinante para realizar la matriz de selección de dichos métodos fue el impacto ambiental que estos producen. Se considera que el ejercer la profesión de ingeniero químico va de la mano con los principios de la ingeniería verde, la cual propone que el diseño de productos y procesos sean viables en el aspecto económico, tecnológico y ambiental. Como resultado se eligió el método de extracción y transesterificación con fluidos supercríticos debido a que este presenta un impacto ambiental menor a los demás y también es el método con el que se obtienen mayores rendimientos en tiempos más cortos.

La extracción con fluidos supercríticos se puede llevar a cabo con diferentes solventes y se eligió el CO₂ por su facilidad en la obtención, manejo y que no es tóxico a comparación de los demás solventes, el CO₂ hace parte de los procesos naturales por lo que sus emisiones no son tan perjudiciales para el ambiente. También permite obtener los ácidos grasos con un grado de pureza mayor del 90 % y su presencia en esta corriente no afecta las propiedades del aceite por lo que permite continuar con el proceso de transesterificación.

La transesterificación generalmente se lleva a cabo con alcohol este puede ser metanol o el etanol, pero para condiciones supercríticas es más conveniente utilizar el metanol porque permite alcanzar grados de pureza más altos, además teniendo en cuenta las precauciones y cuidados necesarios trabajar con él es seguro. Por otra parte, el metanol es una materia prima fácil de conseguir lo que permite disponer de él siempre que sea necesario. Estos aspectos son importantes para el desarrollo del proceso puesto que al trabajarse en condiciones supercríticas se entiende que puede llegar a ser más costoso a comparación de los otros métodos.

La producción de biodiesel a partir de la borra del café es un proceso continuo una vez se tenga la materia prima acondicionada, la extracción se lleva a cabo en condiciones de 74 bar y 31°C condiciones en las que el CO₂ se encuentra como fluido supercrítico lo que permite aumentar su solubilidad con respecto al soluto que son los ácidos grasos, seguido de esto se separa la mezcla en un tren separación conformado de dos columnas ciclónicas las cuales permiten obtener un aceite más limpio que beneficiará la calidad del biodiesel resultante y los demás equipos que conforman el extractor de fluidos supercríticos permiten acondicionar las corrientes tanto para su recuperación en el caso del CO₂ y su posible recirculación, como para dar continuidad en el proceso de obtención. Para la transesterificación la cual se lleva a cabo

en condiciones de temperatura desde 190 a 350°C y de presión mayores a 80 bar y una relación de 42 a 1 con respecto al metanol y los ácidos grasos, permite asegurar la mayoría de los contactos entre los triglicéridos y el alcohol para obtener así rendimientos mayores del 95%. Al igual que en la extracción los demás equipos comienzan a disminuir las condiciones críticas para permitir la separación de los productos que son los esteres metílicos y el glicerol, además es posible recuperar el metanol con un porcentaje alto de pureza y pensar en la recirculación en el proceso.

Al desarrollar la simulación se comprueba que los datos teóricos recolectados de las condiciones de operación si funcionan correctamente para la producción de biodiesel, además permitió conocer cuánto biodiesel era posible producir a partir de la cantidad recolectada de las tiendas Juan Valdez elegidas en localidad de chapinero, obteniendo así 533.62kg/año de biodiesel a partir de 73000 kg/año lo cual es aceptable para una planta piloto. la simulación permite conocer resultados más cercanos a la realidad de un proceso industrial ya que permite ver la variabilidad en los flujos volumétricos, consumo de energía, cambios de temperatura y fases en las que se encuentran los compuestos en las diferentes etapas del proceso. A partir de estos resultados fue posible encontrar equipos que se adapten a los volúmenes del proceso y dimensionar la planta piloto para un área total 1000m³.

Por último, el análisis financiero del proyecto arrojó resultados rentables y favorables para la implementación de la planta a nivel piloto en Colombia. Se obtuvo una TIR, VPN Y B/C altas por lo que se concluyó que se iba a tener en 5 años ganancias favorables y proyecciones óptimas para este proceso que favorece la economía del país y al mismo tiempo hace un papel importante en el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fedebiocombustibles, “Biocombustibles, la alternativa verde”, [En línea]. Disponible: https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2780-titulo-biocombustibles_la_alternativa_verde.htm. [Acceso: febrero 3, 2021].
- [2] Fedebiocombustibles, “los biocombustibles en Colombia”, [En línea]. Disponible: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-200.htm>. [Acceso: febrero 3, 2021].
- [3] Fedebiocombustibles, “Biocombustibles en el marco del Covid-19”, [En línea]. Disponible: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-3272.htm>. [Acceso: febrero 3, 2021].
- [4] B. Herrera Jaime, S. Leyva Rolon, V. Ortiz Ceron, J. F. Cardenas Valderrama, y E. Garzon Lozano, “Biocombustibles en Colombia,” *Report*, p. 22, 2009.
- [5] C. Álvarez, “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional,” *Econ. Inf.*, no. 359, pp. 63–89, 2009.
- [6] Fedepalma, “Palma en Colombia”, [En línea]. Disponible en: <https://www.palmadeaceite.org/palma-de-aceite-en-colombia>. [Acceso: febrero 24, 2021].
- [7] C. Castro, “evaluación del biodiésel producido a partir de aserrín de café bajo un proceso de transesterificación a nivel laboratorio como fuente de energía alternativa,” *j. chem. inf. model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013. [acceso: febrero 24, 2021].
- [8] Erenovable, “el origen del biodiesel: usos y ventajas”, [en línea]. disponible: <https://erenovable.com/el-biodiesel-el-origen-y-sus-ventajas/>. [acceso: febrero 16, 2021].
- [9] Palermo. “Biodiesel”, [En línea]. Disponible: https://www.palermo.edu/economicas/pdf_economicas/Presentacion_biocom_Steinberg.pdf. [Acceso: febrero 25, 2021]
- [10] Características, “Definición y características CAFÉ”, [En línea]. Disponible: <https://www.caracteristicas.co/cafe/#ixzz6nzhwRbwx>. [Acceso: marzo 2, 2021].
- [11] A. Urribarrí et al., “Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel” *Multiciencias*, vol. 14, no. 2, pp. 129–139, 2014, [En línea].

- Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/904/90432601006.pdf>. [Acceso: marzo 2, 2021]
- [12] A. Deligiannis, A. Papazafeiropoulou, G. Anastopoulos, y F. Zannikos, “Waste Coffee Grounds as an Energy Feedstock,” *Proceeding 3rd Int. CEMEPE SECOTOX Conf.*, no. March 2016, pp. 617–622, 2011, [En línea]. Disponible: https://www.mendeley.com/research/waste-coffee-grounds-energy-feedstock/?utm_source=desktop&utm_medium=1.13.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B54b970a5-bd4d-4e4d-a154-ec395765f49d%7D%5Cnhttp://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15731. [Acceso: marzo 2, 2021]
- [13] Semana, “colombianos gastan casi \$100.000 en café al año”, 1, octubre, 2020, [En línea]. Disponible: <https://www.semana.com/empresas/articulo/consumo-de-cafe-de-los-colombianos-en-2020/302149/#:~:text=Un%20estudio%20de%20la%20consultora,1.160%20tazas%20de%20caf%C3%A9%20anualmente>. [Acceso: marzo 2, 2021].
- [14] Capítulo Café Colombia, “Empresas certificadas”, [En línea]. Disponible en: <https://www.bascafe.org/empresas-certificadas.html>. [Acceso: marzo 2, 2021].
- [15] Portafolio, “Un café con la jefa de Juan Valdez”, 25, noviembre, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/revista-portafolio/un-cafe-con-la-jefa-de-juan-valdez-535913>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [16] Juan Valdez, “Informe de Gestión 2019,” *Rev. PH*, 2019, [En línea]. Disponible: <https://www.juanvaldezcafe.com/sites/default/files/InformedeGestionProcafecolS.A.2019.pdf> [Acceso: marzo 13, 2021].
- [17] NJ Health, “Derecho a Saber Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas Descripción y uso,” *New Jersey Dep. Heal.*, p. 6, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1594sp.pdf>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [18] Chemical Safety Facts. “Metanol”. [En línea]. Disponible en: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/metanol/>. [Acceso: marzo 13, 2021].

- [19] Documentación ideam. Guía “Metanol” 2019. [En línea]. Disponible: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia19.pdf>
- [20] S. Kant Bhatia et al., “An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification technologies,” *Fuel*, vol. 285, no. April 2020, p. 119117, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119117. [Acceso: marzo 17, 2021]
- [21] Proyecto fittema, “Disolventes”. [En línea]. Disponible en: <http://istas.net/descargas/Doc%20de%20FITTEMA%20-%20DISOLVENTES.pdf>. [Acceso: marzo 17, 2021].
- [22] Universidad nacional, revista Unal. Ingeniería química. “Esterificación”. [En línea]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeinv/article/view/20904/2181>. [Acceso: marzo 17, 2021].
- [23] J. C. Palacios Ormeño, “Estudio de pre-factibilidad para la instalación de una planta piloto de producción de biodiesel a partir de los residuos sólidos de café gastado en la región Lambayeque,” *Univ. Nac. Pedro Ruiz Gall.*, 2020, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/8414>. [Acceso: marzo 17, 2021]
- [24] A. Esquivel F. and P. Vargas Aguilar, “Uso de aceites esenciales extraídos por medio de fluidos supercríticos para la elaboración de alimentos funcionales,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 20, no. 4, p. 7, 2007. [Acceso: marzo 17, 2021]
- [25] Alonso, C. C., Álvarez, I., Bjorkroth, J., & González, R. C. (2010). Nuevas tecnologías en la conservación y transformación de los alimentos. http://www.institutomaspascualsanz.com/descargas/formacion/publi/Libro_Conserva_Transforma_Alimentos.pdf. [Acceso: marzo 17, 2021]
- [26] R. J. Velasco, H. S. Villada, and J. E. Carrera, “Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria,” *Inf. Tecnol.*, vol. 18, no. 1, pp. 53–66, 2007, doi: 10.4067/s0718-07642007000100009. [Acceso: marzo 17, 2021]
- [27] C. Aiello-mazzarri, Y. Salazar, and F. Ysambertt, “Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café: esterificación con H₂SO₄ y transesterificación con KOH Generating Biodiesel Using Fats Extracted from Coffee Grounds : Esterification

- using H₂SO₄ and Transesterification ,” vol. 29, no. 1, pp. 53–66, 2019. Acceso 15 abril 2021]
- [28] A. Arbeláez and M. Rivera, “Diseño Conceptual De Un Proceso Para La Obtención De Biodiesel a Partir De Algunos Aceites Vegetales Colombianos,” *Eng. Thesis*, vol. 1, pp. 1–119, 2007. Acceso 15 abril 2021]
- [29] E. M. Vargas Solano, “Transesterificación de aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea usando CaO y Fe₂O₃ como catalizadores,” *Univ. los andes*, 2005.
- [30] J. Van Gerpen, “Biodiesel processing and production,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 86, no. 10, pp. 1097–1107, 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
- [31] D. Manuale, “Obtención de biodiésel en condiciones supercríticas,” *Univ. Nac. Litoral*, vol. 1, pp. 37–45, 2010. [Acceso 15 abril 2021]
- [32] M. De Luca, M. Gely y A. Pagano, “Producción de biodiesel en condiciones supercríticas”, *Revista argentina de ingeniería*, Vol. 4, pp. 2, Oct. 2014, [En línea] <https://radi.org.ar/wp-content/uploads/2016/10/21-1.pdf>. [Acceso 15 Abril 2021]
- [33] A. H. West, D. Posarac, and N. Ellis, “Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 14, pp. 6587–6601, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.046. [Acceso 15 abril 2021]
- [34] Jérôme Hervé Lamoureux, “Diseño conceptual de una planta de biodiesel,” p. 137, 2007. [Acceso 15 abril 2021]
- [35] D. Lainfiesta, “Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal escala laboratorio,” p. 191, 2009, [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1119_Q.pdf. [Acceso 15 abril 2021]
- [36] E. Flores, A. Gonzalez, N. Ramirez, A. Cohen, J. . Robledo, and M. J. Cruz, “diseño de un proceso continuo de producción de biodiesel,” *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 12, no. 3, pp. 505–511, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966013>. [Acceso 24 julio 2021]
- [37] D. L. Mariana, G. Cristina, and A. M. Pagano, “Producción de biodiesel en condiciones supercríticas,” *Estadísticas sobre Biodiesel*, p. 6, 2014. [Acceso 15 abril 2021]

- [38] Ingeniero marino, “Intercambiadores de calor”. [En línea]. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/#:~:text=Intercambiador%20de%20Calor-.Los%20intercambiadores%20de%20calor%20son%20dispositivos%20cuya%20funci%C3%B3n%20es%20transferir,sin%20que%20estos%20se%20mezclen.> [Acceso 20 junio 2021]
- [39] Técnica industrial sl, “uso y funcionamiento de los compresores de aire comprimido”. [En línea]. Disponible en: <https://folchtecnicaindustrial.com/uso-y-funcionamiento-de-los-compresores-de-aire-comprimido/> [Acceso 20 junio 2021]
- [40] G. S. Shareef, “Condensadores Refrigerados,” vol. [Accesado, pp. 16–31, [En línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-1ch2-s.pdf>. [Acceso 20 junio 2021]
- [41] CF comercial Foisa, “Intercambiador de calor funcionamiento, tipos y eficiencia”. [En línea]. Disponible en: <https://comercialfoisa.com/intercambiador-de-calor-funcionamientotipos-y-eficiencia/> [Acceso 20 junio 2021]
- [42] GEDAR, “Decantadores”. [En línea]. Disponible en: <https://www.gedar.com/residuales/decantadores.htm> [Acceso 20 junio 2021]
- [43] M. Franco and M. A. Larrayoz, “Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales en condiciones supercríticas,” *Proy. Fin Máster, Univ. Politècnica Catalunya*, p. 79, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19694/TFM.Simulacindelproces?sequence=1> [Acceso 15 abril 2021]
- [44] Anónimo, “Control de Columnas de Destilación Índice.” [Acceso 20 junio 2021]
- [45] R. Hernández Ramírez, “4. ALMACENAMIENTO PROVISIONAL Y TRANSPORTE DE CO₂ 4.1. Almacenamiento provisional,” vol. 2, 2007. [Acceso 20 junio 2021]
- [46] Techno Engineers, “Tanque de almacenamiento CO₂”. [En línea]. Disponible en: <https://mosengg.com/es/co2-storage-tank.html#:~:text=L%C3%ADquido%20aislado%20al%20vac%C3%ADo%20Almac.> [Acceso 20 junio 2021]

- [47] TextosCientificos.com, “El metanol y la seguridad química”. [En línea]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/quimica/metanol/seguridad-quimica>. [Acceso 20 junio 2021]
- [48] I. D. E. L. A. Sustancia *et al.*, “Ficha de datos de seguridad glicerina 99,5% 1.,” vol. 34, no. 1272, pp. 1–9, 2013. [Acceso 20 junio 2021]
- [49] G. Buenas, P. D. E. Manejo, B. Del, and P. Biocombustible, “Biocombustible.” [Acceso 20 de junio 2021]
- [50] IDEAM, “cundimarca,” p. 283. [En línea] Disponible en: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cundinamarca_texto.pdf. [Acceso 26 julio 2021]
- [51] A. Mendoza, “Extracción de aceite de café a partir de la borra del grano de café tostado como residuo agroindustrial,” *SELL J.*, vol. 5, no. 1, p. 55, 2020. [Acceso 12 marzo 2021]
- [52] Fedebiocombustibles, “Preguntas frecuentes de los Biocombustibles”, [En línea]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [53] DANE, “Mercado laboral”, [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [54] Tenjo-Cundinamarca, “como llegar al municipio”, [En línea]. Disponible en: <https://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Como-llegar-al-municipio.aspx>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [55] Tenjo-Cundinamarca, “ECONOMÍA”, [En línea]. Disponible en: <https://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Como-llegar-al-municipio.aspx>. [Acceso: marzo 13, 2021].
- [56] N. Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 3, p. 8, 2010, [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>. [Acceso 1 junio 2021]
- [57] LIMA COMPOST, “¿Sabías que la borra de café está mejor en el suelo que en la bolsa de basura?”. [En línea]. Disponible en: <https://limacompost.com/2018/08/05/borra-de-cafe-se-composta/> [Acceso 1 junio 2021]

- [58] AspenTech, “Aspen plus: Simulación de proceso para la industria química”. [En línea]. Disponible en: <https://www.aspentech.com/en/resources/brochure/aspens-plus-simulacion-de-proceso-industria-quimia#:~:text=Aspen%20Plus%3A%20Simulaci%C3%B3n%20de%20proceso,qu%C3%ADmicos%20de%20especialidad%20y%20farmac%C3%A9utica> [Acceso 1 junio 2021]
- [59] A. García and E. Campo, “Extracción de celulosa a partir de la borra de café,” *Cenicafé*, vol. 50, no. 3, pp. 205–214, 1999. [Acceso 15 abril 2021]
- [60] M. R. Luis Miguel and P. H. David Orlando, “Valorización De Los Residuos De Café Tostado y molido (borra de café), generados en el campus central de la universidad de el Salvador,” 2020. [Acceso 26 julio 2021]
- [61] J. D. G. Gachancipa and V. M. Zarta, “Evaluación de la extracción de lípidos presentes en la borra de café utilizando un solvente alternativo,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 43, no. 1, p. 7728, 2020, [En línea]. Disponible en: https://online210.psych.wisc.edu/wp-content/uploads/PSY-210_Unit_Materials/PSY210_Unit01_Materials/Frost_Blog_2020.pdf <https://www.economist.com/special-report/2020/02/06/china-is-making-substantial-investment-in-ports-and-pipelines-worldwide> <http://www>. [Acceso 26 julio 2021]
- [62] M. a Calva-Ramírez, “Comparación de eficiencia energética entre sistemas de secado horizontal y vertical,” *Tesis de grado*, p. 148, 2007. [Acceso 26 julio 2021]
- [63] D. Daniela. “Extracción y caracterización de aceite de café (*Coffea arabica*) a partir grano tostado con CO₂ supercrítico”, Universidad de Nariño, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://sired.udenar.edu.co/2712/>. [Acceso 26 de julio 2021]
- [64] I. Ortiz, “Extracción mediante CO₂ supercrítico,” *Univ. Autónoma Madrid Univ. Complut. Madrid*, pp. 7–8, 2009. [Acceso 26 de julio 2021]
- [65] U. D. E. Barcelona, “Reactores multifásicos,” 2013. [Acceso 26 de julio 2021]
- [66] C. Quevedo, “Diseño de una planta piloto de extracción de aceite esencial de limón usando CO₂ como fluido supercrítico,” *Univ. Nac. Piura*, pp. 1–110, 2019. [Acceso 27 de julio 2021]

- [67] macro, D., 2021. *IPC de Colombia 2021*. [En línea] datosmacro.com. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/colombia>. [Acceso 25 June 2021].
- [68] Dane.gov.co. 2021. *Sistema de Consulta CIU Rev. 4.A.C.* [En línea] Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/138-espanol/1933-sistema-de-consulta-ciu-rev-4ac> [Acceso 25 junio 2021].
- [69] Erenovable.com. 2021. *El origen del biodiesel: usos y ventajas - Erenovable.com*. [En línea] Disponible en: <<https://erenovable.com/el-biodiesel-el-origen-y-sus-ventajas/>> [Acceso 25 junio 2021].
- [70] S. Vera and D. Alvarez, “evaluación de la viabilidad técnico-financiera para la obtención de terpenos partiendo del cannabis mediante una revisión del arte,” *J. Chem. Inf. Model.*, 2020. [Acceso 25 junio 2021]
- [71] Universidad de America, “Manual Estructuración del trabajo de grado,” Bogotá, Colombia, 5, 2021. [PDF]

RECOMENDACIONES

En la bibliografía consultada para el proceso de transesterificación con metanol supercrítico se plantea la opción de agregar dióxido de carbono como cosolvente con el propósito de disminuir la temperatura y presión supercríticas del metanol, se utiliza una relación de 25 a 1 con respecto al aceite y una mezcla de 75% metanol y lo restante en dióxido de carbono [35]. Esta alternativa puede llegar a ser beneficiosa para reducir costos de producción de la planta puesto que la inversión inicial es alta por lo que son equipos para trabajar en condiciones supercríticas, además puede significar ahorros en el consumo energético de la planta al no tener que alcanzar condiciones tan altas como 250 bar y más de 200 °C.

Se recomienda estudiar la posibilidad de una integración energética puesto que el reactor tiene reacciones exotérmicas es decir que liberan calor y puede servir como servicio de calentamiento para otras corrientes. También en resultados de la unidad S-101 correspondientes a la simulación de la separación de CO₂ y ácidos grasos sugieren la recuperación de la corriente de la salida 1 que se compone en su totalidad de CO₂ para volverla a reintegrar en el proceso de extracción lo cual disminuiría los costos de materias primas puesto que, se recircula esta corriente va a agregar todo el tiempo CO₂ nuevo. Con la corriente de salida 1 de la unidad S-101 de la simulación del proceso de transesterificación ocurre algo similar, esta tiene un pequeño porcentaje de glicerol; se sugiere estudiar a fondo los efectos de estas pequeñas cantidades de glicerol si se recirculara esa corriente de metanol al reactor. Una vez realizado el análisis de sensibilidad del flujo másico de metanol Vs la fracción de palmitato de metilo se pudo observar que es posible utilizar una relación menor a 40 a 1, sin embargo, se sugiere llevar a cabo un estudio con base a una simulación para comprobar el mínimo de relación que permita obtener los mismos rendimientos y también estudiar el comportamiento de la temperatura con la disminución de esta relación.

Para el aprovechamiento de la corriente de salida 1 del decantador en el proceso de transesterificación se sugiere estudiar la posibilidad de utilizar el subproducto glicerol para la producción de metanol por medio de un hidrogenolisis catalítica puesto que el metanol tiene un valor comercial más alto que el glicerol.

Para el desarrollo del análisis económico no se contaba con el valor de la borra puesto que esta es considerada como un desecho, al haber obtenido datos positivos con respecto a la viabilidad del proyecto se podría llegar a plantear una retribución económica a la empresa Juan Valdez puesto que esta fue la empresa proveedora que se eligió, además para aumentar la producción de biodiesel anual también se podría considerar recoger la borra de todos los puntos que son alrededor de 113 tiendas en Bogotá. De esta manera contribuir al crecimiento económico tanto de la planta como de la marca Juan Valdez.

GLOSARIO

Ácido graso: son compuestos naturales de las grasas y aceites formados por cadenas largas de moléculas de hidrogeno y carbono.

Ácido graso libre: le da la acidez al aceite por lo que no está unido a una molécula de glicerol

Especies Activas: reacción química compuesta por fragmentos moleculares como, los radicales libres, hidrogeno y carbón.

Extracción: técnica para separar un compuesto de una mezcla solida o liquida. Se aprovecha las diferentes solubilidades que los dos componentes presentan.

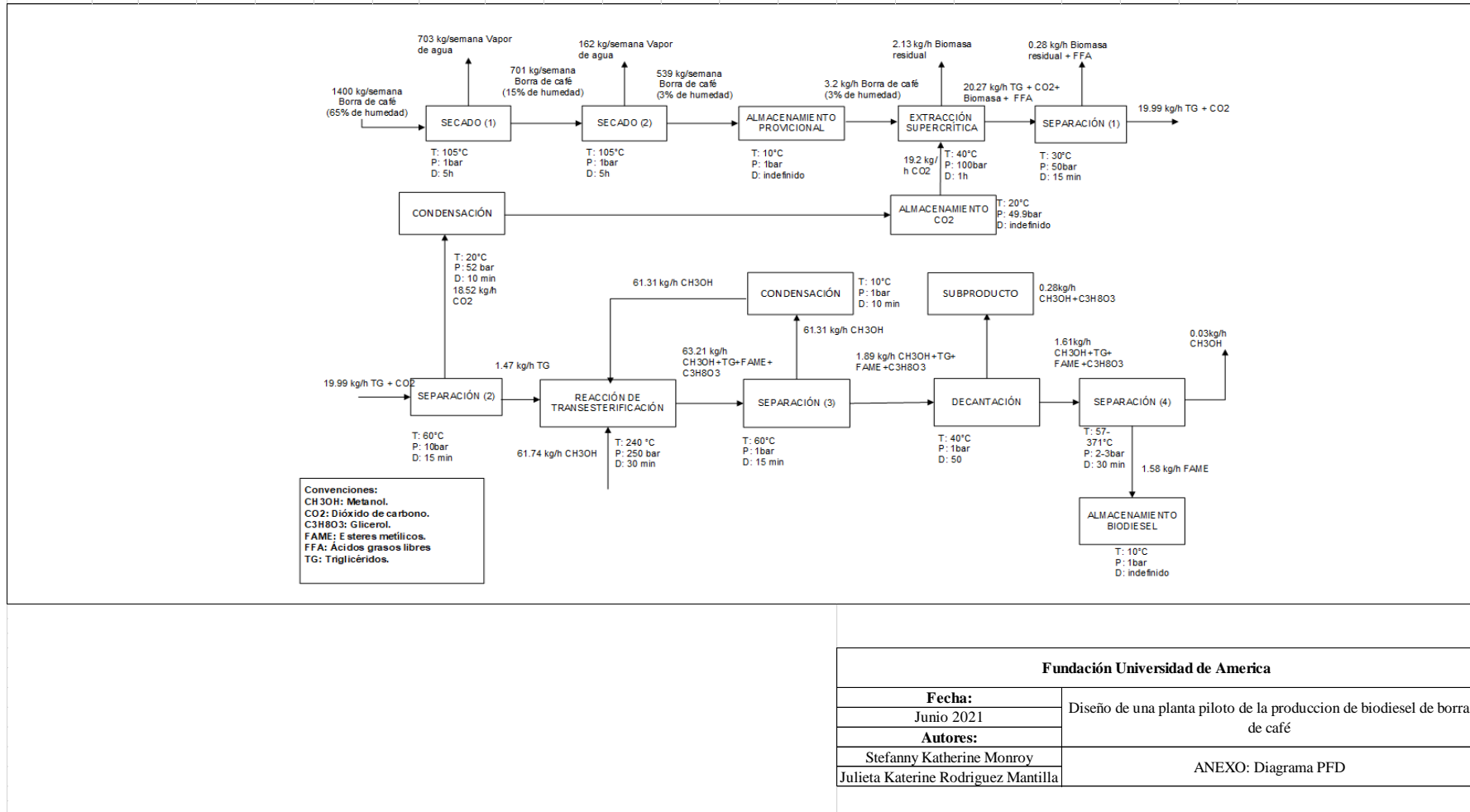
Planta piloto: es un proceso de operaciones unitarias a pequeña escala para obtener información que se pueda obtener su viabilidad a escala industrial.

Promotores químicos y físicos: estos son usados generalmente para aumentar la absorción de los AINEs (Medicamentos antiinflamatorios no esteroides), lo más utilizados son los aceites esenciales/terpenos y terpenoides.

ANEXOS

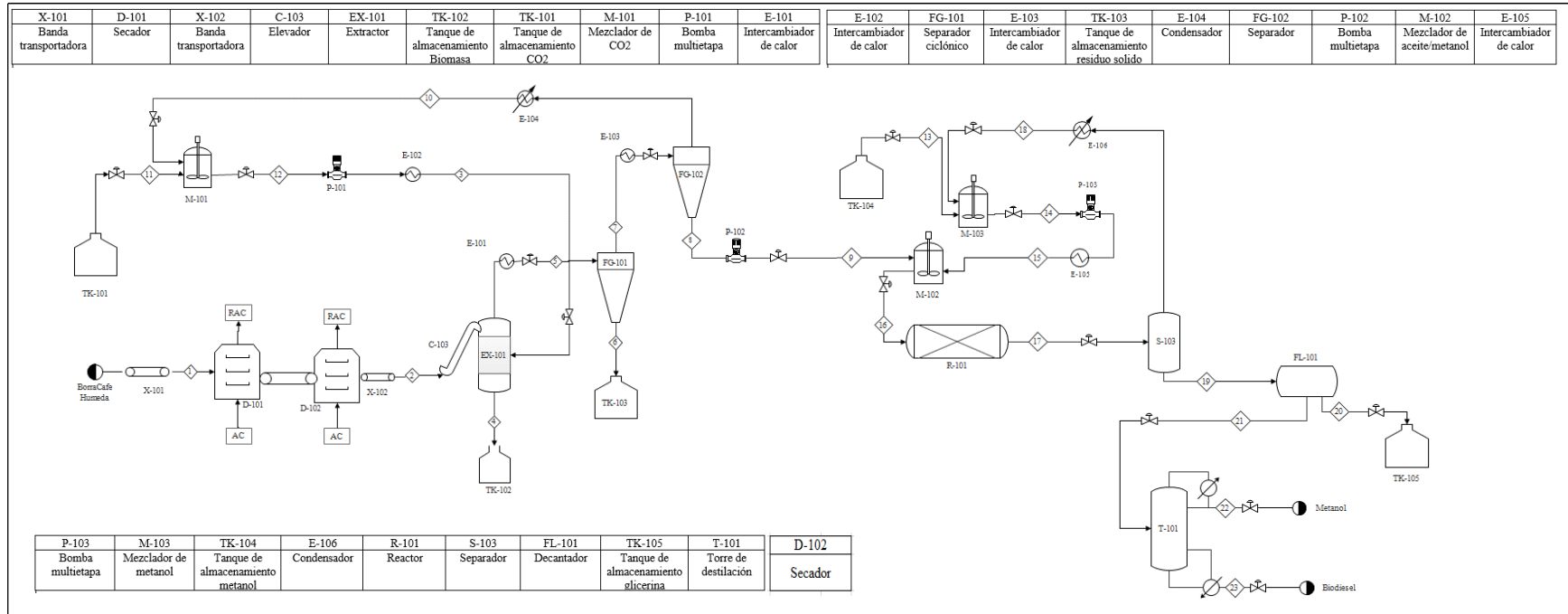
ANEXO 1

Diagrama BFD de la obtención de biodiesel de borra de café por fluidos supercríticos



ANEXO 2

Diagrama PFD de la obtención de biodiesel de borra de café por fluidos supercríticos

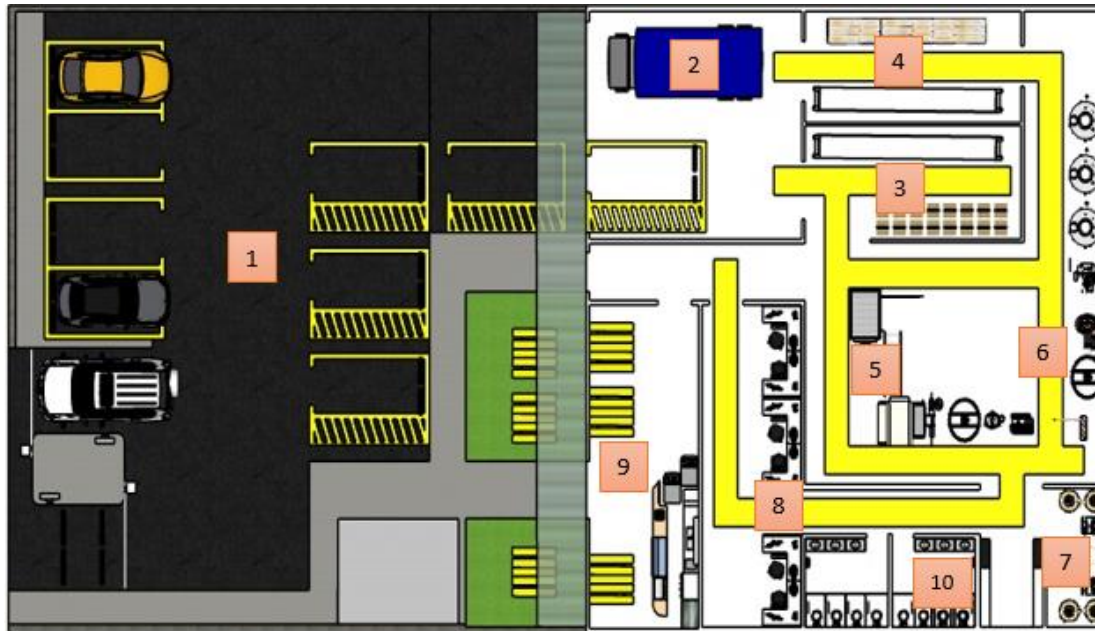


Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	20	105	40	20	30	20	60	20	20
Presion (bar)	1	1	100	1	50	1	10	10	1
Aceite (tripalmitina)	14600	14600	0	438	14162	141,62	14020	13880	13880
Biomasa residual	29200	29200	0	28324	849,72				
Agua	29200	2044	0	1982,7	59,48				
Grasas	58400	31244	0	30307	909,2	900,11	9,0011	8,9111	8,9111
Biodiesel (palmitato de metilo)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerina	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	730000	14600	715400	7154	708246	7082,5	7082,5

Fundación Universidad de America	
Fecha:	Diseño de una planta piloto de la producción de biodiesel de borra de café
Junio 2021	
Autores:	ANEXO: Diagrama PFD
Steffany Katherine Monroy Cardona Julieta Katerine Rodriguez Mantilla	

ANEXO 3

Plano de la planta piloto de biodiesel de borra de café vista superior con sus áreas descriptas

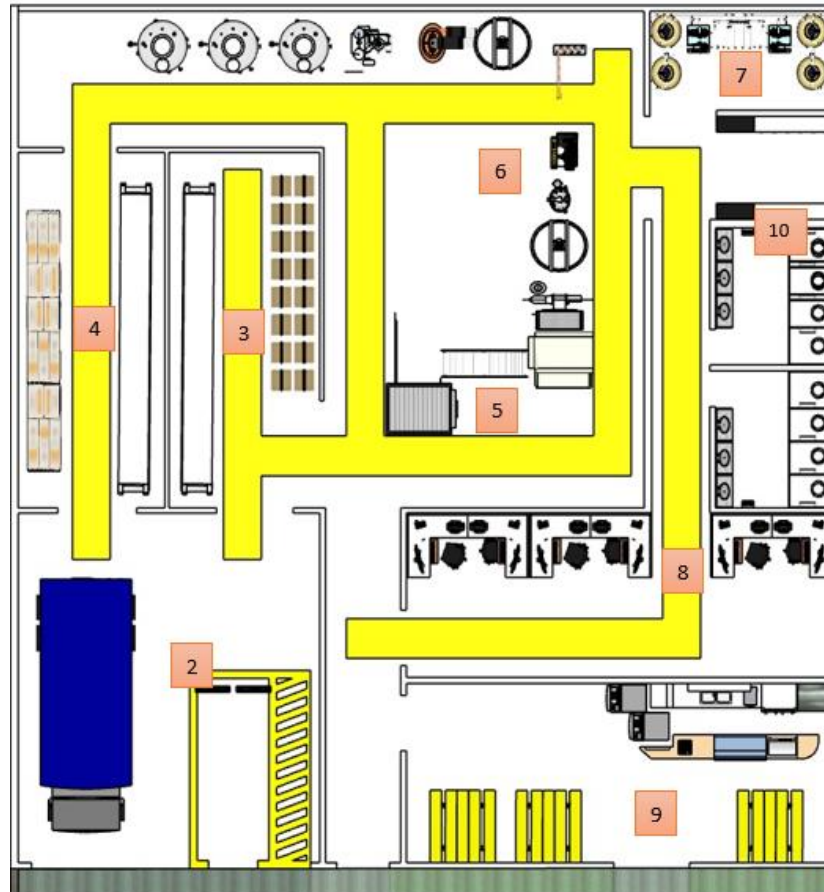


Numero	Área
1	Parqueadero
2	Recepción
3	Almacenamiento materia primas
4	Almacenamiento producto terminado
5	Acondicionamiento
6	Producción
7	Servicios industriales
8	Administrativa
9	Social
10	Enfermería y baños

ANEXO 4

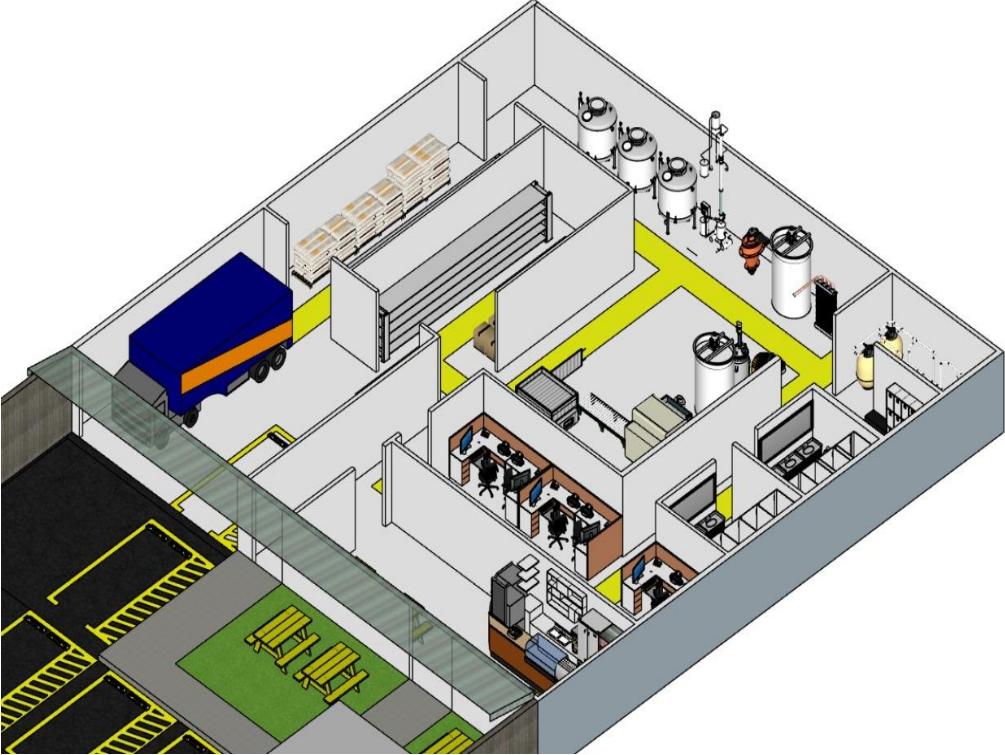
Plano de la distribución de los lugares dentro de la planta con sus áreas descriptas

Número	Área
1	Parqueadero
2	Recepción
3	Almacenamiento materia prima
4	Almacenamiento producto terminado
5	Acondicionamiento
6	Producción
7	Servicios industriales
8	Administrativa
9	Social
10	Enfermería y baños



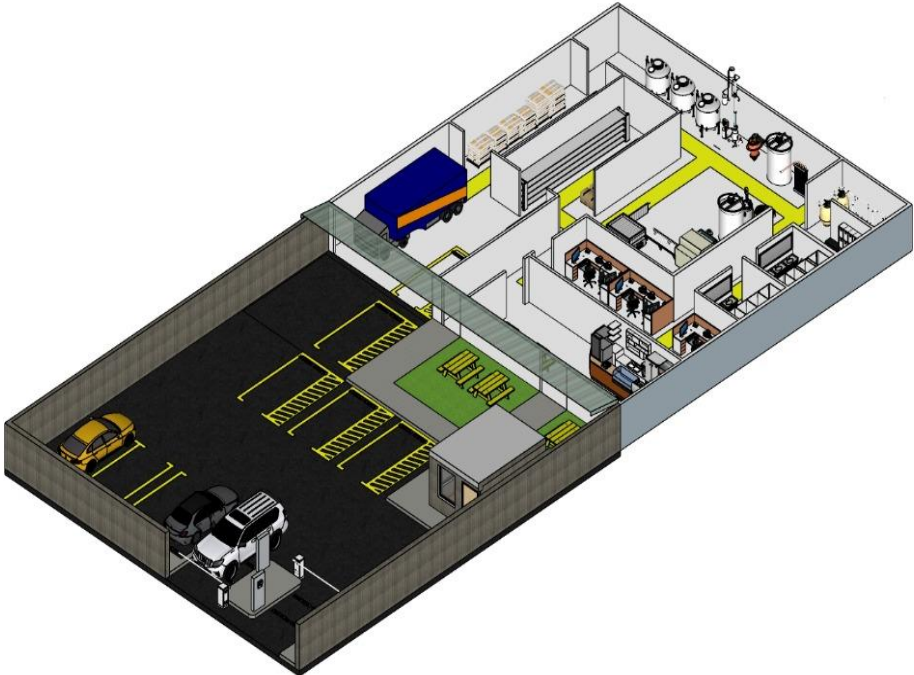
ANEXO 5

Plano de la planta piloto vista de perfil



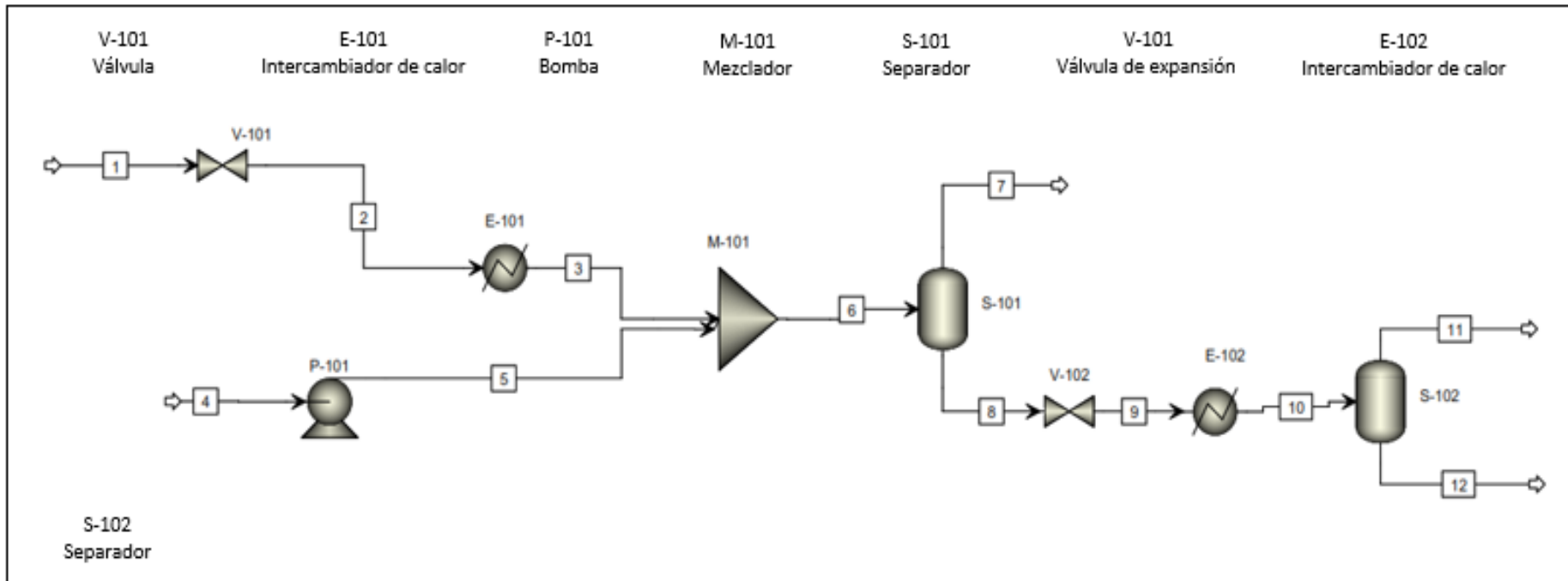
ANEXO 6

Plano de la planta piloto vista de perfil 2



ANEXO 7

Diagrama de flujo para la separación del CO₂.



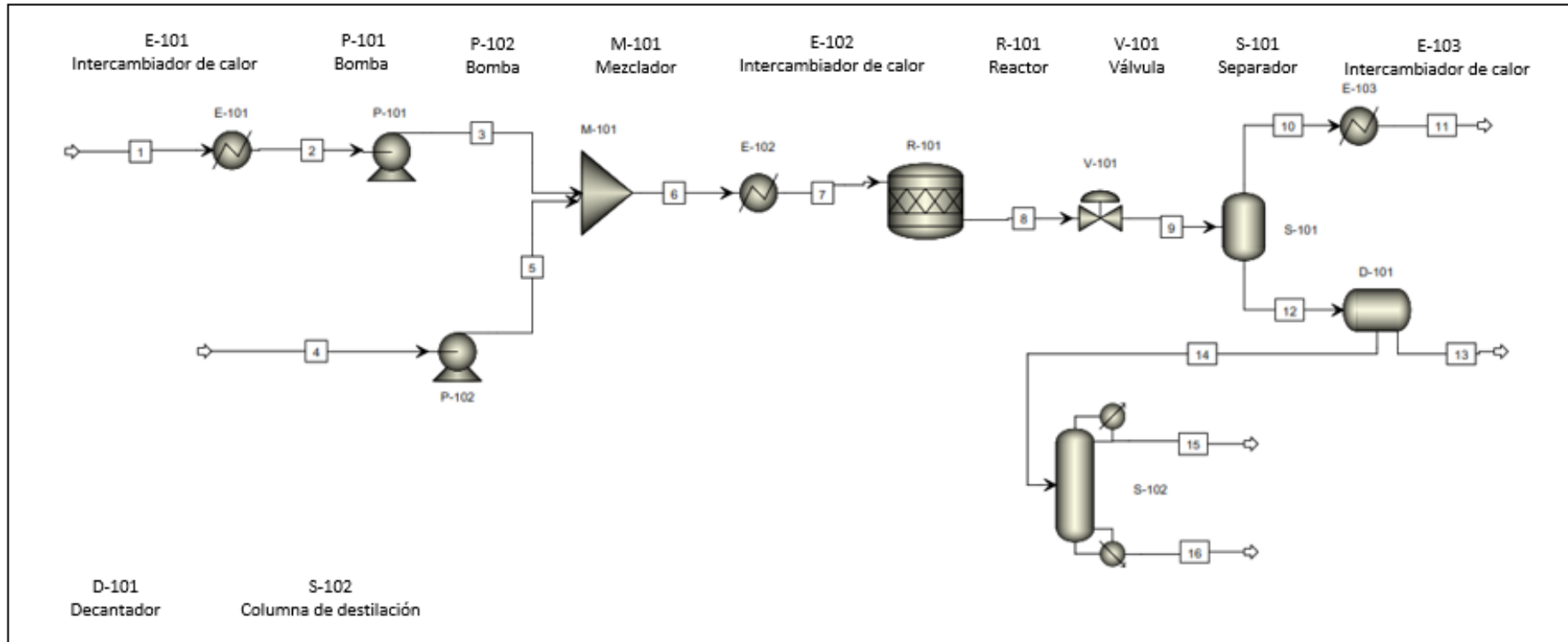
ANEXO 8

Balace de materia en el proceso de transesterificación con metanol supercrítico.

Balace de masa para la reacción de transesterificación con metanol supercrítico										
	Metanol	Acidos grasos	Mezcla metanol/ácidos grasos	Productos de la transesterificación	Productos de la separación 1		Productos del decantador		Productos de columna de separación 2	
Número de corriente	1	4	6	8	10	12	13	14	15	16
Fracción másica										
Metanol	1	-	0,977	0,974	0,998	0,106	0,602	0,0276	0,999	0,001
Glicerol	-	-	-	0,002	0,0007	0,055	0,398	0,0003	7,27E-13	0,0003
Palmitato de metilo	-	-	-	0,011	1,63E-05	0,417	5,69E-09	0,483	6,64E-09	0,496
Tripalmitina	-	0,546	0,013	0,001	2,63E-10	0,0462	3,01E-21	0,053	0	0,055
CO2	-	0,011	0,0002	0,0002	0,0002	8,95E-07	1,37E-06	8,19E-07	3,12E-05	6,72E-14
Trilinoleina	-	0,443	0,010	0,001	1,53E-08	0,037	2,44E-21	0,043	0	0,044
Linoleato de metilo	-	-	-	0,009	8,67E-07	0,339	7,74E-07	0,392	1,85E-21	0,402
Flujo molar Kmol/h	0,076	0,002	0,080	0,080	0,079	0,0005	0,0002	0,0003	5,12E-05	0,0002
Flujo masico Kg/h	2,422	1,471	2,634	2,634	2,561	0,072	0,011	0,063	0,002	0,061
Temperatura °C	15	60	26	190	60	60	40	40	83	371
Presión bar	1	10	250	250	1	1	1	1	2	3

ANEXO 9

Diagrama de flujo del proceso de transesterificación con metanol supercrítico.



ANEXO 10

- **Secador 1**

$$m = \dot{m} * t$$

$$m = 8,33 \frac{kg}{hr} * 5 hr$$

$$m_{Secador1} = 41,65 kg \sim 42 kg_{Secador1}$$

- **Secador 2**

$$m = \dot{m} * t$$

$$m = 4,16 \frac{kg}{hr} * 5 hr$$

$$m_{Secador1} = 20,8 kg \sim 21 kg_{Secador1}$$

- **Extractor**

$$\dot{m}_{borracafe\ seca} = 28060 \frac{kg}{año} \sim 3,20 \frac{kg}{hr}$$

$$\text{Relación } kg\ CO_2 / kg\ borra\ de\ café = \frac{6}{1}$$

$$\rho_{extractor} = 0,97$$

$$\rho_{aceite\ borracafe} = 896\ kg/m^3 \sim 0,896\ kg/l$$

$$\rho_{CO_2} = 815,38\ kg/m^3 \sim 0,815\ kg/l$$

$$V_{Extractor} = \frac{m_{borracafe} * t * \rho_{extractor}}{\rho_{aceiteborracafe}} + \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}$$

$$m_{CO_2} = 3,20 \frac{kg}{hr} * 6 = 19,2\ kg/hr\ CO_2$$

$$V_{Extractor} = \frac{3,20 \frac{kg}{hr} * 1hr * 0,97}{0,896 \frac{kg}{L}} + \frac{19,2 \frac{kg}{hr} CO_2 * 1hr}{0,815 \frac{kg}{L}}$$

$$V_{Extractor} = 27,02 \sim 27L$$

- **Reactor**

$$V = Q * t$$

$$Q_{\text{reactor}} = Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{salida}}$$

$$Q_{\text{reactor}} = 5,97 \text{ L/hr} + 5,75 \text{ L/hr}$$

$$Q_{\text{reactor}} = 11,75 \text{ L/hr}$$

$$t = 30 \text{ min} \sim 0,5 \text{ hr}$$

$$V = 11,75 \frac{\text{L}}{\text{hr}} * 0,5 \text{ hr}$$

$$V = 5,87 \text{ L} \sim 6 \text{ L}$$

- **Decantador**

$$Q = Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{salida}}$$

$$Q = 0,14 \text{ L/hr} + 0,13 \text{ L/hr}$$

$$Q = 0,27 \text{ L/hr}$$

$$t = 50 \text{ min} \sim 0,8 \text{ hr}$$

$$V = 0,27 \frac{\text{L}}{\text{hr}} * 0,8 \text{ hr}$$

$$V = 0,22 \text{ L} \sim 1 \text{ L}$$

- **Columna de separación**

$$Q = Q_{\text{entrada}} + Q_{\text{salida}}$$

$$Q = 0,12 \text{ L/hr} + 0,90 \text{ L/hr}$$

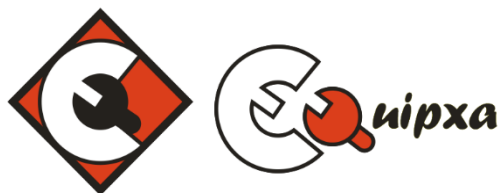
$$Q = 1,02 \text{ L/hr}$$

$$t = 30 \text{ min} \sim 0,5 \text{ hr}$$

$$V = 1,02 \frac{\text{L}}{\text{hr}} * 0,5 \text{ hr}$$

$$V = 0,51 \text{ L} \sim 1 \text{ L}$$

ANEXO 10



Bogotá, Julio 28 de 2021

COTIZACIÓN No. P021 – 1989

CLIENTE

Stefanny Katherine Monroy Cardona

3016041055

skmonroyc@gmail.com

Bogotá

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

Extractor de fluidos super críticos

Marca	WT-50
Precio (\$ COL)	350.200.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	1 año
Extracto de presión (MPa)	40MPa
Capacidad (L)	50L
Peso (Kg)	2000 Kg
Poder (KW)	30 KW
Dimensiones (L*W*H) (mm)	5000*4800*1800
Capacidad separador 1 (L)	25L
Capacidad separador 1 (L)	

20L

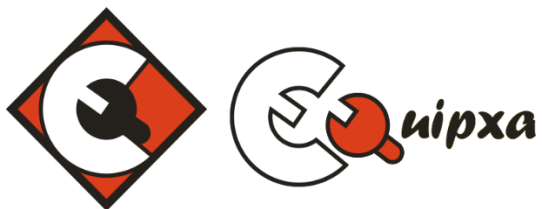
www.equipxa.com



SECADOR 1

Modelo	Secador al vacío JY-30
Precio (\$COL)	9.830.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	2 año
Capacidad (kg)	30kg
Temperatura de condensador (°C)	-45 °C
Numero de estantes	8
Temperatura del estante	-25 a 70 °C
Flujo de calor del estante	1 °C /min
Productos en los estantes	7 piezas
Dimensiones de la bandeja (mm)	720*595
Flujo de vacío de la cámara a 100 Pa	<30 min
Refrigerante	R404a
Poder (Kw)	.,95Kw
Dimensiones de la cámara	2,5*1,1*2
Peso (kg)	1800

www.equipxa.com



SECADOR 2

Modelo	Secador al vacío JY-50
Precio (\$COL)	13.762.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	2 año
Capacidad (kg)	50kg
Temperatura de condensador (°C)	-45 °C
Numero de estantes	8
Temperatura del estante	-25 a 70 °C
Flujo de calor del estante	1 °C /min
Productos en los estantes	14 piezas
Dimensiones de la bandeja (mm)	595*595
Flujo de vacío de la camara a 100 Pa	<30 min
Refrigerante	R404a
Poder (Kw)	12,05Kw
Dimensiones de la cámara	2,8*1,2*2
Peso (kg)	2500



REACTOR TUBULAR

Tipo de equipo	Reactor tubular 5402 flujo continuo
Precio (\$COL)	8.620.000
Marca	Parr Instrument company
Material	Acero inoxidable
Tamaño	½ pulg.
Capacidad (L)	20L
Presión max. (bar)	207
Temperatura máx. (°C)	550
O.D/I.D (mm)	13/9,5
Separador	5L
Controlador	Equipado con PID automáticos, visualización y control de temperatura, presión, nivel y flujo

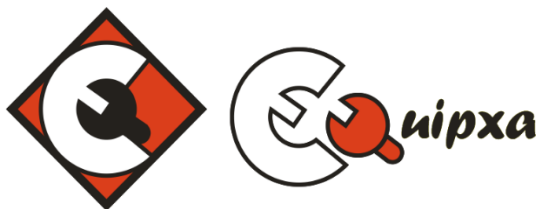
www.equipxa.com



Decantador

Tipo de equipo	Separador de glicerina GQ/GF 45
Costo (\$COL)	13.557.250
Material	Acero Inoxidable
Garantía	1 año
Capacidad	50L
Velocidad de rotación (r/min)	28000
Separación max.	19800
Potencia (kW)	0,6
Area de dispersión de calor	0,5 m ²
Dimensiones (L*W*H)	580*650*750

www.equipxa.com



COLUMNA DE SEPARACION

Tipo de equipo	Columna destiladora YFT-10
Costo (\$COL)	13.000.000
Material	Vidrio
Garantía	1 año
Peso (Kg)	85
Capacidad (L)	10L
Voltaje (V)	220V
Dimensiones (L*W*H)	1500*600*3100
Termómetro de interfaz	24/40
Válvula de alimentación	24/40
Reflujo relación controlador	Pantalla digital Reflux 1:99/99:1
Destilación de control de temperatura	Dos pantallas digitales cuatro forma
Destilación de interfaz	DN50



MEZCLADOR

Tipo de equipo	Mezclador/agitador <i>MH-50</i>
Costo (\$COL)	7.540.000
Material	Acero inoxidable 304
Garantía	1 año
Uso	líquido
Peso (Kg)	1000
Capacidad (L)	50 L
Potencia de mezcla (kW)	0,75
Velocidad de mezcla (rpm)	0-63
Dimensiones (L*W*H) (mm)	1500*1300*2350



INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tipo de equipo	heating / cooling Liaoning
Costo (\$COL)	2.100.000
Material placa	Hastelloy
Material conexión	Acero inoxidable
Garantía	1 año
Caudal (l/hr)	200 L/hr
Temperatura (°C)	-25 °C a 190 °C
Voltaje	220V
Dimensiones (L*W*H)	1340*850*1720mm
Espesor de la placa	0,5-0,6mm

www.equipxa.com



COMPRESOR

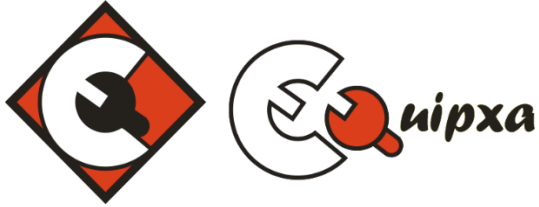
Tipo de equipo	Compresor de alta presión Pistón SCU200
Costo (\$COL)	10.500.000
Garantía	1 año
Capacidad (L/min)	200 L/min
Presión max. (bar)	300 bar
Poder (Kw)	4 Kw
Dimensiones (L*W*H)	700*960*570 mm

www.equipxa.com



CONTENEDOR CO2

Tipo de equipo	Tanque criogénico VC2/16
Costo (\$COL)	10.000.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	1 año
Peso (Kg)	1200 kg
Capacidad (L)	1000L
Presión de trabajo (Mpa)	1,6 Mpa
Dimensiones (W*H)	1100*2000



CONTENEDOR LIQUIDOS

Tipo de equipo	Tanque de almacenamiento criogénico Chart industries
Costo (\$COL)	1.500.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	1 año
Peso (Kg)	40 kg
Capacidad (L)	50 L
Temperatura de trabajo (°C)	0-200 °C
Presión de trabajo (bar)	1 a 10 bar
Dimensiones (W*H)	900*1100



CONTENEDOR BIODIESEL

Tipo de equipo	Tanque de almacenamiento de biodiesel
Costo (\$COL)	2.100.000
Material	Acero inoxidable
Garantía	1 año
Presión trabajo (Mpa)	9 Mpa
Temperatura de trabajo (°C)	100 °C
Capacidad (L)	50L
Dimensiones (W*H)	800*600mm

www.equipxa.com



CONDICIONES:

Equipos entregados en Bogotá – Colombia. Un (1) año de garantía por desperfectos de fábrica.

Cordialmente,

ESTEBAN OREJUELA SANDOVAL
DIRECTOR DE PROYECTOS
EQUIPXA SAS CEL 311 462 58 67
www.equipxa.com

www.equipxa.com