



Instituto Politécnico Nacional

**Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
Campus Zacatecas**

Ingeniería Ambiental

***“Factibilidad del reciclaje de residuos de aceite vegetal
usado para la producción de biodiésel”***

Tesis Individual

Que para obtener el título de:

Ingeniería Ambiental

Presenta:

Alejandra Ortega Félix

Directores de tesis:

M. en C. Verónica Ávila Vázquez

M. en C. Miguel Mauricio Aguilera Flores



Zacatecas, Zac. Octubre de 2017

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la vida, salud y fortaleza, así como todas las bendiciones otorgadas en esta gran etapa de mi vida.

A mis padres Juan Carlos y Sonia por haberme dado su amor y apoyo condicional en cada una de las etapas de mi vida, así como por facilitarme todas las herramientas para lograr cumplir mis metas y a mi hermano Juan Carlos por siempre estar presente en todos y cada uno de los momentos de mi vida.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional por hacerme parte de una gran familia y una gran casa de estudios, por formarme como profesionista para poder alcanzar mis metas y servir a mi país.

A la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, por otorgarme la preparación, enseñanzas y como cada uno de los conocimientos adquiridos en mi proceso de formación.

A mis asesores M. En C. Verónica Ávila Vázquez y M. En C. Miguel Mauricio Aguilera Flores por haberme otorgado tiempo, paciencia, esfuerzo, conocimientos y ser guías dentro de mi formación académica.

A mi comisión revisora, M. En A. Yesika Yuriri Rodríguez Martínez, M. En C. Hans Christian Correa Aguado y I.Q. Raudel Medina Leños, por su tiempo y sus valiosas aportaciones dentro de este proyecto.

A todos y cada uno de mis maestros y técnicos docentes por haber sido un pilar fundamental dentro de mi formación como ingeniero ambiental.

Dedicatorias

Dedico el presente trabajo con todo mi amor y cariño a:

Mis padres por ser una parte fundamental en mi vida, por apoyarme y guiarme en mi formación como persona y darme deseos de superarme día a día y siempre tener nuevas metas que seguir y darme su amor incondicional en todo momento.

Mis asesores de tesis, por que nunca desistieron al momento de enseñarme y por apoyarme y depositar su confianza, tiempo y esfuerzo en la realización de éste proyecto y ser una parte fundamental en mi formación como ingeniero ambiental.

Mis profesores y técnicos docentes por el valioso tiempo otorgado y tener toda la disponibilidad cuando requería de su apoyo.

Al resto de mi familia y amigos por estar siempre presentes en cada momento y apoyarme para salir adelante, así como las maravillosas experiencias por las que pasamos juntos.

RESUMEN

El Aceite Vegetal Usado (AVU) es un residuo susceptible a ser valorizado mediante su reciclaje para la producción de biodiésel, siendo éste último un biocombustible que sustituye total o parcialmente al diésel convencional en motores de combustión interna.

En la presente investigación se realizó un diagnóstico de la cantidad de materia prima de AVU que se puede disponer en los municipios de Zacatecas y Guadalupe (zona metropolitana) en el estado de Zacatecas para estimar la capacidad que se tiene para la producción de biodiésel. El trabajo experimental consistió en 4 lotes de residuos de AVU (2 de aceite de fritura, 1 de aceite de panadería y 1 de grasa de pollo), dentro de un prototipo de reactor con capacidad de 10 L, para llevar a cabo la transesterificación del aceite. A cada lote se le dio el tratamiento siguiente: filtración (pretratamiento), transesterificación con catálisis homogénea, extracción, purificación y secado del biodiésel; para posteriormente determinar el rendimiento obtenido en la reacción de transesterificación, así como evaluar la calidad del biocombustible con base en los parámetros establecidos en los estándares internacionales de calidad: ASTM D6751 de Estados Unidos de América y EN 14214 de la Unión Europea.

Los resultados permitieron identificar 97 establecimientos pertenecientes al sector de alimentos, de los cuales se podría disponer aproximadamente de 3,299 L mensuales de AVU, y ser tratados en una planta semi-industrial para la producción de biodiésel. Los rendimientos obtenidos del proceso de transesterificación fueron de: 92.72, 92.20, 84.20 y 80 % para los Lotes 1, 2, 3 y 4 respectivamente; así como la mayoría de los parámetros evaluados cumplen con los estándares internacionales de calidad para la utilización del biocombustible. Los parámetros que se encuentran dentro de los límites establecidos son densidad, viscosidad, índice de saponificación, índice de yodo y corrosión en lámina de cobre, mientras que la humedad y materia volátil e índice de acidez, son parámetros que no se encuentran dentro de los límites establecidos, por lo que se recomienda la utilización de mezclas de biodiésel con diésel convencional empezando desde una proporción B5 (5% biodiésel, 95% diésel) e ir aumentando gradualmente hasta alcanzar los límites establecidos.

Finalmente, se estimaron los costos de producción de biodiésel con un valor de \$ 3.50 M.N. lo que demuestra la factibilidad económica de reciclar los residuos de AVU para la producción de biodiésel.

ABSTRACT

Used Vegetable Oil (UVO) is a waste susceptible to be valorized by recycling for the production of biodiesel, being this a biofuel that replaces totally or partially the conventional diesel in internal combustion engines.

In the present investigation, a diagnosis was made to identify the quantity of UVO raw material that could be available in the cities of Zacatecas and Guadalupe (metropolitan area) in the state of Zacatecas and to estimate the capacity of biodiesel production. The experimental part consisted of 4 batches of UVO wastes (2 frying oil, 1 bakery oil and 1 chicken fat), in a reactor prototype with a capacity of 10 L, to carry out the transesterification of the UVO. Each batch was given the following treatment: filtration (pretreatment), transesterification with homogeneous catalysis, extraction, purification and drying of the biodiesel. The yield obtained in the transesterification reaction was determinate for each one and the quality of the biofuel was evaluated respect to the parameters established in the international quality standards: ASTM D6751 of the United States of America and EN 14214 of the European Union.

The results allowed the identification of 97 establishments belonging to the food sector, of which approximately 3,299 L per month of UVO could be disposed of and treated in a semi-industrial plant for the production of biodiesel. The yields obtained from the transesterification process were: 92.72, 92.20, 84.20 and 80% for Lots 1, 2, 3 and 4 respectively; as well as the majority of the evaluated parameters comply with the international standards of quality for the use of the biofuel. The parameters that are within the limits established are density, viscosity, saponification index, iodine index and cooper strip corrosion, while the humidity and volatile matter and acidity index are parameters that are not within the limits, but it is recommended to use the biodiesel blends with conventional diesel starting from B5 (5% biodiesel, 95% diesel) and gradually increasing until reaching the established limits.

The biodiesel production costs were estimated at a value of \$ 3.50 M.N., demonstrating the economic feasibility of recycling UVO waste for biodiesel production.

ÍNDICE

	PAG.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Aprovechamiento de los residuos de Aceite Vegetal Usado y la producción de biodiésel a partir de ellos como medidas de mitigación para el calentamiento global y cambio climático.	3
1.1 <i>Generalidades sobre el calentamiento global y cambio climático</i>	3
1.2 <i>Medidas de mitigación del cambio climático y calentamiento global</i>	11
1.2.1 Valorización de residuos	13
1.2.2 Uso de energías alternas	14
1.3 <i>El Aceite Vegetal Usado (AVU) como un residuo susceptible al reciclaje para la producción de biodiésel.</i>	17
1.4 <i>Características generales del biodiésel</i>	18
1.4.1 Procesos de producción de biodiésel	19
1.4.2 Insumos	22
1.4.3 Materias primas	22
1.4.4 Tecnologías para producción de biodiésel	23
1.4.5 Rentabilidad de la producción de biodiésel	26
1.4.6 Comercialización del biodiésel	28
1.4.7 Legislación vigente en relación al biodiésel en México	28
1.5 <i>Calidad del biodiésel</i>	29
1.5.1 Normas que determinan la calidad del biodiésel	29
1.5.1 Parámetros que determinan la calidad del aceite y del biodiésel.	30
1.6 <i>Casos de estudio relacionados con la producción de biodiésel a partir de residuos de AVU.</i>	37
1.7 <i>Guadalupe y Zacatecas, municipios potenciales para la producción de biodiésel a partir de residuos de AVU.</i>	38
1.8 <i>Justificación</i>	39
1.9 <i>Objetivos</i>	40
Objetivo general	40
Objetivos específicos	40
CAPITULO 2. Metodología.	41
2.1 <i>Elaboración y análisis estadístico de la generación de aceite vegetal usado</i>	41
2.1.1 Delimitación de la zona de estudio	41
2.1.2 Diagnóstico de la generación de aceite vegetal usado	42

2.1.3	Elaboración del mapa de ubicación de establecimientos generados de aceite vegetal usado	42
2.1.4	Análisis estadístico de los datos	42
2.1.5	Diseño de la ruta de recolección de aceite vegetal usado	42
2.1.6	Dimensionamiento de una planta semi-industrial para la producción de biodiésel.	43
2.2	<i>Producción de biodiésel</i>	43
2.2.1	Pretratamiento del aceite vegetal usado	43
2.2.2	Transesterificación del aceite vegetal usado	43
2.2.2	Purificación del biodiésel	44
2.2.3	Lavado del biodiésel	44
2.3	<i>Caracterización fisicoquímica de biodiésel</i>	44
2.3.1	Densidad (Aceite y biodiésel)	44
2.3.2	Viscosidad (Aceite y biodiésel)	45
2.3.3	Humedad y materia volátil (Aceite y biodiésel)	45
2.3.4	Índice de saponificación (Aceite y biodiésel)	46
2.3.5	Índice de acidez (Aceite y biodiésel)	46
2.3.6	Índice de yodo (Biodiésel)	47
2.3.7	Índice de Peróxido (Aceite)	48
2.3.8	Corrosión en lámina de cobre (Biodiésel)	48
2.4	<i>Determinación de la factibilidad económica, social y ambiental del reciclaje del aceite vegetal usado para la producción de biodiésel</i>	49
CAPÍTULO 3. Análisis y discusión de los resultados		51
3.1	<i>Diagnóstico de la cantidad de residuos de AVU.</i>	51
3.2	<i>Producción de biodiésel a partir de residuos de AVU en reactor prototipo con capacidad de 10 L por catálisis homogénea básica</i>	65
3.3	<i>Caracterización fisicoquímica de la materia prima para la producción de biodiésel.</i>	69
3.4	<i>Rendimientos obtenidos en la reacción de transesterificación.</i>	74
3.5	<i>Caracterización fisicoquímica del biodiesel obtenido a partir del reciclaje del Aceite Vegetal Usado.</i>	74
3.5	<i>Análisis económico de la producción de biodiésel a partir del reciclaje de residuos de AVU.</i>	78
3.6	<i>Factibilidad ambiental y social del uso de biodiésel producido a partir de residuos de AVU.</i>	85
CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS		87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		89
ANEXOS		95

Índice de cuadros

No.	Título del cuadro	Pág.
1	Fuentes de generación de GEI.	4
2	Medidas de mitigación para la disminución de CO ₂ para cada sector.	11
3	Proporción de ácidos grasos en aceite vegetal usado.	18
4	Ventajas y desventajas del uso del biodiésel.	19
5	Estándares y especificaciones para el biodiésel-Normatividad internacional.	29
6	Propuestas de rutas de recolección.	59
7	Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica del Aceite Vegetal Usado.	70
8	Rendimientos obtenidos en la reacción de transesterificación.	74
9	Caracterización fisicoquímica del biodiésel producido a partir del reciclaje de AVU.	75
10	Costos de producción de biodiésel.	82
11	Coordenadas geográficas de puntos muestreados.	96

Índice de Figuras

No.	Título de la figura	Pág.
1	Fuentes de generación de GEI mundialmente, 2010.	5
2	Suministro primario de energía global.	5
3	Emisiones de CO ₂ a partir del uso de combustibles fósiles.	6
4	Emisiones globales de CO ₂ en el año 2013.	7
5	Consumo mundial de energía por fuente energética.	8
6	Estructura de la producción de energía en México.	8
7	Contribución de las emisiones de CO ₂ por sector en México.	9
8	Límites planetarios.	10
9	Emisiones de CO ₂ generadas por energías alternas y energías convencionales.	15
10	Tipos de biomasa utilizados para la generación de energía.	16
11	Reacción general de transesterificación para la obtención de biodiésel.	20
12	Reacciones llevadas a cabo en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel.	21
13	Proceso de obtención de biodiésel tipo batch.	24
14	Producción de biodiésel en sistemas en continuo.	25
15	Producción de biodiésel a partir de un reactor de ultrasonido.	26
16	Costos de producción de biodiésel para el año 2011.	27
17	Establecimientos con servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas.	38
18	Municipios donde se llevó a cabo el diagnóstico.	41
19	Prototipo utilizado para la producción de biodiésel.	44
20	Lámina patrón ASTM COPPER STRIP CORROSION STANDARDS (ASTM METHOD D130/IP 154).	49
21	Localización de establecimientos encuestados.	51
22	Tipos de establecimientos generadores de aceite vegetal usado.	52
23	Régimen del establecimiento.	52
24	Generación de residuos de aceite vegetal usado.	53
25	Generación de residuos de aceite vegetal usado por sector.	54
26	Disposición de los residuos de aceite vegetal usado por sector.	55
27	Precio de venta de los residuos de aceite vegetal usado.	55
28	Establecimientos dispuestos a donar los residuos de aceite vegetal usado por sector.	56
29	Frecuencia de generación de residuos de aceite vegetal usado.	57
30	Vehículo y recipientes a utilizar en la recolección de aceite vegetal usado.	59
31	Ruta de recolección 1, primera propuesta.	61
32	Ruta de recolección 2, primera propuesta.	62
33	Ruta de recolección 3, primera propuesta.	63

34	Ruta de recolección 1, segunda propuesta.	64
35	Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 1.	66
36	Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 2	67
37	Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 3.	68
38	Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 4.	69
39	Planta semi-industrial para la producción de biodiésel.	79
40	Diagrama de flujo de producción de biodiésel.	79
41	Diagrama de proceso de la producción de biodiésel.	80

LISTA DE SÍMBOLOS Y/O NOMENCLATURA

AVU: Aceite Vegetal Usado

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HFC: Hidrofluorocarbonos

H₂O: Agua- vapor de agua

H₂SO₄: Ácido sulfúrico

KOH: Hidróxido de potasio

NaOH: Hidróxido de sodio

NO_x: Óxidos de nitrógeno

N₂O: Óxido de nitrógeno

PFC: Perfluorocarbonos

SF₆: Hexafluoruro de azufre

SO₂: Dióxido de azufre

ZMEZ: Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas

INTRODUCCIÓN

En México, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), denomina como residuo a todo material generado de procesos como: extracción, beneficio, transformación, consumo, producción, utilización o tratamiento, el cual ya no se pueda utilizar en el proceso que lo generó. La clasificación que tienen estos residuos conforme a la Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos LGPGIR es en Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP).

El aceite vegetal usado es residuo que proviene principalmente de establecimientos productores de alimentos y bebidas de uso comercial así como de uso doméstico, por sus características es considerado como un RSU con base en la LGPGIR.

La importancia que tiene darle un tratamiento a este tipo de residuos radica en que al ser vertidos sobre los sistemas de alcantarillado, éstos causan problemas en redes de saneamiento y sobrecostos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que es complicada la separación de este residuo de las aguas residuales (González & González, 2015).

Otros de los impactos negativos que lleva este tipo de residuos es la carga contaminante que cuando llega a medios acuáticos, la cual reduce la oxigenación dentro del medio acuático y disminución de la actividad fotosintética debido a la absorción de la radiación, causando así la disminución en la producción de oxígeno disuelto, teniendo como consecuencia disminución en la vida acuática (González & González, 2015).

Una de las alternativas que se propone para el reciclaje de los residuos de aceite vegetal usado es la generación de biodiésel.

Las ventajas que tiene este biocombustible son las bajas emisiones de gases contaminantes a la atmósfera que generan y la accesibilidad que hay de materia prima para la producción, ya que puede obtenerse a partir de la extracción del aceite de cultivos de plantas oleaginosas o de residuos de aceite vegetal que han sido utilizados anteriormente para la producción de alimentos (McCormick & Westbrook, 2007).

Existen diversas problemáticas tanto económicas, sociales y ambientales relacionadas con el uso y consumo de combustibles derivados del petróleo como son: el gas, gasolina y diésel. Una de las problemáticas ambientales más

representativas por el uso y consumo de diésel es el cambio climático, el cual es producido por *Gases de Efecto Invernadero* (GEI) causantes del calentamiento global y cambio climático. Según el *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (2013)*, en México las emisiones generadas por la quema de combustibles en carros de combustible base diésel es de 59,382 gigagramos (gg) de CO₂eq con un porcentaje de emisión del 14.7 % del CO₂ producido por la quema de combustibles fósiles.

Otra problemática que se tiene en relación al uso y consumo del diésel son las fluctuaciones en el precio, causando así problemas económicos y sociales como la pobreza (INECC, 2010).

En este sentido el biodiésel es un combustible que surge como una alternativa a esta problemática ambiental y al mismo tiempo favorece el manejo adecuado del aceite vegetal usado al ser reciclado antes de disponer finalmente de él.

En el estado de Zacatecas se encuentran dos problemáticas, una de ellas es derivada de la quema de combustibles base diésel que es la generación de GEI, y la otra está en relación al manejo inadecuado que se le da a los residuos de aceite vegetal usado sobre todo en su disposición, debido a que no hay legislación específica para la recolección y tratamiento de este tipo de residuos (Castañeda & Pérez, 2015).

Por lo anterior, en el presente proyecto se presenta el diagnóstico de la recuperación del aceite vegetal usado en el sector restaurantero en los municipios de Guadalupe y Zacatecas, que corresponden a la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas (ZMEZ), la producción de biodiésel a partir de residuos de aceite vegetal como una alternativa para dar tratamiento a este tipo de residuo, y la propuesta de que dicho biocombustible pueda ser utilizado en uno de los sectores de mayor consumo como es el transporte público, ya que con ello se presentaría una disminución de las emisiones de GEI generadas por la quema de combustibles fósiles y se evitaría contaminar al ambiente al darle un tratamiento al aceite vegetal usado antes de su disposición.

CAPÍTULO 1. Aprovechamiento de los residuos de Aceite Vegetal Usado y la producción de biodiésel a partir de ellos como medidas de mitigación para el calentamiento global y cambio climático.

1.1 Generalidades sobre el calentamiento global y cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) define como cambio climático al cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. El calentamiento global es la manifestación más evidente de lo que es el cambio climático y se refiere al aumento de las temperaturas terrestres y marinas globales (SEMARNAT, 2009).

El calentamiento global es un proceso que es llevado a cabo por los Gases de Efecto Invernadero (GEI), que son aquellos componentes de la atmósfera, tanto de origen natural como antropogénico, que absorben y emiten la radiación solar. Los principales GEI son el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y metano (CH₄). Hay otros tipos de GEI que se encuentran en la atmósfera de origen sintético, los más importantes son: Hexafluoruro de azufre (SF₆), hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC). En el Cuadro 1 se muestran las principales fuentes de generación de estos GEI (Benavides & León, 2007).

La capacidad que tienen estas moléculas para la absorción de la radiación térmica depende de su momento bipolar, de todos los GEI emitidos por el ser humano, el CO₂ es el de mayor interés para el cambio climático, ya que es el que presenta mayor abundancia tanto de manera natural como de manera antropogénica. La contribución que tiene el CO₂ a este fenómeno supone el 60 % de la captura de radiación térmica realizada por todos los GEI (IPCC, 2007).

Cuadro 1. Fuentes de generación de GEI.

GEI	Fuente de generación	Fuente
CO ₂	La generación de origen natural se da debido a que forma parte en un gran número de procesos biológicos por el ciclo del carbono; su origen antropogénico se le otorga principalmente a la quema de combustibles fósiles.	Greenpeace, 2010.
CH ₄	Su fuente de generación más importante es la descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos, como son: actividades agrícolas (proceso digestivo de herbívoros, estiércol, descomposición en condiciones anaerobias), disposición de residuos sólidos y tratamiento anaeróbico de aguas residuales.	Benavides & León, 2007.
N ₂ O	Su principal fuente de generación es por la quema de combustibles fósiles, biomasa y la agricultura debido al empleo de fertilizantes nitrogenados.	Benavides & León, 2007.
H ₂ O	La principal fuente de generación del vapor de agua es por la evaporación del agua o por la sublimación del hielo, debido al ciclo del agua.	Benavides & León, 2007.
SF ₆	Su origen es sintético, es generado en la producción de magnesio.	Colque & Sánchez, 2007.
HFC	Su origen es sintético y es utilizado como disolvente en aerosoles, refrigerantes y dispersores de espuma.	Colque & Sánchez, 2007.
PFC	Su origen es por acción del hombre en la producción de aluminio por electrólisis.	Colque & Sánchez, 2007.

Para el año 2015 de las emisiones medidas mundialmente, se estimó que la concentración de CO₂ promedio mundial fue de 399.8 partes por millón (ppm), de diversas actividades antropogénicas que producen GEI, la generación de energía representa la mayor fuente de emisiones (IEA, 2015). En la Figura 1, se observa la composición de los GEI generados de manera antropogénica.

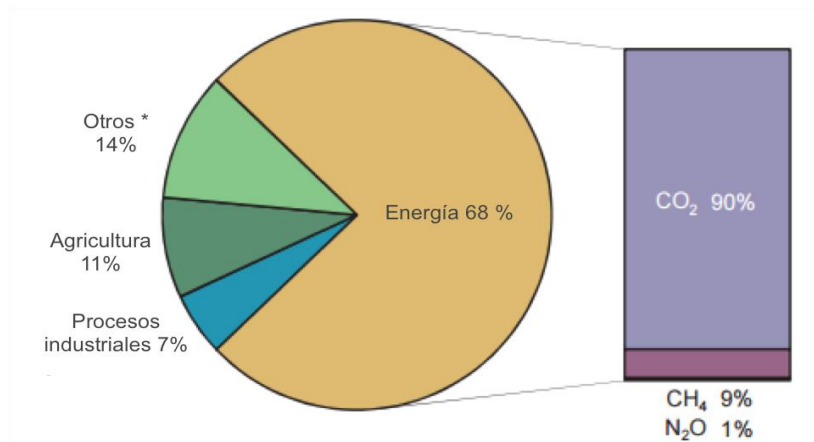


Figura 1. Fuentes de generación de GEI mundialmente, 2010.
(Fuente: IEA, 2015)

En la Figura 1 se observa que la fuente de generación que tiene mayores emisiones de GEI es la energía, con una generación de CO₂ del 90 %, CH₄ 9 % y el 1% restante de N₂O. Teniendo también que la agricultura y los procesos industriales tienen generaciones de GEI a la atmósfera con un 11 % y 7 % respectivamente. El 14 % de las emisiones de GEI corresponden a las actividades relacionadas con la quema de biomasa, las emisiones indirectas de N₂O de los productos no agrícolas de las emisiones de NO_x y NH₃, residuos y uso de solventes.

El aumento global de la demanda de energía proviene del crecimiento económico global y el desarrollo, el suministro primario de energía global total incrementó un 150 % desde el año 1971 hasta el año 2013, haciendo uso principalmente de los combustibles fósiles, así como se muestra en la Figura 2.

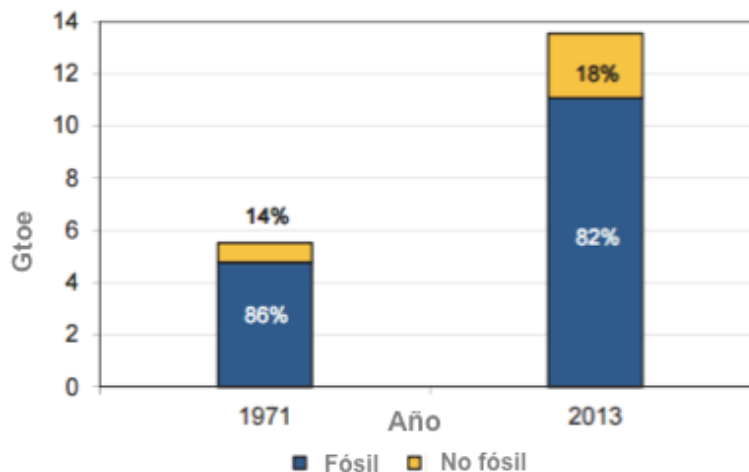


Figura 2. Suministro primario de energía global.
(Fuente: IEA, 2015)

En la Figura 2 se observa el incremento del suministro de energía desde el año 1971 y 2013, donde en el año 2013, el 82 % del suministro primario de energía global corresponde al uso de combustibles fósiles (IEA 2015).

La creciente demanda mundial de energía a partir del uso de combustibles fósiles es una pieza clave en la tendencia ascendente de las emisiones de CO₂, donde el incremento fue desde casi 0 hasta 32 GtCO₂ en el año 2013, así como se muestra en la Figura 3.

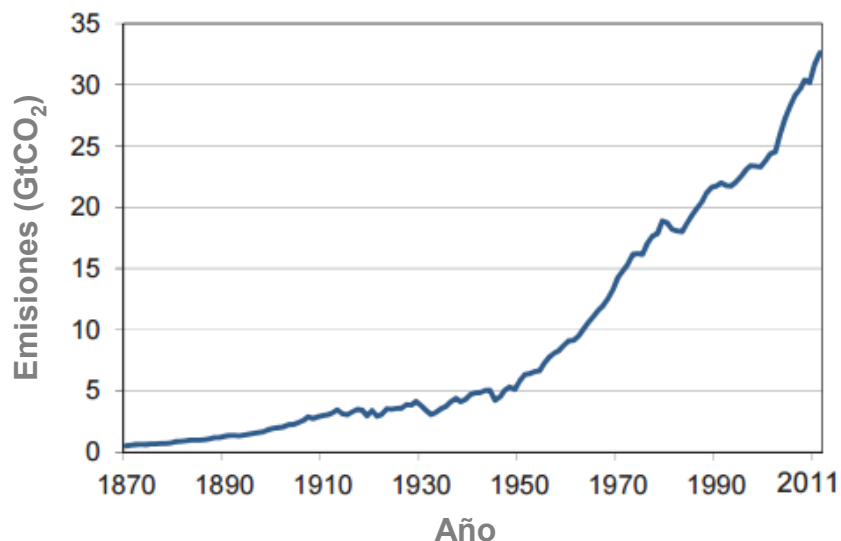


Figura 3. Emisiones de CO₂ a partir del uso de combustibles fósiles.
(Fuente: IEA, 2015)

El incremento de las emisiones de CO₂ ha ido exponencialmente desde la revolución industrial hasta la actualidad.

Los dos sectores que representan mayor emisión de CO₂ de manera global es la generación de energía y calor y el sector de transporte, donde se atribuye que en estos sectores es donde hay mayor consumo de combustibles fósiles, en la Figura 4 se observa el porcentaje de emisiones generado por cada sector en el año 2013.

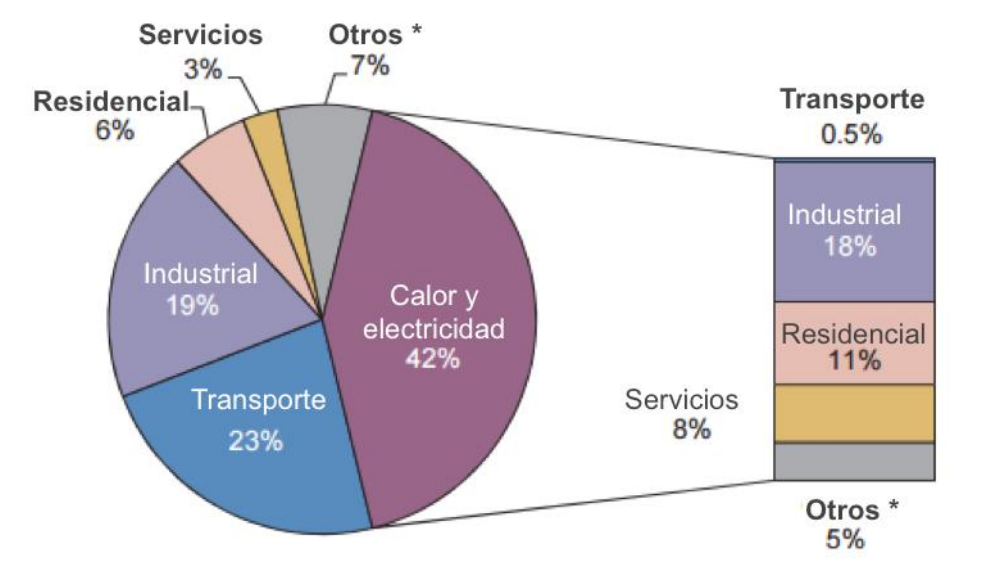


Figura 4. Emisiones globales de CO₂ en el año 2013.
(Fuente: IEA, 2015)

Como se muestra en la Figura 4, los dos sectores que tienen mayores emisiones de CO₂ son: el sector de electricidad y calor con un 42 % y el sector de transporte con 23 %, mientras que el 19 % corresponde a la industria, el 6 % de uso residencial, el 3 % en servicios y el 7 % restante en agricultura, pesca, entre otras. Esto se debe a que para los sectores de electricidad y calor, y transporte se destaca el uso de combustibles fósiles para la producción de energía.

De los combustibles fósiles utilizados para la generación de energía y transporte son:

- Petróleo y sus derivados.
- Carbón y sus derivados.
- Gas natural.

En el año 2013, a nivel mundial en el consumo de energía destacan los petrolíferos en un 40.4 % y las energías renovables en un 15.7 % del consumo de energía total, como se muestra en la Figura 5.

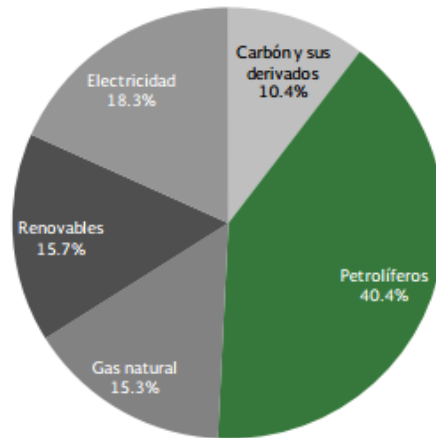


Figura 5. Consumo mundial de energía por fuente energética.
(Fuente: SENER, 2015)

En la Figura 6 se observa la estructura de producción de energía donde el petróleo sigue destacando en la producción de energía eléctrica hasta en un 63.4 % de los demás combustibles, tomando en cuenta que los recursos renovables abarcan un 7.6 % de la producción total. Dentro de los recursos renovables utilizados en la generación de energía destaca el uso de biomasa y biogás en un 4.1 % del 7.6 %, esto indica que en México aún se depende de los combustibles derivados del petróleo, causando así graves problemas ambientales, reflejados principalmente en el calentamiento global y cambio climático.

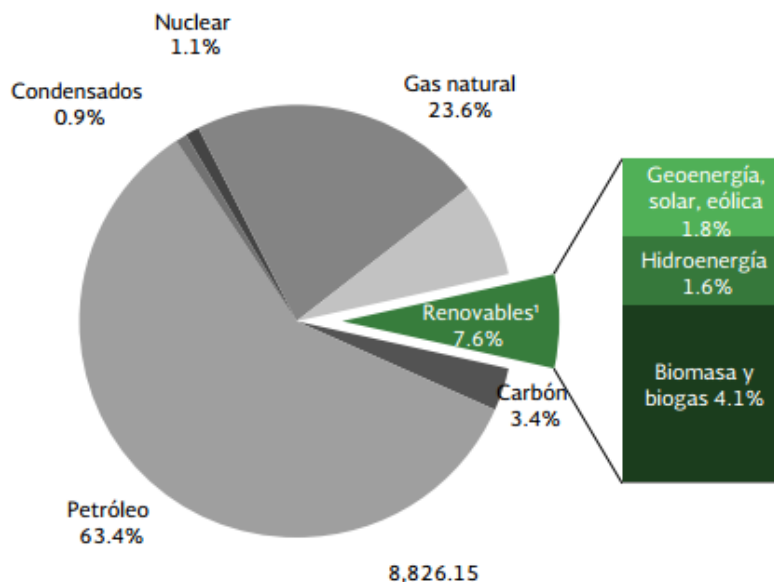


Figura 6. Estructura de la producción de energía en México.
(Fuente: SENER, 2015)

En México, en el año 2010 se totalizaron 748 millones de toneladas de CO₂, indicando un incremento del 33.4 %, tomando como base el año de 1990, teniendo una tasa de crecimiento anual del 1.5 % (INECC, 2013), donde el uso de combustibles fósiles para la producción de energía genera el 60 % de las emisiones de GEI y el 75 % de las emisiones de CO₂ dentro del país (SENER, 2012).

La contribución de las emisiones de GEI en México, en el año 2010 por sector respecto al CO₂ fue de: Energía, 67.3 %; en Agricultura, 12.3 %; Procesos Industriales, 8.2 %; Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura, 6.3 % y Desechos, 5.9 %; así como se muestra en la Figura 7.

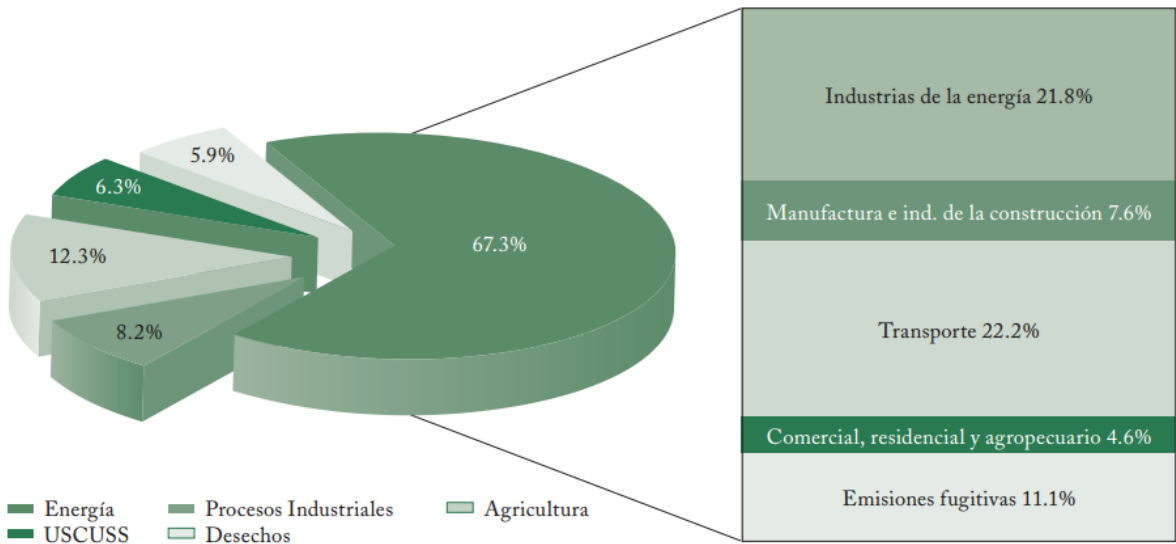


Figura 7. Contribución de las emisiones de CO₂ por sector en México.
(Fuente: INECC, 2013)

En la Figura 7 se muestra que México sigue la tendencia global en las emisiones de CO₂, ya que el sector que más destaca en la emisión de este gas es el sector de energía, dentro del cual el sector de transporte tiene un alto impacto en la generación debido a que el consumo de energía está basada en el uso de combustibles fósiles, principalmente en compuestos derivados del petróleo.

Tanto el calentamiento global como el cambio climático forman parte de los 9 límites planetarios, los cuales están constituidos por nueve alteraciones al sistema de la Tierra e ilustran los riesgos de las actividades humanas sobre éste, presentándose en la Figura 8.

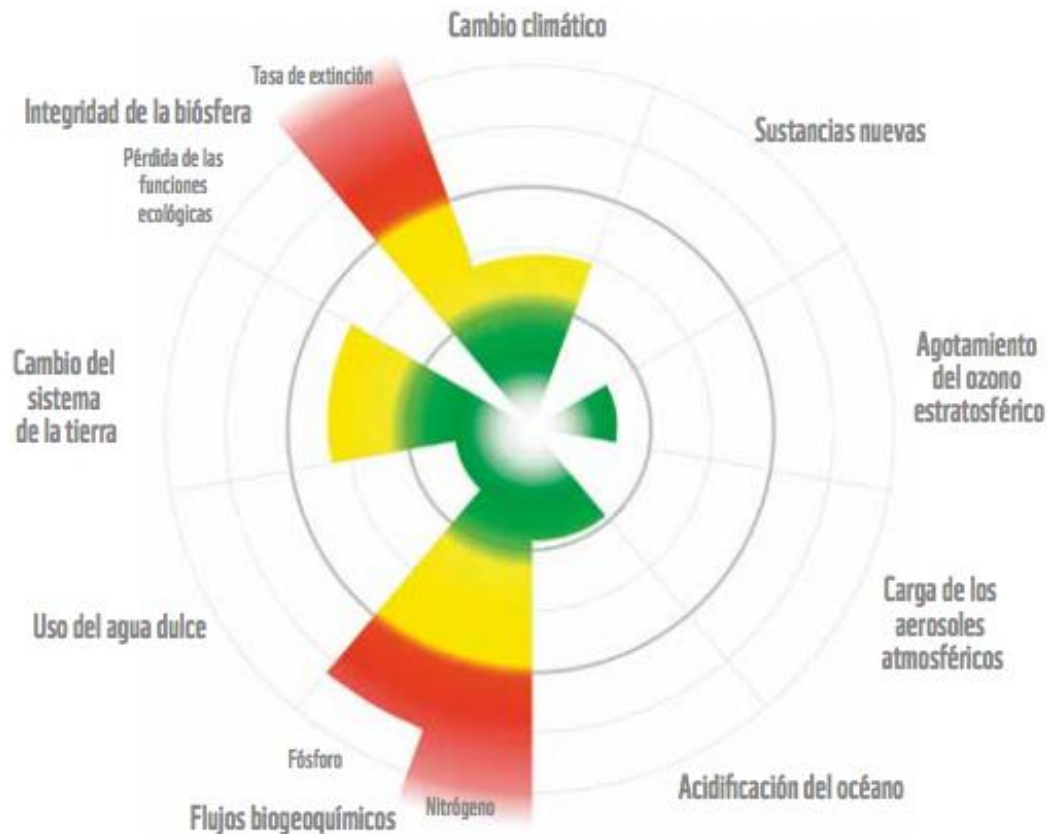


Figura 8. Límites planetarios.
(Fuente: WWF, 2016)

En la Figura 8 se observan los 9 límites planetarios presentados desde el 2009 por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los cuales se definen como un umbral crítico que se relaciona con el deterioro del medio ambiente y dan un estimado acerca del daño que producen las actividades humanas sobre el ambiente en una escala mundial y los impactos que pueden ocasionar, al igual que estiman el espacio seguro de trabajo para los seres humanos con respecto al funcionamiento de la Tierra. Éstos se estiman haciendo un estudio preliminar para identificar los procesos claves del planeta Tierra e intentar cuantificar para cada proceso el nivel de frontera que no deben ser transgredidos para evitar un cambio inaceptable en el medio ambiente y que éstos no presenten riesgos tanto para la biodiversidad como para los seres humanos. En la Figura 8 el área verde corresponde al espacio de operación seguro y éste se encuentra debajo del límite, el área amarilla representa la zona de incertidumbre, que es donde existe un peligro de alterar la estabilidad del medio ambiente, mientras que el área roja es la zona de peligro o de alto riesgo (WWF, 2016).

En el caso del cambio climático y calentamiento global el límite planetario presentado es de una concentración de CO₂ atmosférico < 350 ppm con un grado de incertidumbre de hasta 550 ppm, desde el año 2015 la concentración de CO₂ rebasó el área de operación segura entrando a una zona de incertidumbre alcanzando cantidades mayores a 440 ppm atribuido principalmente a la quema de combustibles fósiles. Por lo que se han propuesto varias medidas para mitigar y prevenir los efectos que conlleva el calentamiento global y el cambio climático (Yus, 2015).

1.2 Medidas de mitigación del cambio climático y calentamiento global

Las consecuencias que conllevan las emisiones de CO₂ es el calentamiento global teniendo como consecuencia el cambio climático, por eso el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático propone las siguientes medidas de mitigación para la reducción de CO₂ en cada sector, enlistándose a continuación (IPCC, 1996):

- Programas basados en el mercado los cuales proporcionan a clientes o fabricantes asistencia técnica y/o incentivos;
- Normas obligatorias para el uso eficiente de la energía aplicadas en el lugar de fabricación o al momento de hacer una construcción;
- Normas voluntarias para el uso eficiente de la energía;
- Mayor insistencia en programas privados o públicos para obtener productos más eficientes.

En el Cuadro 2, se muestran las medidas de mitigación propuestas por el Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático divididas por cada sector, México hace uso de estas propuestas.

Cuadro 2. Medidas de mitigación para la disminución de CO₂ para cada sector.

Sector	Medidas de mitigación de CO ₂
Manufactura e industria de la construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Las mejoras de las partes exteriores de los edificios (reduciendo la transferencia de calor y utilizando la debida orientación del edificio, ventanas que economicen energía y un albedo del edificio adecuado al clima) para lograr la reducción de energía de calefacción y refrigeración

Cuadro 2. Medidas de mitigación para la disminución de CO₂ para cada sector (continuación).

Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Controles de las fugas del refrigerante en el acondicionamiento del aire • Utilización de biocombustibles • Cambios en la infraestructura urbana y de transporte
Industria	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer políticas para la minimización de GEI
Energía	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en la infraestructura • Conversión más eficiente de combustibles fósiles • Utilización de combustibles fósiles con poco carbono • Utilización de energía nuclear • Fuentes de energías alternas
Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de biocombustibles • Aplicar mejoras tecnológicas • Mejor gestión de animales rumiantes

(Fuente: IPCC, 1996)

En el sector transporte se han implementado varias medidas donde se destaca la utilización de biocombustibles y el transporte sustentable: el cual busca introducir soluciones de transporte público que reduzcan la intensidad energética de los desplazamientos, mejoren la calidad del aire y sean más accesibles para toda la población, en el que se destaca la **incorporación de tecnologías “limpias”** (vehículos diésel con trampas de partículas, vehículos híbridos) así como el **uso de combustibles “limpios”** donde se puede implementar el uso biocombustibles (Centro Mario Molina, 2016).

En el estado de Zacatecas, a través de la Ley del Cambio Climático para el Estado de Zacatecas y Municipios, se proponen las siguientes medidas para la mitigación de GEI (LCCZM, 2015):

- Minimizar los efectos y los impactos generados por el Cambio Climático
- La conservación de los ecosistemas y aumento de sumideros de carbono
- Reducir la tasa de deforestación y pérdida de biodiversidad
- Aumentar y mejorar la cobertura vegetal en terrenos de agostadero
- Incorporar los ecosistemas, áreas naturales protegidas, unidades de manejo para la conservación de la vida silvestre (UMA) y de manejo sustentable a esquemas de pago por servicios ambientales
- Fortalecer la infraestructura para la prevención, detección, control y combate a incendios forestales
- **Fomentar el uso de energías alternas**

- En municipios, implementar mejoras en: el **manejo integral de residuos sólidos urbanos**, tratamiento de aguas residuales y conservación y mantenimiento de áreas verdes

1.2.1 Valorización de residuos

Parte de las emisiones de GEI provienen del sector de desechos, como se ha mencionado anteriormente en la Figura 7, en México el sector de desechos genera el 5.9 % de las emisiones al igual que la contaminación tanto en suelos, agua y aire por un manejo inadecuado, por lo tanto, ha surgido la necesidad de tener una gestión adecuada de los residuos, los cuales abarcan cuatro categorías (INECC, 2012):

- Tratamiento de aguas residuales: Para reducir emisiones de metano (CH₄) y aprovechar el agua tratada en otras actividades ajenas al proceso que la generó, utilizar el CH₄ para la generación de electricidad con la que operan las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).
- Captura y aprovechamiento de biogás producto de rellenos sanitarios y PTAR
- **Reciclaje: Reducción de residuos, valorización de los residuos y reducción de costos en materia prima**
- Composta: Aumento de la productividad agrícola y disminución de residuos orgánicos

Las estimaciones de las emisiones de GEI de las prácticas de gestión de residuos tienden a basarse en métodos tales como la evaluación del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés de *Life Cycle Assessment*). El LCA es una metodología que lleva a la identificación, cuantificación y caracterización de los impactos ambientales asociados en la elaboración de un producto. El LCA plantea mejorar y manejar el producto de manera sustentable, minimizando la utilización de materias primas nuevas, reciclando productos y minimizando residuos en el proceso de producción (Rodríguez, 2003).

La valorización de residuos es el principio de la LGPGIR cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica (SEMARNAT, 2003). Los procesos de valorización de los residuos sólidos urbanos se basan dependiendo de las características de los residuos y los procesos utilizados con mayor frecuencia son:

- Físicos: Reutilización y separación para reciclaje.
- Biológicos: Compostaje y degradación anaeróbica.
- Químicos y termoquímicos: Hidrólisis, **transesterificación**, incineración, pirólisis y gasificación.

Otros factores que influyen en la valorización de los residuos es el proceso donde son generados, el volumen y la composición de estos, la identificación del uso de los residuos y la disponibilidad y el precio de los materiales vírgenes con base en los costos de reciclaje.

La biomasa es una fuente de energía alterna que utiliza los principios de valorización de residuos, tal es el caso de los residuos de aceite vegetal usado, los cuales mediante un proceso químico (transesterificación) se generan biocombustibles, otorgando un valor energético a este tipo de residuos (Áviles, 2014).

1.2.2 Uso de energías alternas

Como se ha mencionado anteriormente, existen varias medidas de mitigación para la disminución del CO₂ y como consecuencia alternativas para mitigar el calentamiento global y el cambio climático. Una de las medidas propuestas es el fomentar el uso de energías alternas.

México al ser un país que se encuentra en vías de desarrollo, el compromiso que adquiere para la reducción de emisiones es mediante el uso de energías alternas. En la Figura 9 se muestra la concentración de emisiones de CO₂ que generan las energías alternas con respecto a las energías convencionales.

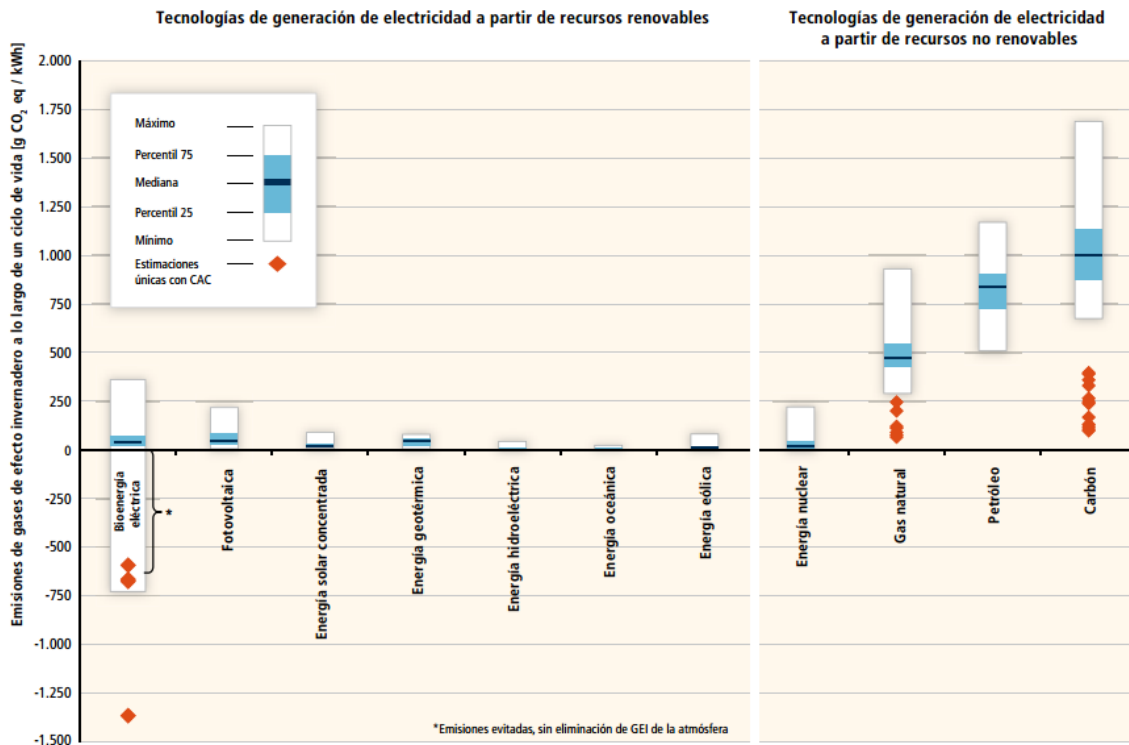


Figura 9. Emisiones de CO₂ generadas por energías alternas y energías convencionales.
(Fuente: IPCC, 2011)

En la Figura 9 se observan que las emisiones de CO₂ generadas por las fuentes alternas de energía son menores que las fuentes de energía convencionales, por lo que representan ser una alternativa viable para la disminución del CO₂.

Las energías renovables son aquellas energías alternativas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua; dentro de las más importantes se encuentran la energía solar, la energía eólica, la energía hidráulica, la de la biomasa y la geotérmica (IPCC, 2011).

La energía de interés en este proyecto es la energía proveniente de la biomasa:

Energía de la biomasa

La biomasa es una fuente de energía basada en el aprovechamiento de materia orgánica tanto de origen vegetal como animal. Las materias primas utilizadas van desde residuos forestales, agrarios o pecuarios, cultivos energéticos, componentes orgánicos de residuos sólidos urbanos, y otras fuentes de residuos orgánicos. Mediante diversos procesos, esos materiales pueden ser utilizados

para producir de forma directa electricidad o calor, o para generar combustibles gaseosos, líquidos o sólidos. La biomasa se puede clasificar en húmeda y seca, como se muestra en la Figura 10:

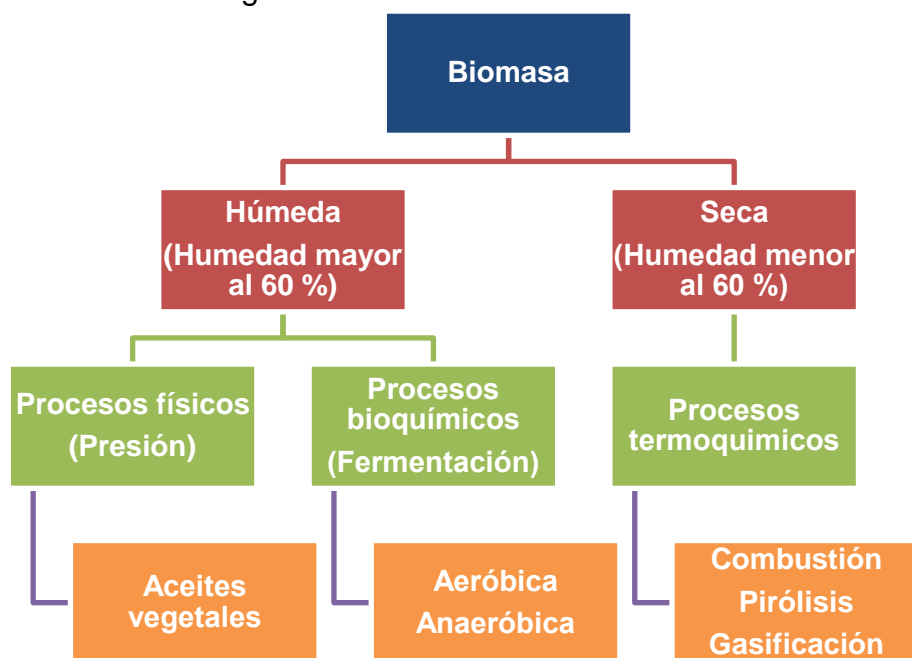


Figura 10. Tipos de biomasa utilizados para la generación de energía.
(Fuente: Secretaría de Energía, 2008)

Las principales formas de generación de energía a partir de la biomasa son los **biocombustibles**, los cuales se definen como aquellos combustibles que se obtienen a partir de biomasa como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída por medio de plantas o animales, que pueden sustituir a los combustibles convencionales derivados de petróleo (Salinas & Gasca, 2009).

Los biocombustibles más conocidos se clasifican en: biogás, bioetanol y biodiésel.

El bioetanol es un biocombustible que se obtiene a partir de la fermentación alcohólica de la materia orgánica rica en azúcar utilizado como aditivo o sustituto de la gasolina; el biogás está conformado principalmente por CH_4 y CO_2 obtenido a partir de la digestión anaerobia de los desechos orgánicos y materia orgánica proveniente del ganado, mientras que el biodiésel es producido a partir de plantas oleaginosas, aceites vegetales y grasas animales (SAGARPA, 2011).

El biocombustible de interés para este proyecto es el **biodiésel**.

1.3 El Aceite Vegetal Usado (AVU) como un residuo susceptible al reciclaje para la producción de biodiésel.

La producción de biodiésel en México se ha hecho con base en la extracción de aceites a partir de cultivos de plantas oleaginosas, teniendo otra alternativa que es el reciclaje de AVU en la elaboración de alimentos.

La utilización de biodiésel a partir de cultivos oleaginosos puede presentar varios problemas tanto de forma ambiental como social, ya que competiría con cultivos que son destinados para la alimentación, al igual que habría un cambio de uso de suelo de forestal a uno agropecuario, causando una problemática ambiental, por lo que la utilización AVU presenta mayores ventajas, en las que destacan que no genera competencia de recursos y se da un tratamiento a este tipo de residuos, evitando problemas de contaminación en sistemas de drenaje o alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (Morales, 2015).

La importancia que tiene darle un tratamiento a este tipo de residuos radica en que al ser vertidos sobre los sistemas de alcantarillado, éstos causan problemas en redes de saneamiento y sobrecostos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que es complicada la separación de este residuo de las aguas residuales. Otros de los impactos negativos que lleva este tipo de residuos es la carga contaminante que aporta a medios acuáticos, ya que cuenta con una elevada carga de DQO y al formarse una capa sobre la superficie, reduce la oxigenación dentro del medio acuático y disminución de la actividad fotosintética debido a la absorción de la radiación, causando así la disminución en la producción de oxígeno disuelto, teniendo como consecuencia disminución en la vida acuática, por lo tanto es ambientalmente factible hacer el reciclaje de los residuos de AVU para la producción de biodiésel (González & González, 2015).

Los AVU son la materia prima más atractiva para la producción de biodiésel debido a su bajo costo, ya que en muchos de los casos éstos son gratuitos o el costo se reduce en un 60 % en comparación con el aceite vegetal virgen. La generación de estos residuos se localiza en las casas habitación en menor proporción, mientras que en hoteles, restaurantes de comida rápida y establecimientos son generadores de este aceite en mayores proporciones.

La eficiencia de los aceites y grasas varían de acuerdo a sus propiedades tanto físicas como químicas, en las que destaca principalmente la composición de ácidos grasos. En el Cuadro 3 se presentan las proporciones de ácidos grasos en el AVU.

Cuadro 3. Proporción de ácidos grasos en Aceite Vegetal Usado.

Ácido	Palmítico (C16:0)	Estearico (C18:0)	Oleico (C18:1)	Linoleico (C18:2)	Linolénico (C18:3)
(%)	8.5	3.1	21.3	55.2	5.9

(Fuente: Bulla, 2014)

Las proporciones presentadas en el Cuadro 4 pueden variar dependiendo del uso que se le haya dado anteriormente al aceite, la frecuencia de calentamiento, el alimento que se utilizó, si tiene residuos sólidos presentes, entre otros (Bulla, 2014).

En México, la investigación que se hace en relación al biodiésel es mediante la producción de aceites vegetales, los cuales requieren mayores volúmenes en cuanto a producción como en terrenos que sirvan como sembradíos energéticos, teniendo problemas debido a los altos costos en la materia prima y en que son recursos que pueden ser utilizados para la alimentación; sin embargo, los AVU son una gran alternativa en el proceso de producción de biodiésel, ya que en la mayoría del país, son residuos no aprovechados.

1.4 Características generales del biodiésel

El biodiésel es definido por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés *American Society for Testing and Materials*) como “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales y que se emplean en motores diésel o en calderas de calefacción”, el cual es considerado como un biocombustible renovable que puede ser utilizado total o parcialmente como sustituto del diésel (Montoya, 2009).

El biodiésel tiene las mismas propiedades del diésel empleado como combustible para vehículos; éste se puede utilizar ya sea en forma pura designándolo B100 o mezclado con diésel obtenido del petróleo designándolo BXX. La XX establece el porcentaje de mezcla en el diésel. En México se plantearon 3 escenarios para la producción de biodiésel que son (Solben, 2008):

- Escenario 1: B5 – 5 % biodiésel y 95% diésel.
- Escenario 2: B10 – 10 % biodiésel y 90% diésel.
- Escenario 3: B20 – 20 % biodiésel y 80% diésel.

Existen varias ventajas en cuanto al uso y producción del biodiésel, esto es debido a su carácter biodegradable y la procedencia de la materia prima utilizada para su producción. En el Cuadro 4 se presentan las ventajas y desventajas del uso de este biocombustible.

Cuadro 4. Ventajas y desventajas del uso del biodiésel.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima de origen renovable • Baja dependencia a combustibles derivados del petróleo • Puede funcionar en cualquier motor de diésel convencional en estado puro o en mezcla • Puntos de inflamación más altos que el diésel convencional, haciendo más segura la manipulación • Es biodegradable • No es tóxico • No genera SO₂, debido a que no contiene azufre • Disminución del CO₂ • Mejores condiciones lubricantes que el diésel convencional, por lo que prolonga la vida útil del motor 	<ul style="list-style-type: none"> • El costo no compite frente a los costos de los combustibles convencionales • Posee menor estabilidad de oxidación, por lo que el tiempo de almacenamiento no debe exceder 6 meses • Alta sensibilidad a bajas temperaturas, por lo que puede solidificarse • Emisiones de NO_x

(Fuente: Bulla, 2014; Vivas, 2014)

1.4.1 Procesos de producción de biodiésel

La transesterificación es uno de los procesos utilizados para la producción de biodiésel, que consiste en una reacción entre un triglicérido, el cual es una molécula de glicerol con tres moléculas de ácidos grasos, y un alcohol (metanol o etanol) mediante el uso de un catalizador, para tener como productos glicerina y biodiésel (Vivas, 2010).

En la Figura 11 se presenta la reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel.

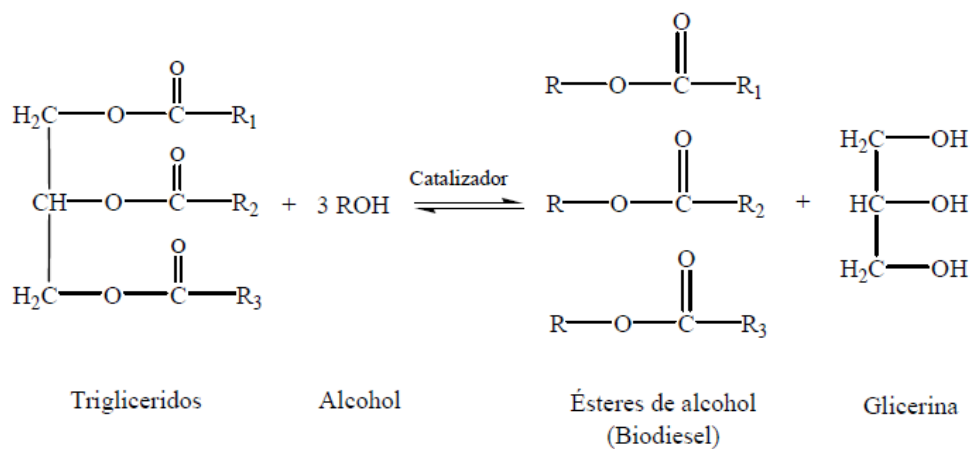


Figura 11. Reacción general de transesterificación para la obtención de biodiésel.
(Fuente: Vivas, 2010)

El proceso global para la producción de biodiésel lleva varias etapas que son: acondicionamiento de la materia prima, reacción de transesterificación y purificación del producto (Montoya et al., 2006).

El acondicionamiento de la materia prima depende de las características de la misma, que son el contenido del agua y de los ácidos grasos libres, los cuales tienen que ser bajos para evitar reacciones de saponificación y por lo tanto la generación de jabón.

La transesterificación consta de tres reacciones en las que se van esterificando los ácidos grasos unidos al glicerol. La primera reacción es la conversión de triglicéridos (TG) a diglicéridos (DG), la segunda es la conversión de diglicéridos a monoglicéridos (MG), y finalmente de monoglicéridos a glicerina, produciendo una molécula de éster por cada glicérido en cada paso, ya que se está tratando con una reacción reversible, se utiliza un exceso de alcohol para aumentar la conversión a ésteres (Montoya et al., 2006). En la Figura 12 se muestran las reacciones de la transesterificación.

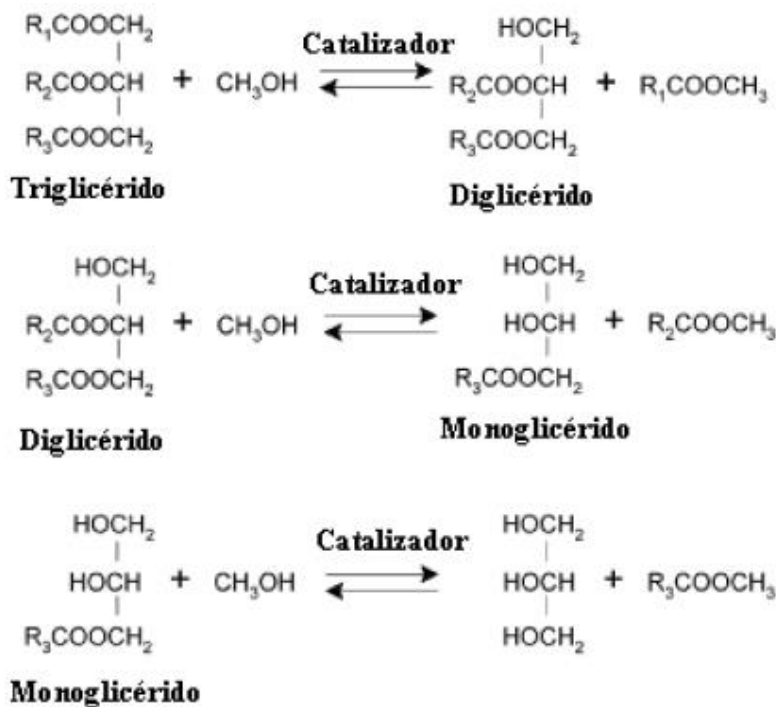


Figura 12. Reacciones llevadas a cabo en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel.
(Fuente: Lotero et al., 2005)

La etapa de separación es aquella donde se separa el biodiésel de la glicerina, mientras que en la purificación se determina tanto la pureza del biocombustible como la de la glicerina, determinando los costos del biodiésel y la recuperación del alcohol. Posteriormente se tiene que hacer una neutralización de todo el proceso, para formar sales y hacer más fácil su remoción. Luego de esta etapa, la fase del éster se somete a un lavado para remover las sales y la glicerina que no se separó, donde finalmente se seca el biodiésel por destilación o filtración al vacío. La purificación de la glicerina consta de una centrifugación o filtración para lograr la separación de sales precipitadas, y se puede añadir un proceso de destilación para obtener glicerina con mayor calidad (Montoya et al., 2006).

Las variables que afectan en el proceso de transesterificación son (Montoya, 2009):

- Calidad de materias primas
- Temperatura
- Concentración del catalizador
- Relación alcohol/aceite
- Grado de agitación
- Humedad y ácidos grasos libres

1.4.2 Insumos

La reacción de transesterificación se da en presencia de un catalizador homogéneo que puede ser de carácter ácido o básico, o también puede darse mediante catalizadores heterogéneos como resinas u óxidos metálicos (Ganduglia, 2009; Bulla, 2014).

- **Catálisis homogénea básica:** Los catalizadores básicos son los más económicos y los más utilizados a nivel industrial, ya que pueden operar a condiciones moderadas de temperatura y presión, pero presenta una desventaja en los aceites vegetales usados, debido a que contienen un alto contenido de agua y ácidos grasos libres que pueden ocasionar la formación de jabones. Los más comunes son el NaOH y KOH.
- **Catálisis heterogénea ácida:** Los catalizadores ácidos son menos convencionales que los básicos, debido a que hace que la reacción sea más lenta, pero son utilizados cuando se trabaja con aceites con un alto contenido de ácidos grasos. El más utilizado es el H₂SO₄.
- **Catalizadores heterogéneos:** Son aquellos que se encuentran en una fase diferente a las dos sustancias que reaccionan (aceite y alcohol), los más utilizados son los óxidos metálicos como las alúminas y silicatos. Las ventajas que presenta el uso de catalizadores heterogéneos es la capacidad de reutilización y estabilización de enzimas. Las desventajas son los problemas presentados por la formación de tres fases diferentes a las de los reactivos y los requerimientos de altas temperaturas para lograr la reacción.
- **Catalizadores enzimáticos:** Son los que presentan mayores ventajas ambientalmente, ya que utilizan enzimas en la reacción y éstas se pueden reutilizar, funcionan a temperaturas de 20-30 °C y requieren menos procesos de purificación. Las desventajas que presenta esta catálisis es que tienen bajas velocidades de reacción.

El alcohol es uno de los insumos indispensables para la producción de biodiésel, que puede ser metanol o etanol, dependiendo de los costos el más común es el metanol, debido a que es más económico, teniendo menor eficiencia que el etanol.

1.4.3 Materias primas

Existen diferentes alternativas de materias primas utilizadas para la obtención de biodiésel en las que destacan (Bulla, 2014).

- Aceites provenientes de semillas oleaginosas: Colza, girasol, coco, algodón, palma, soja, higuera, oliva, maíz

- Aceites alternativos: *Cynara*, *Crambe abyssinica*, *Jatropha curcas*, *Pogianus*, *Brassica carint*
- Aceite de semillas alteradas genéticamente: Aceite de girasol de alto oleico
- **Aceites vegetales usados**
- Grasas animales
- Aceites provenientes de microorganismos: microalgas

La eficiencia de los aceites y grasas varían de acuerdo a las propiedades físicas, como son la densidad, viscosidad, punto de fusión e índice de refracción; y a las propiedades químicas como el pH, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación e índice de éster, entre otros.

1.4.4 Tecnologías para producción de biodiésel

Para la producción de biodiésel a nivel industrial, existen dos tipos de reacciones que tienen que ser llevadas a cabo que son la transesterificación y la esterificación. Estas dos reacciones pueden ser llevadas de forma continua o discontinua (lotes o batch).

Sistemas tipo lotes o batch

El sistema tipo batch es utilizado en plantas de menor capacidad de producción y cuando la calidad de materia prima difiere. De forma general se utiliza un reactor con un agitador dentro de éste, este tipo de producción emplea más tiempo de reacción y separación que el proceso de transesterificación, esto es debido a que las fases de la reacción son ejecutadas en el mismo reactor (Bulla, 2014). En la Figura 13 se muestra el diagrama del sistema de producción de biodiésel tipo batch.

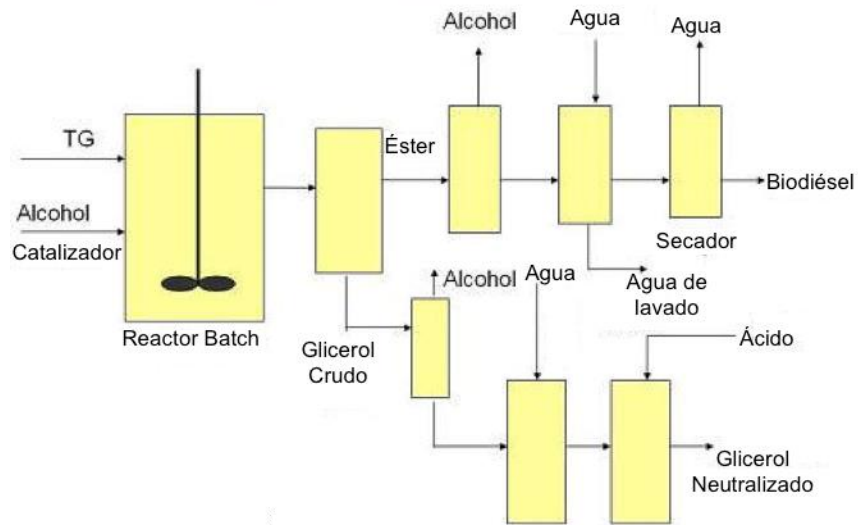


Figura 13. Proceso de obtención de biodiésel tipo batch.
(Fuente: Bulla, 2014)

En el diagrama presentado en la Figura 13, a un reactor batch entran el AVU, el alcohol y el catalizador para dar la reacción dentro del reactor, posteriormente, el producto se separa en dos fases por medio de decantación: en glicerina y biodiésel, este último pasa a diferentes reactores para varios lavados con agua, mientras que la glicerina pasa a un proceso de purificación mediante el uso de lavados y ácidos para neutralizarla.

Sistemas tipo continuo

El sistema continuo es utilizado para plantas cuya capacidad excede los 10,000 L y tiene una entrada de insumo constante. Este sistema cuenta con una serie de reactores en cadena con un sistema de agitación. Los reactores son denominados CSRT (por sus siglas en inglés *Continuous Stirred Tank Reactor*).

Las ventajas que presenta este sistema es que puede sufrir de modificaciones en el volumen con el fin de obtener mayores tiempos de reacción y conseguir mayores rendimientos en la transformación del AVU a ésteres.

Las desventajas que presenta este tipo de sistemas son las necesidades de un suministro constante de materia prima y que hay un aumento en la dispersión de la glicerina en la fase de los ésteres, aumentando el tiempo de reacción (Bulla, 2014). En la Figura 14 se presenta el diagrama de producción de biodiésel en un sistema continuo.

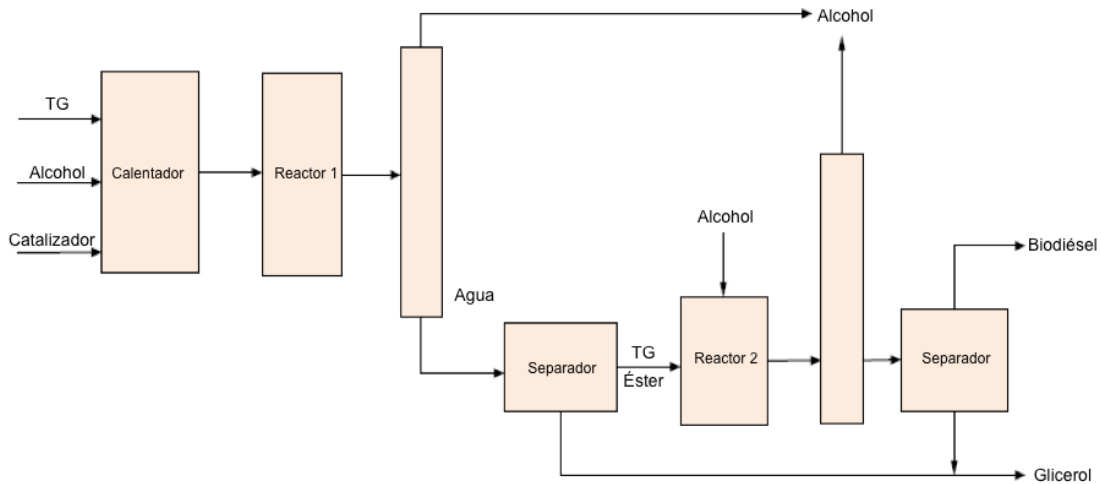


Figura 14. Producción de biodiésel en sistemas en continuo.
(Fuente: Bulla, 2014)

En el sistema continuo entran el alcohol, el catalizador y el AVU a un calentador para acelerar la reacción y posteriormente pasar a un reactor, de ahí se le adiciona agua para hacer la recuperación del alcohol en un separador donde se da la separación del aceite y los ésteres para pasar al segundo reactor donde se le vuelve a añadir alcohol y se deja activar, finalmente pasa a un separador donde se da la separación entre biodiésel y glicerol.

Reactor de ultrasonido

Este sistema se encarga de la reducción del tiempo de transesterificación, manejando rendimientos de hasta el 99 % en un tiempo de 5 minutos y con una agitación menor. Se encarga de reducir insumos como lo son el alcohol y la cantidad de catalizador a emplear. En la Figura 15 se presenta el diagrama de la producción de biodiésel mediante la ultrasonificación.

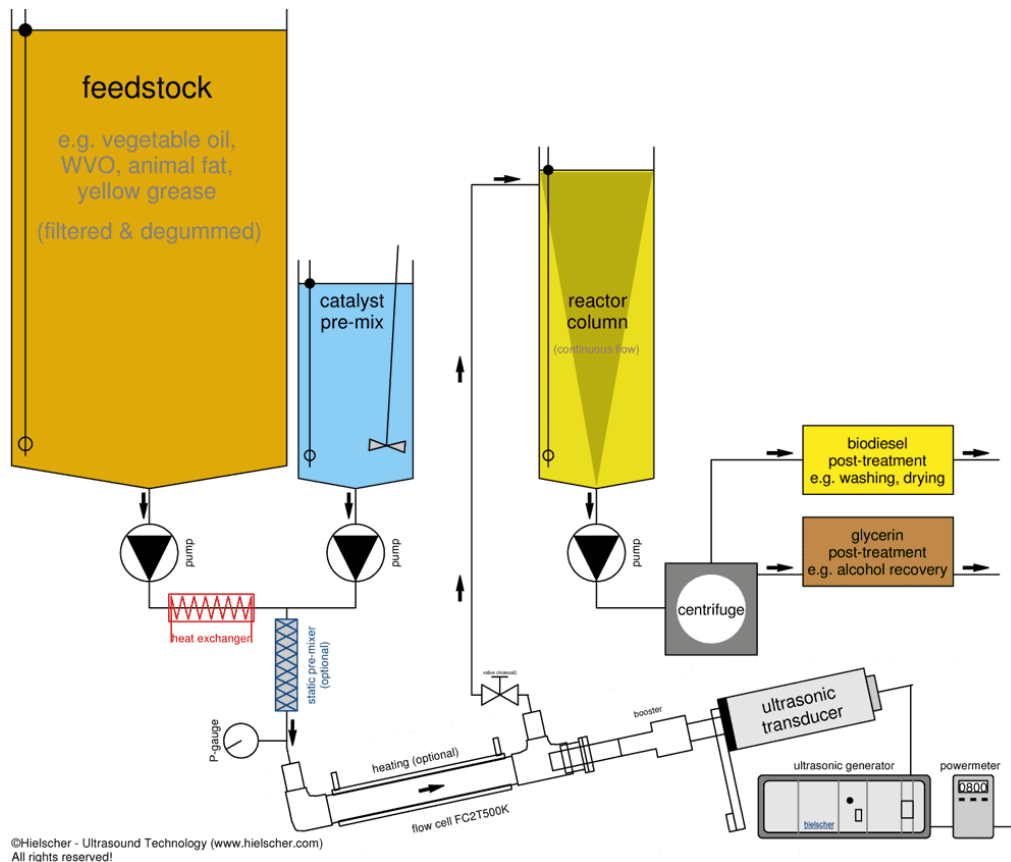


Figura 15. Producción de biodiésel a partir de un reactor de ultrasonido.
(Fuente: Bulla, 2014)

Los reactores ultrasónicos se instalan generalmente para mezclar dos corrientes de alimentación: el aceite y metanol (con catalizador). Para ello, se ingresa una pre-mezcla cruda, la cual es bombeada al reactor ultrasónico, donde la cavitación ultrasónica mezcla y emulsiona ambos reactivos dentro de 5 a 15 segundos. Cuando la mezcla sale del flujo del reactor, la glicerina se separa por gravedad para así obtener el biodiésel (Hielscher®, 2016).

1.4.5 Rentabilidad de la producción de biodiésel

La factibilidad económica del biodiésel depende de varios factores que van desde la obtención y producción de la materia prima, hasta el lugar donde se lleva a cabo la producción del biodiésel.

Los factores a influenciar en los costos del biodiésel son: localización de la planta, condiciones de proceso, dimensiones de la planta, requerimientos energéticos,

materia prima utilizada, catalizador empleado, rendimiento logrado y el grado de purificación tanto del biodiésel como de la glicerina (Maldonado et al., 2010).

Del 51 al 91 % del costo del biodiésel corresponde a la materia prima, por lo tanto éste tiene costos más elevados que el diésel, por lo que las medidas más factibles para disminuir los costos del biocombustible son: el reciclaje de residuos de AVU y el uso de mezclas de biodiésel y diésel.

En la Figura 16 se muestran los costos del biodiésel por litro utilizando varias fuentes de materias primas, comparándolos con el diésel producido en PEMEX.

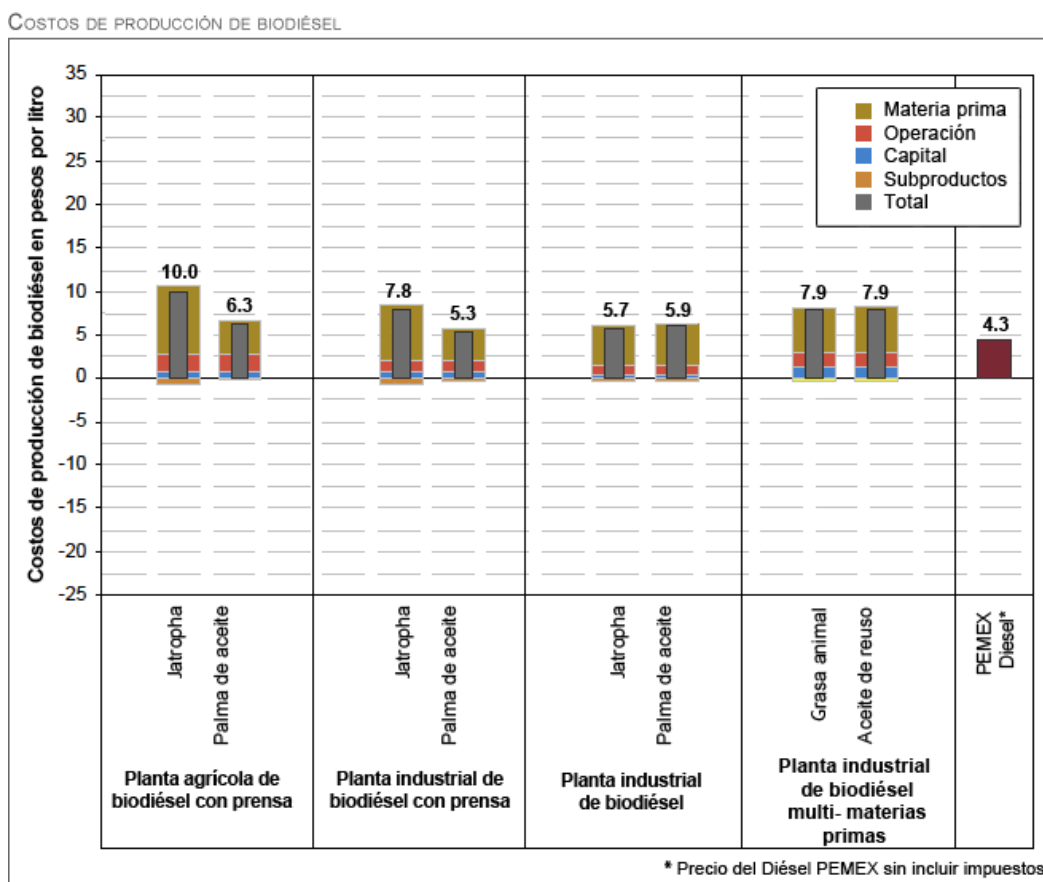


Figura 16. Costos de producción de biodiésel para el año 2011.
(Fuente: SAGARPA, 2011)

En la Figura 16 se puede observar que los costos de producción de biodiésel para el año 2011 no son rentables debido a que son más altos que el diésel PEMEX, actualmente el diésel PEMEX tiene un costo de \$17.10 M.N., considerando el aumento en energías que se utilizan en el proceso de producción y la estabilidad

de materia prima para la producción de biodiésel, puede ser rentable la producción de éste.

Como se mencionó anteriormente, la producción de biodiésel puede ser rentable si la materia prima se obtiene a partir de residuos de AVU, ello implicaría costos en el tratamiento previo, pero tendría una disminución significativa en los costos de producción de la misma.

1.4.6 Comercialización del biodiésel

En el apartado 2.3 fueron mencionados los tres escenarios propuestos por la Secretaría de Energía (SENER), para la comercialización y producción de biodiésel. Este biocombustible puede ser utilizado en vehículos con motor a base diésel, por lo que lo convierte en una fuente alternativa para ser utilizada como combustible en líneas de transporte público urbano.

1.4.7 Legislación vigente en relación al biodiésel en México

En México aún no se cuenta con un marco legal que permita el desarrollo, producción y empleo de biodiésel en automóviles, ni un marco legal que otorgue las características de calidad y comercialización del biodiésel.

La legislación vigente que hay en México es la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, que tiene como objetivo general promover la producción y consumo de los biocombustibles para tener otras fuentes de energía en México y así que el campo Mexicano tenga apoyo.

Esta ley contempla a los bioenergéticos que provengan de cualquier fuente, mientras no se tenga un impacto negativo sobre la soberanía alimentaria de México, y establece las bases legales para promover la producción, comercialización y uso de los biocombustibles con el fin de reactivar el sector rural con la creación de empleos, así como procurar el desarrollo de la producción y consumo de biocombustibles como un medio para la reducción de emisiones de GEI a la atmósfera (SAGARPA, 2011).

1.5 Calidad del biodiésel

1.5.1 Normas que determinan la calidad del biodiésel

Existen diversos estándares o parámetros que tienen como objetivo determinar la calidad del biodiésel, los cuales determinan el funcionamiento y la vida útil de los equipos de inyección de combustible en los motores diésel. La caracterización fisicoquímica es un método fundamental que se puede aplicar para determinar la calidad del biodiésel así como su eficiencia, en la cual se puede tomar como referencia normatividad vigente donde se tienen parámetros establecidos. En México, no hay normativa o estándares de calidad que regulen la producción y la caracterización del biodiésel, por lo que es necesario recurrir a normatividad internacional como es el caso de la norma ASTM D6751 (*American Society for Testing and Materials*) en los Estados Unidos de América (E.U.A) y la norma EN 14214 por el CEN (*European Committee for Standardization*) en Europa (Díaz, 2015).

La norma ASTM D6751 establece las especificaciones para el biodiésel en mezclas de B5 hasta B20, mientras que la norma ASTM D6751-02 establece las especificaciones del biodiésel B100. En el caso de la EN 14214 sólo establece los parámetros para el biodiésel en un estado de B100 pero no para niveles medios tales como la mezcla B20 (Díaz, 2015).

En el Cuadro 5 se establecen los parámetros utilizados para determinar la calidad del biodiésel a nivel internacional, utilizando parámetros establecidos en las normas ASTM D6751 y EN 14214, siendo la última la que impone restricciones más rigurosas en la calidad del biodiésel.

Cuadro 5. Estándares y especificaciones para el biodiésel-Normatividad internacional.

Parámetro	E.U.A.	Europa	Unidades
	Norma		
	ASTM D6751 (2007)	EN 14214 (2003)	
Densidad 15°C	-	0.86 - 0.90	g/cm ³
Viscosidad 40°C	1.9 - 6.0	3.5 - 5.0	mm ² /s
Punto Ignición	≥ 100	≥ 120	°C
Agua	≤ 0.05%	≤ 500	mg/kg
Corrosión-Cu	> N° 3	N° 1	-

Cuadro 5. Estándares y especificaciones para el biodiésel-Normatividad internacional (continuación).

Número Cetano	≥ 47	≥ 51	-
Número Neutralización	≤ 0.80	≤ 0.50	mg KOH/g
Estabilidad Oxidación 110°C	-	6	Horas
Metanol	≤ 0.2	≤ 0.2	% Peso
Contenido Metilésteres	-	≥ 96.5	% Peso
Triglicérido	-	≤ 0.2	% Peso
Monoglicérido	-	≤ 0.2	% Peso
Glicerina libre	≤ 0.02	≤ 0.02	% Peso
Glicerina total	≤ 0.24	≤ 0.25	% Peso
Número Yodo	-	≤ 120	g I ₂ /100 g aceite
Fósforo	0.001	4	mg/kg
Punto Inflamación	120	101	°C
Poder calorífico	39.40	37.5	MJ/kg
Contenido Metales	5	5	mg/g
Índice Acidez	0.5	0.5	mg KOH/g

Fuente: Elaboración propia.

De los parámetros mencionados en el cuadro 5, existen algunos que son utilizados para determinar tanto la calidad del biocombustible, como la calidad del aceite (materia prima) para determinar la eficiencia que tiene este último para ser procesado en biodiésel.

1.5.1 Parámetros que determinan la calidad del aceite y del biodiésel.

Como se ha mencionado anteriormente, la norma ASTM D6751 de E.U.A y la norma europea EN 14214 establecen los límites de los parámetros utilizados para determinar la calidad del biodiésel como combustible, con el fin de evitar daños en los motores de combustión interna que utilizan diésel, por esta razón se tiene que evaluar la calidad que tiene el aceite, ya que de ésta depende la calidad del biocombustible.

Los parámetros que determinan la calidad del aceite y del biodiésel son: densidad, viscosidad, humedad y materia volátil, índice de peróxido, índice de yodo, índice de saponificación, índice de acidez, los cuales se describen a continuación.

- **DENSIDAD**

La densidad está determinada como la relación del peso sobre el volumen, la cual se ve afectada por la temperatura. Ésta depende directamente de la composición

del aceite si es puro o usado, el grado de rancidez y el tratamiento que lleva el aceite, aumentando su valor al disminuir el largo de la cadena y al aumentar el número de dobles enlaces (Díaz, 2015).

La norma Europea EN 14214 es la que establece los valores para el biodiésel mostrando valores de 0.86-0.90 g/cm³, este parámetro es determinante del porcentaje máximo de biodiésel en una mezcla, por lo que es necesario empezar con mezclas desde B5 (5% Biodiésel, 95% diésel) aumentando el porcentaje de biodiésel desde 2-5% en cada mezcla, siempre que se mantengan los límites establecidos dentro de la norma (Díaz, 2015).

La densidad es un parámetro importante en el funcionamiento del motor, ya que éste si se encuentra con valores más altos puede causar problemas en los inyectores del motor así como la solidificación y congelación a bajas temperaturas (Castro et al., 2007).

- **VISCOSIDAD**

La viscosidad es la resistencia de un fluido a fluir cuando se encuentra bajo el efecto de la gravedad, lo recomendable es tener valores mínimos para evitar pérdidas de potencia en el motor debido a las fugas de las bombas de inyección, al igual que va a presentar características de lubricidad (Castro et al., 2007).

De acuerdo con las normas internacionales, la viscosidad se presenta en valores de 1.9–6.0 mm²/s en el caso de la ASTM D6751 y de 3.5–5.0 mm²/s en el caso de la norma EN 14214.

La viscosidad es una propiedad que está relacionada directamente con la estructura química del combustible, ya que la viscosidad aumenta al incrementarse la longitud de la cadena y disminuye con el aumento del número de enlaces (Nivel de insaturación). Por lo tanto la viscosidad de la materia prima (grasa animal o aceite vegetal) siempre será mayor a la del biodiésel generado, este parámetro es un indicador de la eficiencia de la reacción de transesterificación ya que se tiene que disminuir el valor inicial con respecto al valor final (Canakci & Sanli, 2008).

- **HUMEDAD Y MATERIA VOLÁTIL**

El contenido de humedad dentro del aceite a tratar es un parámetro viable para determinar la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal, ya que éste al presentar altos valores de humedad se puede dar la formación de jabones dentro del biodiésel, así como la hidrolización de los triglicéridos y

diglicéridos dando la formación de ácidos grasos libres, disminuyendo la calidad del biocombustible (Sánchez & Huertas, 2012).

En el caso del biodiésel, el contenido de humedad (en su caso restos de metanol o agua por no realizar adecuadamente el lavado y purificación) puede generarse corrosión y promover el desarrollo de microorganismos, provocando que los sedimentos causen problemas de taponamiento en filtros e inyectores (Sánchez & Huertas, 2012).

El valor de humedad y materia volátil debe ser menor a un valor de 0.05 % para cumplir con las especificaciones de las normas ASTM D6751 y EN 14214.

- **ÍNDICE DE PERÓXIDO**

El índice de peróxido es la cantidad de miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de grasa, el cual el yoduro de potasio se encarga de oxidar el aceite. Los peróxidos son formados en los puntos de insaturación de las cadenas de carbonos de los ácidos grasos (Sánchez & Huertas, 2012).

Este parámetro se encarga de medir el grado de oxidación que han sufrido las grasas y los aceites durante su almacenamiento, los valores permitidos para las grasas y aceites son menores a 20 mEq/Kg de grasa de acuerdo a la norma mexicana NMX-F-109-SCFI-2006, mientras que para el biodiésel los valores estipulados en la norma EN 14214 es una estabilidad a la oxidación en un lapso de 6 horas (Díaz, 2015).

Los peróxidos se forman a partir de la descomposición de las grasas en presencia de oxígeno. Esta oxidación es una de las principales causas del deterioro del biodiésel y da lugar a la aparición de malos olores. Este parámetro afecta la calidad del biodiésel debido a que un alto índice de peróxido indica que el biocombustible está entrando en una etapa de degradación oxidativa ocasionado enranciamiento y que el biocombustible reaccione con los recipientes en los que se encuentra almacenado (Molina, 2011; Díaz, 2015).

- **ÍNDICE DE YODO**

Este parámetro indica el grado de insaturación que poseen los ácidos grasos de una grasa o aceite y del biodiésel mismo, influye directamente en la calidad tanto del aceite y por consecuencia del biodiésel ya que indica la tendencia a la oxidación (Sánchez & Huertas, 2012).

El índice de yodo es un parámetro que influye también en el punto de fusión del combustible, ya que si este se encuentra a mayor cantidad de insaturaciones, menor el punto de fusión del aceite, debido a que los aceites de origen natural

están compuestos por diversos ácidos grasos (saturados e insaturados) con diferentes puntos de fusión que son mantenidos luego de la reacción de transesterificación (Díaz, 2015).

El índice de yodo influye directamente en la calidad del biocombustible que se obtuvo ya que si tiene valores muy altos hay una mayor tendencia a la oxidación debido a la escasez de átomos de hidrógeno en su composición, ya que si este se encuentra insaturado, las cadenas son atacadas por oxígeno dando lugar a la formación de peróxidos, los cuales forman polímeros entre las distintas cadenas de ácidos grasos que dan lugar a la formación de gomas dentro del motor, afectando su mecanismo y su vida útil y disminuyendo la lubricidad de éste (Yaakob et al., 2014; Díaz, 2015).

La norma europea EN 14214 establece los índices de yodo con un valor de ≤ 120 g de $I_2/100$ g de aceite para el biodiésel, por lo que a un valor mayor en el aceite, menor índice de cetano, por lo tanto, menor calidad de combustión del biocombustible en los motores (Molina, 2011).

- **ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN**

El índice de saponificación es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) requeridos para saponificar un gramo de grasa bajo condiciones específicas. Este parámetro es una medida de los ácidos grasos libres y combinados que existen en la grasa o el aceite, ya que cuanto mayor sea la proporción de ácidos grasos en la cadena corta, mayor será el índice de saponificación (Sánchez & Huertas, 2012).

Este índice refiere a la probabilidad de una grasa o aceite a transformarse en jabón por la presencia de KOH con un alcohol, por lo que a mayor índice de saponificación mayor la probabilidad de presencia de jabón en el biodiésel, disminuyendo la calidad de éste.

Otro factor que influye directamente en este parámetro es el contenido de humedad dentro de la materia prima (aceite o grasa), ya que el agua favorece a la formación de jabones por saponificación impidiendo una completa reacción de transesterificación, y finalmente afectando en el rendimiento y calidad del biodiésel (Zuleta et al., 2016).

- **ÍNDICE DE ACIDEZ**

Los límites establecidos para este parámetro, de acuerdo a las normas ASTM D6751 y EN 14214 son un valores menores a 0.5 mg de KOH/g de aceite, este parámetro indica la cantidad de ácidos grasos libres en el biodiésel debido a que

no se completó de manera eficiente la reacción de transesterificación o la degradación del aceite durante su almacenamiento, en los cuales puede haber la presencia de productos saponificables que pueden causar daños en el motor por la posible formación de gomas (Enweremadu & Mbarawa, 2009).

El índice de acidez determina tanto la calidad del aceite como el biodiésel, un valor elevado del 5 % en aceites muestra una alta cantidad de ácidos grasos libres, generado por un alto grado de hidrólisis. Este parámetro es importante para determinar la eficiencia de reacción de transesterificación, ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador formando jabones y disminuyendo el rendimiento de la reacción (Díaz, 2015).

Existen otros parámetros que se utilizan para determinar la calidad del biodiésel como combustible, estos son: Número de cetano, corrosión en lámina de cobre, punto de ignición, punto de inflamación, punto de nube, contenido de metilésteres, contenido de mono, di y triglicéridos, contenido de glicerina libre y total, entre los más importantes y son descritos a continuación:

- **NÚMERO DE CETANO**

Este parámetro es una medida de la calidad del biodiésel como combustible desde el proceso de combustión y el punto de vista químico, el número de cetano guarda relación del tiempo que transcurre entre la inyección del carburante con el comienzo de la combustión. Cuando es producida una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante, se dice que la combustión es de calidad, por lo tanto, cuanto más elevado sea el número de cetano, menor es el retraso de ignición y mejor es la calidad de combustión (Fajardo, 2015).

El número de cetano está relacionado directamente con la estructura química del aceite o grasa utilizado como materia prima, ya que dependiendo de la materia prima, va a haber variaciones en la composición de los ácidos grasos: saturados e insaturados, mostrando que los aceites y grasas altamente saturadas tendrán un número de cetano muy alto (≥ 70) mientras que los aceites o grasas poliinsaturados tendrán un valor menor a 47 (Sánchez et al., 2012; Díaz, 2015).

La normatividad internacional proporciona los límites para este parámetro, para el biodiésel el valor propuesto por la ASTM D6751 es ≥ 47 , mientras que en la norma europea, el valor establecido es ≥ 51 . Cuando el número de cetano se encuentra por debajo de los límites, la combustión es muy lenta y da lugar a la generación de ruido excesivo, mayor aumento en las emisiones de NO_x , reducción del rendimiento del vehículo y disminución del tiempo de vida útil del motor (Sánchez et al., 2012).

- **CORROSIÓN EN LÁMINA DE COBRE**

La corrosión en lámina de cobre da a conocer la acción corrosiva del biocombustible sobre el cobre así como la presencia de ácidos y otros elementos que puedan degradar algunas partes del sistema de inyección, este parámetro indica la compatibilidad del biocombustible con los componentes metálicos del motor.

En el biodiésel, la corrosión es inducida por los ácidos o compuestos sulfurados, por lo tanto se relaciona directamente con el índice de acidez al igual que con el contenido de agua presente en el biocombustible (Molina, 2011).

Los límites establecidos en la norma estadounidense ASTM D6751 es un valor $>N^{\circ} 3$, mientras que para la norma europea EN14214 el límite máximo es la clase 1B.

La importancia de este parámetro radica en que los ácidos y compuestos azufrados presentes pueden deteriorar los componentes metálicos dentro del motor, así como la degradación del biocombustible provocando la formación de depósitos en los tanques de almacenamiento.

- **PUNTO DE IGNICIÓN E INFLAMACIÓN**

El punto de ignición es la temperatura en la cual el combustible en su estado líquido produce vapores para mantener la combustión.

Los límites del punto de ignición que se tienen para el biodiésel son: $\geq 120^{\circ}\text{C}$ en la norma europea EN14214 y $\geq 100^{\circ}\text{C}$ para la norma ASTM D6751.

El punto de inflamación también conocido como *flash point*, es la temperatura mínima a la que los vapores del biocombustible se hacen inflamables. La diferencia que se tiene con el punto de ignición es que cuando el combustible está en condiciones de inflamarse, le hace falta el calor de ignición, una vez que se retira la fuente de calor externa se puede mantener la combustión iniciada o se puede apagar el fuego por sí solo (Díaz, 2015).

La norma EN 14214 establece un punto de inflamación para el biodiésel de 101°C , mientras que la norma ASTM D6751 tiene un valor de 120°C .

Estos parámetros indican si hay una cantidad excesiva de alcohol que no reaccionó durante la transesterificación, o bien, la cantidad de compuestos volátiles que puede tener el combustible. Ambos parámetros son utilizados para satisfacer temas de seguridad industrial y estimar las condiciones de almacenamiento del biocombustible (Díaz, 2015).

- **PUNTO DE NUBE**

También conocido como punto de enturbiamiento, es la temperatura en la que un material graso se vuelve turbio debido a la formación de cristales y a la solidificación de los ácidos grasos saturados presentes en la muestra. La importancia de este parámetro radica en que los sólidos y cristales formados se aglomeran con mayor facilidad y rapidez, causando obstrucciones en las tuberías del combustible y filtros, disminuyendo la vida útil del motor (Fajardo, 2015).

Con la formación de sólidos, el material se aproxima a un punto de congelación, y aquí se mide la temperatura más baja en la cual todavía habrá flujo hasta llegar al punto de obstrucción del filtro en frío (*cold filter plugging point*), las normas internacionales no establecen límites para este parámetro (Fajardo, 2015).

En el biodiésel, el punto de nube permite evaluar la funcionalidad del biocombustible a bajas temperaturas, ya que el biodiésel tiene un punto de nube más alto que el diésel convencional, por lo que en climas fríos es necesaria la adición de un anticongelante.

- **CONTENIDO DE METILÉSTERES, MONO-, DI- Y TRIGLICÉRIDOS**

El contenido de metilésteres (% FAME) es un parámetro que indica la pureza que tiene el biodiésel, teniendo un valor mínimo del 96.5 % p/p establecido en la norma EN 14214, en el caso de los mono-, di- y triglicéridos los valores máximos permitidos son del 0.2 % p/p de acuerdo a la norma EN 14214.

Estos parámetros son medidos mediante la cromatografía gaseosa (CG), la cual sirve para separar y conocer la composición de los metilésteres formados en la reacción de transesterificación, que son separados de acuerdo a la cantidad de carbonos presentes y el número de dobles enlaces. Se necesitan dos patrones internos para determinar los glicéridos: el primer patrón es el de 1, 2, 4-butanotriol para determinar el contenido de glicerol y el segundo patrón es el de 1, 2, 3-tricaproilglicerol (tricaprina) para detectar y analizar el contenido de mono-, di y triglicéridos (Herrera & Velez, 2008; Díaz, 2015).

Cuando se presenta un bajo contenido de metilésteres en el biodiésel, se indican condiciones de reacción no apropiadas o la presencia de impurezas, como son: alcohol, glicéridos, glicerol, grasas solubles, metales, proteínas, vitaminas, fosfolípidos e hidrocarburos (Díaz, 2015).

- **CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE Y TOTAL**

El contenido de glicerina libre y total refleja la calidad del biodiésel y la efectividad de la reacción de transesterificación, así como los lavados llevados a cabo dentro del proceso. Un valor alto de glicerina libre puede causar problemas durante el almacenamiento o dentro del sistema de combustible. Un alto contenido total de glicerina puede dar lugar a la incrustación del inyector debido a los compuestos inorgánicos y jabones acumulados en la glicerina, también puede contribuir a la formación de depósitos en el sistema de combustible, reduciendo la efectividad del motor (Fajardo, 2015).

El límite máximo permitido para el contenido de glicerina libre es de 0.02 % p/p establecidos por las normas ASTM D6751 y EN 14214, mientras que los límites máximos permitidos para el contenido de glicerina total es de 0.24 % p/p por la norma ASTM D6751 y de 0.25 % en p/p para la norma EN 14214.

1.6 Casos de estudio relacionados con la producción de biodiésel a partir de residuos de AVU.

Actualmente en México, existen varias empresas encargadas de la recolección y reciclaje de residuos de AVU para la producción de biodiésel, estas son:

- Biodiesel MORECO: Es una empresa que tiene su origen en el estado de Michoacán, que se encarga de la recolección de los residuos de AVU para la generación de biodiésel como sustituto de diésel. Esta empresa tiene cobertura en los municipios de Uruapan, Zamora, Jiquilpan y Sahuayo, dentro del estado de Michoacán. También en el estado de Querétaro, en municipios como Juriquilla y San Juan del Río. En el estado de Guanajuato tiene una ruta de recolección en las ciudades de León, Guanajuato, Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende y San Felipe, al igual que en Guadalajara en el estado de Jalisco.
- Biofuels de México S.A. de C.V.: Es una empresa originaria de la Ciudad de México que se encuentra en operación desde el año 2005, la cual provee de biodiésel a la empresa transportista ADO y Turibús. Actualmente esta empresa recolecta más de 500,000 litros de residuos de AVU al año en ciudades como Puebla, Cholula, Cuernavaca, Distrito Federal, Zona Metropolitana, Toluca, Metepec, Guadalajara, Tlaquepaque, Zapopan, Tonalá, Veracruz, Córdoba, Xalapa, Boca del Río, Querétaro, Cancún, Playa del Carmen y Chetumal.
- Renov México: Esta empresa tiene centros de acopio en Puebla, San Luis Potosí, Querétaro, Chiapas y Puerto Vallarta, que se encargan de la

recolección de residuos de AVU y el reciclaje para la producción de biodiésel.

1.7 Guadalupe y Zacatecas, municipios potenciales para la producción de biodiésel a partir de residuos de AVU.

La selección de los municipios de Guadalupe y Zacatecas como el área de estudio se hizo con base en que son dos municipios pertenecientes a la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas (ZMEZ), donde juntos suman un total de 334,065 habitantes (187,918 para Guadalupe y 146,147 para Zacatecas; INEGI, 2015), tomando en cuenta que la generación de CO₂ eq por habitante en México es de 6.55 toneladas por año (SEMARNAT, 2014), se tendrían aproximadamente 1'230,862.9 toneladas de CO₂ por todos los habitantes de Guadalupe y Zacatecas, siendo una cifra significativa en la emisión de GEI, por lo que es una buena alternativa proponer el uso del biodiésel en una línea del transporte público, dando tratamiento a los residuos de AVU y así lograr una disminución de los GEI que contribuyen al calentamiento global y el cambio climático.

La producción de biodiesel a partir de residuos de AVU presenta un gran potencial en los municipios de Guadalupe y Zacatecas, debido a que dentro de estos municipios la economía está basada en un 47 % en las actividades terciarias, en las que destacan el sector restauranero y el sector hotelero, teniendo como generación residuos de AVU, por lo tanto, estos municipios pueden presentar un gran potencial en la producción de biodiésel a partir del reciclaje de AVU. En la Figura 17 se muestra la concentración de establecimientos con servicios de alojamiento temporal (hoteles) y de elaboración de alimentos.

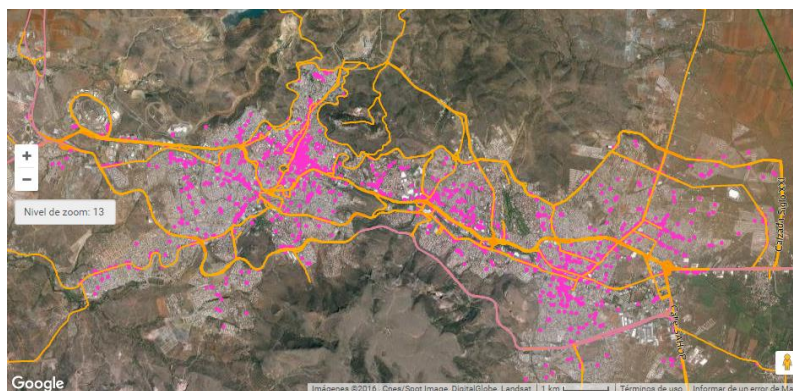


Figura 17. Establecimientos con servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas.

(Fuente: Google Maps & INEGI, 2016)

La situación que se presenta con base en la gestión integral de los residuos de AVU se encuentra desfavorable debido a que no hay legislación vigente tanto de manera federal como de manera local para el tratamiento y disposición final de estos residuos, por lo que en la mayoría de los establecimientos dentro de estos municipios brindan una disposición inadecuada a este tipo de residuos.

Por lo que este proyecto puede ser factible tanto económica, social y ambientalmente, debido a que se daría un tratamiento a residuos que tienen una disposición inadecuada, evitando problemas de contaminación, así como una reducción en las emisiones de CO₂. Económicamente sería factible debido a que habría una disminución en los costos de materia prima para la producción de biodiésel, obteniendo precios más económicos en la venta del biocombustible en relación al diésel PEMEX.

1.8 Justificación

La producción de biodiésel a partir de los residuos de AVU es una alternativa que puede aplicarse para la resolución de dos de las problemáticas dentro de los municipios de Guadalupe y Zacatecas, que son el manejo inadecuado de estos residuos por parte de servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas (hoteles y restaurantes) y la generación de emisiones de CO₂ por la quema de combustibles fósiles proveniente de fuentes móviles como el transporte público urbano.

Dentro de los beneficios técnicos de este proyecto es el tratamiento y reciclaje a los residuos de AVU, y de los beneficios económicos que, al ser un reciclaje, la obtención de materia prima puede ser de forma gratuita (debido a las donaciones de aceite) por los establecimientos, disminuyendo significativamente los costos de producción de biodiésel, así como el beneficio obtenido para los posibles compradores del biocombustible a un precio menor que el diésel convencional, ya que al utilizar materia prima reciclada los precios de producción son más bajos y por consecuencia los precios de venta de biodiésel son más factibles económicamente.

La ventaja que presenta este proyecto en relación a la contaminación por el uso de combustibles fósiles es una reducción de las emisiones de GEI debido a una disminución considerable del CO₂ al utilizar el biodiésel en una línea de transporte público urbano.

Dentro de este proyecto, el biodiesel tiene como objetivo sustituir una parte del uso de los combustibles fósiles, como es el diésel, dentro de los municipios de Guadalupe y Zacatecas, para así lograr una disminución de los residuos de AVU mediante el reciclaje y la disminución de las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles fósiles (Canakci & Sanli, 2008).

1.9 Objetivos

Objetivo general

Determinar la factibilidad ambiental, económica y técnica del reciclaje de residuos de Aceite Vegetal Usado para la producción de biodiésel en una planta semi-industrial, mediante el diagnóstico de la generación de Aceite Vegetal Usado, la producción y la caracterización del biodiésel obtenido a partir de 4 lotes de residuos en un prototipo de 10 L.

Objetivos específicos

1. Identificar establecimientos del sector de producción de alimentos y bebidas y alojamiento temporal generadores de aceite vegetal usado en los municipios de Guadalupe y Zacatecas de la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas
2. Realizar un diagnóstico sobre la cantidad, disposición y frecuencia de generación de los residuos de aceite vegetal usado en los establecimientos previamente identificados
3. Cuantificar la cantidad de residuos de aceite vegetal usado a disponer para la producción de biodiésel en una planta semi-industrial
4. Diseñar una propuesta del sistema de recolección de los residuos de aceite vegetal usado en los establecimientos de estudio.
5. Realizar el proceso de reciclaje del Aceite Vegetal Usado para la producción de biodiésel en un prototipo de 10 L mediante catálisis homogénea básica.
6. Determinar la calidad del biodiésel mediante la evaluación de parámetros (Densidad, viscosidad, humedad y materia volátil, índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo y corrosión en lámina de cobre) establecidos en normas internacionales como son ASTM D6751 y EN 14214.
7. Determinar los costos de producción del biodiésel mediante un balance económico.
8. Realizar la propuesta de una planta semi-industrial para la producción de biodiésel a partir de la cantidad de residuos de aceite vegetal usados disponibles en la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas.
9. Determinar la factibilidad económica, técnica y ambiental de la instalación de una planta semi-industrial de producción de biodiésel a partir de residuos de aceite vegetal usados para ser utilizada en una línea de transporte de la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas.

CAPITULO 2. Metodología.

2.1 Elaboración y análisis estadístico de la generación de aceite vegetal usado

2.1.1 Delimitación de la zona de estudio

La zona de estudio se delimitó a los municipios de Guadalupe y Zacatecas, los cuales son pertenecientes a la Zona Metropolitana del Estado de Zacatecas (ZMEZ), como se muestra en la Figura 18.

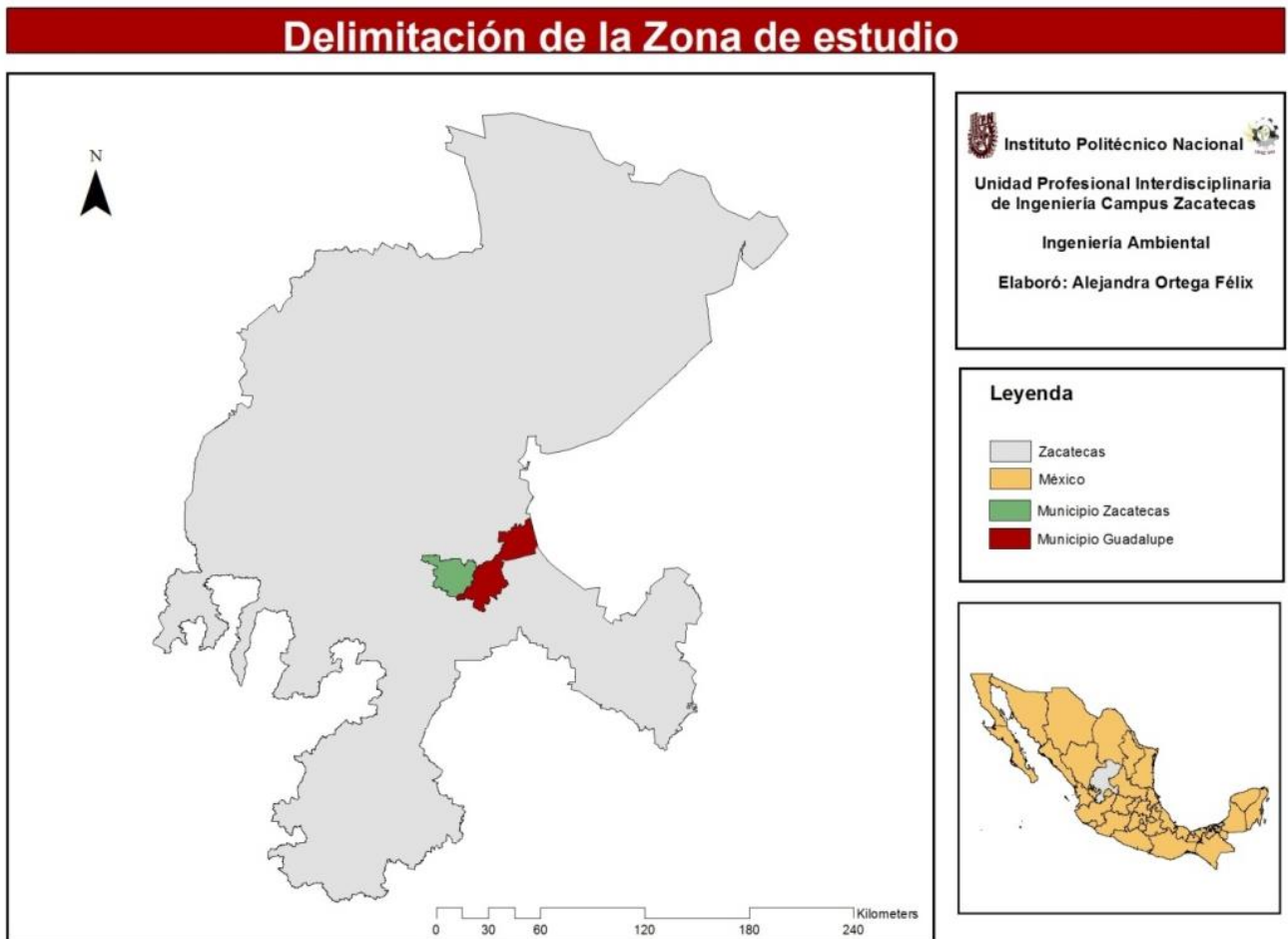


Figura 18. Municipios donde se llevó a cabo el diagnóstico.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005)

La selección e identificación de la zona de estudio se hizo mediante la proporción de listas de los establecimientos de alojamiento temporal y elaboración de alimentos y bebidas otorgadas por los Ayuntamientos de los municipios de Guadalupe y Zacatecas.

De las listas de los establecimientos se tomaron sólo aquellos ubicados en las principales vías de los municipios de Guadalupe y Zacatecas, que corresponden a la zona centro o metropolitana de ambos municipios, la Avenida García Salinas, Boulevard López Portillo y el centro comercial Galerías Zacatecas.

2.1.2 Diagnóstico de la generación de aceite vegetal usado

La realización del diagnóstico se hizo mediante entrevistas a cada uno de los establecimientos dentro de Guadalupe y Zacatecas con la aplicación de una encuesta (Véase en Anexo 1), tomando en cuenta los siguientes datos de interés:

- Nombre del establecimiento
- Cantidad y frecuencia de generación de los residuos de aceite vegetal
- Precio de venta por litro de los residuos de aceite vegetal
- Si se desea donar el aceite
- Si al establecimiento le interesaría tener publicidad acerca del apoyo al proyecto

2.1.3 Elaboración del mapa de ubicación de establecimientos generados de aceite vegetal usado

La ubicación de los puntos de muestreo, ubicados en el anexo 2 del documento, fue georreferenciado con el uso de un GPS (Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés *Global Positioning System*), al momento de la realización de las encuestas. Se tomaron las coordenadas geográficas y se transformaron en el sistema de coordenadas UTM NAD 1927 Zona 13, con el apoyo del programa “*Transformación de coordenadas TRANINV*”, ubicado en la página de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Derivado de esto, se procedió a hacer la elaboración de un mapa con los puntos de ubicación de los establecimientos encuestados usando como herramienta Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.1.4 Análisis estadístico de los datos

El análisis de información se realizó mediante una base de datos creada en el programa Microsoft Office Excel® en el que la información recopilada en las encuestas se vació, con el fin de elaborar gráficas, para la determinación de la cantidad a disponer de AVU y para la realización del dimensionado de una planta semi-industrial para la producción de biodiésel; para el diseño y elaboración de mapas se hizo mediante SIG.

2.1.5 Diseño de la ruta de recolección de aceite vegetal usado

Con el mapa de ubicación de los establecimientos y el análisis estadístico se hicieron dos propuestas de recolección de los residuos de AVU, utilizando SIG y Google Earth Pro, como apoyo.

2.1.6 Dimensionamiento de una planta semi-industrial para la producción de biodiésel.

El dimensionado de la planta semi-industrial se hizo con base en el análisis estadístico hecho anteriormente, del cual se cuantificó la cantidad de residuos de AVU a disponer. Se investigaron los equipos con la empresa bio-diesel GRIMA y los insumos a utilizar dentro del proceso.

2.2 Producción de biodiésel

Para la obtención de biodiésel se utilizaron 4 lotes de residuos de AVU, los cuales consistieron en: aceite utilizado en producción de frituras (2), aceite utilizado en panadería (1) y grasa de pollo (1).

2.2.1 Pretratamiento del aceite vegetal usado

El pretratamiento del aceite vegetal usado llevado a cabo fue la filtración para los dos lotes de aceite de fritura y el lote de aceite de panadería, pasando los residuos de aceite por un filtro (tela de malla fina), eliminando residuos sólidos e impurezas. En el caso de la grasa de pollo se hizo la filtración y se añadió otra etapa que fue la esterificación, donde se adicionaron 6 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y se dejó reaccionar a una temperatura de 60 °C por un tiempo de 90 min (Medina et al., 2014).

Posteriormente se realizó el calentamiento del aceite a unos 65 °C aproximadamente y la reacción de transesterificación (Pérez et al., 2009).

2.2.2 Transesterificación del aceite vegetal usado

La reacción de transesterificación fue llevada a cabo en un prototipo de 10 L (Figura 19) para cada lote, se utilizó metanol en una relación molar 1:3 y como catalizador hidróxido de sodio (NaOH), en un tiempo de 2 h a una temperatura de reacción de 65 °C y una agitación de 720 rpm. Al finalizar la reacción se dejó en reposo por 24 horas para lograr la separación del biodiésel de la glicerina (Castro et al., 2007).



Figura 19. Prototipo utilizado para la producción de biodiésel.
(Prototipo diseñado por: Juan José Saldivar y Pedro Rodríguez)

2.2.2 Purificación del biodiésel

El biodiésel que se obtuvo de la separación con la glicerina, fue llevado a un proceso de purificación a una temperatura de 65 °C por un lapso de 40 min para eliminar residuos de metanol en el biodiésel, ya que estos pueden afectar la calidad fisicoquímica del mismo (Vivas, 2010).

2.2.3 Lavado del biodiésel

Se realizaron lavados con agua acidificada con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para neutralizar el pH del biodiésel y eliminar residuos restantes de NaOH. Finalmente se llevó a cabo la etapa de secado, donde se calentó el biodiésel a temperaturas de 95-100 °C por 120 min para eliminar la humedad restante del proceso de lavado (Vivas, 2010).

2.3 Caracterización fisicoquímica de biodiésel

2.3.1 Densidad (Aceite y biodiésel)

La densidad se determinó mediante el uso de un picnómetro con un volumen de 25 mL a peso constante. Realizando pruebas por triplicado para cada una de las

muestras. Se puso la muestra dentro del picnómetro, se pesó en una balanza analítica y se determinó la densidad con la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad Ec. 1$$

Donde:

ρ = Densidad (g/mL).

m = masa (g).

v = Volumen (mL).

2.3.2 Viscosidad (Aceite y biodiésel)

Este parámetro se hizo mediante un viscosímetro rotacional, en el cual se tomaron 250 mL de muestra de cada uno de los lotes de biodiésel, se realizó por triplicado. Los resultados obtenidos se expresaron en mm²/s.

2.3.3 Humedad y materia volátil (Aceite y biodiésel)

Se hizo uso de la metodología descrita en la norma NMX-F-211-SCFI-2012 “Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales- determinación de la humedad y materia volátil por el método de placa caliente”, la cual describe que en un vaso de precipitado se agregaron 5 ± 0.05 g de la muestra; colocándose en una parrilla eléctrica a una temperatura menor a 130 °C. La aproximación del punto final se juzgó por el cese de burbujas o también por la ausencia de espuma. Cuando el punto final aparente fue alcanzado, se siguió calentando hasta la formación incipiente de humos, evitando el sobrecalentamiento de la muestra. Finalmente, se enfrió la muestra a temperatura ambiente en un desecador y se determinó su masa. Esta prueba se realizó por triplicado para los 4 lotes de aceite y biodiésel y, con el uso de la Ecuación 2 se determinó el porcentaje de *humedad y materia volátil (% HMV)*.

$$\%HMV = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \quad Ec. 2$$

Donde:

M₁ = Masa de la muestra (g).

M₂ = Masa de la muestra sin humedad y materia volátil (g).

2.3.4 índice de saponificación (Aceite y biodiésel)

Según lo establecido en la norma NMX-F-174-SCFI-2014 “Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales- determinación del índice de saponificación”, se colocaron 2 ± 0.05 g de la muestra aproximadamente en un matraz bola de 250 mL y se le agregaron 20 mL de hidróxido de potasio (KOH) en solución alcohólica. Al matraz se le adaptó un refrigerante de reflujo. La saponificación se llevó a cabo de 30 a 35 min para que sea completa. Una vez terminada la saponificación, se le agregó 1 mL de solución indicadora de fenolftaleína al 1.0 %, titulándose a temperatura ambiente con ácido clorhídrico (HCl) 0.5 N. La valoración se realizó hasta que, después de transcurrir medio minuto de que se le agrega la última gota de la solución valorante, se produjera una decoloración de la solución valorada.

Se hizo una prueba en blanco con las mismas condiciones en las que se efectuó la de la muestra y se registró el volumen de la solución de HCl 0.5 N gastado en la valoración. Simultáneamente se preparó un blanco en las mismas condiciones y se reportaron los valores obtenidos de la titulación con HCl 0.5 N. Este procedimiento se realizó por triplicado para los 4 lotes de aceite y biodiésel y se determinó el índice de saponificación (I.S.) mediante la Ecuación 3.

$$I.S. = \frac{V_1 - V}{M} \times 28.05 \quad Ec. 3$$

Donde:

V_1 = Volumen de HCl 0.5 N gastado en la titulación del blanco (mL).

V = Volumen de HCl 0.5 N gastado en la titulación de la muestra (mL).

M = Masa de la muestra (g).

28.05 = Miligramos de KOH equivalente a 1 mL de HCl 0.5 N.

2.3.5 índice de acidez (Aceite y biodiésel)

Utilizando la metodología descrita en la norma ASTM D974 “Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration”, en un matraz Erlenmeyer de 50 mL, se agregaron 1 ± 0.05 g de muestra con 10 mL de alcohol etílico neutralizado, disolviendo la muestra. Posteriormente, se agregó 0.2 mL de fenolftaleína y se valoró con una solución de KOH 0.1 N, agitando frecuentemente hasta que se obtuvo un vire color rosa y éste persistiera durante 30 s. Esta determinación se hizo por triplicado para los 4 lotes de aceite y de biodiésel. Se realizó una prueba con un blanco en las mismas condiciones en las que se efectuó la muestra y se registró el volumen de la solución de KOH 0.1 N gastado en la valoración. El resultado del índice de acidez (I.A.) se expresó en mg de KOH de acuerdo a la Ecuación 4.

$$I.A. = \frac{(V - V_1) \times N \times 56.1}{M} \quad Ec. 4$$

Donde:

V_1 = Volumen de KOH 0.1 N gastado en la titulación del blanco (mL).

V = Volumen de KOH 0.1 N gastado en la titulación de la muestra (mL).

M = Masa de la muestra (g).

56.1 = Equivalente químico de la potasa.

N = Normalidad de la muestra.

2.3.6 índice de yodo (Biodiésel)

De acuerdo con la metodología propuesta por la norma NMX-F-152-SCFI-2011 "Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales- determinación del índice de yodo por el método de ciclohexano", en un matraz de 500 mL con tapón de vidrio se pesaron entre 0.05 ± 0.005 g de la muestra, se agregaron 2 mL de cloroformo (CHCl_3) y 5 mL del reactivo de Hanus, agitando vigorosamente. Se prepararon simultáneamente 2 testigos para cada uno de los lotes de biodiésel.

Se dejaron en reposo los matraces por 30 min evitando el contacto con la luz solar. Al transcurrir este tiempo, se añadieron 2 mL de la solución de yoduro de potasio (KI) al 15 % y se agitó vigorosamente. Finalmente, se agregaron 20 mL de agua, previamente hervida, a temperatura ambiente.

Se realizó la valoración del índice de yodo con una solución de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta un punto de vire color amarillo. Posteriormente, se agregaron 0.1 mL de solución de almidón al 1 % y se continuó la titulación hasta un vire de azul intenso a incoloro o amarillo paja. Se realizó una prueba con un blanco en las mismas condiciones en las que se efectuó la muestra y se registró el volumen de la solución de tiosulfato 0.1 N gastado en la valoración.

Finalmente, el índice de yodo (I.Y.; expresado en g de I_2 / 100 g de aceite) se calculó con la Ecuación 5.

$$I.Y. = \frac{(V_1 - V) \times N \times 12.69}{M} \quad Ec. 5$$

Donde:

V_1 = Volumen de tiosulfato de sodio 0.1 N gastado en la titulación del blanco (mL).

V = Volumen de tiosulfato de sodio 0.1 N gastado en la titulación de la muestra (mL).

M = Masa de la muestra (g).

12.69 = Equivalente químico del yodo.

N = Normalidad de la muestra.

2.3.7 índice de Peróxido (Aceite)

Según la norma NMX-F-154-SCFI-2011 “Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales- determinación del valor del peróxido”, se colocaron 1 ± 0.05 g de la muestra dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se añadieron 10 mL de la solución de ácido acético-cloroformo (3:2) y se agitó hasta disolver la muestra de aceite completamente.

Posteriormente, se adicionaron 0.1 mL de la solución saturada de KI, se agitó y se dejó reposar durante 1 min, después se agregaron 10 mL de agua destilada recientemente hervida. Se valoró la muestra con una solución de tiosulfato de sodio 0.1 N, agitando vigorosamente después de cada adición hasta obtener un vire ligeramente amarillo. Se agregó 0.1 mL de la solución de indicadora de almidón y se procedió con la valoración de la muestra hasta la desaparición del color azul.

Se realizó una prueba con un blanco en las mismas condiciones en las que se efectuó la muestra y se registró el volumen de la solución de tiosulfato 0.1 N gastado en la valoración.

Finalmente, el índice de peróxido (I.P.; expresado en miliequivalentes de peróxido contenidos en un kilogramo de grasa o aceite) se calculó con la Ecuación 6.

$$I.P. = \frac{(V - V_1) \times N \times 1000}{M} \quad Ec. 6$$

Donde:

V_1 = Volumen de tiosulfato de sodio 0.1 N gastado en la titulación del blanco (mL).

V = Volumen de tiosulfato de sodio 0.1 N gastado en la titulación de la muestra (mL).

M = Masa de la muestra (g).

N = Normalidad de la muestra.

2.3.8 Corrosión en lámina de cobre (Biodiésel)

Para determinar este parámetro se hizo uso de la metodología propuesta por la ASTM D130 “Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Cooper Strip Test”.

En un vaso de precipitado de 50 mL, se depositó una tira de cobre, previamente pulida con una lija hasta desaparecer la opacidad, cubriéndola con la muestra. El vaso se colocó sobre una parrilla eléctrica hasta alcanzar una temperatura de 100 °C en la muestra, la cual se mantuvo por 3 h en calentamiento. Transcurrido este tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se retiró la laminilla de cobre, se lavó con agua destilada y se dejó secar al ambiente.

Se comparó el color obtenido de la tira de cobre con la lámina patrón ASTM COPPER STRIP CORROSION STANDARDS (ASTM METHOD D130/IP 154) mostrado en la Figura 20, expresándose en niveles de corrosión según corresponda.



Figura 20. Lámina patrón ASTM COPPER STRIP CORROSION STANDARDS (ASTM METHOD D130/IP 154).

2.4 Determinación de la factibilidad económica, social y ambiental del reciclaje del aceite vegetal usado para la producción de biodiésel

La factibilidad económica se determinó mediante un análisis de los costos de producción para posteriormente realizar un balance económico y así determinar los costos de producción de biodiésel utilizando como materia prima aceite vegetal usado, los parámetros evaluados fueron:

- Gastos de recolección.
- Insumos utilizados en el proceso de producción de biodiésel.

- Gasto de energía eléctrica, agua y mano de obra.

Para el cálculo del costo total de biodiésel producido por lote, se hizo una propuesta, la cual se muestra en la Ecuación 7.

$$X \text{ rec.} + Y \text{ prod.} + Z = \text{Costo total de biodiésel} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

X rec.= es el costo de recolección (\$ M.N.).

Y prod. = es el costo de producción (\$ M.N.).

Z = Mano de obra – 20 % costo total de producción (\$ M.N.).

Con éstos parámetros evaluados, se escalaron a una producción de un lote de 1000 L para posteriormente sacar el precio por litro.

La factibilidad social se determinó mediante una propuesta en donde el biodiésel sea utilizado en una línea del transporte público de Guadalupe y Zacatecas, denominada “Transportes de Guadalupe”, proponiendo utilizar mezclas de biodiésel desde B5 hasta B20 para ir adaptando los motores de los autobuses y así evitar daños en el motor.

En la Ecuación 8 se presenta una fórmula para estimar el consumo de combustible de cada uno de los autobuses para una mezcla diésel-biodiésel (Díaz, 2014):

$$EC_{\text{autobús}} = Ef_c * R_a * (BX) \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

$EC_{\text{autobús}}$ = Combustible requerido para el autobús (L).

Ef_c = Eficiencia del uso del combustible (L/Km).

R_a = Total de kilómetros recorridos (Km).

BX = Porcentaje de diésel + biodiésel, asumiendo una eficiencia similar tanto para el diésel como el biodiésel.

Para determinar la cantidad de biodiésel a utilizar en el autobús, se propone el uso de la Ecuación 9 y partiendo de ahí se puede estimar la cantidad requerida para toda la línea de transporte público dependiendo la cantidad de autobuses que se tengan (Díaz, 2014).

$$EC_{\text{biodiésel}} = EC_{\text{autobús}} \times \% \text{Biodiésel} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

$EC_{\text{biodiésel}}$ = Combustible requerido de biodiésel para el autobús (L).

$EC_{\text{autobús}}$ = Combustible requerido para el autobús (L).

CAPÍTULO 3. Análisis y discusión de los resultados

3.1 Diagnóstico de la cantidad de residuos de AVU.

En la ZMEZ se encuestaron 97 establecimientos de giro de alojamiento temporal y producción de alimentos, correspondientes a los sitios de estudio, a los cuales se les aplicó la encuesta (Figura 21).



Figura 21. Localización de establecimientos encuestados
Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005)

De los 97 establecimientos encuestados, como se muestra en la Figura 21, el 62 % pertenece a los restaurantes (verde), el 12 % al sector de hotelería (amarillo), el 18 % a la categoría de comida rápida (rojo) y finalmente el 8 % restante a las rosticerías (azul).

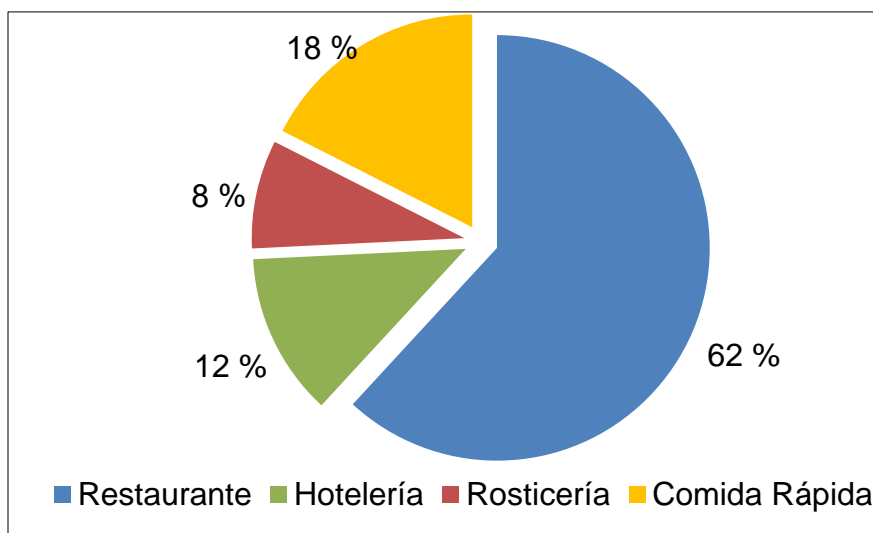


Figura 22. Tipos de establecimientos generadores de aceite vegetal usado.

De acuerdo con la Figura 22, el sector que tiene mayor presencia dentro de la zona muestreada es el de restaurantes dentro de los cuales se consideran restaurantes gourmet y familiares, de los establecimientos de comida rápida se consideraron los que contaban con freidoras, tomando en cuenta si provenían de franquicias o cadenas. En la Figura 23 se presentan los establecimientos que se encuentran dentro de una franquicia o si provienen de independientes.

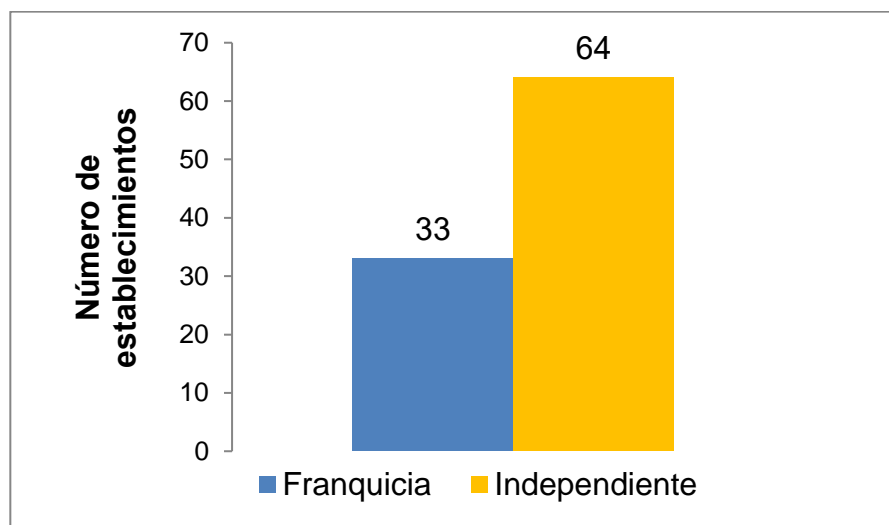


Figura 23. Régimen del establecimiento.

De los 97 establecimientos encuestados, 33 establecimientos provienen de franquicias o de cadenas, mientras que 64 pertenecen a personas físicas o

morales de forma independiente. El régimen del establecimiento es un factor que afecta directamente a la donación de los residuos de AVU, ya que al pertenecer a una franquicia varios de los establecimientos cuentan con políticas internas en la que otorgan los residuos a empresas externas a éstas con las que cuentan con convenios, presentando una disminución en los residuos a disponer para la producción de biodiésel.

Haciendo referencia en la generación de los residuos de AVU, se tiene que 87 de los 97 establecimientos sí generan residuos de aceite, mientras que los 10 establecimientos restantes no tienen generación, tal como se muestra en la Figura 24.

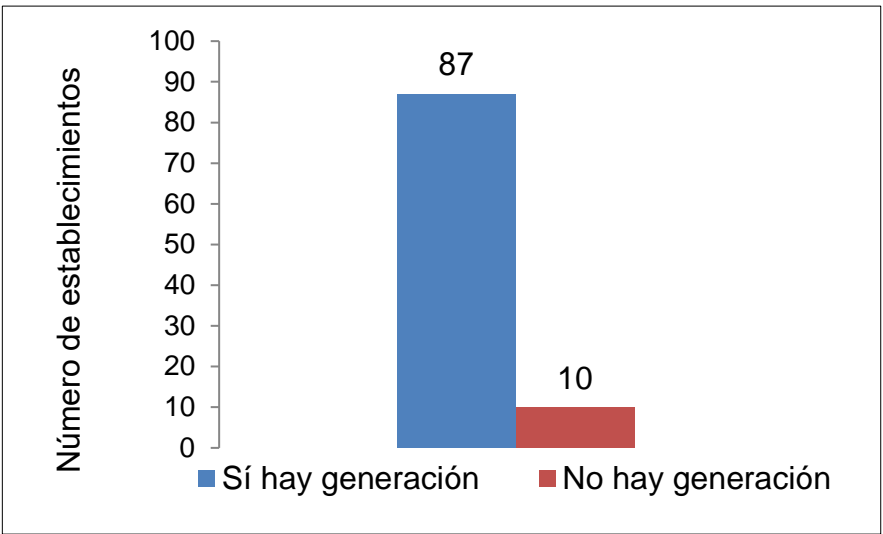


Figura 24. Generación de residuos de aceite vegetal usado.

De los 87 establecimientos que tienen generación de residuos de AVU se hizo una clasificación de acuerdo al tipo de establecimiento y la cantidad generada, como se observa en la Figura 25.

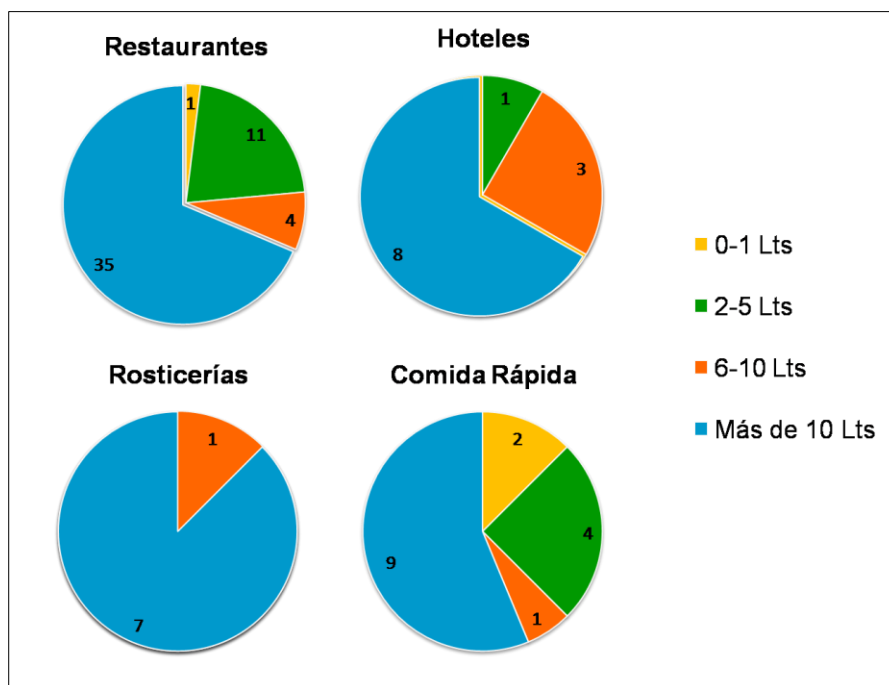


Figura 25. Generación de residuos de aceite vegetal usado por sector.

Como se muestra en la Figura 25, la clasificación que tiene mayor generación de residuos de AVU es de más de 10 L en los cuatro sectores, siendo el sector de restaurantes el de mayor generación, el número de establecimientos con una generación de más de 10 L son 59 en total de los cuales 35 corresponden al sector de restaurantes, 8 al sector de hoteles, 7 a rosticerías y los 9 establecimientos restantes al sector de comida rápida, indicando que el sector con mayor impacto en la generación de residuos de AVU para la producción de biodiésel es el de restaurantes.

Otro punto que se tomó de la encuesta fue el destino que los establecimientos daban a los residuos de AVU, encontrándose la reutilización en las mismas condiciones de producción de alimentos y el reciclaje para la posible producción de biodiésel por medio de empresas externas así como la disposición como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), el cual se presenta en la Figura 26.

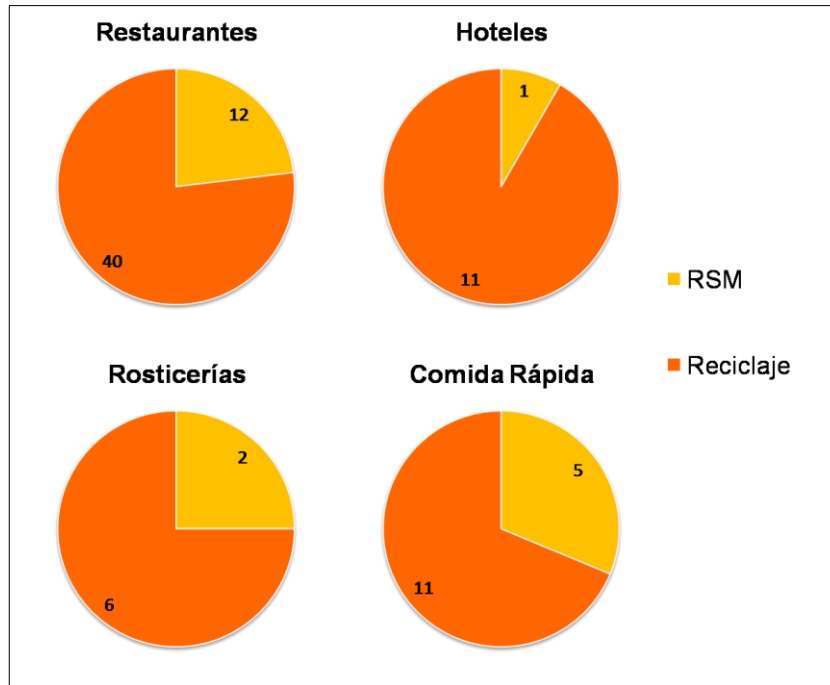


Figura 26. Disposición de los residuos de aceite vegetal usado por sector.

De los 87 establecimientos con generación de residuos de AVU 67 le dan un reciclaje, mientras que los 20 establecimientos restantes lo disponen como RSU. Para el reciclaje de los residuos la mayoría de los establecimientos lo hace mediante empresas externas, los cuales se venden; en la Figura 27 se observa el precio de venta para los residuos de AVU.

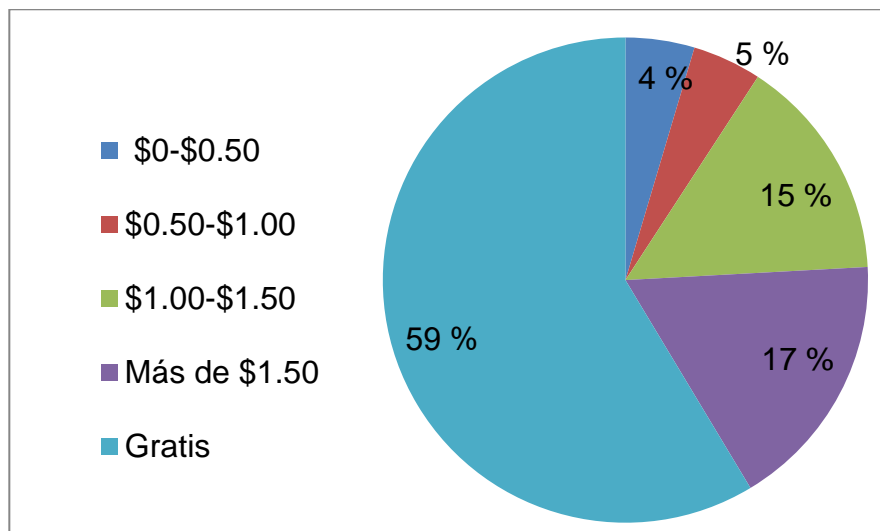


Figura 27. Precio de venta de los residuos de aceite vegetal usado.

En la Figura 27 se observa el precio de venta de los residuos AVU que los establecimientos creen más aptos para este tipo de residuos, de los 87 establecimientos encuestados, el 59 % considera que este tipo de residuo puede manejarse de forma gratuita, mientras que el 17 % considera un precio de venta de más de \$1.50 M.N. por litro para los residuos de aceite, el 15 % cree apropiado un precio de venta de \$1.00 a \$1.50, el 5 % considera de \$0.50 a \$1.00 y el 4% restante un precio que va de \$0 a \$0.50, el cual representa los costos que se van a tener en la materia prima, considerando la compra de ésta. De igual manera se preguntó a los establecimientos si estaban dispuestos a donar los residuos, de los cuales el 77 % de los 87 establecimientos con generación de residuos están dispuestos a donarlos, mientras que el otro restante no, como se muestra en la Figura 28.

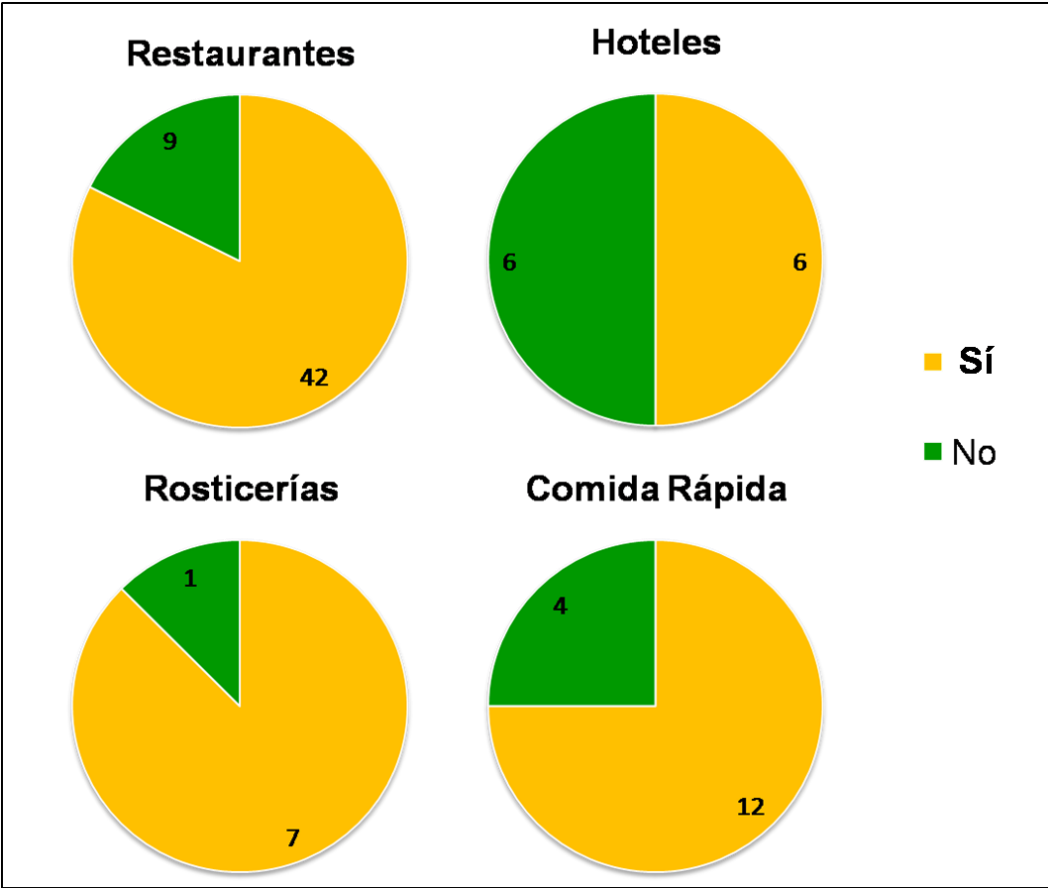


Figura 28. Establecimientos dispuestos a donar los residuos de aceite vegetal usado por sector.

En la Figura 28 se observa que en los cuatro sectores entrevistados hay disposición para donar los residuos, los establecimientos que no están dispuestos a donar corresponden en su mayoría a los sectores de restaurantes, hoteles y comida rápida, debido a que cuentan con convenios con empresas externas que

compran los residuos de aceite, al igual que varios de los establecimientos reutilizan los residuos de aceite para el mismo proceso de producción de alimentos o en el caso del establecimiento de rosticería para la engorda de animales de crianza; para la producción de biodiésel a partir del reciclaje de los residuos de aceite vegetal usado se tomaron en cuenta sólo los establecimientos que están dispuestos a donar los residuos, ya que habría una reducción en los costos de producción y por lo tanto en el precio final del biodiésel.

Otro factor tomado en cuenta fue el interés de los establecimientos en tener publicidad acerca de que su establecimiento donó sus residuos de AVU y es “amigable” con el medio ambiente, de los cuales de los 67 establecimientos que están dispuestos a donar sus residuos todos aceptan este tipo de publicidad.

El régimen en el que se encuentra el establecimiento indica la disposición que tiene para donar los residuos de AVU, ya que si pertenece a una franquicia o cadena, cuenta con convenios con empresas que se encargan de la recolección y tratamiento de los residuos; presentando una desventaja, puesto que disminuye la cantidad a disponer de residuos de AVU para la producción de biodiésel.

Otro factor importante que se tomó en cuenta para la realización de este diagnóstico fue la frecuencia de generación de residuos de AVU, ya que éstos ayudan al diseño de una ruta de recolección eficiente, para así poder darle un buen tratamiento o disposición a este tipo de residuos. En la Figura 30 se muestra la frecuencia de generación de los residuos de AVU para los 67 establecimientos que están dispuestos a donar sus residuos.

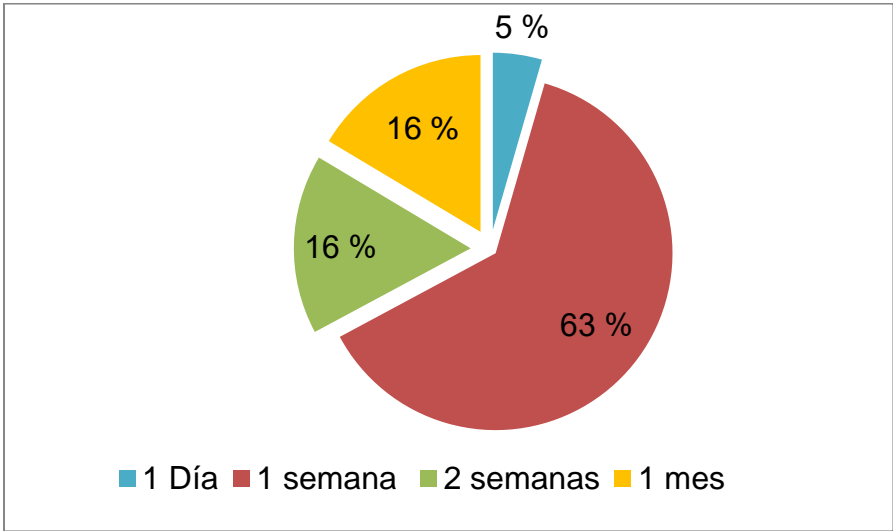


Figura 29. Frecuencia de generación de residuos de aceite vegetal usado.

Según la Figura 29, el 63 % de los 67 establecimientos con generación de residuos de AVU presenta una frecuencia de generación de 1 semana, mientras que el 16 % una frecuencia de 2 semanas, el otro 16 % de un mes y el 7 % de 1 día, esta frecuencia influye sobre los costos de producción de biodiésel, ya que es una de las etapas que tiene mayor consecuencia económica del sistema de manejo de los residuos y si se tiene un buen sistema de recolección, permitirá la minimización en los costos.

Según los resultados obtenidos por el diagnóstico realizado, la cantidad de residuos de AVU a disponer mensualmente corresponde a un aproximado de 3,299 L, considerando los 67 establecimientos que están dispuestos a donarlos; siendo esta una opción económicamente viable para reducir los costos en la materia prima para el proceso de producción de biodiésel.

Los sistemas de recolección tienen la función de recorrer las áreas donde están ubicadas las fuentes de generación, recolectar los residuos y transportarlos a los sistemas de tratamiento o disposición final. Esta es una de las acciones relacionadas con la disminución de problemas ambientales, ya que dan un tratamiento a un residuo que es desechado frecuentemente en el drenaje y en el suelo causando problemas en las redes de saneamiento y plantas de tratamiento de aguas residuales o derrames tanto en suelo como en sistemas acuáticos.

El diseño de las rutas de recolección está basado principalmente en la cantidad y frecuencia de los residuos; estos dos factores van a determinar qué tipo de sistemas o equipos harán la recolección, cuál será el método utilizado para la recolección, así como los siguientes aspectos propuestos por la Secretaría de Desarrollo Social para el diseño de las rutas de recolección (SEDESOL, 1997):

- Número y tipo de equipo seleccionado
- Tamaño de la tripulación
- Frecuencia de recolección
- Distancia total de la ruta de recolección
- Maniobrabilidad de los contenedores
- Topografía del terreno
- Tráfico en la ruta y condiciones de los caminos

Tomando en cuenta las medidas propuestas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados.

a) Número y tipo de equipo seleccionado.

La recolección se hará mediante un vehículo de 3 toneladas modelo Ford F-350 con capacidad de cargar dos recipientes de plástico con capacidad de 1000 litros denominados comúnmente como “Totes”, como se observa en la Figura 30.



Figura 30. Vehículo y recipientes a utilizar en la recolección de aceite vegetal usado.

b) Frecuencia de recolección, distancia total de la ruta y número de viajes por turno: Se hicieron dos propuestas de recolección para los 67 establecimientos las cuales se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Propuestas de rutas de recolección.

Propuesta de recolección		Número de establecimientos	Frecuencia de recolección	Cantidad de AVU en litros (residuo)	Distancia total de la ruta de recolección en Km	Número de viajes
Propuesta 1	Ruta 1	38	Quincenal	1,411	49.32	2
	Ruta 2	57		1,915	55.89	3
	Ruta 3	53		1,569	54.40	3
Propuesta 2	Ruta 1	67	Mensual	3,299	70.56	4

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 6, se observan las dos propuestas realizadas para la recolección de los residuos de AVU para los 67 establecimientos, seleccionando la Propuesta 1, como más factible, ya que al tener una frecuencia de recolección de cada quincena se evita la generación de malos olores en los establecimientos, así como los problemas estéticos que se puedan presentar al tener presentes los residuos, otro punto a destacar es la disposición que tienen los establecimientos para retener los residuos. Las distancias totales manejadas en las dos propuestas son similares, ya que los establecimientos se concentran en puntos estratégicos de la

ciudad, como son el centro histórico de Zacatecas, el centro de Guadalupe y en las principales avenidas de la ZMEZ.

- c) **Jornada laboral en horas:** 8 horas
- d) **Tiempo disponible en minutos:** El tiempo en que se llevará a cabo la recolección a cada establecimiento se estima en 20 minutos.
- e) **Tamaño de la cuadrilla:** El tamaño de la cuadrilla se reduce a una persona para la recolección y una persona para maniobrar el vehículo que se encargue de la recolección, debido a la cantidad de establecimientos y la cantidad de residuos a recolectar.
- f) **Maniobrabilidad de los contenedores:** La recolección se hará de forma manual con el *Método de esquina o parada fija* el cual consiste en que el vehículo recolector se estaciona en cada establecimiento y recoge manualmente los residuos, este es uno de los métodos más económicos en la que se requiere alta demanda de participación tanto de los establecimientos como del recolector (SEDESOL, 1997).

En las figuras 31, 32 y 33 se presentan las rutas de recolección diseñadas para la primera propuesta, mientras que la Figura 34 representa el diseño de la ruta de recolección para la segunda propuesta.

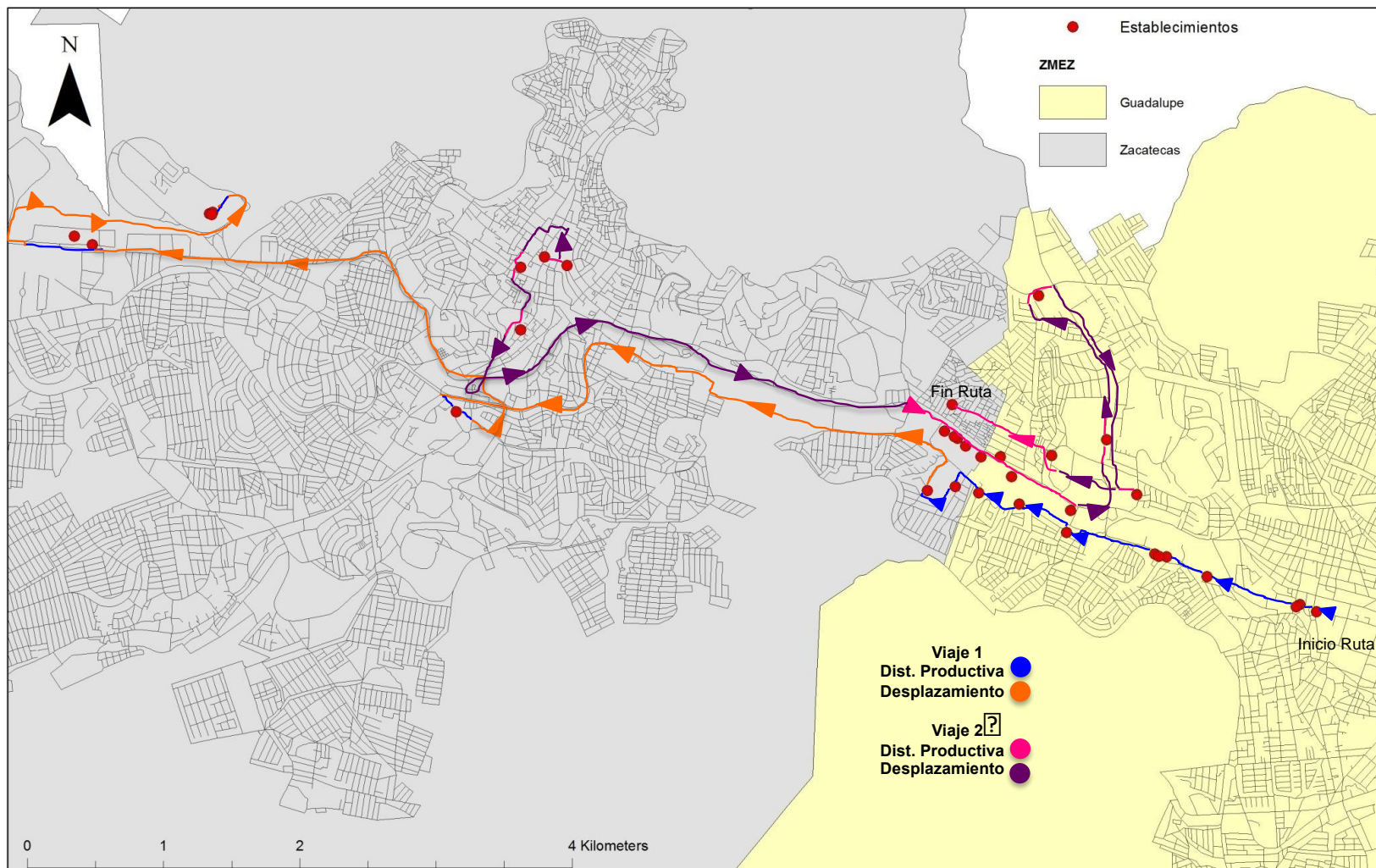


Figura 31. Ruta de recolección 1, primera propuesta.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005) & INEGI (2015).

En la Figura 31, se observa la Ruta 1 para la primera propuesta, tiene un recorrido a un total de 38 establecimientos, de los cuales abarca un total de 49.32 Km con una cantidad total de AVU de 1,411 litros.

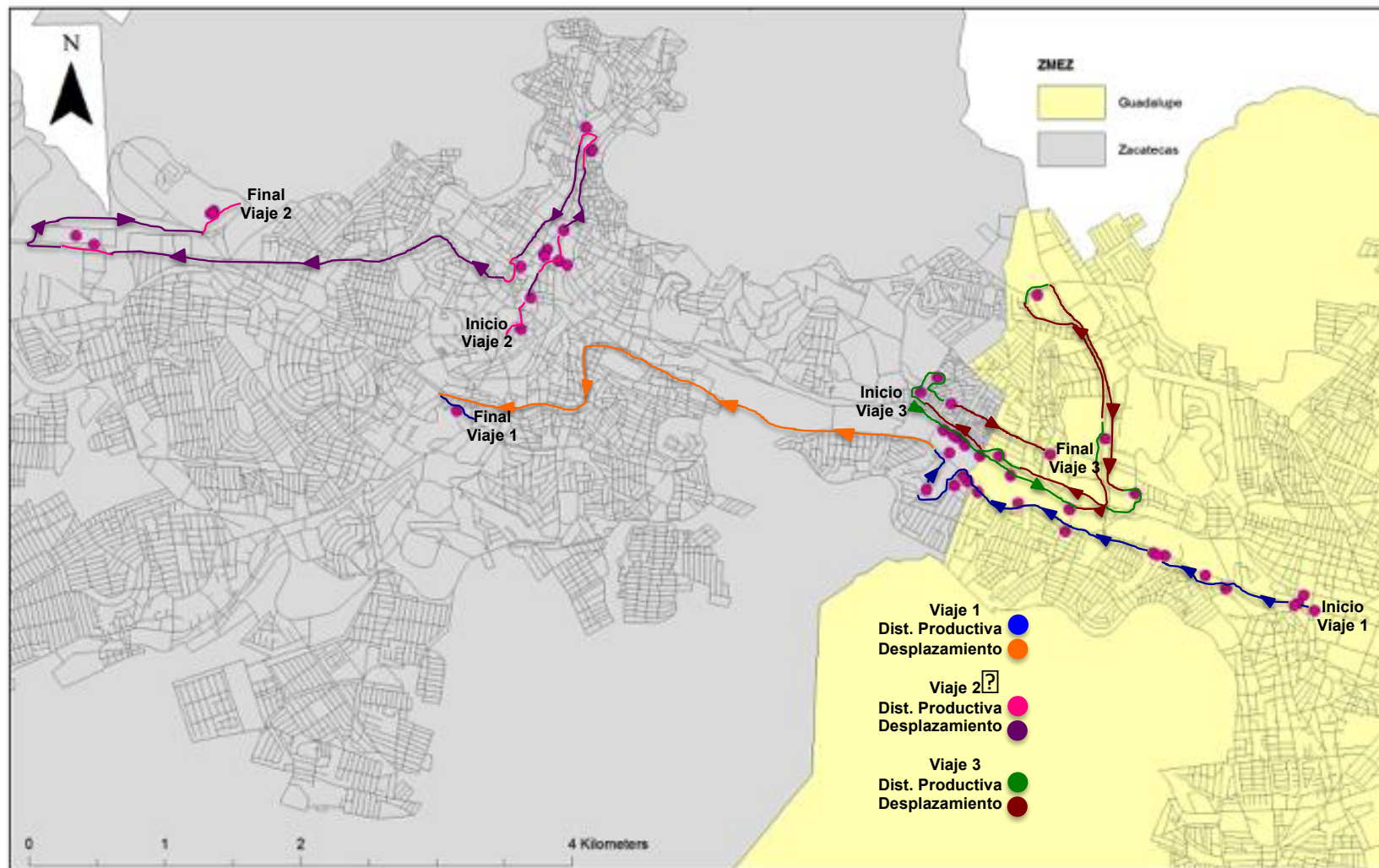


Figura 32. Ruta de recolección 2, primera propuesta.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005) & INEGI (2015).

En la Figura 32, se observa la Ruta 2 para la primera propuesta, tiene un recorrido a un total de 57 establecimientos, de los cuales abarca un total de 55.89 Km con una cantidad total de AVU de 1,915 litros.

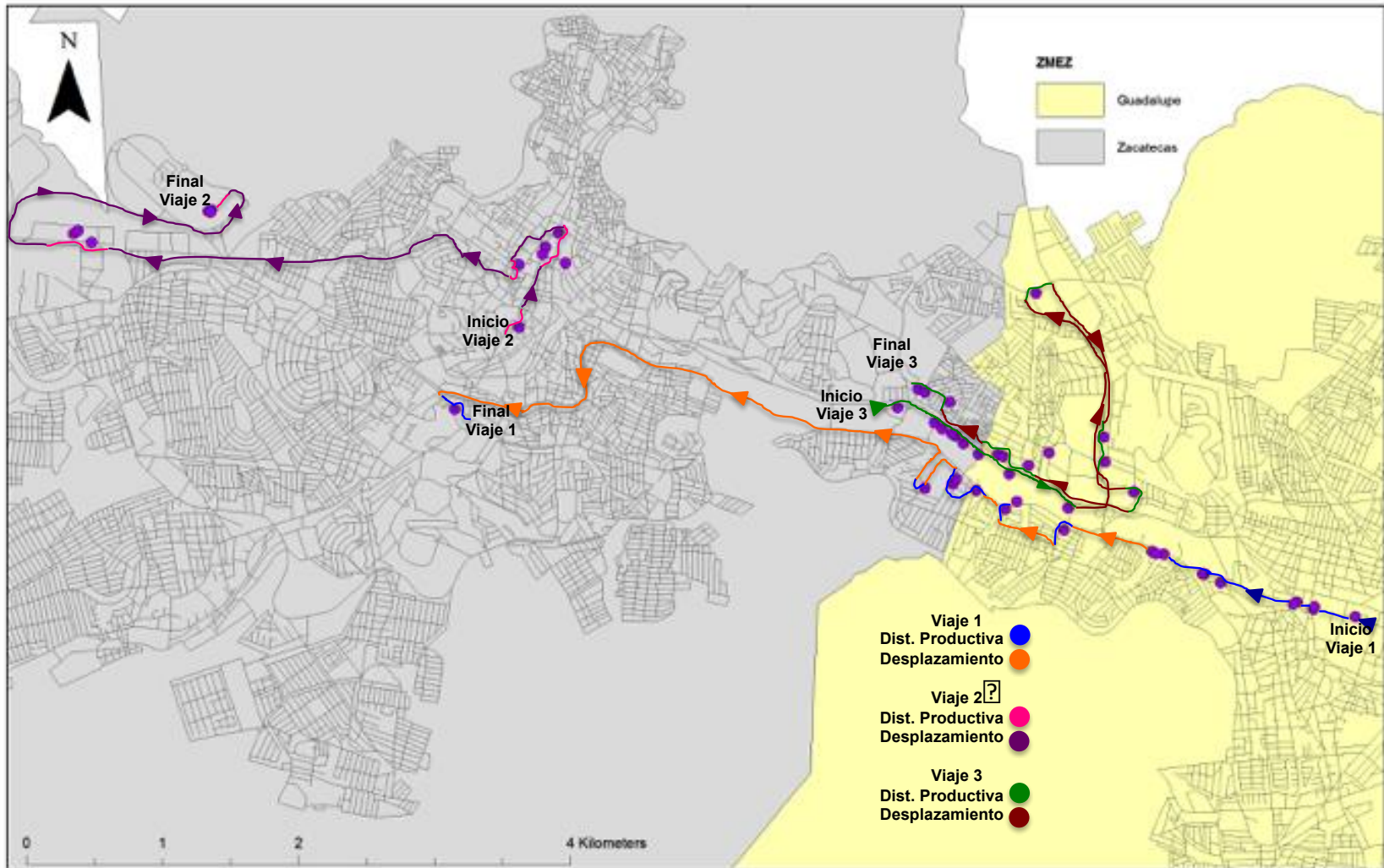


Figura 33. Ruta de recolección 3, primera propuesta.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005) & INEGI (2015).

En la Figura 33, se observa la Ruta 3 para la primera propuesta, tiene un recorrido a un total de 53 establecimientos, de los cuales abarca un total de 54.40 Km con una cantidad total de AVU de 1,569 litros.

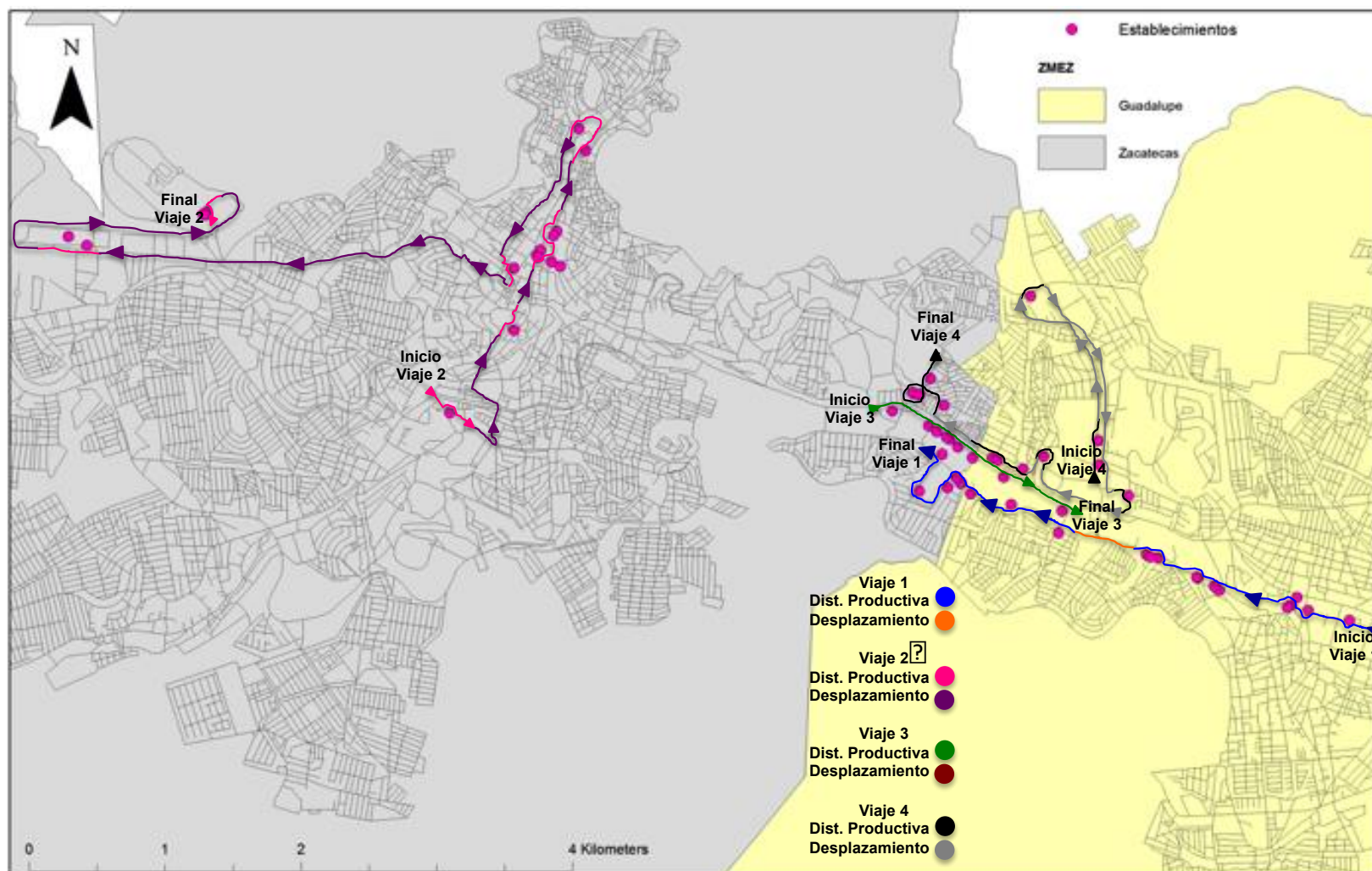


Figura 34. Ruta de recolección 1, segunda propuesta.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2005) & INEGI (2015).

En la Figura 34, se observa la Ruta 1 para la segunda propuesta, tiene un recorrido a un total de 67 establecimientos, de los cuales abarca un total de 58.56 Km con una cantidad total de AVU de 3,299 litros.

De las rutas propuestas puede observarse la ubicación de los establecimientos, los viajes a realizar por el vehículo recolector, así como las distancias productivas, distancias en las que el vehículo recolector sólo se desplaza, dirección o el sentido en que va la ruta de recolección. Para las dos propuestas se observa un aproximado de 6-8 km de distancias productivas, ya que como se mencionó anteriormente los establecimientos se concentran en zonas estratégicas en los municipios de Guadalupe y Zacatecas.

Los beneficios que presenta el diseño de las rutas de recolección son la disminución de costos en la recolección, el tratamiento adecuado de los residuos, disminución de la frecuencia de recolección, así como flexibilidad y facilidad en la recolección.

Las desventajas que se presentaron en el diseño de las rutas de recolección corresponden a la topografía del estado, ya que el municipio de Zacatecas cuenta con zonas con un relieve significativo, así como calles estrechas, calles de 1 sólo sentido, callejones sin salida y privadas, dificultando el diseño y optimización de las rutas.

3.2 Producción de biodiésel a partir de residuos de AVU en reactor prototipo con capacidad de 10 L por catálisis homogénea básica

Del diagnóstico realizado anteriormente, se tiene que mensualmente se pueden disponer aproximadamente 3,299 L de AVU como materia prima para la producción de biodiésel. De los 3,299 L a disponer para reciclaje, 558 L corresponden a rosticerías, 347 L a hoteles, 317 a establecimientos de comida rápida y 2,107 a restaurantes; mostrando que este último es el que tiene mayor generación de residuos de AVU, que en su mayoría destaca el aceite de canola para la producción de alimentos. Se utilizaron 4 tipos distintos de materia prima para producir 4 lotes de biodiésel en un reactor prototipo con una capacidad de 10 L (Figura 18), los cuales se presentan en la Figura 35 (Lote 1), Figura 36 (Lote 2), Figura 37 (Lote 3) y Figura 38 (Lote 4).

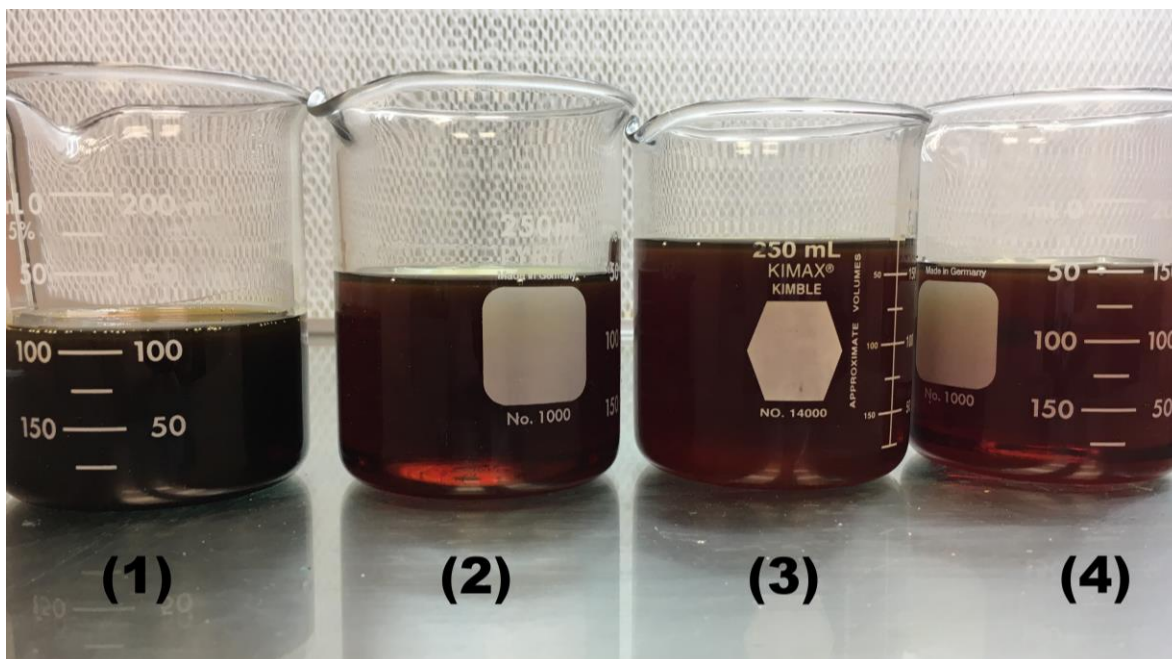


Figura 35. Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 1.

En la Figura 35 se representa la transformación de la materia prima en biodiésel en cada una de las etapas llevadas a cabo en el proceso donde se hizo la producción de biodiésel utilizando como materia prima aceite de fritura, debido a la nitidez de la fotografía y la similitud que se presenta en los colores, en la etapa (1) donde se llevó a cabo el pretratamiento realizado al aceite que fue la filtración, físicamente se pudo observar que el aceite presenta un color muy oscuro, en la etapa (2) representa el biodiésel obtenido de la reacción de transesterificación donde se pudo distinguir una clarificación del color, en la etapa (3) se observa un color más turbio debido a la humedad adquirida con los lavados, la última etapa (4) representa el biodiésel después del secado donde se observa un color más claro que todas las etapas realizadas previamente.

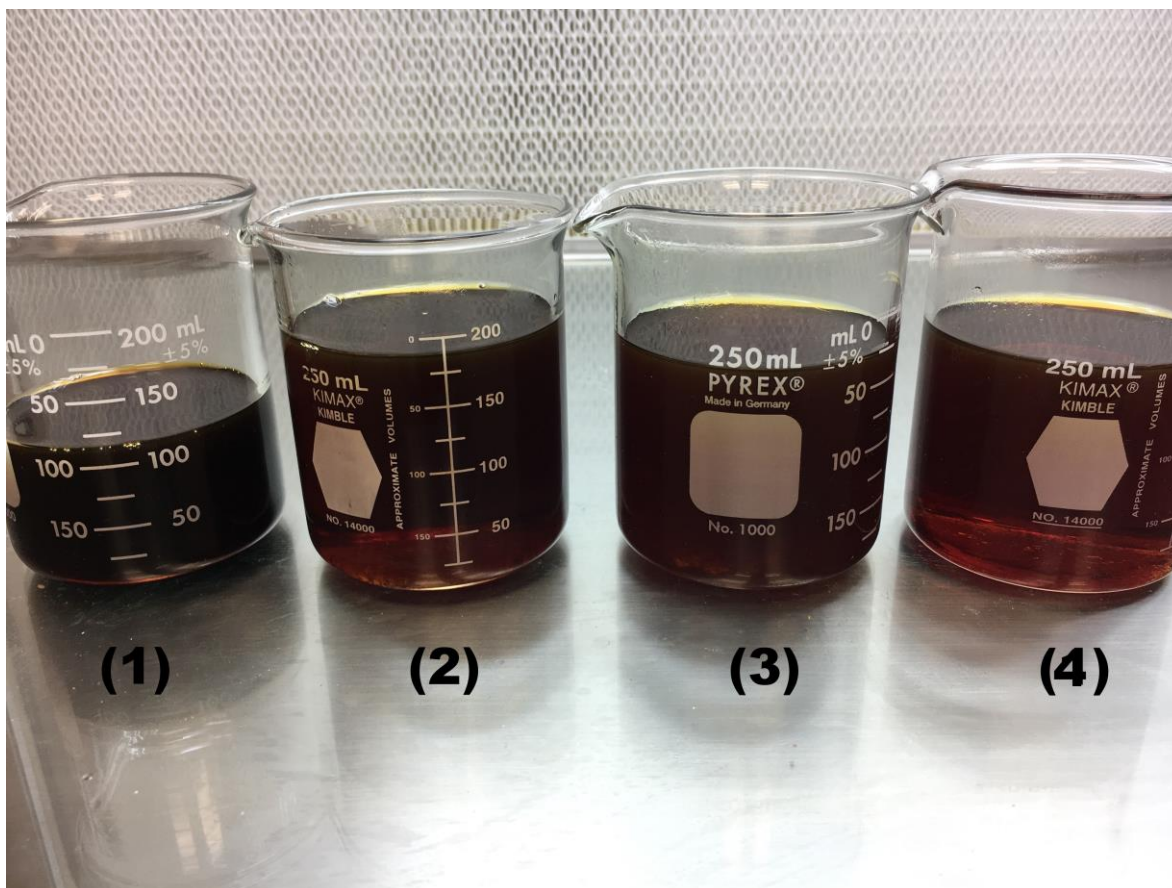


Figura 36. Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 2

En la Figura 36 se observan los productos obtenidos de las etapas llevadas a cabo en el proceso de producción de biodiésel utilizando como materia prima aceite de fritura, debido a la nitidez y calidad de la imagen no se pueden apreciar el cambio de color en las etapas pero físicamente se pudo observar que en la etapa (1) donde el pretratamiento realizado al aceite que fue la filtración, para la remoción de sólidos e impurezas, es donde la materia prima (aceite) presenta un color más oscuro y turbio, en la etapa (2) representa el biodiésel obtenido después de la reacción de transesterificación donde se observa un cambio de color más claro; la etapa (3) se observa un color más turbio debido a la humedad adquirida con los lavados, la última etapa (4) representa el biodiésel después del secado donde se observa un color más claro que todas las etapas previas.

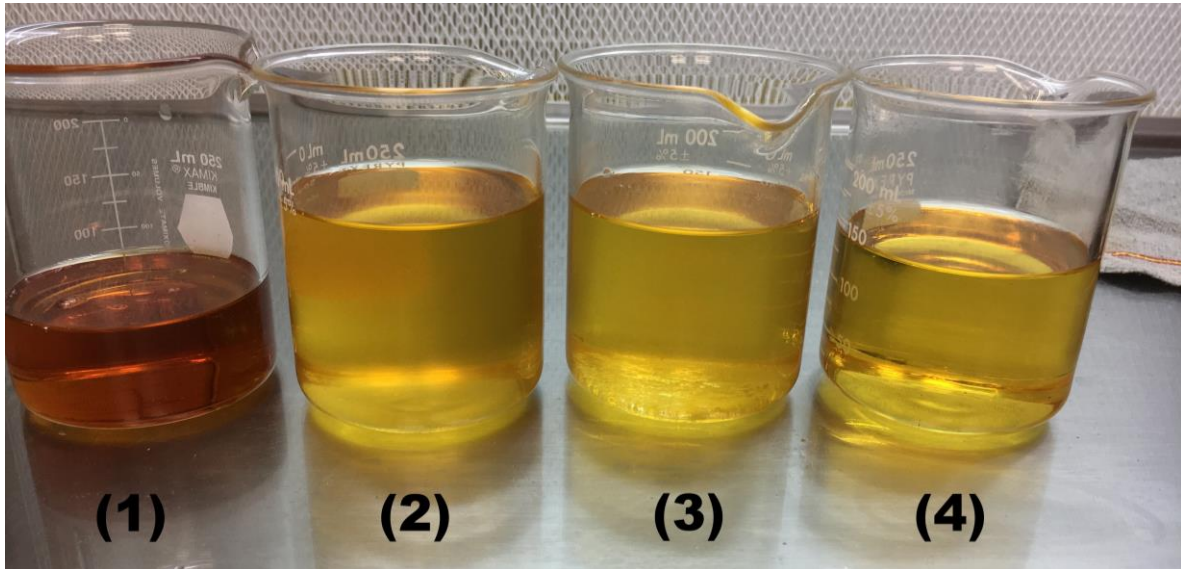


Figura 37. Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 3.

La Figura 37 representa la colorimetría obtenida de las etapas llevadas a cabo en la producción de biodiésel utilizando como materia prima aceite proveniente de panadería, en la etapa (1) se hizo el pretratamiento al aceite, que fue la filtración donde se eliminaron impurezas y sólidos presentes y se observa que el aceite presenta un color café; en la etapa (2) se observa el biodiésel obtenido después de la reacción de transesterificación donde se distingue un cambio de color a amarillo; la etapa (3) se observa mayor turbiedad debido a la humedad adquirida con los lavados, la última etapa (4) representa el biodiésel después del secado donde se observa un color más transparente y más claro que todas las etapas previas.

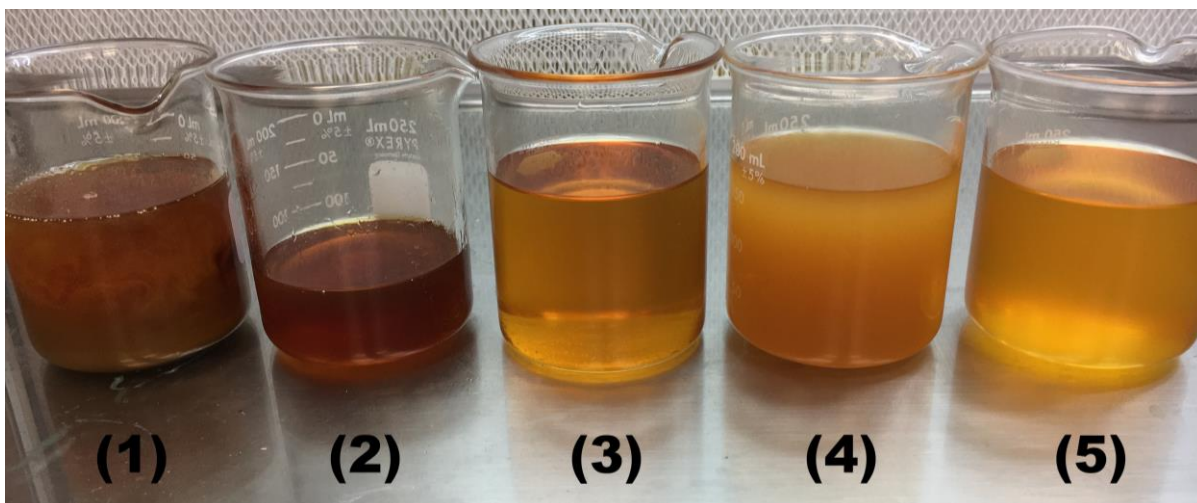


Figura 38. Etapas en el proceso de producción de biodiésel para el Lote 4.

La Figura 38 representa las etapas llevadas a cabo en la producción de biodiésel utilizando como materia prima grasa de pollo, la etapa (1) consistió en una filtración para eliminar residuos sólidos presentes en la grasa, posteriormente, en la etapa (2) se realizó un proceso de esterificación para romper las largas cadenas de triglicéridos, y disminuir los ácidos grasos libres presentes en la grasa y así mejorar la reacción de transesterificación, en la etapa (3) se observa el biodiésel obtenido del proceso de transesterificación, los resultados adquiridos del proceso de lavado se localizan en la etapa (4); mientras que en la etapa (5) se observa el biodiésel en la etapa final después del proceso de secado. En las etapas (1) y (2) se observa un color más café y en la primera etapa se observa presencia de cebo en la grasa, en las etapas posteriores se observa una coloración más amarilla siendo la etapa (4) la que presenta más turbiedad debido al agua adquirida con la humedad.

3.3 Caracterización fisicoquímica de la materia prima para la producción de biodiésel.

La caracterización del aceite sirve para identificar tanto sus propiedades físicas como químicas, las cuales van a influir directamente en los rendimientos obtenidos de la producción de biodiésel así como la calidad del mismo, por esto es importante conocer y determinar las propiedades fisicoquímicas para dar condiciones de operación favorables para obtener el mayor rendimiento y la mejor calidad del biodiésel como combustible. En el Cuadro 7 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del AVU utilizado como materia prima, que fue: aceite de fritura, aceite de panadería y grasa de pollo. Los parámetros

evaluados para el AVU fueron densidad, viscosidad, humedad, acidez e índice de saponificación.

Cuadro 7. Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica del Aceite Vegetal Usado.

Parámetros evaluados del AVU	Valor promedio obtenido			Valores obtenidos por otros autores		
	Aceite de fritura	Aceite de panadería	Grasa de pollo	Aceite puro	Aceite Vegetal Usado (AVU)	Referencias bibliográficas
Densidad (g/mL)	0.92	0.91	0.92	1.00	0.91	(SAGARPA, 2011) (Murcia et al., 2013)
Viscosidad (mm ² /s)	14.16	11.00	16.24	32.60	38.40	(Rodríguez et al., 2011) (Rodríguez, et al., 2017)
Humedad y materia volátil (%HMV)	1.08	1.03	1.40	0.10	0.40	(Díaz, 2015) (Murcia et al., 2013)
Índice de saponificación (mg de KOH/g de aceite)	13.42	7.37	10.01	131.50	201.50	(SAGARPA, 2011) (Murcia et al., 2013)
Índice de acidez (mg de KOH/g de aceite)	3.33	1.11	3.10	0.90	9.19	(SAGARPA, 2011) (Murcia et al., 2013)

(Fuente: Elaboración propia)

En el Cuadro 7 se observan valores similares de densidad tomadas a una temperatura de 25 °C de 0.91-0.92 g/mL consistentes a los presentados en la bibliografía para AVU, mientras que para el aceite en estado puro se le atribuyen valores de 1.0 g/mL, por lo tanto los valores obtenidos para la materia prima son favorables para la producción de biodiésel, ya que al momento de entrar en el proceso de transesterificación hay una disminución de la densidad debido a que hay una separación de los ácidos grasos de la glicerina y al estar en contacto con altas temperaturas dentro del motor se presenta menor densidad debido a la atomización del combustible. La densidad es un parámetro relacionado directamente con el contenido energético que pudiera tener el biocombustible, ya

que de ello depende el grado de saturación de los ácidos grasos del combustible y al tener valores altos indican mayor grado de energía térmica (Castro et al., 2007).

La viscosidad al igual que la densidad es un parámetro que disminuye sus valores al entrar en contacto con altas temperaturas, los valores presentados en el cuadro 7, indican valores que oscilan desde 11.00-16.24 mm²/s, mientras que los valores reportados en la bibliografía para AVU son de 42.20 mm²/s y para aceites en estado puro es de 32.60 para el aceite de colza, que comercialmente es uno de los más económicos y más utilizados en los procesos de producción de alimentos. Los altos valores presentados en la bibliografía para el AVU se pueden atribuir a que al ser utilizados previamente en el proceso de producción de alimentos se pudo haber visto alterada su composición por lo que es importante conocer el uso u origen del AVU donado en cuestión; ya que pudo ser mezclado con otro tipo de aceites o estar en contacto con líquidos solubles. Los aceites vegetales con un alto contenido de ácido oleico (ácido graso monoinsaturado) son los más adecuados para utilizarse en la producción de biodiésel ya que este ácido confiere un equilibrio entre la estabilidad oxidativa y fluidez tanto del aceite como del biodiésel (Castro et al., 2007; Riba et al., 2010; Rodríguez et al., 2011).

En el Cuadro 7 se presentan valores de humedad y materia volátil tanto para las muestras utilizadas como materia prima para la producción de biodiésel (aceite de fritura: 1.08 %, aceite de panadería: 1.03 % y grasa de pollo 1.4 % siendo el más alto) así como lo reportado en la bibliografía para aceite crudo (0.1 %) y AVU (0.4 %). Para el aceite crudo el contenido de agua es mínimo, debido a que en el proceso de purificación es un factor que está siendo monitoreado constantemente por la oxidación. El valor de humedad reportado en la bibliografía para AVU fue de 0.4% y los valores más altos de humedad se presentaron en la materia prima utilizada para la producción de biodiésel que fue en la grasa de pollo (1.4 %), debido a que las grasas están compuestas en su mayoría por ácidos grasos y agua, el aceite de fritura también presentó altos valores de humedad al igual que el aceite de panadería, esto es debido al tratamiento que se le den a los alimentos con el aceite, ya que dentro del proceso de cocción de los alimentos se liberan ácidos grasos libres los cuales facilitan la formación de H₂O. Otro factor que interviene en el aumento de la humedad es debido al deterioro sufrido por el aceite por el uso en la elaboración de frituras, la oxidación debido a su contacto con el medio ambiente así como el tiempo y tipo de almacenamiento (Herrera & Velez, 2008; Galeano & Guapacha, 2011).

La humedad y materia volátil son parámetros clave para determinar la viabilidad del proceso de transesterificación para la producción de un biocombustible, debido a que a altos contenidos de humedad hay formación de jabones, consumo y reducción de la efectividad del catalizador, dificultando la separación del glicerol y la purificación del biodiésel. Cuando hay agua presente, a temperaturas elevadas se puede dar un proceso de hidrolizado de triglicéridos a diglicéridos y dar lugar a la formación de ácidos grasos libres, provocando un aumento en la acidez tanto del biodiésel como en la materia prima (Demirbas, 2008), por eso es importante hacer uso de un pretratamiento a la materia prima que puede ser una evaporización al vacío o hacer uso de sales absorbentes (Castro et al., 2007).

La humedad presente en el aceite va a ser un factor clave para determinar el índice de saponificación que este es un indicador de los ácidos grasos libres presentes en el aceite o la grasa y es directamente proporcional a su masa molecular, es decir, cuanto mayor sea la proporción de ácidos grasos libres, mayor será el índice de saponificación. Éste es un parámetro utilizado para determinar la pureza y estimar aproximadamente el peso molecular promedio de los aceites y de las grasas (Galeano & Guapacha, 2011). En el Cuadro 7 se muestran los valores obtenidos en la determinación del índice de saponificación presentando valores relativamente bajos en comparación con los mostrados en la bibliografía, para el aceite de fritura se presentaron valores de 13.42 mg de KOH/g de aceite, para el aceite de panadería 7.37 mg de KOH/g de aceite y para la grasa de pollo 10.01 mg de KOH/g de aceite, mientras que para el aceite crudo y AVU se encuentran valores de 181.50 y 201.50 mg de KOH/g de aceite respectivamente. Los valores que presenta este parámetro indican que la cantidad de jabón formada en la transesterificación será baja, por lo tanto no existen efectos considerables que afecten el rendimiento de la transesterificación (Sánchez & Huertas, 2012).

Otro parámetro evaluado dentro del Cuadro 7, fue el índice de acidez, cuyas muestras analizadas dieron valores de 3.33, 1.11 y 3.10 mg de KOH/g de aceite, para el aceite de fritura, aceite de panadería y grasa de pollo respectivamente, siendo valores altos en comparación con el aceite en estado puro que muestra valores de 0.90 mg de KOH/g de aceite y para el AVU valores de 9.19 mg de KOH/g de aceite. Los valores presentados dentro de las muestras analizadas son considerados altos debido a la cantidad de ácidos grasos libres presentes en las muestras, los cuales fueron adquiridos de la hidrólisis y de la descomposición lipolítica de algunos triglicéridos. La acidez presenta un valor muy variable dependiendo de las condiciones de uso y de almacenamiento, las grasas o aceites en estado puro presentan valores de acidez muy bajos o casi nulos debido a que no han sufrido ninguna alteración.

El índice de acidez es un valor importante para la reacción de transesterificación ya que los ácidos grasos libres que se encuentran presentes reaccionan con el catalizador (NaOH) dando lugar a la formación de jabones, lo que reduce el rendimiento en la producción de biodiésel. Los jabones presentes dentro del biodiésel promueven la formación de emulsiones que dificultan la producción del biocombustible (Castro et al., 2007).

De los parámetros evaluados se tienen que cuidar los valores de humedad e índice de acidez, para evitar la formación de jabones y bajos porcentajes de rendimiento. Los parámetros que se evaluaron no dan información concluyente del estado cualitativo del aceite, ni da predicciones acerca de cómo se va a dar la reacción de transesterificación, da indicios del pretratamiento que puede ser llevado a cabo para la materia prima, por lo que también es necesario analizar otros parámetros como son: índice de peróxido, índice de yodo, composición química del aceite, cenizas, proteínas, grasa total, entre otros.

En un aspecto técnico, las características recomendadas para un aceite ideal para la producción de biodiésel son (Castro et al., 2007):

- Bajo contenido de ácidos grasos libres, para evitar pretratamientos y maximizar su eficiencia y rendimiento en la transesterificación
- Bajo contenido de material insaponificable que puede dar lugar a la formación de impurezas y depósitos durante su combustión en el motor
- Bajo contenido de agua, ya que el agua favorece la formación de ácidos grasos libres y de jabones
- Bajo contenido de fósforo, para evitar emulsiones durante la transesterificación y purificación del biodiésel y evitar impurezas dentro del biocombustible
- Bajo índice de yodo, para tener mayor estabilidad y almacenamiento del biocombustible
- Dar preferencia a los aceites con ácidos grasos monoinsaturados más que ácidos poliinsaturados

La caracterización de la materia prima es un proceso que puede ser llevado a cabo para lograr mayor eficiencia en el proceso de producción de biodiésel, para identificar el pretratamiento que tiene que llevar la materia prima y así reducir costos en la producción.

3.4 Rendimientos obtenidos en la reacción de transesterificación.

En el Cuadro 8 se muestran los rendimientos obtenidos en la reacción de transesterificación de los 4 lotes de biodiésel provenientes de residuos de AVU.

Cuadro 8. Rendimientos obtenidos en la reacción de transesterificación.

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4
Materia prima utilizada	Aceite de fritura		Aceite de panadería	Grasa de pollo
Rendimiento obtenido (%v/v)	92.72	92.20	84.20	80.00

(Fuente: Elaboración propia)

Los rendimientos obtenidos de la reacción de transesterificación fueron los más altos del 92 % para los lotes 1 y 2 teniendo como materia prima aceite de fritura, según la información presentada en el Cuadro 8. Para el Lote 3 proveniente de aceite de panadería, el rendimiento obtenido fue de 84.20 % debido a que hubo pérdidas de biodiésel al momento de hacer la separación de la glicerina, ya que por la composición del aceite tenía residuos de harina presentes, provocando una ligera solidificación de la glicerina dentro del reactor. El Lote 4 proveniente de grasa de pollo fue el que obtuvo menor rendimiento, debido a que se tuvo que realizar un pretratamiento previo, que fue la esterificación, dejando ácidos grasos libres que no reaccionaron con el catalizador provocando la disminución de su eficiencia.

3.5 Caracterización fisicoquímica del biodiesel obtenido a partir del reciclaje del Aceite Vegetal Usado.

La caracterización fisicoquímica del biodiésel se hace con el fin de hacer un control de calidad, teniendo un control sobre ciertos parámetros fisicoquímicos establecidos por normas internacionales especificadas para el biodiésel, las cuales las más importantes son la norma estadounidense ASTM D6751 y la norma

europea EN 14214. En el Cuadro 9 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del biodiésel así como los límites máximos establecidos en las normas internacionales.

Cuadro 9. Caracterización fisicoquímica del biodiésel producido a partir del reciclaje de AVU.

Parámetros evaluados del biodiésel	Valor promedio obtenido				Valores permisibles ASTM D6751	Valores permisibles EN 14214
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4		
Densidad (g/mL)	0.89	0.89	0.88	0.89	-	0.86-0.90
Viscosidad (mm ² /s)	3.41	3.60	2.82	3.76	1.9-6.0	3.5-5.0
Humedad y materia volátil (% HMV)	2.10	2.31	1.08	0.94	≤0.05	≤500 mg/kg
Índice de saponificación (mg de KOH/g de aceite)	13.50	10.18	8.35	80.01	-	-
Índice de acidez (mg de KOH/g de aceite)	0.54	0.92	0.56	0.74	0.5 máx	0.5 máx
Índice de yodo (g de I ₂ /100 g de aceite)	28.02	7.22	7.98	12.05	-	≤120
Corrosión en lámina de cobre	1a	1a	1a	1a	< N°3	1

(Fuente: Elaboración propia)

En el Cuadro 9 se observa que la densidad del biodiésel obtenido en los 4 lotes se encuentra dentro de la normatividad europea y se asemejan con los valores del diésel comercial (0.87-0.95 g/mL), pudiendo hacerse un mezclado empezando en una proporción mínima de B5 (5% biodiésel, 95% diésel) para su uso en motores de combustión interna (PEMEX, 2017). La densidad representa un parámetro importante en el funcionamiento del motor, ya que éste si se encuentra con

valores más altos puede causar problemas en los inyectores del motor así como la solidificación y congelación a bajas temperaturas (Castro et al., 2007).

La densidad refleja la composición de metilésteres dentro del biodiésel, al igual que proporciona información acerca del contenido energético del combustible, ya que a mayores densidades hay mayor energía térmica y por lo tanto mejor economía del biocombustible (Sánchez & Huertas, 2012).

La viscosidad es la resistencia de un fluido a fluir cuando se encuentra bajo el efecto de la gravedad, lo recomendable es tener valores mínimos para evitar pérdidas de potencia en el motor debido a las fugas de las bombas de inyección, al igual que va a presentar características de lubricidad (Castro et al., 2007), de los resultados obtenidos se tiene que los 4 lotes de biodiésel entran dentro de la normatividad propuesta por la ASTM D6751 y se pretende que al usar mezclas con diésel convencional disminuyan estos valores ya que éste se encuentra con un valor de viscosidad mínimo de $1.9 \text{ mm}^2/\text{s}$ (PEMEX, 2017).

Tanto los aceites vegetales como grasas animales tienen moléculas de ácidos grasos (ésteres) y glicerol, el glicerol (alcohol trivalente) es una de las razones de una elevada viscosidad, durante el proceso de transesterificación, hay un reemplazo entre el glicerol por un alcohol monovalente (metanol) formando ésteres monoalquílicos, por esto es que hay una disminución en la viscosidad del biodiésel sobre el aceite (Riba et al., 2010).

La densidad y la viscosidad son parámetros que tienen un papel muy importante en la atomización del carburante realizado por el sistema de inyección, ambos parámetros se encargan de determinar si se realiza o no la combustión completa del carburante, es por eso que tienen influencia tanto en el nivel de emisiones de partículas como en la eficiencia del motor.

La humedad indica el contenido de agua presente dentro del biodiésel, la cual puede generar corrosión y promueve el desarrollo de microorganismos. Los sedimentos pueden causar problemas de taponamiento de filtros e inyectores. Como se indica en el Cuadro 9 ninguno de los lotes se encuentra dentro de los límites establecidos, debido a la calidad de la materia prima utilizada, como se ha mencionado anteriormente las grasas están compuestas en su mayoría por ácidos grasos y agua, el aceite de fritura también presentó altos valores de humedad al igual que el aceite de panadería, esto es debido al tratamiento que se le den a los alimentos con el aceite, ya que dentro del proceso de cocción de los alimentos se liberan ácidos grasos libres los cuales provocan la formación de agua, así como a las prácticas de lavado utilizadas en los equipos donde se utilizaba el aceite y el agua que se usó para la realización de los lavados del biodiésel. El contenido de

agua en el biodiésel tiene efectos negativos sobre los rendimientos, reduce el calor de combustión produciendo la formación de humos, teniendo un arranque más difícil con menos energía, por lo que se recomienda realizar un proceso de purificación para eliminar la humedad restante en el biodiésel, así como partículas que sedimentan en el combustible por la humedad presente (Demirbas, 2008).

El índice de acidez indica la cantidad de ácidos grasos libres en el biodiésel debido a que no se completó de manera eficiente la reacción de transesterificación o a la degradación del aceite durante su almacenamiento, en los cuales puede haber la presencia de productos saponificables que pueden causar daños en el motor por la posible formación de gomas (Enweremadu & Mbarawa, 2009). De acuerdo con los resultados obtenidos en el Cuadro 9 el índice de acidez se superó para los 4 lotes de residuos, teniendo valores más altos en el Lote 2, debido a que por la procedencia de la muestra (aceite de fritura), ésta estuvo expuesta en varias ocasiones a altas temperaturas por lo que hubo mayor rompimiento en cadenas de triglicéridos dejando ácidos grasos libres que no reaccionaron en el proceso de transesterificación. Para el caso del Lote 4 que la procedencia de la materia prima es de grasa de pollo, ésta presenta mayor cantidad de ácidos grasos saturados y se tuvo que hacer un tratamiento previo que fue la esterificación, por lo que pudieron presentarse mayor cantidad de ácidos grasos libres que formaron jabón o que no reaccionaron dentro de la esterificación (Tejada et al., 2013).

El índice de yodo influye directamente en la calidad del biocombustible que se obtuvo ya que si tiene valores muy altos hay una mayor tendencia a la oxidación, lo que contribuye a la formación de gomas dentro del motor afectando su mecanismo y su vida útil y la disminución de la lubricidad de éste. Los valores obtenidos para este parámetro los cuatro lotes se encuentran por debajo del límite máximo de la norma europea, indicando mayor estabilidad a la oxidación, por lo que no es necesario la adición de antioxidantes (Yaakob et al., 2014). El valor más alto presentado fue en el Lote 1 que utilizó como materia prima aceite de fritura, este valor se presentó ya que este aceite estuvo mayor tiempo en almacenamiento y fue el que se utilizó con mayor frecuencia. El Lote 4 de igual manera presentó altos valores en este parámetro debido a que la grasa de pollo presenta altos valores de índice de yodo (130 g de I₂/100 g de aceite), debido a la alta composición de triglicéridos (Sánchez, 2016).

La corrosión en lámina de cobre da a conocer la acción corrosiva del biocombustible sobre el cobre así como la presencia de ácidos y otros elementos que puedan degradar algunas partes del sistema de inyección, con base en los resultados obtenidos y presentados en el Cuadro 9 se observa que los 4 lotes se encuentran dentro de los parámetros establecidos por las normas internacionales, con valores de 1a siendo éste el más bajo presentado en la lámina patrón de la

ASTM COPPER STRIP CORROSION STANDARDS, indicando que el biodiésel producido es óptimo ya que no contiene agentes corrosivos ni ácidos que puedan atacar cobre y aleaciones que se encuentran dentro del motor (Vivas, 2010).

Por una parte, de los parámetros obtenidos y representados en el Cuadro 9, la densidad, viscosidad, índice de saponificación, índice de yodo y corrosión en lámina de cobre, cumplen con los estándares de calidad internacionales, lo que permitiría la utilización del biodiésel como combustible en motores de combustión interna y debido a la similitud de sus parámetros entre los Lotes 1, 2 y 3, se pueden realizar mezclas de la materia prima (AVU) para su posterior conversión a biodiésel. Sin embargo, el Lote 4 difiere debido al origen animal de la grasa de pollo y no vegetal como los otros 3, por lo que sería necesario darle un tratamiento previo a este tipo de grasa, debido a la estructura molecular del mismo, como lo es el proceso de esterificación. Por otro lado, la humedad y el índice de acidez fueron parámetros que no cumplen con los límites establecidos por los estándares de calidad, por lo que se recomienda que el biodiésel producido sea utilizado como combustible en motores diésel, pero mezclado con diésel partiendo de B5 (5% biodiésel, 95% diésel) hasta cumplir con los valores establecidos en dichos estándares.

Con los parámetros analizados anteriormente se presenta que el biodiésel es adecuado para usarse en motores a diésel utilizando mezclas que van desde B5 hasta B20, por lo que se recomienda analizar otro tipo de parámetros para determinar tanto la calidad del biodiésel como combustible, eficiencia de la reacción de transesterificación, presencia de impurezas, así como para tomar medidas de seguridad al almacenarlo y manipularlo, estas pruebas son: número de cetano, punto de ignición, punto de inflamación y punto de nube, contenido de metilésteres, mono-, di- y triglicéridos y contenido de glicerina libre y total.

3.5 Análisis económico de la producción de biodiésel a partir del reciclaje de residuos de AVU.

Con los resultados presentados del diagnóstico realizado se justifica el escalamiento e implementación de una planta semi-industrial con una capacidad de producción de biodiésel de 1000 L/lote, utilizando como materia prima residuos de AVU, en la zona metropolitana de Guadalupe-Zacatecas del estado de Zacatecas.

De acuerdo al análisis realizado se obtuvieron aproximadamente 3, L de AVU para la producción de biodiésel de manera mensual, por lo tanto se pueden hacer 4

lotes utilizando el 80 % de la capacidad del equipo. En la Figura 39 se observa la planta semi-industrial propuesta por la empresa bio-diesel GRIMA.



Figura 39. Planta semi-industrial para la producción de biodiésel.
(Fuente: bio-diesel GRIMA, 2015)

La planta de producción de biodiésel consta de 3 reactores, uno para el pretratamiento del AVU, el segundo donde se da la reacción de transesterificación y el tercero donde se da la mezcla del metóxido, contando con resistencias para la reacción y el tratamiento de la materia prima. El proceso de operación es tanto de forma manual como automática, mediante el uso de un tablero de control.

La potencia requerida para llevar a cabo el proceso de producción de biodiésel es una corriente trifásica de 220 V, y las dimensiones que tiene el equipo son: 2.20 m de ancho, 2.60 m de alto, 2.10 m de largo con un peso de 800 kg aproximadamente.

El proceso de producción de biodiésel dentro de la planta semi-industrial se presenta en la Figura 40.

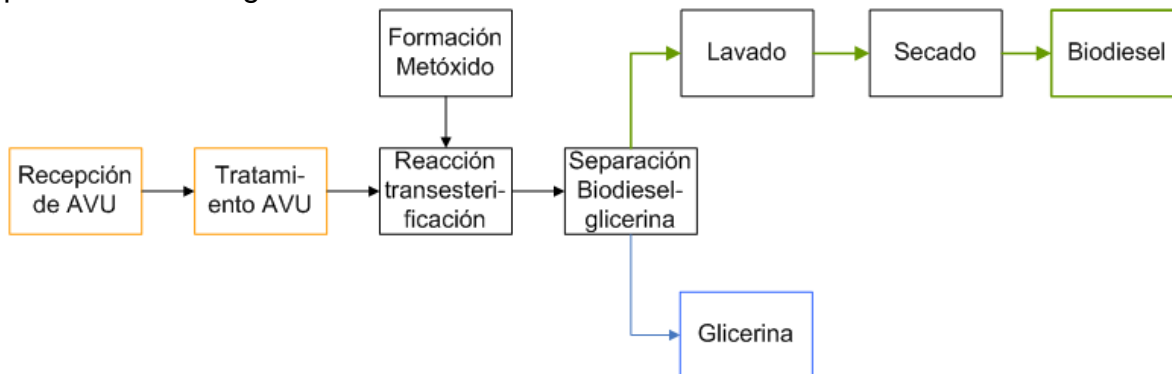


Figura 40. Diagrama de flujo de producción de biodiésel.
(Fuente: Elaboración propia)

El proceso de producción de biodiésel comienza con la recepción y tratamiento de la materia prima que son los residuos de AVU, mediante el calentamiento y filtración para retener los sólidos y partículas suspendidas en el aceite, el calentamiento es llevado a cabo por resistencias dentro de un reactor.

En otro reactor se da la formación del metóxido con el uso de un alcohol, generalmente metanol (CH_3OH), a una relación molar 3:1 e hidróxido de sodio o hidróxido de potasio en 1 ó 2 % p/p con relación en la masa del aceite. Para después ser pasado al reactor de transesterificación (Phan & Phan, 2008).

El proceso de transesterificación es llevado a cabo con el AVU tratado y el metóxido a condiciones de temperatura de $60\text{ }^\circ\text{C}$ con una agitación de 200 rpm durante 2 h. Finalizado el tiempo de reacción se deja en reposo 24 h para hacer la separación de fases y extraer la glicerina por decantación, siendo recirculada al reactor donde se encuentra el aceite. Posteriormente el biodiésel se somete a una serie de lavados para la remoción de residuos y a un proceso de secado para la obtención de biodiésel en una forma más pura.

En la Figura 41 se observa el diagrama de proceso de la producción de biodiésel.

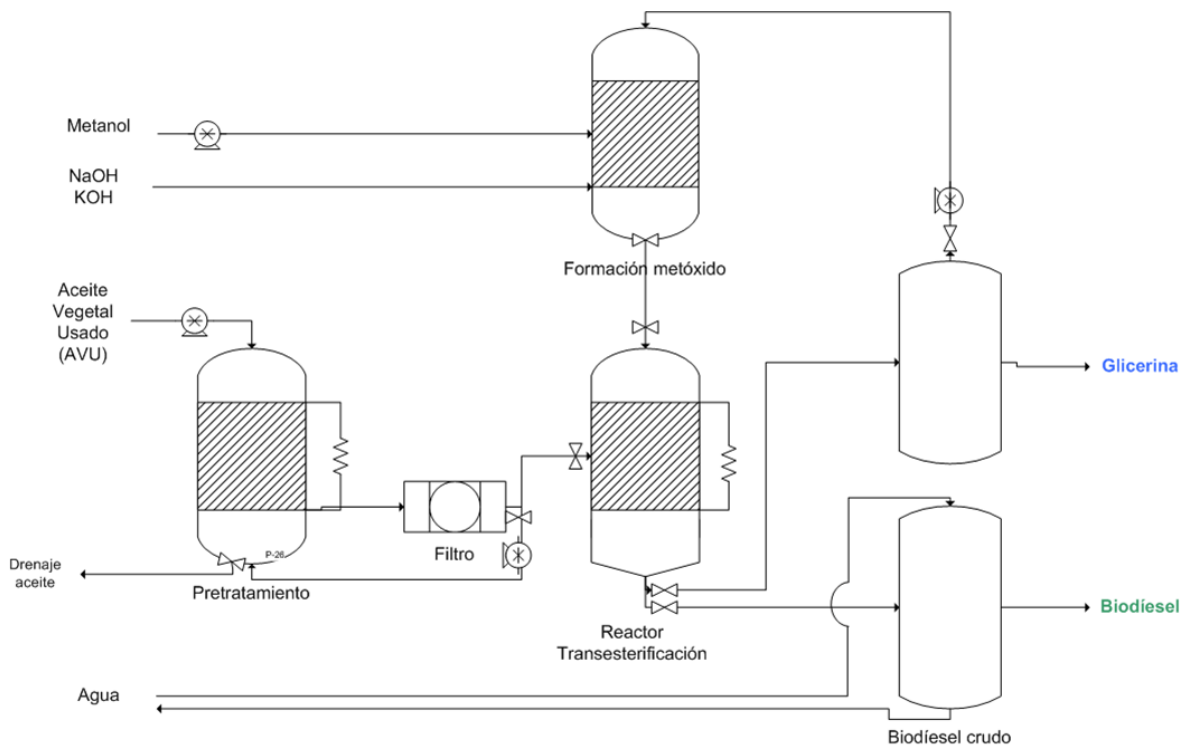


Figura 41. Diagrama de proceso de la producción de biodiésel.
(Fuente: Elaboración propia)

El costo de producción de biodiésel depende principalmente del costo de materia prima a utilizar, es por ello que se decidió utilizar residuos de AVU, ya que de acuerdo con el diagnóstico realizado el precio de venta de este tipo de residuo es de \$0.00 M.N. contándolo como donación por parte de 67 de los 97 establecimientos encuestados, incluyendo los costos de recolección del AVU.

Otros factores que influyen en el costo del biodiésel son: Insumos utilizados en el proceso de producción (Metanol, hidróxido de sodio), energía eléctrica utilizada (KW/h), agua utilizada dentro del proceso y mano de obra, éstos son costos considerados sólo en el proceso de producción y son presentados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Costos de producción de biodiésel.

Costos de recolección	Ruta de recolección propuesta	Distancia total de la ruta (Km)	Rendimiento del vehículo (Km/L)	Costo de combustible por vehículo (\$/L)	Precio diésel (\$/L)	Precio total de recolección (\$ M.N.)	Cantidad de AVU por ruta (L)	Precio de recolección por litro (\$/L)	Costo por Lote de biodiésel (\$ M.N.)
	Propuesta 1								
	Ruta 1	49.32	3	16.44	17.10	281.12	1,411	0.20	199.24
	Ruta 2	55.89	3	18.63	17.10	318.57	1,915	0.17	166.36
	Ruta 3	54.4	3	18.13	17.10	310.08	1,569	0.20	197.63
Propuesta 2									
	Ruta 1	70.56	3	23.52	17.10	402.19	3,299	0.12	121.91
Costo total de recolección (\$ M.N.)									<u>171.28</u>
Costos de energía eléctrica						Consumo total de energía eléctrica por Lote (KW/h)	Cargo fijo (\$ M.N.)	Cargo adicional por cada uno de los primeros 50 KW/h (\$ M.N.)	Costo total energía eléctrica por lote de biodiésel (\$ M.N.)
						13.2	64.71	2.55	887.87
Costos de agua						Consumo total de agua por litro de biodiésel (m ³)	Cargo fijo (\$ M.N.)	Costo total de agua por litro de biodiésel (\$ M.N.)	Costo total de agua por lote de biodiésel (\$ M.N.)
						0.0233	15.34	0.35	357.42

Cuadro 10. Costos de producción de biodiésel (Continuación).

Metanol	Metanol por litro de aceite (L)	Precio unitario metanol por litro (\$ M.N.)	Total metanol por lote de biodiésel (L)	Costo total metanol por lote de biodiésel (\$ M.N.)
	0.166	8.94	166	1,484.04
Hidróxido de sodio (NaOH)	NaOH por litro de aceite (Kg)	Precio unitario NaOH por Kg (\$ M.N.)	Total NaOH por lote de biodiésel (Kg)	Costo total NaOH por lote de biodiesel (\$ M.N.)
	0.007	6.06	7	42.47
Costo total de producción (\$ M.N.)				<u>2,771.80</u>
Costo mano de obra (\$ M.N.)				<u>554.36</u>
COSTO TOTAL POR LOTE DE BIODIÉSEL (\$ M.N.)				<u>3,497.44</u>
PRECIO LITRO DE BIODIÉSEL (\$ M.N.)				<u>3.50</u>

(Fuente: Elaboración propia)

En el Cuadro 10 se presentan los costos de recolección para los 67 establecimientos dispuestos a donar la materia prima, el precio que cada litro de AVU tendrá aproximadamente es un promedio de \$ 0.17 M.N por litro recolectado, para un lote de producción de 1,000 L el costo total de recolección varía de acuerdo a la propuesta tomada, teniendo un aproximado de \$ 171.28 M.N.

Como se ha mencionado anteriormente, la energía eléctrica requerida es una corriente trifásica con 220 V según los requerimientos energéticos de la máquina ECO-MX por la empresa bio-diesel GRIMA, tomando en cuenta las tarifas propuestas por CFE, entra en la Tarifa 2 de negocio para un servicio general de hasta 25 kW de demanda, teniendo un cargo fijo de \$ 64.71 M.N. por kW consumido más un cargo adicional de \$ 2.55 por cada uno de los primeros 50 kW/h, dando un costo total de energía eléctrica por lote de \$ 887.87 M.N. aproximadamente.

El consumo de agua, tomando en cuenta en lo reportado en la bibliografía (Apalko, et al., 2007), el consumo de agua para producir un litro de biodiésel es de aproximadamente 0.0233 L, usando la tarifa propuesta por la Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas (JIAPAZ), para el sector industrial es de \$ 15.34 M.N. por m³, teniendo un costo total de agua por lote de biodiésel de aproximadamente \$ 357.42 M.N.

Para los insumos utilizados en el proceso de producción, la cantidad requerida de metanol es de 0.166 L para 1 litro de aceite, mientras que el NaOH es de 7 g para 1 litro de aceite, ambos valores fueron tomados por el manual del equipo, y utilizando los precios cotizados, el costo total de metanol es de \$ 1,484.04 y para el NaOH es de \$ 42.72 M.N.

Otros factores que influyen directamente en el precio final del biodiésel son los subproductos obtenidos como es el caso de la glicerina, la cual siendo tratada, puede presentar un ingreso extra ya que ésta tiene un valor económico. Otro factor que permite reducir costos de operación es la recuperación y reutilización del metanol.

De acuerdo con la ecuación 7 propuesta en la metodología, se tiene que el costo total del lote de biodiésel de 1,000 litros es de \$ 3,497.44 M.N., por lo que el precio final por litro de biodiésel es de un aproximado de **\$ 3.50 M.N.**, por lo que económicamente es factible, ya que el precio del diésel convencional es de **\$ 17.00 M.N.**, por lo que se presenta una oportunidad la producción de biodiésel a partir del reciclaje de residuos de AVU.

La rentabilidad de los biocombustibles depende de los costos que se tengan en la materia prima, por lo que dentro de este proyecto es factible tomando en cuenta

que la materia prima a utilizar es a partir de residuos de AVU, por lo que es necesario realizar convenios con los establecimientos de comida para no tener altos costos de producción y evitar aumentos en los precios de las líneas de transporte público.

3.6 Factibilidad ambiental y social del uso de biodiésel producido a partir de residuos de AVU.

Como se ha mencionado anteriormente, las ventajas que presenta el uso del biodiésel es la disponibilidad, portabilidad, que proviene de un origen renovable, mayor eficiencia de combustión, menor contenido de azufre y compuestos aromáticos, mayor número de cetano y mayor biodegradabilidad respecto al diésel derivado del petróleo. Otra de las principales ventajas que se presenta es el potencial para reducir la dependencia que se tiene al diésel convencional (Dermirbas, 2008).

El uso del biodiésel presenta una reducción de contaminantes locales asociados a la combustión de motores a diésel que son el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y partículas (PM). Para realizar el cálculo de disminución de emisiones de CO₂ se tiene que hacer uso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que consiste en calcular tanto las emisiones de operación del vehículo como en la producción del biodiésel para así hacer eficiente el proceso de obtención tanto de manera económica como ambiental (Díaz, 2014).

Otra de las ventajas, es el tratamiento que se le va a dar a un residuo que por lo general tiene una disposición inadecuada al momento de desecharlo, siendo éste depositado en los residuos sólidos municipales así como en el suelo y drenaje principalmente. Los riesgos que presenta el depósito de grasas y aceites en el alcantarillado es la probabilidad de causar inundaciones debido a que éstos se saponifican y se adhieren a las tuberías causando una disminución del diámetro de las tuberías o inclusive una obstrucción completa en la misma (Williams et al., 2012).

Los residuos de grasas y aceites ocasionan varios problemas tanto ambientales como de higiene, ya que incrementan la contaminación del agua y se proporcionan para la formación de patógenos como virus, bacterias, inclusive ratas. Otro de los problemas es que al llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales aumentan los costos y la energía requerida para tratarlos, por lo que en muchos de los casos el agua se deposita directamente sobre los cuerpos acuáticos causando una elevada carga de DQO, afectando el intercambio gaseoso dentro de los cuerpos de agua. Al estar dentro de los cuerpos de agua se da una reducción

del oxígeno disuelto y por consecuencia una reducción de la actividad fotosintética, provocando la disminución de la vida acuática y disminución de la calidad del agua (González & González, 2015). Por lo que se recomienda diseñar un programa de recolección para los hogares, restaurantes, hoteles, entre otros, para reducir al máximo la cantidad de desechos de AVU y que éstos puedan ser desechados y aprovechados correctamente.

Otra de las ventajas que presenta el dar un buen tratamiento a este tipo de residuos radica en llevar un control en la preparación de alimentos, ya que en varios sitios se da la reutilización del aceite hasta que haya un consumo total disminuyendo la calidad de los alimentos preparados y ser propensos a la proliferación tanto de virus como de bacterias.

El reciclaje de los residuos de AVU para la producción de biodiésel no presenta competencia con la agricultura y los cultivos energéticos, ni pone en riesgo la seguridad alimentaria, ya que no reduce las tierras destinadas a la agricultura ni reduce la calidad de las tierras, por lo que presenta una ventaja considerable ya que se trata de aprovechar y dar tratamiento a un residuo, por lo que presenta a su vez una ventaja social (Ramos, 2011).

La disminución de las reservas de petróleo y el aumento en los precios de los combustibles, han creado problemas económicos para la sociedad en general, siendo la clase media y baja las más vulnerables a estos impactos debido al aumento en los precios del transporte público, por lo que el biodiésel puede aminorar o disminuir el aumento en los precios de éste, ya que debido a la estabilidad en los costos de materia prima no se presenta un gran aumento en el precio de venta del biocombustible.

Los problemas que presenta la producción de biodiésel van en la generación de residuos sólidos presentes en las grasas, así como la generación de glicerina, la cual es un subproducto que presenta un valor económico para la industria farmacéutica siempre y cuando ésta sea purificada, por lo que se tiene que dar un tratamiento o se tiene que disponer correctamente, mediante la contratación de una empresa externa, causando un incremento en los costos de producción del biodiésel.

Otro de los problemas presentes en la planta de producción de biodiésel es la generación de aguas residuales con residuos de NaOH, metanol, grasas, aceites y glicerina, por lo que es necesario recurrir a un proceso de filtración, colocar trampas de aceite y neutralización para recurrir a la reutilización del agua o para disponerla en el sistema de alcantarillado.

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Se realizó un diagnóstico de la generación de residuos de aceite vegetal usado por medio de la aplicación de encuestas a 97 establecimientos de alojamiento temporal y producción de alimentos ubicados en los municipios de Guadalupe y Zacatecas, de los cuales se obtuvo la cantidad, frecuencia, tratamiento o disposición final de los residuos.

De los 97 establecimientos encuestados se obtuvo que el 90 % de los establecimientos tiene generación de residuos de aceite vegetal usado, destacando la categoría de más de 10 L en la cantidad generada, el sector que más destaca es el sector restaurantero con un porcentaje del 62 %. El 77% de los establecimientos que tienen generación de residuos utiliza el reciclaje como una forma de disposición para los residuos de aceite vegetal usado.

Los establecimientos que están dispuestos a donar los residuos de aceite vegetal usado son 67, siendo un apoyo económico en el proceso de producción de biodiésel ya que presenta una disminución en los costos de materia prima.

La frecuencia de generación de los residuos de aceite vegetal usado que destacó en el diagnóstico fue de 1 semana, siendo un factor importante en el diseño de las rutas de recolección.

La frecuencia de recolección es un factor que ayuda al diseño de rutas de recolección, de las rutas propuestas, la propuesta 1 es la que destaca en este proyecto con una frecuencia de recolección de quince días obteniendo cantidades de 1,371, 1,803 y 1,513 L de aceite vegetal usado para las 3 rutas propuestas.

Las condiciones de recolección propuestas son mediante un camión de 3 toneladas con dos lotes de capacidad de 1000 litros cada uno, la recolección se hará con dos personas en una jornada laboral de 8 horas tomando un tiempo de 20 minutos en cada establecimiento.

Al hacer el reciclaje de los residuos de AVU se obtuvieron porcentajes de rendimiento en la reacción de transesterificación de 92.72, 92.20, 84.20 y 80.00 % para los 2 lotes de aceite de fritura, para el lote de aceite de panadería y la grasa de pollo respectivamente; siendo evidente que aquellos residuos mezclados con grasa animal deben ser previamente esterificados para poderse mezclar con el resto de los residuos y así obtener rendimientos más altos y someterse al reciclaje.

Pudo comprobarse que el biodiésel obtenido cumple con los parámetros establecidos en los estándares de calidad de las normas ASTM D6751 (Estados Unidos de América) y EN 14214 (Unión Europea), excepto para la humedad e índice de acidez, por lo que el biocombustible puede ser utilizado con confiabilidad en motores diésel, recomendándose a partir de mezclas B5 (5% biodiésel, 95% diésel) e ir incrementando las proporciones hasta garantizar que se cumplen las especificaciones señaladas por los estándares internacionales de calidad.

Se recomienda realizar más análisis para determinar la calidad del biodiésel como combustible, como es el índice de cetano, al igual que otros análisis para determinar las medidas requeridas para su manipulación, así como establecer un control en el almacenamiento y no poner en riesgo la integridad física de quien manipule el biodiésel, tal es el caso del punto de nube, punto de ignición, punto de ebullición. Se requiere también de un análisis químico para determinar la composición del biodiésel, como lo son: contenido de metilésteres, mono-, di- y triglicéridos y contenido de glicerina libre y total.

El costo de producción estimado para un litro de biodiésel es de \$ 3.50 M.N. aproximadamente, por lo que el reciclaje de residuos de AVU es factible económicamente para la producción de biodiésel.

Finalmente, pudo determinarse que es factible técnica, ambiental y económicamente la implementación de una planta semi-industrial con capacidad de producción de biodiésel de 1000 L/lote, utilizando residuos de Aceite Vegetal Usado como materia prima proveniente del sector de producción de alimentos y el de alojamiento temporal de la zona metropolitana del estado de Zacatecas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatorre, F. (2009) *Energías Renovables para el desarrollo sustentable en México*. Secretaría de Energía (SENER). México.
- Apalko, J., Hanacek, J., Sanguina, E., Villalba, G., Mascke, C. (2007). *Planta elaboradora de biodiésel*. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. Argentina.
- Áviles, J. (2014). *Metodología para la valorización de residuos sólidos urbanos. Caso de estudio Atlacomulco, Estado de México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Benavides, H. & León, G. (2007) *Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia.
- Bulla, E. (2014) *Diseño del proceso de producción del biodiésel a partir de aceites de fritura*. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Canakci, M., Sanli, H. (2008). *Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties*. J Ind Microbiol Biotechnol. Vol. 35, pp. 431-441.
- Castro, P., Coello, J., Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú*. Primera edición. Soluciones Prácticas – ITDG. Perú.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad (CONABIO) (2005). *Portal de Geoinformación*. Ubicado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Consultado el día 5 de octubre de 2016).
- Díaz, A., Ávila, V., Aguilera, M. (2015). *Caracterización del biodiésel obtenido a partir del aceite de semillas de higuera silvestre (Ricinus communis L.) en el municipio de Tlaltenango, Zacatecas*. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Díaz, O. (2014) *Sistema de recolección de aceite usado para conversión de biodiésel*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Dermirbas, A. (2008) *Progress and recent trends in biodiesel fuels*. Energy Conversion and Management, Vol 50, pp. 14-34.

- Enweremadu, C., Mbarawa, M. (2009). *Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil: a review*. Energy reviews. Vol. 13, pp. 2205-2224.
- Fajardo, F. (2015). *Técnicas de caracterización para el Biodiésel basadas en la Normatividad Internacional ASTM*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. México.
- Galeano, C. & Guapacha, E. (2011). *Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos de pollo para la producción de un biocombustible (biodiésel)*. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- González, I. & González, J. (2015). *Aceites usados de cocina. Problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras*. Consorcio de Aguas Bilbao Biskaina.
- Greenpeace (2010). *México ante el cambio climático global – Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación*. México
- Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) (1996). *Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático*. Suiza.
- Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) (2007). *Cambio climático 2007-Informe de síntesis*. Suiza.
- Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) (2011). *Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Suiza.
- Herrera, J., Vélez, J. (2008). *Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiésel)*. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- Hielscher®, *Mezcla ultrasónica para la producción de biodiésel*. Estados Unidos de América. Documento Web. Ubicado en: https://www.hielscher.com/es/biodiesel_ultrasonic_mixing_reactors.htm (Consultado el día 17 de octubre de 2016).
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2012). *Bases para una estrategia de desarrollo bajo en emisiones en México*. Documento Web. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/ine-ecc-ec-02-2012.pdf> (Consultado el día 10 de junio de 2017).

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: 1990-2010*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Documento Web. Ubicado en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/> (Consultado el día 17 de octubre de 2016).
- International Energy Agency (IEA) (2015). *CO₂ emissions from fuel combustion*. Francia.
- Ley de Cambio Climático para el Estado de Zacatecas y Municipios (LCCEM) (2015). Zacatecas. México
- Lotero, E., Liu, Y., López, D. (2005). *Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis*. Engineering Chem. 5353-5363.
- Maldonado, O., Zambrano, G., Rolz, C. (2010) *Producción de biodiésel: estrategias y tecnología*. Universidad del Valle de Guatemala. Revista 21. Pág. 11-21.
- Medina, M., Ospino, Y., Tejeda, L. (2014). *Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiésel*. Universidad de Caldas, Colombia. Vol. 40, Pp. 25-34.
- Molina, C. (2011). *Estudio de la composición y estabilidad de biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales limpios y procedentes de aceites de fritura*. Tesis de doctorado. Universidad de la Laguna. España.
- Montoya, M., Cardona, C., Orrego, C., Gutiérrez, L. (2006). *Obtención de biodiésel por reacción extractiva*. Universidad Nacional de Colombia.
- Montoya, J. (2009). *Modelamiento y simulación de la cinética de transesterificación del aceite de ricino con alcohol etílico, catalizada con NaOH*. Universidad Nacional de Colombia.
- Moragues, J. & Rapallini, A. (2003). *Energía eólica*. Argentina.
- Morales, F. (2015). *Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir de aceites usados*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Murcia, B., Chaves, L., Rodríguez-Pérez, W., Murcia, M., Alvarado, E. (2013). *Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina*. Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. 15, pp. 61-70.

- Naciones Unidas (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Pérez, P., Gusberti, P. Gallardo. (2009). *Producción de biodiesel a partir de aceites usados de cocina a escala piloto en la Provincia de Mendoza*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 13, pp. 125-129.
- PEMEX (2017). *Hoja de datos de seguridad-Diésel Automotriz*. Versión 7. Documento Web. México.
- Phan, A. & Phan, T. (2008). *Biodiesel production from waste cooking oils*. Fuel. Vol. 87, 3490-3496.
- Ramos, A. (2011). *Impacto de los Biocombustibles sobre el Desarrollo Humano*. Grupo de biocombustibles, ONGAWA – Ingeniería para el Desarrollo Humano.
- Riba, J., Esteban, B., Baquero, G., Puig, R., Rius, A. (2011). *Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diésel*. AFINIDAD LXVI, Vol. 546, pp.100-106.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley. (2009). *Planetary boundaries:exploring the safe operating space for humanity*. Ecology and Society 14(2): 32. Documento Web. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>(Consultado el día 23 de mayo de 2017).
- Rodríguez, B. (2003). *El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental*. Boletín iiE, pp. 91-97.
- Rodríguez, C., Lafargue, F., Sotolongo, J., Rodríguez, A., Chitue de Assuncao, J. (2011) *Determinación de las propiedades físicas y carga crítica del aceite vegetal *Jatropha curcas* L*. Ingeniería Mecánica, Vol. 15, pp. 170-175.
- Rodríguez, D., Riesco, J., Romero, D. (2017). *Obtención de biodiesel a partir de mezclas de aceite de cocina usado y de aceite de higuera*. Universidad Santo Tomás. Colombia.
- Salinas E. & Gasca, V. (2009). *Los biocombustibles*. El Cotidiano, Septiembre-Octubre, 75-82

- Sánchez, F. (2016). *Procesado y calidad de las harinas de carne. Carnes desengrasadas y ricas en grasa*. FEDNA. Barcelona. España.
- Sánchez, I., Huertas, K. (2012). *Obtención y caracterización de biodiésel a partir de aceite de semillas de Ricinus communis. (Higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero*. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- Sánchez, Y., Piloto, R., Goyos, L., Ferrer, N. (2012). *Predicción del número de cetano de biocombustibles a partir de su composición de ácidos grasos*. Ingeniería Mecánica, Vol. 15, pp. 147-157. Cuba.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). *Tipos de Biocombustibles* (2011). Documento Web. Ubicado en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/bio/index.php/introduccion/tipos-de-biocombustibles.html> (Consultado el día 6 de octubre de 2016).
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2011). *Costos del proceso de producción*. Documento Web. Ubicado en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/bio/index.php/biodiesel/costos-del-proceso-de-produccion.html> (Consultado el día 6 de octubre de 2016).
- Secretaría de Energía (SENER) (2015): *Balance Nacional de Energía-2014*. México.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (1997). *Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2009). *Cambio climático – Ciencia, evidencia y acciones*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2014). *Emisión Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015). *Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. Diario Oficial de la Federación. México
- Solben (2008). *Biodiésel en México*. México.
- Tejada, C., Tejada, L., Villabona, A., Monroy, L. (2013). *Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal*. Universidad de Caldas. Colombia. Luna Azul, Vol. 36, pp. 10-25.

- Vivas, A. (2010). *Estudio y obtención de biodiésel a partir de residuos grasos de origen bovino*. Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- Williams, J., Clarkson, C., Mant, C., Drinkwater, A. May, E. (2012). *Fat, oil and grease deposits in sewers: Characterisation of deposits and formation mechanisms*. WATER RESEARCH, Vol. 46, pp. 6319-6328.
- WWF International (2016). *Planeta Vivo Informe 2016- riesgo y resiliencia en una nueva era*. Documento Web. http://awsassets.panda.org/downloads/informe_planeta_vivo_2016.pdf (Consultado el día 23 de mayo de 2017)
- Yus, R. (2015). *Los límites del planeta hoy día*. Rev. El Observador, nº 27-I-2015.
- Yaakob, Z., Narayanan, B., Padiaparambil, S., Unini, K., Akbar, M. (2014). *A review on the oxidation stability of biodiesel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 35. pp. 136.
- Zuleta, E., Bonet, J., Díaz, L., Bastidas M (2016). *Optimización del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de palma y etanol, mediante el método de superficie de respuesta*. Grupo de Energías Alternativas y Biomasa, Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico del Cesar, Universidad Popular del Cesar.

Anexo 2. Coordenadas geográficas y UTM de los establecimientos.

Cuadro 11. Coordenadas geográficas de puntos muestreados.

RESTAURANTE	Coordenadas geográficas con notación decimal		Coordenadas geográficas NAD1927 UTM Zona 13	
	N	O	X	Y
Sanborns	22.773348	-102.573940	749096.092	2520325.43
UrbanFood	22.759867	-102.543064	752292.446	2518884.58
Garufa	22.758957	-102.541562	752444.265	2518736.65
Sirlon Carnes a la parrilla	22.761628	-102.545631	752062.966	2519025.58
Flipper Mariscos	22.761808	-102.545723	752053.186	2519045.36
Wings Army- García Salinas	22.756220	-102.541227	752525.307	2518434.23
Argentina Express	22.776935	-102.597676	752487.871	2518483.76
Dynasty- Comida china	22.776935	-102.597676	746651.529	2520682.94
La calaña express	22.776862	-102.598073	746610.883	2520674.19
Peppers	22.776935	-102.597676	746651.529	2520682.94
Comix	22.776832	-102.597915	746627.166	2520671.13
La Bonita	22.776935	-102.597676	746651.529	2520682.94
Liverpool	22.776998	-102.597665	746652.546	2520689.94
Mc Donalds	22.762016	-102.546183	751968.084	2519117.30
Che bacán	22.757701	-102.546938	751898.445	2518638.07
El costeñito	22.760124	-102.545250	752067.405	2518909.32
Carl's Junior Zacatecas	22.760886	-102.546184	751970.056	2518992.13
Mama Dolores	22.756701	-102.540369	752575.131	2518538.50
Wings Air Force	22.756701	-102.540369	752575.131	2518538.50
El Portón	22.762097	-102.549052	751673.208	2519121.38
El pollo feliz	22.758188	-102.543945	752205.026	2518697.11
Groots café	22.757927	-102.544920	752105.343	2518666.54
Milk	22.758551	-102.544264	752171.588	2518736.77
Vancouver Wings	22.757480	-102.543246	752278.137	2518619.88
Cenaduría Arboledas	22.754779	-102.537019	752922.828	2518331.34
City Express	22.774895	-102.606309	745768.454	2520442.61
Fiesta Inn	22.775501	-102.607601	745634.660	2520507.59
Dynasty- Comida china	22.770868	-102.575066	748984.933	2520048.85
Hotel Quinta Real	22.768801	-102.575792	748914.110	2519818.68
Burger King	22.759538	-102.545666	752025.746	2518843.71
Wong Comida China	22.758252	-102.544651	752132.380	2518702.99
Hotel Casa Real	22.756226	-102.536726	752950.262	2518492.11
Hotel Plaza	22.758532	-102.540889	752518.341	2518740.42
Unagui	22.761628	-102.545631	752025.503	2519075.26

Cuadro 11. Coordenadas geográficas de puntos muestreados (continuación).

RESTAURANTE	Coordenadas geográficas con notación decimal		Coordenadas geográficas NAD1927 UTM Zona 13	
	N	O	X	Y
Hotel Mesón de Jobito	22.772945	-102.575716	748914.395	2520277.80
Burguer queen centro	22.773304	-102.573026	749190.056	2520322.10
Acrópolis	22.775320	-102.572624	749227.685	2520546.07
El mercader	22.775028	-102.572852	749204.796	2520513.34
Dalí Café	22.774081	-102.573796	749109.551	2520406.86
La Cofradía	22.773737	-102.574072	749081.826	2520368.30
Los Portales	22.774086	-102.573793	749109.851	2520407.42
Mc Donalds	22.773616	-102.573992	749090.263	2520355.03
La Toscana	22.773612,	-102.574062	749083.080	2520354.47
Big Pollo Express	22.753033,	-102.529914	753655.984	2518150.11
Broaster	22.753242	-102.530751	753569.608	2518171.82
Koda comida china	22.753096	-102.530464	753599.363	2518156.14
Hamburguesas Jhonny	22.751678	-102.527056	753952.111	2518004.92
Taquería Don Luis	22.751703	-102.527171	753940.250	2518007.50
Marbella	22.750812	-102.525575	754105.868	2517911.54
Mariscos del centro	22.751098	-102.525898	754072.154	2517942.67
Birriería Mi Pueblito	22.751775	-102.527464	753910.014	2518014.97
Carnitas El Gringo Viejo	22.750747	-102.524549	754211.397	2517906.11
Chitona	22.749229	-102.519252	754758.418	2517747.08
Aries Restaurant	22.750731	-102.520661	754610.873	2517911.02
Burguerito	22.750255	-102.520020	754677.611	2517859.40
El Marlín	22.749720	-102.520458	754633.604	2517799.38
Dipori	22.749588	-102.520708	754608.164	2517784.33
Ostionería Alameda	22.749378	-102.519210	754762.457	2517763.65
El Capitán III	22.748669	-102.516269	755065.931	2517690.18
Hacienda del Cobre	22.759843	-102.541663	752436.415	2518884.31
El Recoveco	22.759063	-102.539485	752661.598	2518801.64
Sr. Habanero	22.759696	-102.541278	752476.237	2518868.69
El Pastor Rosticería- Gavilanes	22.759876	-102.537993	752813.375	2518894.24
El Pastor Rosticería- Tres Cruces	22.763383	-102.545062	752080.731	2519270.62
El Pastor Rosticería- Bernárdez	22.757195	-102.531947	753439.436	2518607.62
El Bronco	22.764164	-102.547215	751858.125	2519353.46
Burguerito- Calle 2	22.764258	-102.547303	751848.912	2519363.72

Cuadro 11. Coordenadas geográficas de puntos muestreados (continuación).

RESTAURANTE	Coordenadas geográficas con notación decimal		Coordenadas geográficas NAD1927 UTM Zona 13	
	N	O	X	Y
Hotel Parador	22.772354	-102.583479	748118.061	2520199.30
La Palapita	22.770507	-102.538728	752718.282	2520070.50
Hotel La Finca Del Minero	22.780569	-102.570536	749432.608	2521130.98
La Leyenda	22.780655	-102.570465	749439.744	2521140.63
Hotel Emporio	22.776490	-102.572474	749240.966	2520675.92
Hotel Santa Rita	22.775292	-102.573000	749189.114	2520542.34
Hotel Misión Argento	22.774493	-102.573644	749124.416	2520452.75
Los Dorados de Villa	22.782120	-102.570906	749391.782	2521302.15
Cenaduría Wendy	22.782087	-102.571258	749355.688	2521297.90
La Tapatía	22.773013	-102.572396	749255.298	2520290.93
El Rey Moro	22.760859	-102.534048	753216.833	2519009.86
Wong Comida China	22.761560	-102.533855	753235.366	2519087.84
Las Costillas de Sancho	22.761124	-102.544705	752121.556	2519021.01
El Rincón del Pescador	22.760601	-102.544140	752180.559	2518964.05
La Antigua Merendero Bar	22.761260	-102.544914	752099.835	2519035.72
El Santo Cabrito	22.778250	-102.574392	749040.759	2520867.62
El Barretero	22.763428	-102.580497	748440.535	2519215.65
El Rico Lechón	22.764098	-102.546800	751900.878	2519346.85
Hamptom Inn	22.775679	-102.607270	745668.339	2520527.85
Unagui - Galerías	22.776781	-102.597737	746645.541	2520665.78
Vips - Guadalupe	22.762823	-102.549401	751636.024	2519201.20
Vips-González Ortega	22.770709	-102.574987	748993.337	2520031.37
Caramelos- Bernárdez	22.759245	-102.534019	753222.791	2518831.14
La Toscana	22.763056	-102.548662	751711.512	2519228.27
Caramelos	22.763056	-102.548779	751699.493	2519228.07
La Traviata	22.758133	-102.539742	752636.908	2518698.19
Birriería Jaramillo	22.761628	-102.545988	751988.829	2519074.65
Gorditas Doña Julia Suc.	22.761556	-102.546016	751986.084	2519066.63
Sopes Manue	22.765150	-102.545998	751981.332	2519464.74