



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

Obtención de combustible sostenible de aviación a partir
de Aceite de Cocina Usado y lípidos de *Coelastrella* sp
CORE3

Tesis que presenta
Stephanie Michelle Villafán Cáceres

En opción al título de:
Maestra en Ciencias en Energía Renovable

Mérida, Yucatán, México 2023

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se regirán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Firma: _____

Lic. Stephanie Michelle Villafán Cáceres

Mérida, Yucatán, México, a 15 de noviembre de 2023

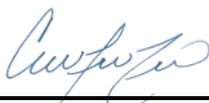
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN ENERGIA RENOVABLE



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Stephanie Michelle Villafán Cáceres** titulado " **Obtención de combustible sostenible de aviación a partir de Aceite de Cocina Usado y lípidos de *Coelastrella* sp CORE 3**", fue realizado en la Unidad de Energía Renovable, en la línea de investigación de Bioenergía, en los laboratorios de Síntesis y de Biocombustibles del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del **Dr. Juan Carlos Chavarría Hernández** y la codirección de la **Dra. Ruby Alejandra Valdez Ojeda**, perteneciente al Programa de Posgrado en Energía Renovable de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 27 de noviembre de 2023

Agradecimientos

Al CONAHCYT por el apoyo económico otorgado a través de la beca de posgrado No.800691.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. y todas las personas que lo conforman por abrirme las puertas para mi formación académica.

Al laboratorio de Síntesis y de Biocombustibles de la Unidad de Energías Renovables por brindarme las herramientas para realizar esta investigación.

Al Dr. Juan Carlos Chavarría Hernández por compartir sus conocimientos y su dedicación con sus alumnos, así como su tiempo y asesoría en todo momento.

A la Dra. Ruby Alejandra Valdez Ojeda por su asesoría, ayuda y apoyo durante este proceso.

A mis asesores Dr. Julio César Morales Ortuño, Dr. Jesús Alvarado Flores y Dra. Norma Laura Rodríguez Avila, por sus observaciones y recomendaciones durante esta investigación.

A la técnica I.Q. Tanit Toledano Thompson por su asistencia en la fase experimental y por su guía en Cromatografía de Capa Fina y de Columna.

Al Dr. Luis Orlando Polanco Vásquez por su ayuda y apoyo en el uso del reactor y equipo de DRX.

Al M. en C. Martín Baas López por su orientación en el análisis de Fisorción de N del catalizador utilizado.

Al Dr. Gilver Rosero Chasoy por su apoyo durante el uso del cromatógrafo.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por siempre alentarme a seguir mis sueños.

A Carlos, por motivarme y por brindarme su amor en esta etapa.

A mis amigos de la maestría porque su compañía hizo mejor esta aventura. Mariana y Aurora, gracias por su amistad tan bonita.

Dedicatoria

Para mis papás, por todo el amor y apoyo incondicional que siempre me dan aún en la distancia. ¡Los amo!

A Liz y Karen, por ser parte fundamental en mi vida.
¡Las amo!

A mis abuelos por siempre estar presentes.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
GLOSARIO	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.....	3
ANTECEDENTES	3
1.1 Dependencia de los combustibles fósiles en la industria de la aviación.....	3
1.2 Alternativas a los combustibles fósiles.....	3
1.3 Generalidades del SAF (Sustainable Aviation Fuel).....	4
1.4 Ventajas de utilizar SAF	5
1.5 Combustibles de aviación y sostenibilidad	5
1.6 Situación actual del consumo del combustible de aviación.....	6
1.6.1 Situación actual del consumo de SAF a nivel mundial.....	6
1.6.2. Turbosina y SAF en México	8
1.7. Materias primas utilizadas para producir combustible de aviación.....	9
1.7.1. Aceite de Cocina Usado.....	10
1.7.2. Microalgas para la producción de SAF	13
1.7.2.1. Microalga del género <i>Coelastrella</i>	15
1.8 Producción de SAF	17
1.8.1 Catalizadores empleados para la producción de SAF	17
1.9. Procesos para la producción de SAF	18
1.9.1. Queroseno isoparafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK)	20
1.9.2. HEFA (Ácidos Grasos y Ésteres Hidroprocesados).....	20
1.9.3. Isoparafinas sintéticas (SIP)	22
1.9.4. FT-SPK/A (Queroseno sintético Fischer-Tropsch con aromáticos).....	22
1.9.5. Alcohol to Jet (ATJ).....	22
1.10. Investigación de mercado	23
1.11. Cadena de suministro.....	25
OBJETIVO GENERAL.....	28
OBJETIVOS PARTICULARES	28
CAPÍTULO 2.....	29
METODOLOGÍA.....	29

2.1. Cultivo microalgal	29
2.1.1. Medios de cultivo	29
2.1.2 Purificación de <i>Coelastrella</i> sp (CORE 3)	29
2.1.3 Curva de crecimiento	29
2.1.4. Producción de biomasa microalgal y extracción lipídica.....	30
2.2. Aceite de Cocina Usado	34
2.3. Síntesis y caracterización del catalizador.....	34
2.3.1. Síntesis del SBA-15- ZSM-5.....	34
2.3.2. Síntesis SBA-15-ZSM-5 / Al ₂ O ₃	37
2.3.3. Impregnación Níquel y Molibdeno.....	37
2.4. Caracterización del soporte y catalizador	39
2.5. Síntesis de SAF	40
2.5.1. Evaluación catalítica	40
2.6. Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (CG-EM)	41
2.7. Cálculo de la conversión de las reacciones	42
CAPÍTULO 3.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
3.1. Producción de biomasa microalgal y extracción lipídica	43
3.1.1. Crecimiento de <i>Coelastrella</i> sp CORE 3	43
3.1.2. Producción de biomasa a partir de <i>Coelastrella</i> sp CORE 3	45
3.1.3 Extracción lipídica.....	49
3.1.4. Perfil lipídico de la microalga <i>Coelastrella</i> sp CORE 3.....	51
3.2. Caracterización del ACU	55
3.3. Caracterización del catalizador.....	56
3.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)	56
3.3.2. Fisorción de N ₂	57
3.4. Caracterización de los productos de reacción	59
3.4.1. HDO de ACU	59
3.4.2. HDO de extracto microalgal de <i>Coelastrella</i> sp CORE 3	63
3.5. Conversión de la reacción de HDO.....	67
3.5.1. Conversión de reacción de HDO de ACU	67
3.5.2. Conversión de la reacción de HDO de extracto microalgal.....	68
3.6. Desafíos hacia el uso de SAF	68
CONCLUSIONES	70
PERSPECTIVAS.....	71

BIBLIOGRAFÍA 72
ANEXOS 81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades de la turbosina y el combustible sostenible de aviación [11]	4
Tabla 1.2 Propiedades de la turbosina y el combustible sostenible de aviación [11]	6
Tabla 1.3 Rendimiento de cultivos bioenergéticos	10
Tabla 1.4 Empresas dedicadas a la recolección de ACU en México	11
Tabla 1.5 Composición de ácidos grasos del ACU [76].....	11
Tabla 1.6 Vuelos comerciales utilizando ACU en diferentes proporciones	12
Tabla 1.7 Especies de microalgas para la producción de SAF	14
Tabla 1.8 Vuelos comerciales utilizando como materia prima los lípidos de microalgas para la producción de SAF	15
Tabla 1.9 Composición lipídica de microalga Coelastrella [73]	16
Tabla 1.10 Tabla comparativa de Botryococcus braunii y Coelastrella.....	17
Tabla 1.11 Catalizadores utilizados en la producción de SAF [36] [37] [38] [39] [42] [41] .	18
Tabla 1.12 Procesos para la producción de SAF [34].....	19
Tabla 1.13 Porcentaje lipídico y productividad de biomasa y lípidos de distintas microalgas [37]	23
Tabla 2.1 Fases móviles de cromatografía en columna por gravedad.....	33
Tabla 3.1 Densidad celular por hora de Coelastrella CORE 3	43
Tabla 3.2 Rendimiento del cultivo de Coelastrella en las dos fases de experimentación ..	47
Tabla 3.3 Extractos crudos obtenidos.....	50
Tabla 3.4 Fracciones del extracto lipídico de la microalga Coelastrella.....	53
Tabla 3.5 Compuestos identificados de la segunda fracción del extracto lipídico.....	53
Tabla 3.6 Compuestos identificados de la transesterificación de ACU	55
Tabla 3.7 Características estructurales del catalizador	58
Tabla 3.8 Compuestos obtenidos HDO de ACU.....	60
Tabla 3.9 Clasificación de los compuestos obtenidos HDO de ACU.....	62
Tabla 3.10 Clasificación de los compuestos obtenidos HDO del extracto microalgal	64
Tabla 3.11 Clasificación de los compuestos obtenidos por HDO con extracto microalgal	65
Tabla 3.12 HEFA con distintas especies de microalgas.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción de biocombustibles por medio de microalgas [19]	13
Figura 1.2: Etapas de reacción del HDO [35]	21
Figura 1.3 Producción de SAF por medio de HEFA [35].....	22
Figura 1.4 Rutas de producción para SAF [35].....	23
Figura 1.5 Cadena productiva para la producción de SAF [47]	26
Figura 2.2 Escalamiento del cultivo microalgal.....	30
Figura 2.3 Extracción lipídica con cloroformo-metanol.....	32
Figura 2.4 (A) Extracto microalgal con hexano; (B) (C) Compuestos en la columna	33
Figura 2.5 (A) Mezcla de TEOS y ácido clorhídrico; (B) Síntesis en vaso de teflón para la autoclave.....	35
Figura 2.6 (A) Adición de TEOS; (B) Mezcla homogénea de 20 horas	35
Figura 2.7 (A) Autoclave; (B) (C) Síntesis en autoclave.....	36
Figura 2.8 Filtrado al vacío.....	36
Figura 2.9 Preparación de ácido fórmico y boehmita	37
Figura 2.10 Impregnación con Níquel	38
Figura 2.11 Catalizador NiMo/SBA-15-ZSM-5 /Al ₂ O ₃	39
Figura 2.12 Equipo de DRX	39
Figura 2.13 Equipo Quantachrome NT2LX	40
Figura 2.14 Reactor de lecho fijo Microactivity-Reference marca PID Eng & Tech.....	41
Figura 2.15 Reactor de lecho fijo Microactivity-Reference marca PID Eng & Tech.....	42
Figura 3.1 Cultivos de Coelastrella sp en mantenimiento.....	43
Figura 3.2 Cultivos microalgales 0H (A), 72H (B), 96H (C), 144H (D), 168H (E) y 240H (F)44	
Figura 3.3 Curva de crecimiento de Coelastrella sp CORE 3	45
Figura 3.4 Escalamiento de cultivo microalgal de 10 L (A) Cultivo a las 24 horas de su inoculación; (B) Cultivo a las 96 horas de su inoculación	46
Figura 3.5 Sedimentación en cuarto frío del cultivo de 10 L.....	46
Figura 3.6 Diferentes separaciones del cultivo y biomasa microalgal.....	47
Figura 3.7 Biomasa liofilizada	47
Figura 3.8 Cromatografía de capa fina con tres extracciones.....	47
Figura 3.9 Extractos crudos obtenidos.....	47
Figura 3.10 Muestras obtenidas de la columna cromatográfica	52
Figura 3.11 Cromatografía de capa fina de fracciones lipídicas	52
Figura 3.12 Difractogramas de rayos X del catalizador NiMo/ZAS-15 (a) ángulo bajo y (b) ángulo alto	57
Figura 3.13 Isoterma de adsorción-desorción del catalizador NiMo/ZAS-15.....	58
Figura 3.14 Comparación de productos obtenidos con ACU y extracto microalgal.....	58

GLOSARIO

ACU Aceite de Cocina Usado

ARS Agua Residual Sintética

ASA Aeropuertos y Servicios Auxiliares

ATAG Grupo de Acción del Transporte Aéreo

BET Brunauer-Emmett Teller

CCF Cromatografía de capa fina

CG-EM Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas

CH₄ Metano

CMNUCC Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO Monóxido de carbono

CO₂ Dióxido de carbono

CORSIA Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional

CO_{2eq} Dióxido de carbono equivalente

CS₂ Sulfuro de Carbono

DRX Difracción de Rayos X

GEI Gases de Efecto Invernadero

HCL Ácido clorhídrico

HDO Hidrodesoxigenación

HDS Hidrodesulfuración

HEFA Ácidos grasos y Ésteres Hidroprocesados

ICCT Consejo Internacional de Transporte Limpio

Mo Molibdeno

N₂O Óxido nitroso

Ni Níquel

NO_x Óxidos de nitrógeno

OACI Organización de Aviación Civil Internacional

REMBIO Red Mexicana de Bioenergía

RSB Mesa redonda sobre Biomateriales Sostenibles

SAF Combustible Sostenible de Aviación

SAXS Difracción de rayos X de ángulo bajo

SO₂ Dióxido de azufre

SO_x Óxidos de azufre

TAG Triaciglicéridos

TAP Tris-Acetato-Fosfato

TEOS Tetraetoxisilano

WSHV Velocidad espacial horaria en peso

RESUMEN

La industria de aviación es una de las industrias que más crecimiento ha tenido en los últimos años, generando así mayor consumo de fuentes fósiles y, por ende, mayor emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Debido a los impactos ambientales que esto provoca, se han tenido que estudiar y desarrollar alternativas como el combustible sostenible de aviación (SAF, por sus siglas en inglés; Sustainable Aviation Fuel). Existen diversos tipos de materias primas y procesos con los que se puede producir SAF, como el Aceite de Cocina Usado (ACU) o las microalgas. El ACU al no tener un manejo óptimo representa un riesgo ambiental y a la salud, por lo que su uso como materia prima tiene potencial para la producción de biocombustibles. Por otro lado, las microalgas han sido catalogadas como biocombustible de tercera generación, lo que las hace una fuente lipídica con potencial frente a cultivos oleaginosos, tienen una alta actividad fotosintética, fijan CO₂, acumulan grandes cantidades de lípidos y tiene un rápido crecimiento. En este proyecto se llevó a cabo el cultivo de la microalga *Coelastrrella* sp CORE 3 en contenedores de 5 litros hasta lograr un volumen total de 20 L utilizando Agua Residual Sintética como medio de cultivo. Se obtuvo una producción de biomasa de 0.38 gL⁻¹, a partir de esta biomasa, se obtuvieron 1.83 g de extracto microalgal; de los cuales el 38.5% fueron lípidos. El ACU utilizado fue caracterizado con pruebas de densidad, viscosidad, humedad, acidez y saponificación. Posteriormente, ambas materias primas se llevaron a un proceso de hidrodeseoxigenación (HDO) en un reactor de lecho fijo, utilizando NiMo/SBA-15-ZSM-5 /Al₂O₃ como catalizador. En la reacción de HDO de ACU se obtuvo un rendimiento de 55.8% de producción de SAF, con una buena relación de iso/ n-parafinas, la cual demuestra una calidad buena en el SAF obtenido. Mientras que, para la HDO con el extracto microalgal se obtuvo un rendimiento del 21.6% de producción de SAF y una relación de iso/n-parafinas baja.

ABSTRACT

The aviation industry is one of the fastest growing industries in recent years, leading to increase consumption of fossil fuels and, consequently, higher emissions of Greenhouse Gases (GHG). Due to the environmental impacts this causes, alternatives such as Sustainable Aviation Fuel (SAF) have had to be studied and developed. Various types of raw materials and processes can be used to produce SAF, such as Used Cooking Oil (UCO) or microalgae. The lack of optimal management of UCO represents an environmental and health risk, so its use as raw material has potential for the production of biofuels. On the other hand, microalgae are classified as third-generation sources, making them a promising lipid source compared to oilseed crops. They have high photosynthetic activity, capture CO₂, accumulate large lipid quantities and grow rapidly.

In this project, the microalgae *Coelastrella* sp CORE 3 was cultivated in 5 liter containers, which were scaled up to a total volume of 20 liters using Synthetic Wastewater as the growth medium. A biomass production of 0.38 gL⁻¹ was achieved, resulting in 1.83 g of microalgal extract, of which 38.5% were lipids. The UCO was characterized with density, viscosity, moisture, acidity and saponification tests. Subsequently, both raw materials were subjected to a hydrodeoxygenation (HDO) process in a fixed bed reactor, using NiMo/SBA-15-ZSM-5/Al₂O₃ as catalyst. In the HDO reaction of UCO, a yield of 55.8% SAF production was obtained, with a good iso/n-paraffin ratio, demonstrating good quality in the obtained SAF. While, for the HDO with the microalgal extract resulted in 21.6% SAF production yield and a low iso/n-paraffin ratio.

INTRODUCCIÓN

La actual crisis ambiental que enfrentamos, resultado del consumo de fuentes fósiles, ha dado lugar a la emisión de grandes cantidades de contaminantes en la atmósfera, causando afectaciones en el aire, agua, salud humana, cambio climático, entre otros. Estamos viviendo una etapa caracterizada por una demanda energética elevada, lo que ha generado una crisis energética a nivel mundial. Este excesivo consumo de energías fósiles ha llevado al aumento de las emisiones contaminantes.

En consecuencia, se han iniciado investigaciones y propuestas para abordar esta alta demanda energética con el menor impacto ambiental posible. Los biocombustibles son una alternativa que busca generar fuentes de energía de bajo impacto, basadas en materias orgánicas, entre otras características.

El combustible sostenible de aviación (SAF por sus siglas en inglés) está catalogado como un biocombustible líquido sintético que se compone de hidrocarburos lineales y ramificados. Debido a sus propiedades físicas y químicas, este biocombustible es muy parecido a la turbosina.

Existen distintas ventajas sobre el uso de SAF, pero la principal es que este biocombustible, durante su cadena de producción, emite menos cantidades de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en comparación con la turbosina de fuentes fósiles.

A pesar de que su implementación es muy importante a nivel global y nacional, aún se siguen buscando mejoras para su producción. Dentro de las limitantes que existen, está el abastecimiento permanente de materias primas, ya que algunas compiten con la seguridad alimentaria del país y también algunas de estas fuentes ya son utilizadas para la producción de otros biocombustibles, como el biodiesel. Dentro de las materias primas más conocidas para la producción de SAF están las grasas animales, Aceite de Cocina Usado (ACU), lípidos provenientes de microalgas, aceites provenientes de cultivos, etc.

Por otra parte, durante la reacción para la producción de SAF es necesario utilizar catalizadores, los cuales buscan acelerar el proceso de reacción. A pesar de estar en el límite de tiempo para lograr una transición energética, los catalizadores para el combustible sostenible de aviación aún se siguen investigando y desarrollando.

Es por esto que este trabajo estudió la producción de SAF mediante el uso de dos materias primas, ACU y lípidos provenientes de microalgas. Para lograr este objetivo; se cultivaron 20 litros de biomasa microalgal de *Coelastrella* sp CORE 3, además, se sintetizó y se caracterizó el

catalizador a emplear y se sometieron las dos materias primas a una reacción de HDO, con el fin de evaluar el rendimiento de la reacción bajo las condiciones establecidas.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Dependencia de los combustibles fósiles en la industria de la aviación

Actualmente, la energía en la que se basa nuestro sistema económico está constituido en su mayoría por combustibles fósiles, los cuales al ser extraídos y mediante su combustión son una de las fuentes que genera más emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1].

Una de las industrias que aporta grandes cantidades de GEI, es la industria de la aviación. Se estima que globalmente al día despegan 128,000 vuelos comerciales transportando 12,5 millones de pasajeros [2]. De acuerdo con el Organismo Especializado de las Naciones Unidas, la tasa de crecimiento del transporte aéreo a nivel mundial ha ido en aumento [3].

Este crecimiento en la industria de la aviación ha provocado un incremento de contaminantes en la atmósfera. Durante todos los vuelos comerciales que se realizaron en el 2018 a nivel mundial, los aviones emitieron un 2.4% de las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles fósiles [4]. Así mismo, The international Council on Clean Transportation (ICCT), organización que busca investigar, desempeñar y optimizar el transporte terrestre, marítimo y aéreo con el fin de beneficiar la salud pública y mitigar el cambio climático, indica que la industria de la aviación ha aumentado un 32% sus emisiones en los últimos cinco años [4].

La aviación civil en México durante el 2018, emitió 7,602.173 Gg de CO₂eq, lo cual representó el 4.3% de las emisiones del sector transporte, sólo después del sector de autotransporte en emisiones generadas [5]. Además, de acuerdo con Aeropuertos y Servicios Auxiliares durante el 2019 México consumió 4 960 millones de litros de turbosina [6].

La quema de combustible fósil, como la turbosina genera emisiones de CO₂, CH₄, N₂O, CO, SO₂, entre otros. Cabe mencionar que la emisión de estos contaminantes depende directamente del tipo de aeronave utilizada [7].

1.2 Alternativas a los combustibles fósiles

Debido a los grandes impactos ambientales que provoca la extracción, producción y quema de combustibles fósiles, se han estudiado y evaluado alternativas, como biocombustibles amigables con el medio ambiente, los cuales provienen de la materia orgánica, la cual al someterse a un proceso de combustión libera energía y se clasifican en gaseosos, sólidos y líquidos [8].

La REMBIO [9] define los biocombustibles líquidos como:

Aceites, alcoholes y otros compuestos químicos producidos a partir de materia orgánica tal como, plantas herbáceas, oleaginosas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, como también una gran cantidad de desechos biológicos industriales como los desperdicios y los subproductos de la industria alimenticia. Asimismo, los biocombustibles líquidos se clasifican en biodiesel, diésel verde, bioetanol y combustible sostenible de aviación.

1.3 Generalidades del SAF (Sustainable Aviation Fuel)

El SAF es un biocombustible líquido sintético conformado principalmente por hidrocarburos lineales y ramificados, también se hace referencia al SAF como una mezcla de bioquerosenos parafínicos sintéticos, la cual también puede contener compuestos aromáticos, dependiendo de la ruta tecnológica empleada. Debido a su estructura, densidad y propiedades físicas, este biocombustible es de gran similitud con la turbosina fósil [10]. En la Tabla 1.1, analizamos las propiedades que tienen la turbosina fósil y el SAF.

Tabla 1.1 Propiedades de la turbosina y el combustible sostenible de aviación [11]

Propiedades	Turbosina fósil	SAF
Gravedad específica	0.75-0.84	0.73-0.77
Punto de nube (°C)	>40	>40
Energía específica (MJ/kg)	>42.8	44.1
Compuestos aromáticos (vol-%)	<25	<25

La turbosina fósil, se compone en un 70% de parafinas (parafinas, isoparafinas y cicloparafinas). Las primeras, proporcionan al combustible una alta liberación de calor [12], las segundas dan fluidez cuando el combustible se encuentra a bajas temperaturas y las últimas, proporcionan un menor punto de congelación [13]. Los otros compuestos que conforman la turbosina son en 1% las olefinas, las cuales intervienen en el proceso de combustión limpia y el restante está conformado por compuestos aromáticos, los cuales se relacionan con la liberación de energía [13].

1.4 Ventajas de utilizar SAF

Una de las ventajas que más ha sido estudiada sobre el uso de SAF es la reducción de GEI. Se ha reportado que, analizando todo el ciclo de vida del combustible sostenible de aviación, este representa una reducción de GEI de hasta 80% en relación a la turbosina fósil, siendo el principal motivo para fomentar su uso en la industria de aviación [14]. Además, este biocombustible tiene un contenido energético mayor en comparación a la turbosina fósil.

Aunado a esto, existen otras ventajas sobre su uso como la reducción de SO_x y NO_x, los cuales al estar presentes en la atmósfera generan afectaciones en la salud humana [14].

Por otra parte, al utilizar las materias primas que cumplan con lo establecido en el estándar RSB (Round table of Sustainable Biomaterials), se disminuye el impacto ambiental que se genera al suelo como erosión, pérdida de la biodiversidad, entre otros [15]. También se reduce el impacto a los cuerpos de agua y la contaminación de éstos.

Otra de las ventajas de impulsar su uso a nivel país, es que se fomentaría una diversificación de la matriz energética nacional, además, es una alternativa viable frente al agotamiento de fuentes fósiles en México y también su implementación ayudaría a cumplir con los objetivos que, como país, se firmaron en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

1.5 Combustibles de aviación y sostenibilidad

Como se mencionó anteriormente, el estudio, desarrollo e innovación de los combustibles de aviación ha comenzado a fomentar medidas enfocadas hacia la sostenibilidad. Dentro de estas medidas, está CORSIA, por sus siglas en inglés, que es el Plan de reducción y eliminación de carbono para la aviación internacional, el cual surge como una medida para que la industria de la aviación reduzca e incluso elimine sus emisiones de CO₂ basándose en tres medidas bases como la creación de nuevas reglas y procedimientos; tecnologías y aviones más eficientes y desarrollo de nuevos combustibles sostenibles.

CORSIA ha impulsado una certificación que engloba más de 10 criterios que van desde emisiones de GEI, reservas de carbono, agua, tierra, desperdicios y químicos, derechos humanos y laborales, derecho al uso de agua, seguridad alimentaria, entre otros. Debido a esto, esta certificación es una de las más importantes a nivel mundial. Este tipo de iniciativas fomentan la creación de una industria de aviación más sostenible.

1.6 Situación actual del consumo del combustible de aviación

1.6.1 Situación actual del consumo de SAF a nivel mundial

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), durante el 2009 aprobó el uso de biocombustibles alternativos para la industria de la aviación, esto con el fin de reducir las emisiones provenientes de los aviones [16]. A pesar de esto, el mercado de SAF aún sigue en fase de desarrollo a nivel mundial, pero se han realizado algunas acciones que fomentan más su uso y así poder lograr una transición energética.

Dentro de estas acciones propuestas se encuentra el esquema diseñado por la OACI el cual se basa en un proyecto que busca registrar los vuelos que salen y entran de un país con el fin de poder calcular las emisiones totales de CO₂ que se generan [17]. A partir de estas estrategias planeadas por esta organización, se comenzaron a generar nuevos proyectos en la industria de la aviación bajo un enfoque de sostenibilidad. En la Tabla 1.2 observamos algunos de los proyectos que han surgido en el mundo para lograr una transición energética en la industria de la aviación.

Tabla 1.2 Iniciativas dentro de la industria de aviación en pro del ambiente [11]

Proyecto	¿Qué es lo que busca?
Aviation: Benefits Beyond Borders	Su objetivo radica en fomentar los aspectos positivos de la aviación a nivel mundial, abarcando la conectividad, el crecimiento económico, innovación tecnológica y el desarrollo sostenible. Este último engloba la promoción de prácticas sostenibles como una mejor eficiencia ambiental, donde se mejore la calidad del aire, una fabricación más ecológica, se fomente la economía circular, una gestión adecuada de residuos, entre otras.
Aire-protección climática y sostenibilidad	Esta iniciativa alemana busca la generación de queroseno a partir de energía renovables. Se plantea que para el 2025, todos los aviones del país al menos utilicen un 10% de biocombustible.
Biocombustibles Sostenibles de la Aviación del Medio Oeste	Esta iniciativa busca promover la seguridad energética en Estados Unidos, basándose en diversificar el uso de

	biocombustibles en el país con el objetivo de reducir el impacto ambiental.
Aviación sostenible	El Reino Unido planteó esta estrategia con el fin de garantizar un futuro más limpio, silencioso e inteligente para la industria.
Grupo de Acción del Transporte Aéreo (ATAG)	Este grupo se centra en desarrollar y probar estrategias en pro del ambiente, donde los miembros son fabricantes, proveedores y empresas de aviación con presencia a nivel mundial. Teniendo un grupo de investigación enfocado sólo en SAF
SkyNRG	Esta empresa considera que es crucial desarrollar estrategias que busquen minimizar el uso de combustibles fósiles. A través de sus socios estratégicos busca que la producción y uso de SAF sea a nivel mundial
FedEx/ Southwest y Red Rock	Ambas empresas hicieron un contrato para recibir y producir 10, 000 ton/año de SAF a partir de residuos forestales por 8 años, usando este biocombustible en vuelos de California
Cathay Pacific Airways y Fulcrum BioEnergy	Se acordó una producción de SAF utilizando como materia prima residuos, esta producción fue de 100 000 ton/año por 10 años

Otra de las grandes iniciativas que se ha generado en el mundo sobre la implementación de SAF, fue la iniciativa creada por la Unión Europea en el 2015, donde se establece que a partir de dicho año no podrán aterrizar aviones que no tengan una mezcla de SAF y turbosina [18].

Por otra parte, el avance y desarrollo de tecnologías en pro de la industria de aviación, ha ido en aumento pues a finales del año 2020 la empresa Airbus presentó un proyecto *Airbus ZEROe*. Este proyecto busca poner en el mercado 3 aeronaves que funcionen completamente con combustible sostenible de aviación [19]. Otro ejemplo de estos avances es el desarrollo del proyecto que realizaron varias universidades en Estados Unidos junto con la aerolínea Southwest donde desarrollaron un proceso de refinación que puede producir SAF a partir de desechos de alimentos y el cual se espera que pueda operar a inicios del 2023. En este proyecto se estudió el

procesamiento de la materia prima, los reactores, compresores, destiladores, mezclado y almacenamiento del biocombustible [20].

1.6.2. Turbosina y SAF en México

El mercado de aviación es uno de los sectores que más va en aumento, pues de acuerdo con los datos de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), el consumo de turbosina en 2018 en los aeropuertos de Ciudad de México, Cancún, Guadalajara y Monterrey presentó un aumento de 50 millones de litros por bimestre con relación al año anterior [21].

Hay muchos factores que determinan el consumo y la demanda de turbosina, pues varía con relación al número de vuelos operados, tipo de aeronave utilizada, etc. Por lo que la empresa ASA, la cual es la encargada de suministrar el combustible a la industria aérea, contabiliza los litros suministrados a los aeropuertos a nivel nacional por mes. Por ejemplo, el aeropuerto de Cancún durante el 2021 tuvo un consumo de más 755 millones de litros de turbosina mientras que el aeropuerto de Mérida consumió más de 54 millones de litros de turbosina durante el mismo año [22] [23] [24]. Debido a esta alta demanda que existe por el combustible de aviación es necesario incentivar combustibles que no provengan de fuentes fósiles.

De acuerdo con lo publicado en la Ley de Promoción de Bioenergéticos se autorizó la importación de biocombustibles que tengan los certificados jurídicos y técnicos del país de procedencia [25]. Además, se han establecido los lineamientos de las especificaciones de calidad y características para las mezclas sintéticas de los biocombustibles [16] [25] [26].

A pesar de que en nuestro país la producción de SAF aún se encuentra en desarrollo, en 2011 México, se inclinó por la producción de combustible sostenible de aviación obtenido por hidrot ratamiento. Fue en ese mismo año que se realizó el primer vuelo con SAF en el país. Este vuelo se realizó por medio de un *Ecojet* de la aerolínea *Interjet* con una mezcla del 27% y este biocombustible se obtuvo por medio de hidrot ratamiento y como materia prima se utilizó aceite proveniente de *Jatropha curcas* [27].

Otro de los vuelos más importantes que se han realizado en el país, fue el vuelo internacional que despegó del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y aterrizó en Madrid en el 2011, este vuelo utilizó una mezcla de 75% de turbosina fósil con 25% de SAF, en ese entonces referido como bioturbosina. La empresa paraestatal ASA en 2011, publicó un proyecto denominado *Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México*, el cual buscaba hacer

realidad el uso de biocombustibles en la industria de la aviación para el país mediante la coordinación con distintos sectores para avanzar hacia el uso de SAF [28].

Otro ejemplo de producción de SAF fue en 2011 en Ensenada, Baja California donde la empresa OriginOil Inc se unió al proyecto a escala piloto para la producción de SAF a partir de microalgas [29]. El objetivo del proyecto consistía en demostrar la viabilidad de la producción industrial de microalgas y la inversión requerida para la producción a gran escala de SAF. Para el desarrollo de este proyecto se unieron distintos grupos tanto de investigación, empresariales y de inversión. Dentro de las etapas planeadas para el escalamiento del proyecto, se encontraba crear un modelo para posteriormente replicarlo donde se implementarían 1000 ha de microalgas, posteriormente se modificaría la operación de las hectáreas de producción a una de estanques abiertos y otra con fotobiorreactores. El potencial de producción de este proyecto era de 200 kg de biomasa al día obteniendo 74 kg de lípidos [29]. Actualmente se desconoce el estado en el que se encuentra dicho proyecto.

Uno de los esfuerzos más recientes que se han realizado en el país, fue el vuelo que realizó Aeroméxico el pasado 5 de junio del 2022, la empresa adquirió 6,500 litros de SAF para operar un vuelo comercial de Los Ángeles- Ciudad de México reduciendo así 3.7 toneladas de CO₂, siendo el equivalente a lo emitido por 500 coches [30].

Debido a estos proyectos presentados en este apartado, en nuestro país el uso de SAF sólo se ha empleado en vuelos a prueba, pero se espera que esto aumente en los próximos años. De hecho, la Organización Internacional de Aviación Civil esperaba que el mercado de SAF tuviera un aumento en el 2020.

1.7. Materias primas utilizadas para producir combustible de aviación

Entre las materias primas existentes para la producción de SAF existen 3 clasificaciones: primera generación, segunda generación y tercera generación. La primera se caracteriza por utilizar cultivos que son destinados para la alimentación humana. La segunda, utiliza residuos agrícolas y forestales y aceites no comestibles y, por último, la tercera generación se basa en la producción de biocombustibles por medio de algas y microalgas [31]. En la Tabla 1.3 se muestran algunas de las materias primas que funcionan como bioenergéticos y el rendimiento que se obtiene de esos cultivos.

Tabla 1.3 Rendimiento de cultivos bioenergéticos

Materia prima	Rendimiento (kg biodiesel/ ha)	Referencia
Palma (<i>Elaeis quiannensis</i>)	2800-6000	[32]
Jatropha (<i>Jatropha curcas</i>)	350-1900	
Cardo (<i>Cynara cardunculus</i>)	270-1520	
Ricino (<i>Ricinus communis</i>)	260-1400	
Colza (<i>Brassica napus</i>)	500-1400	
Camelina (<i>Camelina satina</i>)	420-1210	
Soja (<i>Glycine max</i>)	500-1000	
Girasol (<i>Helianthus annus</i>)	200-1400	
Microalga (<i>Nannochloropsis</i> sp)	86515	[33]

1.7.1. Aceite de Cocina Usado

Esta materia prima al no tener un manejo óptimo puede volverse un problema de salud pública y ambiental. De acuerdo con López-Cruz et al., el ACU puede contribuir a la proliferación de microorganismos que afectan de manera directa la salud humana [34]. De igual forma, se ha estudiado el impacto que provoca el nulo manejo del ACU y se ha encontrado que este residuo puede contaminar cuerpos de agua, generando afectaciones en la flora y fauna del ecosistema. Además, al ser arrojado por las tuberías puede generar obstrucciones al solidificarse, aumentando así, los costos de mantenimiento de las plantas depuradoras [35].

Otro de los problemas ambientales que genera el nulo manejo de ACU es la contaminación del suelo, pues generalmente este residuo es depositado en la basura, lo que permite que el aceite pueda infiltrarse en las aguas subterráneas [35]. Es por esto que este residuo tiene un gran potencial para volverse una fuente prometedora para la producción de biocombustibles, por lo que es necesario incentivar y fomentar su recolección [34].

En México el manejo adecuado de residuos ha ido en crecimiento y es por esto que cada día hay más empresas que se interesan por la recolección del ACU. En la Tabla 1.4 se resumen algunas de las empresas que se encuentran en distintas partes del país.

Tabla 1.4 Empresas dedicadas a la recolección de ACU en México

Empresa	Puntos de recolección	Fines de recolección	Referencias
Biofuels de México	Estado de México, Ixtapa, Morelos, Puebla, Quintana Roo, Acapulco, Veracruz, Saltillo, Tlaxcala, Ciudad de México, Querétaro y Guadalajara	Para producción de biodiésel	[36]
Reoil	No especifica	Empresa encargada sólo de la recolección de ACU y éste es vendido a empresas para la producción de biodiésel	[35]
Renov	Yucatán	Empresa enfocada en el mercado de reactores para la producción de biodiésel, pero ha comenzado a recolectar ACU	[37]
Moreco	Morelia, Michoacán	Producción de biodiésel	[38]
Energía Girón	Itzincab, Yucatán	Producción de biodiesel	[39]

Se ha estudiado el potencial de ACU para la producción de biocombustibles y se ha encontrado que éste está compuesto en su mayoría de C16 y C18 (ver Tabla 1.5), lo cual lo hace ideal para ser empleado como bioenergético [40] [41].

Tabla 1.5 Ejemplo de composición de ácidos grasos del ACU [41]

% en peso	Lípidos en ACU
Mirístico (C14:0)	0.9
Palmítico (C16:0)	20.4

Palmitoleico (C16:1)	4.6
Esteárico (C18:0)	4.8
Oleico (C18:1)	52.9
Linoleico (C18:2)	13.5
Linolénico (C18:3)	0.8
Araquídico (C20:0)	0.12
Eicosanoico (C20:1)	0.84
Behénico (C22:0)	0.03
Erúcico (22:1)	0.07
Tetracosánico (C24:0)	0.04

El uso de ACU para la producción de combustible de aviación ya se ha realizado en diferentes partes del mundo, en la Tabla 1.6 se reportan algunos vuelos en los que se ha producido SAF a partir de ACU.

Tabla 1.6 Vuelos comerciales utilizando ACU en diferentes proporciones

Empresa	Materias primas utilizadas	Características	Referencias
Alaska Airlines y Dynamics Fuels	20% SAF de ACU 80% Turbosina	Fecha: 20 noviembre 2011 Lugar: Seattle a Portland	[42]
Hainan Airlines	50% SAF de ACU 50% Turbosina	Fecha: 23 noviembre 2017 Lugar: Beijing a Chicago	[43] [44]
Air France-KLM Groups	16% SAF de ACU 84% Turbosina	Fecha: 26 mayo 2021 Lugar: Francia a Montreal	[45]
Airbus A380	100% SAF de ACU	Fecha: 28 de marzo 2022 Lugar: Francia a Niza Fue un vuelo de prueba con 100% de SAF, además fue utilizado el	[46]

		aviación con mayor número de pasajeros	
--	--	--	--

1.7.2. Microalgas para la producción de SAF

Las microalgas son una de las materias primas con gran potencial para la producción de biocombustibles. De estas se pueden obtener distintos tipos de biocombustibles desde biohidrógeno hasta combustible sostenible de aviación (Ver Figura 1.1). Estas microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes y eucariontes [47]. La clasificación de las microalgas está determinada por distintos parámetros como pigmentación, morfología, ciclo de vida y estructura celular [47].

Para la producción de SAF es necesario obtener los lípidos contenidos en ellas y este contenido lipídico varía en relación con la especie a emplear. Generalmente la composición lipídica de estos organismos se compone de TAG (ácidos grasos saturados y ácidos grasos insaturados), ácidos grasos libres y fosfolípidos, entre otros [48] [49].

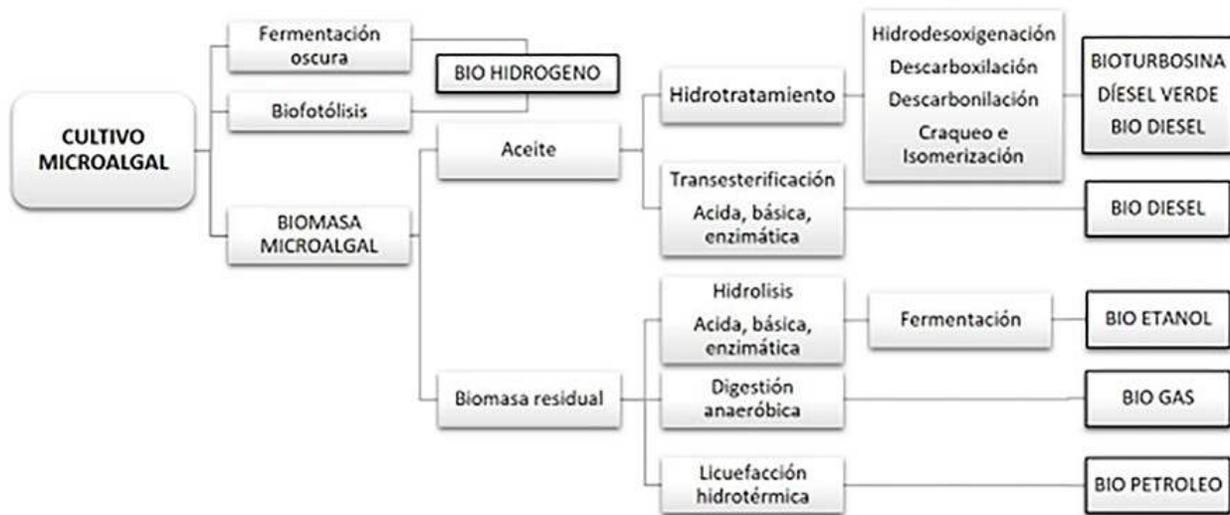


Figura 1.1 Producción de biocombustibles por medio de microalgas [50]

Para evaluar la producción de microalgas es necesario garantizar los parámetros óptimos para su reproducción, ya que éstas se ven modificadas si se altera alguno de los siguientes factores [48] [50] :

1. Intensidad de la luz, a mayor exposición de luz mayor será la producción lipídica.
2. Altas cantidades de nitratos y fosfatos
3. Temperatura

4. pH
5. CO₂ o Aire al que se expone el cultivo.
6. Tamaño de inóculo

Es importante señalar que al modificar algunos de estos parámetros se podría afectar la tasa de latencia, la tasa de crecimiento máximo, la acumulación de biomasa y la producción de metabolitos [48]. De igual forma, al tener una mala composición del medio del cultivo se afectaría la formación lipídica pues esta composición modificaría la producción de biomasa y la composición bioquímica de ésta [47].

A pesar de los cuidados necesarios para garantizar los parámetros óptimos para la producción de microalgas, su cultivo sigue teniendo múltiples beneficios como [48] [50]:

1. Alta tasa de crecimiento. Sus tasas de crecimiento son exponenciales ya que aproximadamente tardan de 5 a 11 días en lograr su fase productiva.
2. Elevada eficiencia fotosintética. Debido a su estructura celular las microalgas alcanzan niveles de eficiencia de 4-8% siendo un 2% mayor en comparación a las plantas superiores.
3. Capacidad de síntesis y acumulación de lípidos. Las microalgas contienen grandes cantidades de lípidos. Se han reportado especies que logran un 80% del peso de biomasa seca de lípidos, pero los valores promedio son de 20-50%.
4. No compiten con zonas destinadas para cultivos, la producción de microalgas se realiza en fotobiorreactores los cuales permiten tener un mejor manejo de la materia prima.
5. Fijan CO₂
6. Producción de metabolitos secundarios

El estudio de microalgas como fuente de materia prima para la producción de SAF es un tema que ha ido en aumento. En la Tabla 1.7 se enlistan las especies que se han empleado para la producción de este biocombustible, así como las características generales que se emplearon en el estudio correspondiente.

Tabla 1.7 Especies de microalgas estudiadas para la producción de SAF

Especie	Características	Referencias
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Medio de cultivo: Agua Residual Sintética (ARS) y melaza. Rendimiento: 70 mg de aceite/ L	[48]

<i>Scenedesmus obliquus</i> (Turpin) Kützing	Medio de cultivo: ARS y Tris-Acetato-Fosfato (TAP)	[50]
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Se cultivaron en paneles de vidrio para exterior Rendimiento: 77% para la producción de parafinas	[51]
<i>Nannochloropsis sp</i>	Se cultivó en un fotobiorreactor El SAF proveniente de microalga se estudió en una mezcla del 50% SAF y 50% turbosina.	[52]
<i>Botryococcus braunii</i>	Floración natural Rendimiento: del 15% por hidrodesintegración	[52]

En la Tabla 1.8 se reporta que la especie *Botryococcus braunii* es de las especies que más se ha estudiado para la producción de SAF e incluso ya ha sido empleada en vuelos comerciales.

Tabla 1.8 Vuelos comerciales utilizando como materia prima lípidos de microalgas para la producción de SAF

Especie	Fecha de vuelo	Características	Referencias
<i>Botryococcus braunii</i>	17 junio 2021	Vuelo comercial: Tokio a Osaka Itami Cumplió con las especificaciones de la ASTM D7566 Empresa: All Nippon Airways	[53]
<i>Botryococcus braunii</i>	17 junio 2021	Vuelo comercial: Tokio a Chitose Empresa: All Nippon Airways	[54]

1.7.2.1. Microalga del género *Coelastrella*

Este género de microalga se había encontrado en suelos y aguas en Nueva Zelanda, Corea, Australia y Bulgaria, pero en 2016 fue encontrada en aguas de Norte América [55]. En el 2017, se reportó la presencia de este género en la región tropical en Yucatán México [55].

En un estudio realizado por la Universidad de Noruega se analizó la composición lipídica de la microalga *Coelastrella*, estos análisis se hicieron en distintos días para conocer las variaciones de los lípidos durante distintos días (ver Tabla 1.9) [56].

Los resultados mostraron que la especie *Coelastrella* tiende a formar mayor porcentaje de ácidos grasos polinsaturados como lo es el ácido linoleico. Es por esto, que en el estudio se concluyó que la biomasa de esta especie contiene los principales ácidos grasos que van de C16-C18, los cuales son ideales para la producción que biocombustibles [56].

Tabla 1.9 Composición lipídica de microalga *Coelastrella* [56]

Ácido graso	Nombre	8 días	18 días
C10:0	Ácido cáprico	0.027 + 0.01	0.033 + 0.01
C12:0	Ácido láurico	0.370 + 0.02	0.359 + 0.04
C14:0	Ácido mirístico	0.140 + 0.01	0.156 + 0.01
C16:0	Ácido palmítico	16.083 + 0.75	17.700 + 2.60
C16:1	Ácido palmitoleico	9.790 + 1.08	11.183 + 0.01
C17:0	Ácido heptadecanoico	0.177 ± 0.02	0.214 ± 0.05
C17:1	Ácido cis-10-heptadecanoico	1.539 + 0.30	1.275 ± 0.13
C18:0	Ácido esteárico	0.305 + 0.05	0.242 + 0.03
C18:1n9t	Ácido elaídico (trans)	0.259 + 0.14	0.107 + 0.02
C18:1n9c	Ácido oleico (cis)	20.191 + 2.15	22.608 + 2.74
C18:2n6c	Ácido linoleico (cis)	11.102 + 3.94	7.127 + 0.50
C18:3n6	Ácido γ-linoleico	0.796 + 0.08	0.894 + 0.08
C20:1	Ácido 111-eicosenoico	0.149 ± 0.01	0.214 ± 0.04
C18:3n3	Ácido linoleico	27.753 + 6.55	32.406 + 4.80
C20:2	Ácido 11.14-eicosadienoico	1.365 ± 0.60	2.280
C22:1n9	Ácido erúxico	0.078 + 0.01	0.074 + 0.03
C20:4n6	Ácido araquidónico	0.027 + 0.00	0.021 + 0.00
Ácidos grasos totales		90.15	96.89

Hasta nuestro conocimiento, los lípidos de esta especie de microalga no han sido estudiados y empleados para la producción de SAF, solamente hay literatura reportada del uso de esta especie para la producción de biodiesel.

En un estudio realizado en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Corea, se trataron microalgas (*Coelastrella*) bajo distintos medios de cultivo para así conocer si existían cambios en el perfil lipídico. Se encontró que el procesamiento con aguas residuales provenientes de cerdos produjo un material adecuado para la posible producción de biodiesel [57].

Otro estudio realizado por la Universidad de la India, analizó la producción de biodiesel a partir de los lípidos de dos especies de microalga, siendo la *Coelastrella sp.* M60 una de éstas. Se encontró que la *Coelastrella* tuvo un mayor porcentaje lipídico y se reportó que esta especie contiene 20% más ácidos grasos monoinsaturados en comparación a la otra especie analizada [58].

En una investigación realizada por la Universidad de Tamaulipas se analizaron las siguientes 5 especies de microalgas: *Chlorella miniata*, *Coelastrella* sp., *Desmodesmus quadricauda*, *Nochloris oleabundans* y *Verrucodesmus verrucosus*. Se encontró que las especies *Coelastrella* sp y *Verrucodesmus verrucosus* fueron las especies candidatas para la producción de biocombustibles debido al perfil lipídico que producen y la cantidad de biomasa obtenida en menor tiempo [59].

Como se analizó en la sección pasada, la especie *Botryococcus braunii* es una de las especies que más se ha estudiado por su formación lipídica, por lo que, en la Tabla 1.10 se presenta una comparación entre ambas especies.

Tabla 1.10 Tabla comparativa de *Botryococcus braunii* y *Coelastrella*

	<i>Botryococcus braunii</i>	<i>Coelastrella multistriata</i>
Tasa de crecimiento	Alta, duplican su biomasa a las 24 h 3-5 horas su fase de crecimiento exponencial [60]	Día 7 fase exponencial [62]
Fijación de CO₂	10 a 50 veces más eficientes que las plantas terrestres [60]	-
Medios de cultivo / Concentración	0.04-0.06 v/vm de CO ₂ para producción lipídica 0.02 v/vm para producción de hidrocarburos Fotobiorreactores [60]	Cultivos (-N) y cultivo (-NP) [62]
Extracción de lípidos	Metodología Bligh y Dyer [60]	Metodología Bligh y Dyer [62]
Contenido lipídico	25-75 % peso seco [61]	50% del peso seco 19- 59.4% de ácidos grasos poliinsaturados [62]

1.8 Producción de SAF

1.8.1 Catalizadores empleados para la producción de SAF

Un catalizador es definido como una sustancia que afecta la velocidad de reacción, pero no su equilibrio termodinámico. Las etapas que ocurren durante la catálisis son tres:

1. Interacción de los reactivos con el catalizador
2. Transformación de los reactivos e interacción con el catalizador
3. Liberación de los productos y recuperación del catalizador

Un catalizador sólido generalmente se compone de dos elementos: soporte y agente activo. En algunos es necesario añadir un tercer elemento que es un promotor.

Durante el proceso para la producción de SAF se emplean catalizadores para poder realizar la reacción en menos tiempo y así optimizar el sistema. Debido a esto es de suma importancia seguir estudiándolos y desarrollándolos. En la Tabla 1.11 se observan algunos de los catalizadores empleados para la obtención de diésel verde y SAF. Cabe mencionar que es poca la información que existe sobre estos, ya que muchos de los catalizadores se encuentran patentados.

Tabla 1.11 Catalizadores utilizados en la producción de SAF [63] [64] [65] [67] [68] [69] [70]

Características del catalizador	Materia prima	Referencia
10%Ni/HZSM-5, Si/Al-45-200 y zeolitas	Lípidos de microalga	[63]
En proporciones de 3%, 5%, 10% 15% Ni/Al ₂ O ₃ y usando soportes comerciales	Lípidos de microalga	[64]
5% Pt/C, 5% Pd/C y usando soportes catalíticos de óxidos como zirconia	Acetite palmítico	[65]
2-9% Ni/SAPO-11, usando soporte patentado	Aceite de palma	[66]
57.6% Ni/SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 4.29 Pd/ Al ₂ O ₃	Aceite de soya	[67]
10% Ni/ Al ₂ O ₃	Grasa de pollo	[68]
En proporciones de 1%,2% 5% en peso de Cu y 59%, 58% y 55% en peso de Níquel-Alúmina	Aceite de girasol	[69]
Co/Mo y Ni/Mo (Patente no. 4992605)	Aceite de canola, girasol, soja y colza	[70]
Ni/Mo/ Al con SiC (Patente no. 5705722)	Aceite pino mezclado con aceite de canola, girasol, palma u otro.	[70]

1.9. Procesos para la producción de SAF

La producción de SAF depende de las distintas tecnologías empleadas y de la materia prima utilizada [71]. Cabe mencionar que, algunos de estos procesos necesitan de una etapa de refinación con el fin de obtener un biocombustible de calidad.

Los procesos de conversión de SAF son aprobados por la Internacional ASTM y para julio 2023 se tenían 11 procesos de conversión aprobados: **FT** (Queroseno parafínico sintetizado hidroprocesado Fischer-Tropsch), **HEFA** (Queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocesados y ácidos grasos), **SIP** (Isoparafinas sintetizadas a partir de azúcares fermentados hidroprocesados), **FT-SPK/A** (Queroseno sintetizado con aromáticos derivados de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes no petroleras), **ATJ-SPK** (Alcohol para inyectar queroseno parafínico sintético), **CHJ** (Combustible para aviones por hidrotermólisis catalítica), **HC-HEFA-SPK** (Queroseno parafínico sintetizado a partir de hidrocarburos-ésteres hidroprocesados y ácidos grasos), **ATJ-SKA** (derivado de ATJ), **HEFA coprocesado** (Cohidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos en una refinería de petróleo convencional), **FT coprocesado** (Cohidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos en una refinería de petróleo convencional) y **biomasa coprocesada** (cohidroprocesamiento de biomasa) [72]. En la Tabla 1.12, se muestran algunos ejemplos de los distintos procesos que existen en empresas o universidades para la producción de SAF.

Tabla 1.12 Procesos para la producción de SAF [49] [25]

Desarrollador	Proceso/Materia prima HS	Etapas del proceso	Producto
Universidad de Carolina del Norte y Energía Diversificada ®	Centia	1.Hidrólisis 2.Decarboxilación 3.Isomeración /craqueo 4.Refinoación	Nafta Gas Licuado del Petróleo Combustible sostenible de aviación Diésel verde
Syntroleum	Bio-synfining	1.Hidrotratamiento 2.Craqueo 3. Refinoación	Nafta Combustible sostenible de aviación Diésel verde
Sasol	Fischer-Tropsch	1.Gasificación 2.Síntesis de Fischer-Tropsch 3.Hidrotratamiento 4.Hidrocraqueo 5.Refinoación	Nafta Gas Licuado del Petróleo Combustible sostenible de aviación Diésel verde
UOP Honeywell	Hidrotratamiento	1.Hidrotratamiento	Nafta

		2.Craqueo/isomerización 3.Refinación	Gas Licuado del Petróleo Combustible sostenible de aviación Diésel verde
--	--	---	--

1.9.1. Queroseno isoparafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK)

Esta ruta fue la primera en ser aprobada para ser utilizada como un proceso para la producción de SAF [25]. La ASTM D7566 fue aprobada en 2009, la cual permite el uso de SAF hasta en un 50% [49]. Este proceso utiliza como materia prima biomasa, carbón o gas natural y por medio de un proceso de gasificación se obtiene un gas sintético o *syngas*, el cual está compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono [48]. Posteriormente, este gas sintético se somete en un reactor Fischer-Tropsch con el fin de obtener Bioquerosenos Parafínicos Sintéticos (BKP o KPS) [34].

1.9.2. HEFA (Ácidos Grasos y Ésteres Hidroprocesados)

Actualmente el HEFA es el proceso más estudiado para la producción de SAF, ya que este proceso permite utilizar distintas materias primas, además las etapas de reacción son compatibles con las instalaciones de refinería existente y en el 2011 este proceso fue aprobado por la ASTM D7566 [34] [63].

Dentro de las materias primas utilizadas se encuentran los lípidos provenientes de plantas, algas, sebo o residuos (ACU). Estas fuentes de lípidos se conforman de oxígeno entre 10-20% de su peso, lo que se busca en este procesamiento es la eliminación de oxígeno, ya que éste al estar presente durante la combustión genera un biocombustible con inestabilidad térmica, con un poder calorífico menor, con alta viscosidad, etc [13].

Este proceso consta de dos fases, a continuación, se explican ambas fases:

1. Primera fase

Lo que se busca es romper los enlaces C-O del triglicérido en presencia de hidrógeno gaseoso y un catalizador, este hidrógeno es empleado a alta presión y temperatura. Lo que se busca tener es una reacción de dobles enlaces, donde el oxígeno contenido en los aceites se reduzca por medio de la saturación de los enlaces dobles C=O y por medio de esta ruptura de enlaces se logra la formación de enlaces C-H.

Después de esta reacción, ocurre la reacción de Hidrodesoxigenación (HDO), la cual consta de 3 mecanismos. El primero es por la descarboxilación, donde se busca una

remoción de oxígeno en forma de CO, posteriormente sigue la descarbonilación donde se remueve el oxígeno por medio de CO₂ y, por último, la hidrogenación la cual remueve el oxígeno en forma de H₂O [19] (ver Figura 1.2).

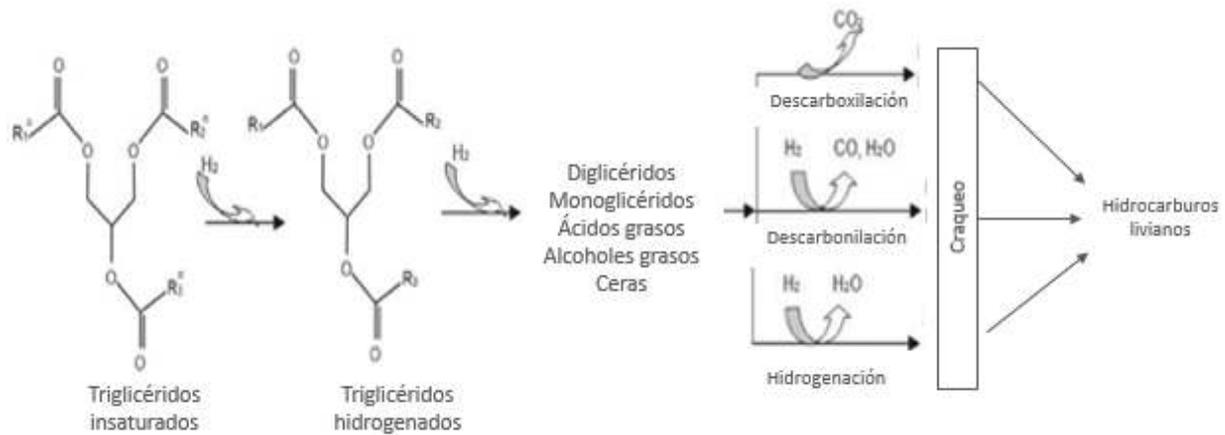


Figura 1.2: Rutas de reacción durante la HDO [73]

2. Segunda fase

En esta etapa se da la isomerización e hidrodeseintegración de las moléculas, pero se ha comenzado a estudiar que esta segunda etapa pueda omitirse, ya que en la HDO también se dan rompimientos. Además, se ha visto que la HDO aumenta la densidad energética por lo que produce un biocombustible con baja viscosidad [50].

Durante todo este proceso se obtiene SAF, naftas o biogasolina y diésel verde. El porcentaje de formación de estos combustibles verdes está determinado por la longitud de cadena de carbonos, la nafta o biogasolina está compuesta de un largo de cadena de C5 a 7, el SAF de C8 a C16 y el diésel verde de C17 a C35 [48]. Este método permite obtener hasta un 36% de rendimiento para la producción de SAF [17] (ver Figura 1.3).

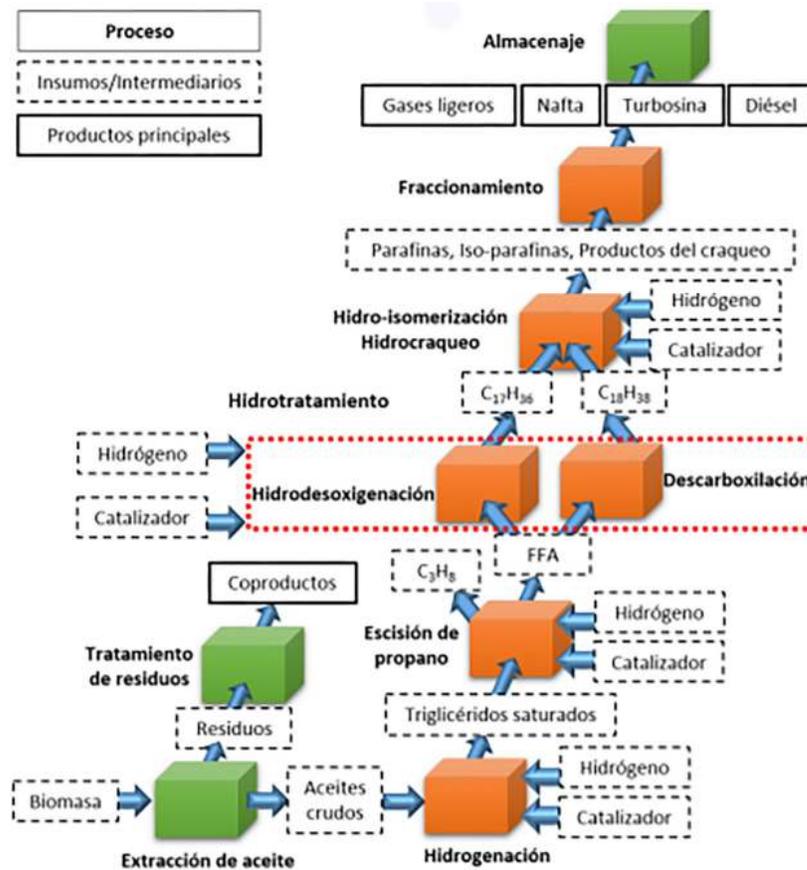


Figura 1.3 Producción de SAF por medio de HEFA [25]

1.9.3. Isoparafinas sintéticas (SIP)

Las SIP fueron aprobadas en el 2014, este proceso se basa en la fermentación de azúcares en moléculas hidrocarbonadas y éstas se pueden mezclar con combustible en turbinas. La mezcla aprobada es del 10% [34] [49].

1.9.4. FT-SPK/A (Queroseno sintético Fischer-Tropsch con aromáticos)

Este proceso fue aprobado en noviembre del 2015, el cual se basa en el proceso FT donde se produce combustible sintético para aviación, pero con aromáticos [25] [49].

1.9.5. Alcohol to Jet (ATJ)

Fue aprobado por la ASTM en abril del 2016, este proceso se basa en la deshidratación, oligomerización e hidroprocesado. La materia prima, que es un alcohol (isobutanol), es convertida en un combustible hidrocarbonado puro [25] [49].

Como se observa en la Figura 1.4, existen distintas rutas para la producción de SAF dependiendo de la materia prima utilizada.

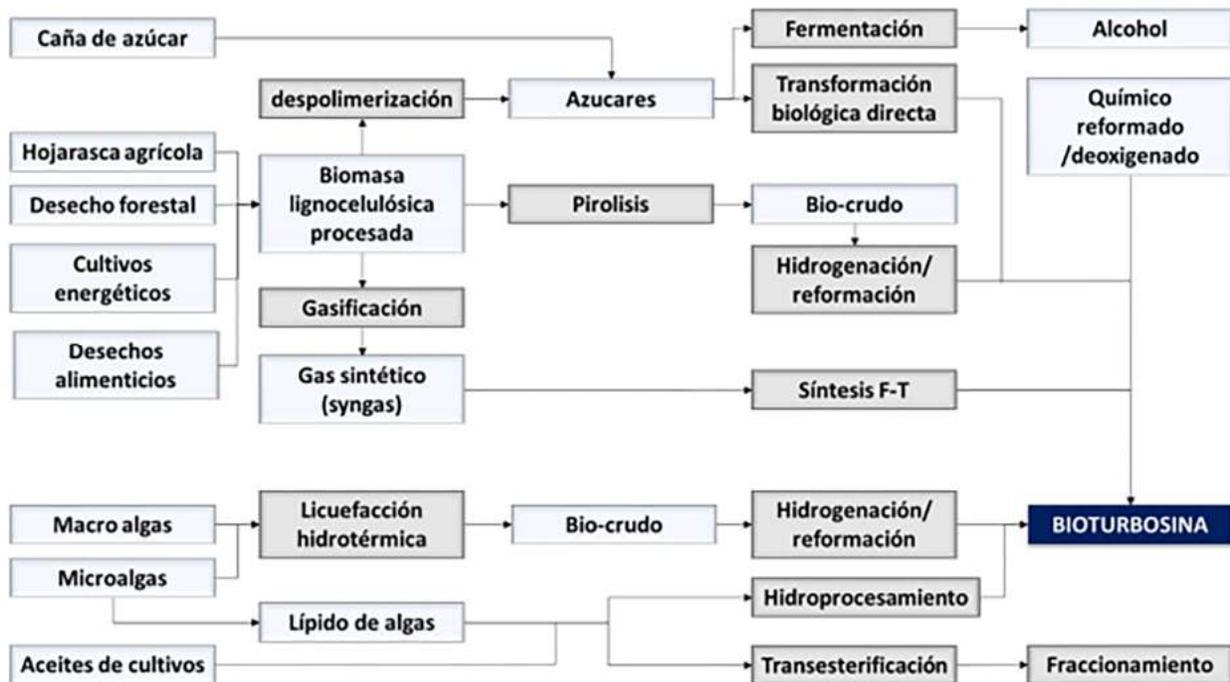


Figura 1.4 Rutas de producción para SAF [34]

1.10. Investigación de mercado

Los costos de producción para la elaboración de SAF siguen siendo elevados en comparación al costo de la turbosina. Esta diferencia de precio se debe principalmente a la diferencia de insumos, recolección y/o producción de la materia prima a emplear.

Es por esto, que incluso al utilizar microalgas como materia prima, el costo de producción varía en relación con la especie a utilizar. En un estudio realizado en 2017 por Castillo et al. [64]., analizaron el porcentaje lipídico y la productividad de biomasa extraídos de distintas especies de microalgas (ver Tabla 1.13)

Tabla 1.13 Porcentaje lipídico y productividad de biomasa y lípidos de distintas microalgas [64]

Especie	Lípidos acumulados (%)	Producción de biomasa ($\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$)	Producción de lípidos ($\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$)	Referencia
<i>Anabaena variabilis</i> Kützing ex Bornet & Flahault	46.9	0.1156	0.0542	Han <i>et al.</i> (2016)

<i>Ankistrodesmus falcatus</i> (Corda) Ralfs	59.6	0.1246	0.074	Singh <i>et al.</i> (2015)
<i>Chaetoceros muelleri</i> Lemmerman	43.4	0.272	---	Wang <i>et al.</i> (2014)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> P.A. Dangeard	25.25	2.0	0.505	Kong <i>et al.</i> (2010)
<i>Chlamydomonas</i> sp.	33.1	---	0.169	Nakanishi <i>et al.</i> (2014)
<i>Chlorella sorokiniana</i> Shihira et R.W.Krauss	31.5	12.2	2.9	Li <i>et al.</i> (2013)
<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Nováková (UTEX 2341)	62.97	1.78	0.29	Li <i>et al.</i> (2011)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> H.Chick	24.25	0.144	0.02685	Tang <i>et al.</i> (2011)
<i>Auxenochlorella protothecoides</i> (Krüger) Kalina et Puncochárova (= <i>Chlorella protothecoides</i> Krüger)	51.5	---	1.19	Mu <i>et al.</i> (2015)
<i>Chlorella vulgaris</i> Beyenrick	22.8	0.0848	0.01043	Frumento <i>et al.</i> (2013)
<i>Chromochloris zofingiensis</i> (Dönz) Fucikova et L.A Lewis (= <i>Chlorella zofingiensis</i> Dönz)	54.5	0.584	0.0223	Feng <i>et al.</i> (2011)
<i>Desmodesmus abundans</i> (Kirchner) E. Hegewals	---	0.27008	0.06708	Xia <i>et al.</i> (2013)
<i>Dunaliella tertiolecta</i> Butcher	11..4	0.42	0.0164	Sideney <i>et al.</i> (2010)
<i>Nannochloropsis oculata</i> (Droop) D.J. Hibberd	50.4	0.497	0.151	Sirin <i>et al.</i> (2015)
<i>Neochloris oleoabundans</i> S.Chantanachat et Bold	29	0.98	0.1124	Santos <i>et al.</i> (2013)
<i>Tetradesmus obliquus</i> (Turpin M.J. Wynne (= <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turpin)	49.6	0.45-0.55	0.151-0.193	Feng <i>et al.</i> (2014)
<i>Scenedesmus</i> sp.	16.6	0.174	0.0195	Taher <i>et al.</i> (2014)
<i>Tetraselmis</i> sp.	30.5	0.13	0.047	Kim <i>et al.</i> (2016)

Se puede observar que los valores de productividad siguen siendo muy bajos, estos autores concluyeron que el costo de producción de biomasa de microalgas para el 2017 fue de \$5.8 USD /Kg [64]. Por esto es de suma importancia estudiar las características de las condiciones de cultivo de las microalgas para así determinar la viabilidad de su producción.

Por otro lado, en un estudio realizado por la Universidad de Taiwán se determinaron los costos de producción de SAF por medio de diferentes etapas de producción utilizando como materia prima el ACU, al utilizar sólo una fase como la hidroconversión el costo fue de 0.47 dólares/litro, mientras que al utilizar dos etapas como un hidrotreatmento y una isomerización el costo fue de 0.56 dólares/ litro [74]. Si analizamos el costo de la turbosina en México en el mes de septiembre 2023 en el Aeropuerto Internacional Cabo San Lucas el costo fue de 28.33 MXN /litro [11]. Mientras que, para el Aeropuerto Internacional del Norte, durante el mismo periodo, el costo fue de 24.44MXN/L [12].

Dentro de las desventajas de utilizar ACU como materia prima es que su producción no siempre es constante y existen múltiples factores que afectan que su producción sea estable.

Es por esto, que es de suma importancia seguir optimizando estos procesos, así como buscar distintas fuentes de materias primas para hacer más diversa la matriz energética.

1.11. Cadena de suministro

Para que la implementación de SAF sea posible es necesario plantear y desarrollar las distintas etapas involucradas. Esta cadena de suministro abarca generalmente 5 etapas (ver Figura 1.5).

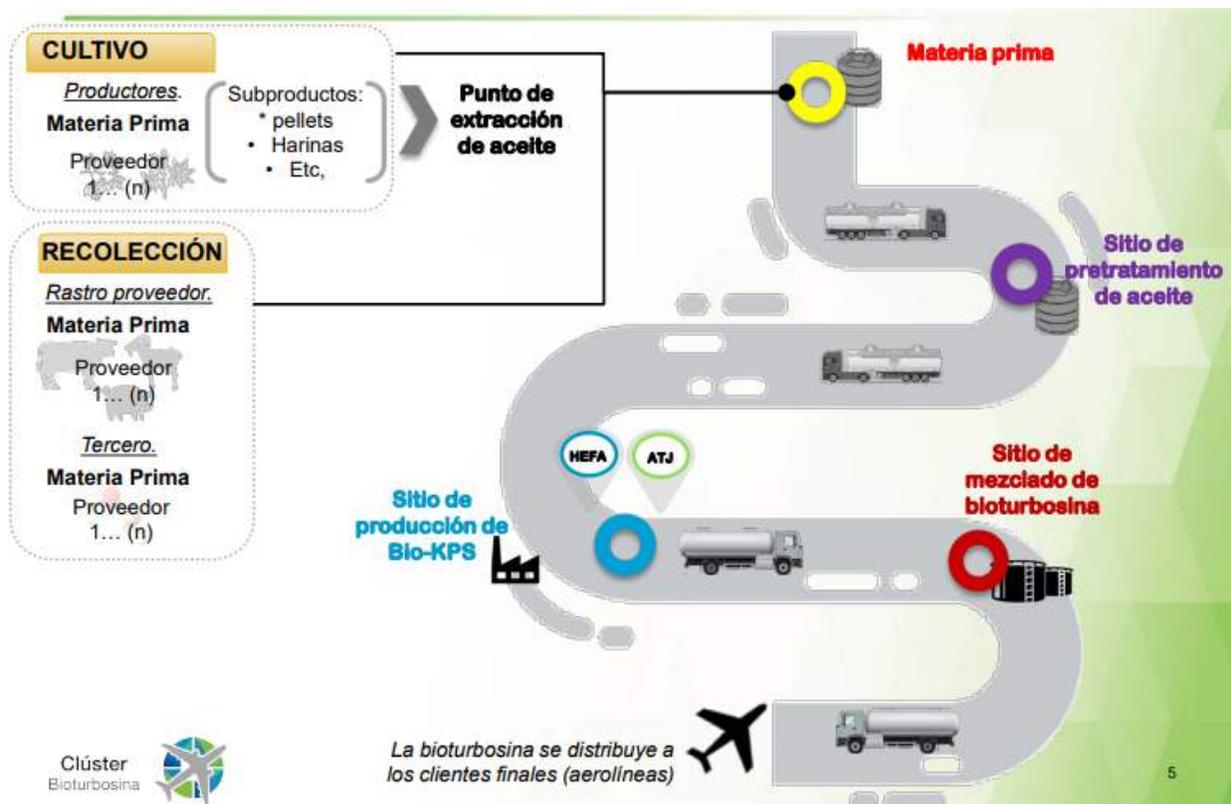


Figura 1.5 Cadena productiva para la producción de SAF [75]

La primera etapa de proceso es la obtención de la materia prima, sea por cultivo o por recolección y es dentro de esta etapa que se debe hacer la extracción del aceite. Posteriormente está la etapa de pretratamiento de este, pues en general el aceite debe ser filtrado y calentado para eliminar el agua y otras impurezas que suele contener. A nivel industria se recomienda como primer paso de refinado un desgomado, el cual consiste en la remoción de fosfolípidos ya que estos provocan formación de espuma, aumentan la inestabilidad oxidativa, forman sedimentos y afectan la calidad y estabilidad del aceite [76].

La tercera etapa es la producción de SAF, posteriormente se encuentra el sitio de mezclado de SAF y turbosina. Y la última etapa es el consumo de SAF por medio de las aerolíneas.

JUSTIFICACIÓN

El uso de SAF (Sustainable Aviation Fuel) permitirá reducir las emisiones de GEI casi a un 50% en relación con la turbosina, siendo ésta una de las principales razones para impulsar su uso. Al utilizar microalgas como materia prima se busca tener una producción de SAF más eficiente y rentable, ya que estos microorganismos tienen una tasa de crecimiento muy alta con relación a otras materias primas. Además, al ser una fuente muy productiva de aceite, las hace una materia prima con mucho potencial. De manera comparativa, se empleará el ACU (Aceite de Cocina Usado), una materia prima que un residuo potencial para ser una fuente bioenergética, maximizando así su valor.

OBJETIVO GENERAL

Sintetizar combustible sostenible de aviación a partir de los lípidos producidos por la microalga *Coelastrella* sp CORE-3 y Aceite de Cocina Usado

OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer las condiciones de cultivo y de extracción de lípidos de la microalga *Coelastrella* sp CORE-3
- Obtener combustible sostenible de aviación a partir del extracto microalgal de *Coelastrella* sp CORE-3 y ACU por HDO utilizando el catalizador NiMo/ ZAS-15
- Evaluar el rendimiento del SAF en las condiciones de operación evaluadas

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Cultivo microalgal

En este estudio se empleó *Coelastrella* sp. (CORE-3) perteneciente al cepario del CICY. Esta cepa fue donada en 2013 por la Colección de Microalgas Marinas y de Agua dulce de la Península de Yucatán del Herbario Alfredo Barrera Marín (FICOYUC-UADY). Estas cepas fueron aisladas de cuerpos de agua dulce de la Península de Yucatán, México.

2.1.1. Medios de cultivo

En este proyecto se emplearon dos medios de cultivo, en los volúmenes de 50 mL y 500 mL se empleó TAP (Tris-Acetato-Fosfato) (Anexo I) y en el volumen de 5000 mL se empleó ARS (Agua Residual Sintética) (Anexo II).

2.1.2 Purificación de *Coelastrella* sp (CORE 3)

La purificación de la cepa se realizó para disminuir la presencia de agentes biológicos (bacterias) que pudieran interferir en el crecimiento de éstas. Bajo la campana de flujo laminar (ESCO Modelo LHG-4AG-F9) se tomaron 40 mL y se centrifugaron (Orto Alresa Digicen 21R) a 4°C, 7000 rpm por 10 minutos. Posteriormente, se desechó el sobrenadante, se lavó la biomasa con 10 mL de agua destilada, se agitó con vortex y se centrifugó de nuevo. Esto se realizó tres veces. Para el último lavado, se agregó 1 mL de HCl y 9 mL de medio TAP y se centrifugó bajo las mismas condiciones. Por último, se volvió a decantar, la pastilla obtenida se suspendió en medio TAP, se sellaron los matraces y se dejó en el cuarto de cultivo.

2.1.3 Curva de crecimiento

2.1.3.1. Conteo celular

La curva de crecimiento de *Coelastrella* sp (CORE-3), se determinó a partir de la toma de una alícuota diaria de 500uL por diez días, para realizar el conteo celular mediante el uso de un hematocitómetro Neubauer y un microscopio óptico (Nikon Eclipse E200) Objetivo 40X. Para el conteo celular se consideró únicamente las células presentes en los cuadros y líneas marcadas en la Figura 2.1.

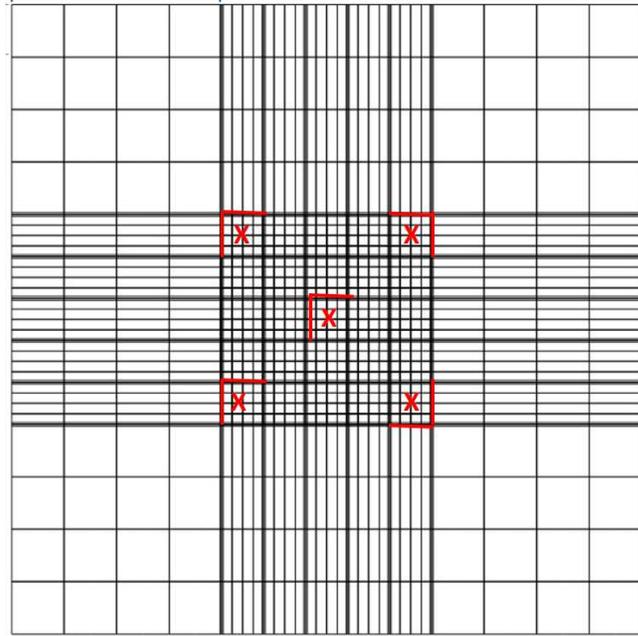


Figura 2.1 Cámara Neubauer y cuadrantes utilizados

Para los cálculos se hizo una ponderación de los cuadrantes y para algunas muestras se hicieron diluciones, por lo que se empleó la ecuación (1) para calcular la concentración celular.

$$\text{Densidad celular (cel-mL}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Número de células}}{\text{Volumen}} \quad (1)$$

2.1.4. Producción de biomasa microalgal y extracción lipídica

2.1.4.1. Escalamiento de cultivos

El escalamiento se realizó a tres volúmenes para obtener un volumen total de 20 litros de cultivo microalgal (Figura 2.2).



Figura 2.1 Escalamiento del cultivo microalgal

Etapa 1. Primeramente, se inocularon 5 mL de cultivo microalgal en 45 mL de medio TAP y se incubaron a 25°C con un fotoperiodo de 16:8 (luz: oscuridad), con un flujo de fotones de $67 \pm 3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por 72 horas y 5000 rpm.

Etapa 2. Para la etapa 2, en matraces de 1L se colocó el inóculo obtenido en la etapa 1 de 50 mL y 450 mL de medio TAP estéril y se incubó bajo las condiciones mencionadas.

Etapa 3. Empleando vitroleros de 8L, se inoculó el cultivo obtenido en la etapa 2 (500 mL) para escalar a 4500 mL empleando para ello ARS. Las condiciones de incubación fueron 25°C, fotoperiodo de 16:8 (luz: oscuridad), flujo de fotones de $67 \pm 3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y agitación por burbujeo de aire por 144 horas. Con el fin de aumentar la cantidad de fotones a los vitroleros utilizados se les colocó una tira de luces led.

Cabe señalar que durante todas las fases y etapas fue necesario utilizar material estéril para lo cual se empleó una autoclave vertical a 120°C durante 20 minutos. El material como mangueras y tapas se lavaron con químicos comerciales que eliminan hongos y bacterias y posteriormente todo se lavó con agua destilada.

2.1.4.2. Recuperación de biomasa

La recuperación de biomasa se realizó por sedimentación durante de 144 horas en el cuarto frío a 4°C. Posteriormente, se desechó el sobrenadante y la biomasa microalgal se transfirió y precipitó por centrifugación (7000 rpm/ 8 min) hasta formar una pastilla. La biomasa se congeló a -20°C y se liofilizó a 0.100 mBar 54°C por 72 horas. La biomasa liofilizada se reservó en un desecador. Posteriormente se pesó la biomasa húmeda y seca por liofilización.

2.1.5. Extracción de lípidos de microalgas

La extracción de lípidos se basó en modificaciones al método de Bligh y Dyer, usando un sistema de cloroformo-metanol (2:1). Inicialmente 150 mg de biomasa liofilizada se mezclaron con 11.8 mL de metanol y 27.6 mL de cloroformo, posteriormente se incubaron (shaker Corning LSE 6790) a 36°C y 150 rpm durante 3 horas. Después la mezcla fue colocada en un embudo de decantación y se separaron las fases (ver Figura 2.3).



Figura 2.2 Extracción lipídica con cloroformo-metanol

Posteriormente, el extracto crudo obtenido se separó por cromatografía de capa fina para observar las diferencias en el número de extracciones realizadas a la misma biomasa seca inicial. Para esto, se utilizó una placa de gel sílice y se colocaron los extractos, como referencia se utilizó aceite vegetal comercial. Como fase móvil se utilizó una mezcla de hexano, acetato de etilo y ácido acético en proporción (9:1:0.1). La placa se reveló con ácido fosfomolibdico.

El extracto crudo obtenido se concentró mediante baño maría, para la evaporación de los solventes.

2.1.6. Cromatografía de columna por gravedad

Se utilizó una columna cromatográfica de 2.5 cm de diámetro y 20 cm de altura. Esta columna se rellenoó con 30 gr de gel sílice. Antes de colocar el gel dentro de la columna éste fue mezclado con hexano durante 24 horas y posteriormente se cargó la columna.

Para montar la columna, primero fue necesario disolver el extracto microalgal en cloroformo y posteriormente se buscó disolver el cloroformo para que el gel sílice quedara impregnado del extracto. Se colocó un algodón para evitar que la sílice se moviera con la fase móvil (ver Figura 2.4).

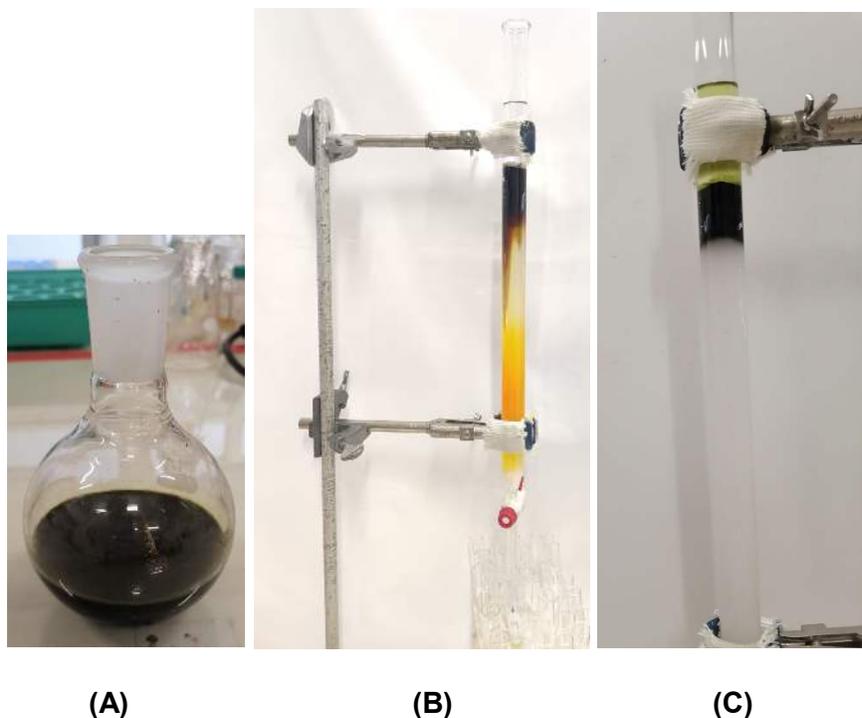


Figura 2.3 (A) Extracto microalgal con hexano; (B) (C) Compuestos en la columna

Para la fase móvil se utilizaron 4 fases con distintos niveles de polaridad como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.14 Fases móviles de cromatografía en columna por gravedad

Fase móvil	Proporción, % (V/V)
Hexano	100
Hexano: Acetato de etilo	90: 10
Hexano: Acetato de etilo	70: 30
Metanol	100

Las fracciones obtenidas se colocaron en tubos de ensayo de 10 mL y las fases móviles se evaporaron en la campana de extracción. Posteriormente, las fracciones obtenidas se evaluaron por CG-EM y la fracción de los triglicéridos fue transesterificada.

2.1.7. Cromatografía de capa fina (CCF)

Para la detección de los compuestos obtenidos de los extractos microalgales se utilizó una placa

de gel de sílice TLC Silica gel60 F₂₅₄ de 4 cm de ancho por 6 de largo, la cual fungió como fase estacionaria.

Las muestras de los extractos se disolvieron en 2 mL de acuerdo a la fase móvil de cada una, éstas fueron colocadas en las placas de gel sílice y con capilares de vidrio se aplicó cada muestra y una línea base de aceite de cocina. Para la fase móvil se utilizó una mezcla de 4.5 mL de hexano, 500 de µL acetato de etilo y 50 µL de ácido acético. Posteriormente, se revelaron por inmersión en ácido fosfomolibdico. Se secó el papel y con ayuda de calor se tiñeron de color oscuro las zonas donde había presencia de triglicéridos.

2.2. Aceite de Cocina Usado

El ACU fue recolectado de un restaurante local en la Ciudad de Mérida, Yucatán, México. La muestra de ACU se sometió a un mezclado y filtrado para retirar los residuos, posteriormente se calentó a 100°C para eliminar el agua por evaporación y se caracterizó con pruebas de densidad, viscosidad, humedad, saponificación y acidez (Anexo III).

Posteriormente se sometió a una reacción de transesterificación y la muestra se analizó por medio de cromatografía utilizando el cromatógrafo de gases YL6900 GC/MS con un detector de masas YL6900, un equipo de inyección EST-Analytical-FLEX.

2.3. Síntesis y caracterización del catalizador

Se empleó un catalizador NiMo/SBA-15-ZSM-5 /Al₂O₃, (etiquetado como NiMo/ ZAS-15) este soporte permite una elevada superficie específica y una gran actividad química superficial permitiendo así, mejores propiedades catalíticas como el tiempo de reacción y de adsorción. Además de brindar la acidez necesaria para fomentar las reacciones de desoxigenación, así como las reacciones de isomerización y rompimiento.

En la síntesis de este catalizador, se emplearon dos metodologías una creada por Zhang et al. [77] y otra desarrollada por Morales-Ortuño et al. [78]. La primera había sido previamente utilizada para sintetizar un catalizador NiMo/USY@Al-SBA-15 Zeolite y la segunda se utilizó para la síntesis del SBA-15. Sin embargo, se llevaron a cabo algunas adaptaciones en el proceso para obtener el catalizador NiMo/ ZAS-15.

2.3.1. Síntesis del SBA-15- ZSM-5

Se pesaron 11.785 g de TEOS y se le adicionaron 27.5 g de la solución de ácido clorhídrico, esto se realizó en forma de goteo y se colocó a baño maría a 35° C por 20 horas. Posteriormente, en

247.696 g de HCl (0.4 M) se añadieron 2.376 gr de Pluronic 123 a 300-600 rpm en baño maría a 35°C por una hora, transcurrido el tiempo se agregaron 5.5 g de ZSM-5 a 300 rpm y se mantuvo la temperatura (ver Figura 2.5).

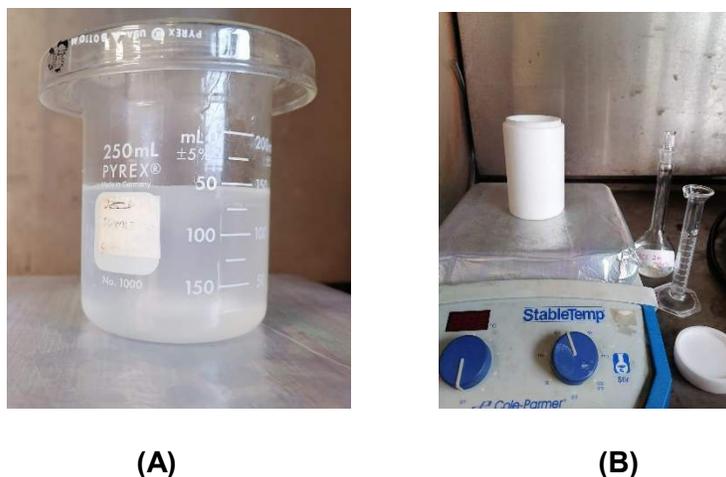


Figura 2.4 (A) Mezcla de TEOS y ácido clorhídrico; (B) Síntesis en vaso de teflón para la autoclave

La mezcla de TEOS y HCl se añadió en forma de goteo a la mezcla de HCl, Pluronic 123 y la ZSM-5 a 300-600 rpm por 20 horas en baño maría a 35°C (ver Figura 2.6).

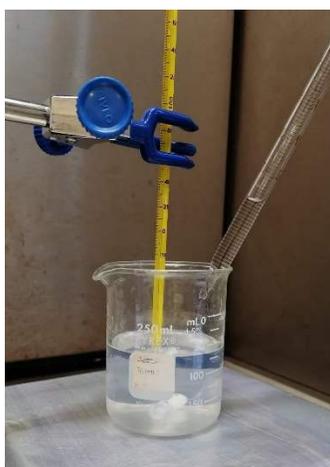


Figura 2.5 (A) Adición de TEOS; (B) Mezcla homogénea de 20 horas

Posteriormente, en una autoclave se colocaron los reactivos para su síntesis y se calentó a 100°C en baño de parafina por 24 h (ver Figura 2.7).



(A)



(B)



(C)

Figura 2.6 (A) Autoclave; (B) (C) Síntesis en autoclave

El producto obtenido se filtró al vacío con aproximadamente 500 mL de agua desionizada y se secó a temperatura ambiente al vacío por 2 horas (ver Figura 2.8). Por último, se calcinó utilizando un horno de vidrio con flujo de oxígeno de 100 ml/ min y se calcinó a 650°C por 6 horas con dos rampas de calentamiento. La primera fue de a 0.8°C/ min hasta llegar a 300°C y permanecer por 30 min, mientras que la segunda rampa también fue de 0.8°C/min hasta llegar a 600°C y permanecer a esa temperatura por 6 horas. En cada calcinación se colocó una capa de fibra de vidrio aproximadamente de 0.5 cm.



Figura 2.7 Filtrado al vacío del producto obtenido de la síntesis

2.3.2. Síntesis SBA-15-ZSM-5 / Al₂O₃

Para la formación de la gamma alúmina se utilizó boehmita catapal B como precursor, para la cual se calculó y determinó un rendimiento del 69% de gamma alúmina. Para el catalizador sintetizado se utilizó una proporción del 45% SBA-15-ZSM-5 y 55% de Al₂O₃. Del volumen total obtenido de la síntesis del SBA-15-ZSM-5 se pesó el 10% de ésta, lo cual se peptizó con una solución de ácido fórmico al 5% conociendo que de 1 g de boehmita catapal requiere 0.83 ml de dicha solución (ver Figura 2.9).

Se mezclaron 1.6437 gr de boehmita catapal B y 1.3640 mL de ácido fórmico al 5% a 300 rpm por 1.5 h, una vez formado el gel se dejó reposar sin agitación por 2 horas. Por otra parte, se mezcló en seco la boehmita restante y la SBA-15-ZSM-5 y transcurrido el tiempo de reposo, se mezclaron con el gel y se agregó agua destilada hasta formar una pasta. Se colocó la mezcla en una jeringa de 5 mL y se realizaron los extruidos, se dejaron secar a temperatura ambiente por 12 horas y luego se secaron a 110°C por 6 horas.

Los extruidos obtenidos se calcinaron a 650°C por 4 horas usando una rampa de calentamiento de 1°C / min, posteriormente estos extruidos fueron tamizados con mallas de tamaño 60-40 (0,25-0,177 mm).



Figura 2.8 Preparación de ácido fórmico y boehmita

2.3.3. Impregnación Níquel y Molibdeno

Tomando en referencia el contenido de Ni y Mo reportado en diferentes trabajos en la literatura [77] [78] se decidió usar un porcentaje de impregnación de Ni del 4% y para el Mo del 12%. De acuerdo con Zhang et al. [77] al utilizar un catalizador NiMo con esos porcentajes obtuvieron un rendimiento de formación de SAF del 35%. Se determinó el volumen de impregnación del

catalizador con el fin de conocer la capacidad máxima que tienen los poros del soporte para retener líquido sin causar inundación y con este valor poder calcular las cantidades necesarias de los compuestos que se impregnarían en el catalizador.

Para obtener el volumen de impregnación, se añadió agua destilada en forma de goteo en 1 gr de catalizador hasta que los poros quedaron completamente saturados y posteriormente se secó en el horno a 110°C por 24 horas.

Se realizó una impregnación sucesiva o secuencial, la cual consta de 3 etapas: impregnación, secado y calcinación. Para la impregnación se utilizó primero níquel, debido a que se ha estudiado el efecto de impregnar el Níquel antes del Molibdeno y se ha reportado que al realizar esta impregnación sucesiva el catalizador posee una alta actividad catalítica, ya que hay una mejor distribución de las fases activas [79].

Debido a esto se inició la impregnación con Níquel (Nitrato de níquel II hexahidratado) con un volumen de 9.6417 mL y 1.6804 g de sal (ver Figura 2.10). Después de la impregnación se dejó a temperatura ambiente por 24 horas y posteriormente se calcinó a 500°C por 5 horas con una rampa de 5°C / min.



Figura 2.9 Impregnación con Níquel

Para la impregnación de Mo (Molibdato de amonio) se preparó un volumen de 9.9805 mL y 2.169 g de sal. Se calcinó con las mismas condiciones que el caso de la impregnación anterior, obteniendo así el catalizador mostrado en la Figura 2.11.



Figura 2.10 Catalizador NiMo/SBA-15-ZSM-5 /Al₂O₃

2.4. Caracterización del soporte y catalizador

2.4.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Por medio del equipo Bruker modelo D8-Advance (figura 2.12) se analizó el difractograma determinado por el tamaño y forma de la celda unitaria del catalizador. Se colocó la muestra de éste en un portamuestras. Se utilizó un ánodo de cobre con radiación CuK α a una longitud de onda 1.54060 Å. Debido a la composición del material se realizaron dos difractogramas, el primero se corrió en un intervalo de 2θ de 5 a 60°, con un tiempo de paso de 0.3 s y tamaño de paso de 0.02°.

Para la dispersión de rayos X en ángulo bajo (SAXS), las muestras se registraron en el intervalo de 2θ de 0.5 a 6°, con un tiempo de paso de 0.1 s y un tamaño de paso de 0.02°.



Figura 2.11 Equipo de DRX D8-Advance

2.4.2. Fisisorción de N₂

El catalizador también se caracterizó mediante fisisorción de nitrógeno por el método de Brunauer-Emmett Teller (BET). Para determinar el área superficial del catalizador y el tamaño de poro, se utilizó el equipo Quantachrome Instruments, modelo NOVA NTLX (ver Figura 2.13). Se realizó una desgasificación de 110°C por 3 horas y en la segunda etapa se realizó una inyección de N₂ a la celda y con el método BET se calculó el área específica, así como el volumen de poro.



Figura 2.12 Equipo Quantachrome NT2LX

2.5. Síntesis de SAF

La síntesis de SAF se realizó en un reactor de lecho fijo Microactivity-Reference marca PID Eng & Tech S.L., el cual cuenta con un sistema de monitoreo y control para los parámetros de reacción (ver Figura 2.14). Este reactor es alimentado por una bomba TELEDYNE ISCO modelo 500D que permite un flujo de hasta 200 mL/min.

2.5.1. Evaluación catalítica

Para poder lograr la síntesis de SAF se realizó previamente una carga del reactor, una activación y la reacción de hidrodesoxigenación

Para la carga del reactor, inicialmente se colocó en el interior de este una capa de fibra de vidrio, posteriormente se colocaron 1.02 g de catalizador y carborondum (Anexo IV) a un volumen de 3.3 cm³. Los valores del volumen de catalizador se determinaron a partir del Weight Hourly Space Velocity (WSHV) seleccionado, el cual nos indica la velocidad espacial en peso (Anexo V).

La activación fue *in situ* con una mezcla de heptano y CS₂ en 1.65% v/v de bisulfuro de carbono, las condiciones de activación fueron a una temperatura de 300°C con una rampa de calentamiento de 5°C/ min, a una presión de 29 bar, por 4 horas, con un flujo de H₂ de 100 ml/min y un flujo de alimentación líquida de 1 ml/min por 10 minutos y 0.1 ml/min durante el tiempo restante de activación.

Para la reacción de HDO, el ACU y el extracto lipídico, fueron diluidos en heptano, conteniendo 0.01% de S en forma de CS₂, lo anterior con el fin de evitar una rápida desactivación del catalizador. La reacción se llevó a cabo con las mismas condiciones de activación, sólo cambió el flujo de alimentación utilizando 0.1 ml/min. El flujo de alimentación se inició diez minutos antes de alcanzar la temperatura deseada, posteriormente se contaron 2 horas y a partir de ahí se inició el conteo para tomar muestras cada hora.



Figura 2.13 Reactor de lecho fijo Microactivity-Reference marca PID Eng & Tech

2.6. Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (CG-EM)

Por medio de la cromatografía se identificaron los compuestos formados en los productos de reacción. Se utilizó el cromatógrafo de gases YL6900 GC/MS con un detector de masas YL6900, un equipo de inyección EST-Analytical-FLEX y la cromatografía se realizó por medio de una columna MEGA-5-HT de 30 m de largo, 0.250 mm de diámetro interno y 1.5 µm de película interna. Las condiciones del método de inyección fueron una temperatura inicial de 50°C, una rampa de 10°C/min hasta llegar a 120°C y mantener este valor por 10 min y una segunda rampa de calentamiento de 10°C/min hasta alcanzar 300°C por 10 min.



Figura 2.14 Cromatógrafo de Gases YL6900, detector de masas YL900 y EST-Analytical-FLEX

2.7. Cálculo de la conversión de las reacciones

Para el cálculo de la conversión en reacción químicas se calculó mediante la comparación de las cantidades iniciales y finales de los reactivos y productos formados durante el proceso. Esta conversión se realizó con el ACU y con el extracto microalgal, con el fin de conocer cuál de las materias primas tuvo una mayor conversión en la reacción de HDO.

Esta conversión se expresa en porcentaje y representa la fracción de los reactivos que reaccionaron para formar productos, dichos cálculos se basaron en la ecuación 2, donde x es la conversión obtenida, CA_f es la concentración final y CA_i es la *concentración inicial*.

$$x = 1 - \frac{CA_f}{CA_i} \quad (2)$$

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Producción de biomasa microalgal y extracción lipídica

La producción de biomasa inició con la purificación de los cultivos debido a que se observó la presencia de una película fina de color blanco, característico de contaminación bacteriana lo cual podría afectar las fases del crecimiento microalgal [80]. Para eliminar la contaminación bacteriana se realizó el método de lavado utilizado por Molina et al., en el que se emplearon HCl 0.5N y agua destilada [81].



Figura 3.1 Cultivos de *Coelastrella* sp en mantenimiento

3.1.1. Crecimiento de *Coelastrella* sp CORE 3

Para determinar la curva de crecimiento fue necesario la toma de una alícuota, de dos cultivos microalgales de *Coelastrella* sp, para el conteo de células microalgales generadas durante cada uno de los diez días, en los que se mantuvieron los cultivos (ver Tabla 3.1). En la Figura 3.2 se pueden ver las imágenes obtenidas de la observación en el microscopio durante los días referidos.

Tabla 3.15 Densidad celular por hora de *Coelastrella* CORE 3

	0 h	72h	96h	120h	144h	168h	240h
Cultivo 1	70.2	117.8	151.6	134.8	129	122.8	134.4
Cultivo 2	82.4	115.8	144.8	137	136.2	134	129.8
Promedio	79.3	116.8	148.2	135.9	132.6	128.4	132.1

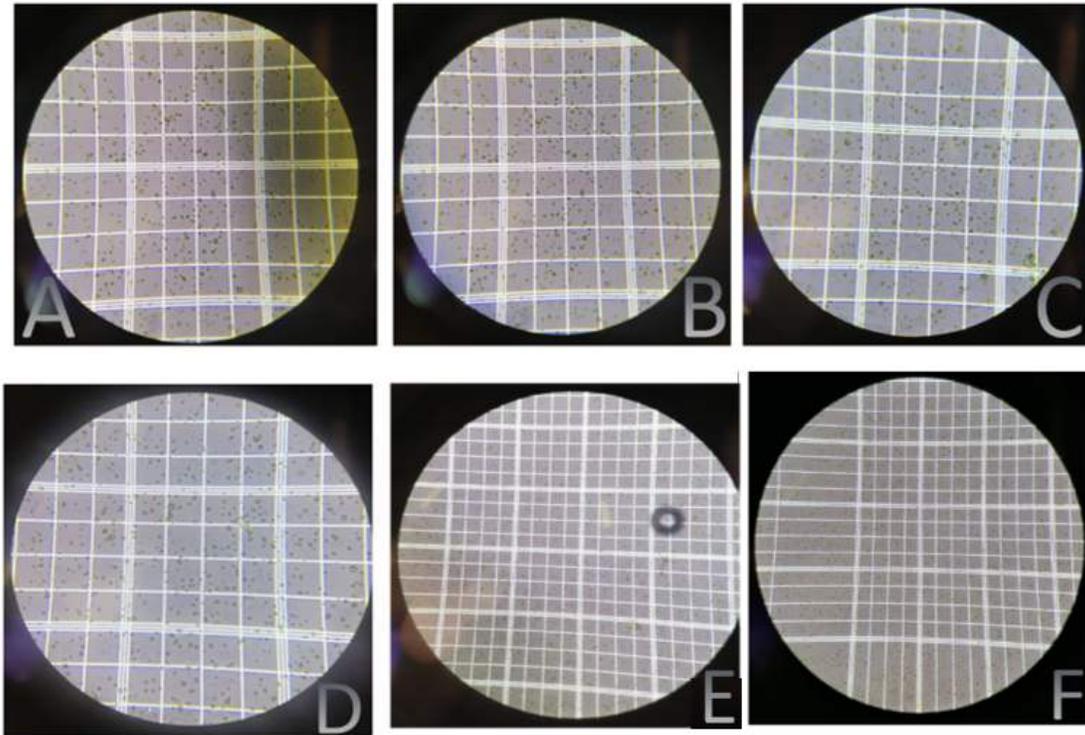


Figura 3.2 Cultivos microalgales 0h (A), 72h (B), 96h (C), 144h (D), 168h (E) y 240h (F)

En la Figura 3.3 se observan las distintas fases de crecimiento de la especie *Coelastrrella* sp CORE-3 en medio de cultivo TAP. En las primeras 24 horas no se observó la fase de latencia o adaptación, por el contrario, el cultivo inició su crecimiento celular. Por lo que durante las primeras 48 horas se observa una fase exponencial incipiente en el cultivo. En esta fase, las microalgas asimilan los nutrientes y realizan su duplicación celular [82]. Es por esto que en la etapa de escalamiento 1 y 2, los cultivos se dejaron 48 horas [82].

A las 96 horas se registró otro pico de crecimiento exponencial de *Coelastrrella* sp CORE-3, el cual representó el punto máximo de crecimiento celular [82].

Posterior a las 96 horas se observa el inicio de la fase estacionaria, misma que duró hasta las 240 horas. En esta fase se observa el mismo número de células, el cual se mantiene constante. Es en este punto que se suspendió el cultivo a las 144 horas [82].

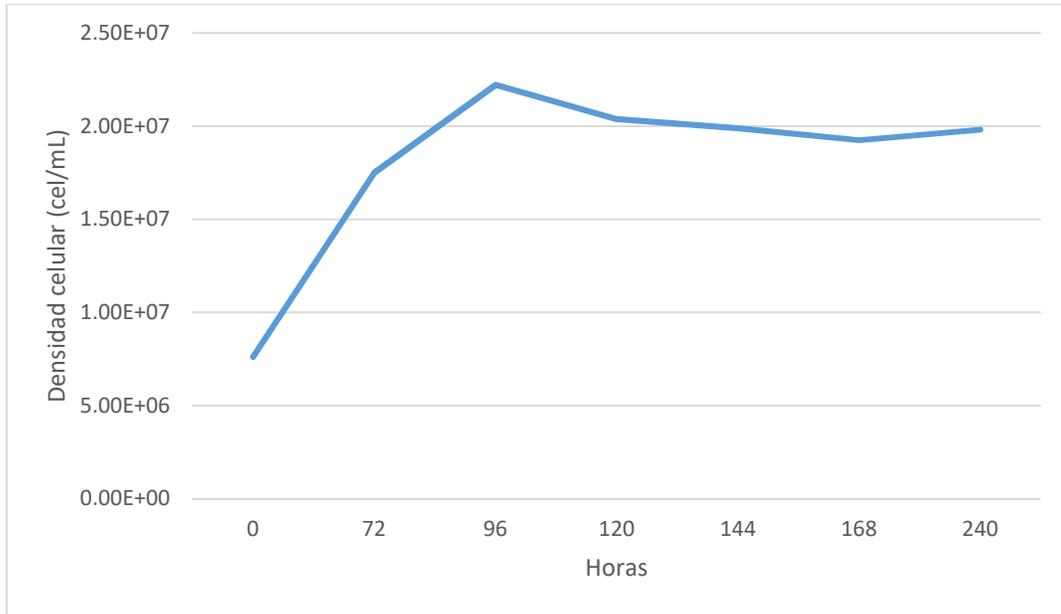


Figura 3.3 Curva de crecimiento de *Coelastrella* sp CORE 3

El crecimiento de las microalgas es afectado por diferentes factores que inhiben o aceleran la división celular. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Maltsev et al., en el que se analizó el efecto de diferentes medios de cultivo de *Coelastrella multistriata* MZ-Ch23 [62]. De acuerdo con Maltsev et al., la fase de latencia fue a los 7 días, mientras que la fase exponencial fue a los 18-21 días en medio de cultivo Bold Basal. Además, se reportó que, al aumentar el tiempo de cultivo a 60 días, se observó un aumento en la producción de biomasa y en la formación de lípidos y ácidos grasos poliinsaturados [62].

3.1.2. Producción de biomasa a partir de *Coelastrella* sp CORE 3

Después de haber determinado las fases de crecimiento, se realizó el escalamiento hasta 20 litros (ver Figura 3.4).



(A)



(B)

Figura 3.4 Escalamiento de cultivo microalgal de 10 L (A) Cultivo a las 24 horas de su inoculación; (B) Cultivo a las 96 horas de su inoculación

Para poder recuperar la biomasa, el cultivo se dejó sedimentar para facilitar su obtención (ver Figura 3.5).



Figura 3.5 Sedimentación en cuarto frío del cultivo de 10 L

Posteriormente, el cultivo se separó de la biomasa y se centrifugó con lo que se obtuvo la biomasa microalgal (ver Figura 3.6).



Figura 3.6 Diferentes separaciones del cultivo y biomasa microalgal

Para retirar la humedad de la biomasa, se realizó la liofilización de ésta durante 72 horas (ver Figura 3.7) y así, se pudo obtener el total de biomasa producida durante las dos fases.



Figura 3.7 Biomasa liofilizada

En la Tabla 3.2 se muestran los valores obtenidos de la biomasa producida, el total de la biomasa producida por los 20 litros fue de 7.6126 gramos. La cantidad promedio de biomasa seca obtenida fue de 0.38 g L^{-1} o bien, si expresamos la biomasa obtenida basándonos en días fue de $0.06 \text{ g L}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Tabla 3.2 Rendimiento del cultivo de *Coelastrella* en las dos fases de experimentación

	Número de tubo	Peso tubo (g)	Peso biomasa húmeda (g)	Peso tubo y biomasa seca (g)	Biomasa seca (g)
Fase 1	Tubo 1	14.6933	17.9425	15.3597	0.6664
	Tubo 2	14.5314	17.7783	15.221	0.6896
	Tubo 3	14.5847	17.8189	15.2639	0.6792
	Tubo A	13.2054	15.8414	13.8038	0.5984
	Tubo B	14.7024	17.3931	15.2993	0.5969
	Tubo C	14.466	17.8121	15.3058	0.8398
Fase 2	Tubo 1	14.5386	17.4923	15.103	0.5644

	Tubo 2	14.6244	17.3555	15.1484	0.524
	Tubo 3	13.1446	16.0294	13.7535	0.6089
	Tubo A	14.5766	17.4834	15.2076	0.631
	Tubo B	14.573	17.7006	15.2325	0.6595
	Tubo C	14.8061	17.2946	15.3606	0.5545
					Total biomasa producida (g)
					7.6126

El rendimiento obtenido en esta investigación es superior a lo reportado por Luo et al., donde analizaron la productividad de *Coelastrella* en distintos medios de cultivo, el primer medio fue Agua Residual Porcina Tratada Aeróbicamente, (AnATSW por sus siglas en inglés) y medio BG11. Se analizó la productividad de biomasa a distintas concentraciones de AnATSW (20%, 40%, 60%, 80% y 100%) y con medio BG11. En los valores reportados para el rendimiento en g/L, se encontró que al utilizar un 40% de AnATSW se obtuvo 0.625 g L⁻¹ y al emplear un medio BG11 se obtuvieron 0.389 g L⁻¹ [83]. Analizando esto, se deduce que la productividad casi se duplicó al utilizar otro medio de cultivo y que el valor obtenido con el medio BG11 es muy similar al obtenido en este trabajo, con medio ARS. Sin embargo, al analizar los valores reportados de la productividad de biomasa por día, se obtuvo una mayor productividad en este trabajo la cual fue de 60 mg L⁻¹día⁻¹ y en lo obtenido por Luo et al., su mayor rendimiento fue de 57.46 mg L⁻¹día⁻¹ al 40% de AnATSW y el menor fue de 33.90 mg L⁻¹día⁻¹ con el medio BG11 [83].

Por otra parte, en un estudio realizado previamente en el Centro de Investigación Científica de Yucatán se analizó la producción lipídica de *Coelastrella* CORE-1, CORE-2 y CORE-3 en un medio con melaza. En dicho estudio la productividad de biomasa más alta fue en CORE-2 en un medio GBFB (2.5 g L⁻¹ glucosa de melaza y 0.5 mL L⁻¹ fosfatos) con una concentración de biomasa de 5.85 g L⁻¹ y con una productividad de biomasa 0.58 g L⁻¹día⁻¹ [34]. Mientras que en la CORE-3, la cual es la especie estudiada en este trabajo, la productividad de biomasa más alta fue de 2.53 g L⁻¹ en un medio GMFM (5 g L⁻¹ glucosa de melaza y 1 mL L⁻¹ fosfatos) y con una productividad de biomasa de 0.25 g L⁻¹día⁻¹ [49]. Comparando la productividad de biomasa obtenida en ese estudio de 0.25 g L⁻¹día⁻¹, con la obtenida en esta investigación de 0.06 g L⁻¹día⁻¹, se observa que la productividad en un medio GMGM fue 4 veces mayor a la productividad de biomasa obtenida en un medio ARS, como lo es el de este trabajo.

3.1.3 Extracción lipídica

Se realizaron tres extracciones para poder determinar cuántas extracciones se realizarían a cada muestra, en los resultados obtenidos de capa fina se determinó que con dos extracciones por muestra era suficiente para extraer la mayor cantidad de lípidos (ver figura 3.8).



Figura 3.8 Cromatografía de capa fina con tres extracciones

Para conocer con mayor precisión el peso del frasco y, por ende, de la fracción, los frascos fueron pesados cada 24 horas por tres días para así conocer su peso constante. Posteriormente, las extracciones lipídicas se concentraron en dichos frascos (Figura 3.9).



Figura 3.9 Extractos crudos obtenidos

Se promediaron los pesos y se pesó el extracto crudo concentrado, en la Tabla 3.3 se observa que de la biomasa total producida de 7.6126 se obtuvieron 1.83 gramos de extracto crudo.

Tabla 3.16 Extractos crudos obtenidos

Tubo	Peso tubo (g)	Peso seco (g)	Diferencia (g)
1	13.2872	14.6251	1.3379
2	13.3774	13.8718	0.4944
		Total de extracto	1.8323

El contenido lipídico de las especies de microalgas es uno de los análisis más importante ya que éste determina su importancia para las aplicaciones comerciales, en este estudio se obtuvo un contenido lipídico mayor al 35% . Se ha estudiado la especie *Coelastrella* sp CORE 3 en distintos medios de cultivo uno de estos son las aguas residuales porcinas tratadas anaeróbicamente y aeróbicamente en las cuales se han reportado contenidos lipídicos que oscilan entre 22.4 y 24.8% [83]. Por otra parte, en un estudio donde se empleó un medio de cultivo BG-11 con variaciones en las proporciones de nitrógeno, fósforo y carbonato de sodio se obseraron distintos rendimientos en la productividad lipídica de *Coelastrella*. Vishambhar et al [84] informaron que al utilizar una combinación del 50% de nitrógeno y 50% de fósforo, el cultivo experimentó un aumento en la producción de biomasa. Además, al utilizar un medio de cultivo limitante se obtuvieron contenidos lipídicos del 21.47%, destacando así la importancia del medio de cultivo como variable a analizar [84].

Estos resultados muestran que tanto la productividad de biomasa y contenido lipídico están determinadas por las condiciones dadas durante la etapa de cultivo. Se ha demostrado que la especie *Coelastrella* produce más lípidos en medios de cultivo de nitrógeno, fósforo y bicarbonato de sodio, ya que este último es una fuente de carbono que aumenta la producción de biomasa y que gracias a su solubilidad permite que la microalga lo asimile de una forma más rápida [84].

Se estima que en promedio las microalgas tienen un 20% de contenido lipídico y que al someterlas a condiciones de estrés de nitrógeno se aumenta esta acumulación hasta un 40% [85]. Una de las razones de que ocurra esto se debe a que se tiene menor multiplicación celular y esta deficiencia de nitrógeno ocasiona que el CO₂ que es fijado en la fotosíntesis para la síntesis de proteínas se utilice en la síntesis de lípidos. Por lo tanto, para lograr tener un cultivo con mayor contenido lipídico el medio deberá tener como limitnte el número de fosfatos y nitratos.

Por lo que, si analizamos los compuestos utilizados en nuestro medio de cultivo, se puede observar que predomina la presencia de fosfatos y que hay un limitado uso de amonio, ya que como se mencionó anteriormente lo que se buscaba era tener un medio de cultivo con una fuente limitante de nitrógeno. Como se ve en la Tabla 3.4, la fracción lipídica representó el 38.54% del peso del extracto, siendo superior a lo reportado en otros estudios donde se obtuvo un 10% con medios de cultivo TAP [49].

El estudio de los efectos que genera las diferentes fuentes de nutrientes en el crecimiento y composición de las microalgas, es un tema crucial para seguir estudiando pues se busca optimizar los cultivos con el fin de incrementar su rendimiento y mejorar su costo de producción. Se ha buscado utilizar los múltiples beneficios que tienen el uso de microalgas para remediación y también para producción de biocombustibles. En un estudio realizado por Angelaalincy et al., [86], estudiaron el efecto de utilizar aguas con arsénico como biorremediación para la producción lipídica de *Coelastrella* sp M60 donde se determinó que esta especie es capaz de tratar aguas con este compuesto y que esto generó un incremento en la producción de lípidos.

De igual forma, se busca encontrar cultivos que sean más económicos o bien, que se aproveche algún residuo para el cultivo de microalgas. Thempsthammart et al. [87] estudiaron el efecto de utilizar melaza no hidrolizada en la producción de biomasa en *Coelastrella* sp. KKU-P1. Estos autores determinaron que la biomasa obtenida tenía un mayor contenido de de carbohidratos 46.7% seguido por 33.9% de proteínas y un 15.10% de lípidos.

Silva et al. [88] estudiaron el efecto de utilizar vinaza de caña como materia prima para el cultivo de microalgas, la cual es un subproducto del proceso de producción de etanol. Los resultados demostraron que la microalga *Coelastrella* sp., incrementó un 30% de producción lipídica variando el contenido de vinaza en el cultivo.

3.1.4. Perfil lipídico de la microalga *Coelastrella* sp CORE 3

Se realizó una caracterización de los lípidos obtenidos del extracto obtenido de la microalga. De la columna cromatográfica se obtuvieron 87 viales, ver figura 3.10.



Figura 3.70 Muestras obtenidas de la columna cromatográfica

En los perfiles lipídicos se observa la presencia o ausencia de lípidos en cada muestra, en la figura 3.11 se observa que la mancha que corresponde a los triglicéridos está presente en las fases 33-36. En total de la columna cromatográfica se obtuvieron 5 fracciones del extracto (ver anexo VI).

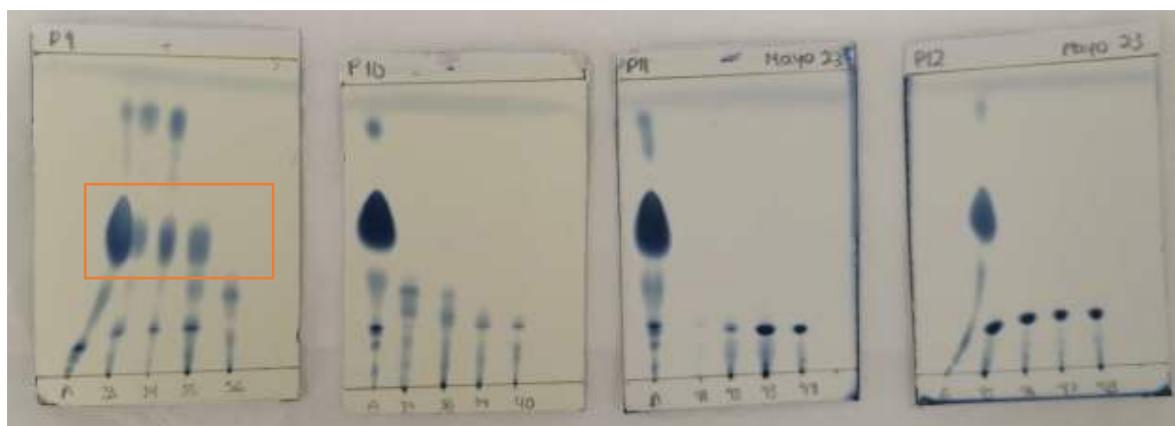


Figura 3.8 Cromatografía de capa fina de fracciones lipídicas

En la tabla 3.4 se muestra el porcentaje del peso del extracto obtenido por fracciones, se puede analizar que la fracción 5 fue la fracción con mayor contenido, mientras que la fracción 2, donde se encuentran los lípidos fue la segunda fracción con mayor porcentaje de extracto.

Tabla 17 Fracciones del extracto lipídico de la microalga *Coelastrella*

Fracción	% peso del extracto
1	2.37
2	38.54
3	2.17
4	7.10
5	49.79

Debido al volumen obtenido y composición del extracto sólo se pudo caracterizar la fracción 2, donde se encuentran los lípidos, los cuales fueron transesterificados. Posteriormente, se caracterizó el producto obtenido de la transesterificación, en la tabla 3.5 se indican los compuestos obtenidos.

Tabla 18 Compuestos identificados de la transesterificación de la fracción 2 del extracto microalgal

Fórmula	Nombre del compuesto	Tiempo de retención (min)	% del total del área de los picos
C8H18O	2-Ethyl-1-hexanol	8.91	9.6106
C12H24O3	Ácido 3-hidroxidodecanoico	9.22	8.4040
C10H10O4	Ftalato de dimetilo	20.14	6.3993
C14H22O	2,4-di-terc-butilfenol	22.22	8.5474
C13H26O2	Ester metílico del ácido dodecanoico	23.26	7.6922
C15H30O2	Ester metílico del ácido tetradecanoico	28.13	2.2705
C19H40	6-metilodecano	29.02	3.0055
C17H32O2	Ester metílico del ácido 7-hexadecanoico	29.57	1.1046
C17H34O	Hexadecanal,2-metil	29.73	0.9921
C17H26O2	Metilo 4,7,10,13-hexadecatetraenoato	30.35	1.9260
C19H30O2	Ácido 13,16-Octadecadiynoic, éster metílico	30.53	3.0580
C16H32O2	Ácido Hexadecanoico, Acido Palmítico	31.34	1.2352
C18H34O	9-octadecenal	31.67	1.5022
C15H30O2	Ester metílico del ácido tetradecanoico	31.9	5.5453

C17H24O4	Ftalato de metilo 2-etilhexilo	32.06	1.8164
C19H30O2	Estearidonato de metilo	32.58	2.2909
C19H36O2	Éster metílico del ácido 11-octadecenoico	32.8	24.1376
C17H34O2	Pentadecanoato de etilo	33.58	2.0385
C17H32O2	11-hexadecenoato de metilo	34.58	1.7645
C22H40	1,9,17-docosatrieno	35.05	1.9557
C18H36O2	Ácido decanoico,éster 2-etilhexílico	36.18	1.0790
C16H32O2	Ácido mirístico	36.57	2.0128
C19H36O2	Éster octílico del ácido 10-undecenoico	37.59	1.6118

De la fracción analizada del extracto obtenido de *Coelastrella* se encontraron 25 compuestos incluyendo hidrocarburos, ésteres metílicos, ácidos y alcoholes grasos, entre otros. En esta fracción se encontraron 2 hidrocarburos, los cuales representan más del 4% de la composición entre un rango de C19-C22. Algunas especies de microalgas pueden almacenar hidrocarburos, como *Botryococcus braunii*, la cual es una microalga de agua dulce al igual que *Coelastrella*, de esta especie se ha entre el 25 hasta 80% de su peso seco en hidrocarburos, encontrando hidrocarburos hasta de C37 [89].

De ésteres metílicos se identificaron 7 compuestos, los cuáles representan casi el 50% de la composición de la fracción con cadenas de entre C10- C19, siendo el éster metílico del ácido 11-octadecenoico el de mayor proporción. Mansur et al. [90], reportaron que en la transesterificación de lípidos de *Coelastrella sp* se encontraron cadenas entre C10-C23, siendo el metil éster de ácido palmítico (C-15) el de mayor proporción. Cabe mencionar que el perfil lipídico de una microalga depende de múltiples factores, como el especie o cepa, las condiciones de cultivo, las condiciones de cosecha o extracción, entre otros. Por lo que, puede existir diferencias entre lo reportado en la literatura y lo obtenido en esta investigación.

Por otra parte, para los ácidos y alcoholes grasos se identificaron 6 compuestos los cuales representaron el 25% de la composición, siendo el 2-etil-hexanol C8H18O el compuesto que se encontró en mayor proporción.

Dentro de los otros compuestos identificados como productos de la transesterificación de la fracción 2 se encontraron aldehídos, fenoles y otros compuestos oxigenados, representando aproximadamente el 20% de la composición total.

3.2. Caracterización del ACU

La tabla 3.6 muestra los resultados de la transesterificación de ACU, donde se analiza que los compuestos que se formaron en mayor cantidad fueron los metil ésteres en más del 85%, seguido por la formación de alcoholes y ácidos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Murcia et al., 2013 donde el mayor compuesto formado con un 48.5% fue el ácido 11- octadecanoico, lo cual es comparable con el valor obtenido de 63.5% seguido por la formación del éster metílico de ácido tetradecanoato, los cuales conforman más del 80% de la muestra [91].

Tabla 19 Compuestos identificados de la transesterificación de ACU

Fórmula	Nombre del compuesto	Tiempo de retención (min)	% del total del área de los picos
C2H6N2O2	Hidrazida de ácido hidroxiacético	5.4	1.03
C6H10N2O4	Azodicarboxilato de dietilo	8.37	8.27
C8H16O2	Ácido 2-metil heptanoico	8.72	1.28
C4H8O2	3-hidroxi butiraldehído	10.36	0.15
C7H13NO3	2-amino-5 hidro-4 metil-4 hexenoico	10.59	0.06
C9H18O2	Metil éster de ácido octanoico	10.7	2.33
C3H4O2	Éster etenílico, ácido fórmico	13.77	0.42
C17H32O2	Metil éster de ácido ciclopentaneundecanoico	19.36	1.10
C4H8O3	Ácido 2-hidroxibutrílico	22.31	0.44
C11H20O4	Metil ester de ácido nonadecanoico	24.81	0.09
C19H40	6 metil octadecano	26.37	0.09
C15H30O2	Éster metílico de ácido tetradecanoato	28.23	19.41
C17H32O2	Éster metílico del ácido 14-metilpentadec-9enoico	30.67	0.30
C15H26O2	12,13- tetradecadienoato de metilo	31.77	0.29
C19H34O2	Éster metílico del ácido 10-octadecenoico	32.95	63.54
C19H34O2	Éster metílico del ácido 9-12-octadecenoico	33.78	0.11

C19H36O2	Éster metílico del ácido 11-octadecenoico	34.7	0.82
C21H34O2	Éster metílico del ácido 5,8,11,14-eicosatetranoico	35.6	0.05
C18H36O2	Éster metílico del ácido 15-hexadecanoico	36.6	0.23

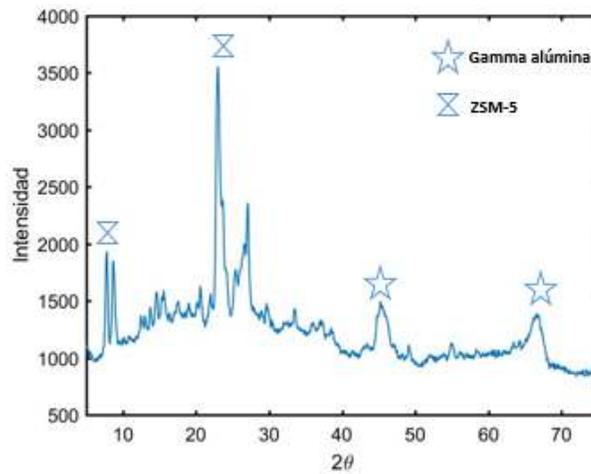
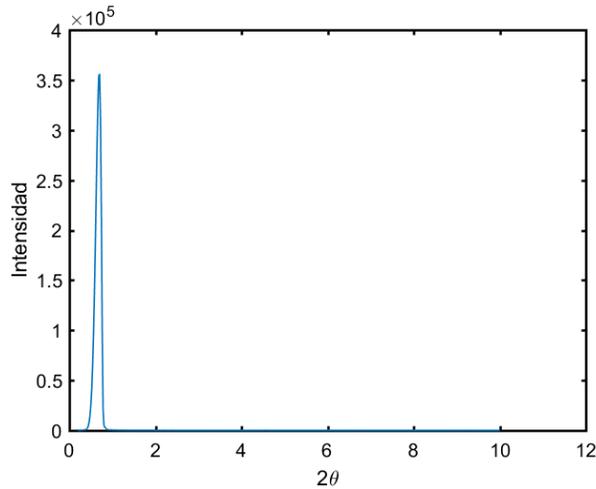
3.3. Caracterización del catalizador

El catalizador NiMo/ ZAS-15 fue sometido a dos pruebas de caracterización para conocer mejor sus propiedades.

3.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Por medio de esta técnica se analiza la composición mineral que tiene el catalizador sintetizado debido a que los rayos X al estar en contacto con el material generan una señal de difracción.

Los patrones de difracción de rayos X de ángulo bajo se muestran en la figura 3.12, se identifica el pico característico de un material mesoporoso SBA-15. Los resultados indican que los materiales sintetizados con SBA-15 y ZSM-5 presentan un comportamiento típico de materiales con estructura mesoporosa, pero dicha estructura muestra un desordenamiento apreciable, incluso observándose la pérdida de los picos característicos de estructura hexagonal [92]. En el difractograma de ángulo alto se observan los picos característicos de la ZSM-5 que se encuentran entre valores de 7,8 y 23, siendo estos los valores reportados en la literatura (Ver anexo VII) [93]. De igual forma en el difractograma de ángulo alto se observa que la gamma alúmina formada coincide con los valores reportados en la literatura, los cuales son a los 45.9° y 66.9° (tarjeta 29-0063) (Ver anexo VIII) [94].



(a)

(b)

Figura 3.92 Difractogramas de rayos X del catalizador NiMo/ZAS-15 (a) ángulo bajo y (b) ángulo alto

3.3.2. Fisisorción de N_2

Este análisis permite conocer las características texturales de un material, como la superficie, volumen y tamaño de poro mediante la relación del gas adsorbido por el catalizador y la presión del gas a temperatura constante. En la figura 3.13 se muestra que la isoterma obtenida para el catalizador con la gamma alúmina es de tipo IV, este tipo de isoterma es típica dentro de los materiales mesoporosos ya que se forma un llenado en multicapas. Con una histéresis combinada tipo H1 y H3; el tipo H1 es representativo de un material adsorbente con una distribución mesoporosa. El tipo H3 es típico de materiales con poros en forma de rendija [95].

Mientras que, la histéresis del SBA-15 junto con la zeolita ZSM-5 es de tipo H1 y H2 siendo este tipo la categoría de los catalizadores mesoporosos.

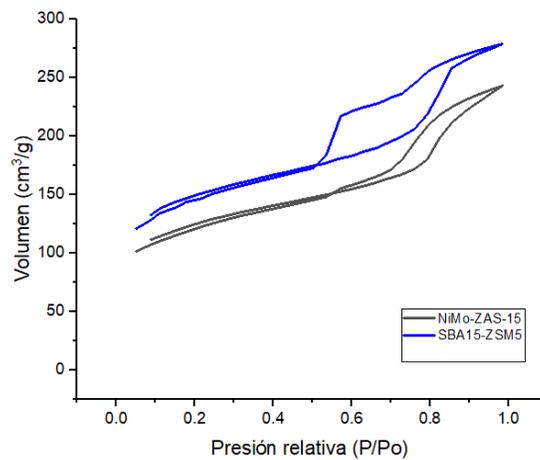


Figura 3.103 Isotherma de adsorción-desorción del catalizador NiMo/ZAS-15

Cabe señalar que el equipo sólo puede analizar tamaño de poro mesoporoso, por lo que los valores reportados son sobre este tamaño de poro. En la tabla 3.7 se muestran las características texturales, obteniendo componentes mesoporosos dentro del rango 2 a 50 nm, con una tendencia entre los valores de 4-5 nm y 8-10 nm. Siendo esto una característica ideal para su uso en la producción de combustible sostenible de aviación y para transformar materias primas como son los lípidos.

Tabla 20 Características texturales del catalizador

	Valores	Unidades
Área superficial (BET)	444.954	m ² / g
Diámetro de poro de desorción (BJH)	4.624	nm
Volumen de poro	0.223	cm ³ g ⁻¹

Es por esto que se seleccionaron estos materiales para conformar el catalizador a emplear, conociendo que el material SBA-15 tiene un gran potencial de soporte para catálisis por sus características estructurales mesoporosas, siendo un soporte que se ensambla en condiciones ácidas y tiene una estructura altamente ordenada [92]. El empleo de materiales que tengan características zeolíticas permite que el proceso catalítico heterogéneo tenga gran potencial ya que estos materiales, como la ZSM-5, tienen grandes áreas superficiales, una buena adsorción,

estabilidad térmica y una acidez considerable, fomentando así la presencia de sitios con suficiente fuerza ácida [93]. Además de presentar sitios Brönsted fuertemente ácidos los cuales permiten el desarrollo de reacciones catalíticas ácidas [96].

Aunado a esto, la gamma alúmina es un soporte que da gran estabilidad al catalizador, con una fuerte acidez de Lewis, permitiendo un funcionamiento óptimo con moléculas pesadas como son los aceites vegetales [97]. Por otra parte, se ha estudiado el uso de NiMo en los catalizadores para su implementación en la producción de SAF, se ha documentado una buena compatibilidad de éste con la zeolita ZSM-5.

En el caso del molibdeno, el cual es un elemento muy utilizado en catalizadores heterogéneos, se ha estudiado la fase activa NiMoS en HDS, ya que este permite tener una mayor selectividad dentro de las reacciones químicas como la oxidación, hidrotratamiento e hidrodeshidrogenación [98]. Por otro lado, el níquel es uno de los elementos más utilizados en los catalizadores y se ha reportado que su uso, junto con molibdeno, sobre la gamma alúmina controla la producción de partículas de níquel y evita su desactivación [99].

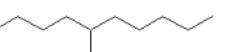
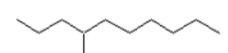
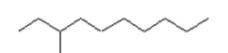
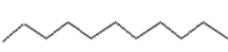
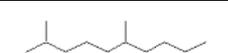
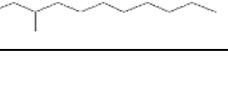
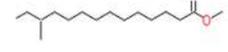
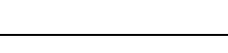
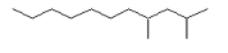
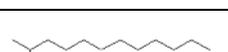
3.4. Caracterización de los productos de reacción

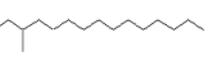
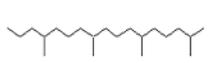
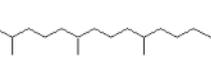
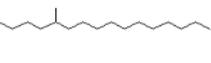
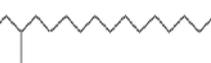
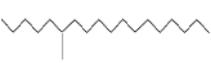
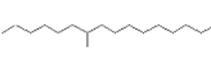
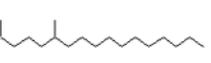
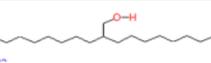
Se analizaron los productos obtenidos por cromatografía de gases/ espectrometría de masas con ambas materias primas, con el fin de comparar los resultados obtenidos. Se seleccionó la hora 3 de ambas reacciones.

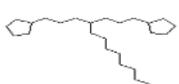
3.4.1. HDO de ACU

Se identificaron 37 compuestos obtenidos en esta reacción, los cuales contienen desde 9 carbonos hasta 25 carbonos, la tabla 3.8 muestra los compuestos identificados. En la primera parte de la tabla se encuentran los compuestos de C8-C16 correspondientes a la fracción de SAF y en la segunda parte, se muestran los compuestos de C17- C35 fracción correspondiente al diésel verde. Se puede observar que dentro del área del SAF el compuesto que se formó en mayor medida fue el hexadecano con un 8.92%, seguido del dodecano con 8.77% y tetradecano con 7.15%. De igual forma, en la tabla 3.8 se muestra que dentro de la fracción C8-C16 hay un compuesto oxigenado, el cual corresponde al éster metílico del ácido 12-tetradecanoico. Por otro lado, en la fracción C17-C35 correspondiente a diésel verde se encontraron compuestos desde C17 hasta C25 y dentro de esta fracción se encuentran 3 compuestos oxigenados. La presencia de compuestos oxigenados en el SAF y en el diésel verde pueden incidir en la calidad del combustible y en el poder calorífico de estos combustibles.

Tabla 21 Compuestos obtenidos HDO de ACU

	Fórmula	Estructura química	Familia	Nombre	Tiempo de retención (min)	% área por fracción
SAF	C9H20		n-parafina	Nonano	7.94	0.47
	C11H24		isoparafina	5-metil decano	9.09	1.96
	C11H24		isoparafina	4-metil decano	9.18	3.11
	C11H24		isoparafina	2-metil decano	9.28	3.09
	C11H24		isoparafina	3-metil decano	9.4	6.98
	C11H24		n-parafina	Undecano	9.98	5.50
	C12H26		isoparafina	2-6 dimetil decano	10.9	4.22
	C12H26		isoparafina	4-metil undecano	10.99	2.15
	C12H26		isoparafina	2,3-dimetil undecano	11.09	2.25
	C12H26		isoparafina	3-metil undecano	11.19	4.82
	C16H32O2		isoparafina	Éster metílico del ácido 12-tetradecanoico	32.98	4.53
	C12H26		n-parafina	Dodecano	11.7	8.77
	C13H28		isoparafina	2,4-dimetil undecano	12.52	5.50
	C13H28		isoparafina	2-metil dodecano	12.73	5.32
	C13H28		n-parafina	Tridecano	13.46	6.19
	C14H30		n-parafina	Tetradecano	14.58	7.15
	C16H34		isoparafina	6-propil tridecano	14.82	1.99

Diésel verde	C15H32		isoparafina	4-metil tetradecano	15.2	3.74
	C15H32		n-parafina	Pentadecano	20.94	6.27
	C16H34		isoparafina	6-metil pentadecano	23.44	3.11
	C16H34		isoparafina	5-metil pentadecano	23.67	1.93
	C16H34		isoparafina	3-metil pentadecano	24.43	2.01
	C16H34		n-parafina	Hexadecano	25.39	8.92
	C21H44		isoparafina	2,6,10,14-tetrametil heptadecano	11.91	2.10
	C17H36		isoparafina	2,6,10-trimetil tetradecano	12.19	2.61
	C19H40		isoparafina	2,6-dimetil heptadecano	23.93	3.59
	C17H36		isoparafina	3-metil hexadecano	25.96	2.34
	C19H40		isoparafina	6-metil octadecano	26.1	2.22
	C17H36		isoparafina	7-metil hexadecano	26.38	2.97
	C17H36		isoparafina	4-metil hexadecano	26.65	1.14
	C19H40		isoparafina	2,6-dimetil heptadecano	27.14	4.01
C18H38O		isoparafina	Octildecanol	27.35	1.20	

C19H40		n-parafina	Nonadecano	27.53	12.57
C22H44		n-parafina	Docosano	28.53	4.93
C25H48		isoparafina	1-ciclopentil-4(3-ciclopentilpropil) dodecano	29.39	0.94
C18H36O		isoparafina	Éster metílico del ácido 15-hexadecanoico	30.86	0.80
C19H34O2		isoparafina	Éster metílico del ácido 9,12-octadecadienoico	32.7	2.75

En la tabla 3.9 se analizan los datos obtenidos de la HDO de ACU, se muestra que durante esta reacción se formó más SAF que diésel verde, obteniendo un rendimiento del 55.83%. Se obtuvo un SAF con 0.57% de oxígeno y un diésel verde con 0.99%, lo cual indica una buena remoción de oxígeno y esto a su vez es indicativo de que se obtuvieron combustibles de buena calidad. Vitthal et al. [100] evaluaron el contenido de oxígeno en el petrodiesel obteniendo un valor de 0.04%, se observa que los valores obtenidos se encuentran por debajo del 1% siendo casi ausente la presencia de oxígeno.

Por otro lado, se señala la presencia de isoparafinas en SAF y en diésel verde, teniendo una mayor presencia de estas en el SAF, lo cual es ideal para este biocombustible pues al tener mayor cantidad de isoparafinas se mejora el rendimiento del combustible ya que brindan una mejor densidad energética y ayudan a resistir mejor las temperaturas a las que se somete el biocombustible. También se analiza la relación isoparafinas y n-parafinas, la cual indica qué tan ramificado es el combustible formado pues, entre mayor número de isoparafinas mayor ramificación, por lo tanto, menor punto de congelación y mejor calidad del combustible. Al respecto es importante anotar que una de las propiedades más críticas con las que debe cumplir el SAF es un punto de congelación menor a -47°C y para cumplir ese criterio, la presencia de isoparafinas juega un papel determinante.

Tabla 22.9 Clasificación de los compuestos obtenidos en la HDO de ACU

# de carbonos	Producto	Rendimiento (%)	O ₂ (%)	Isoparafinas	isoparafinas multiramificadas (%)	n-parafinas	Relación iso / n-parafinas
C8-C16	23	55.8	0.57	16	29.11	7	1.31
C17-C35	14	44.2	0.99	12	61.62	2	1.47

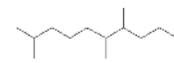
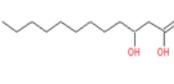
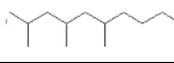
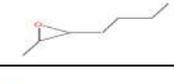
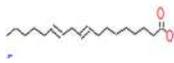
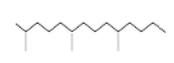
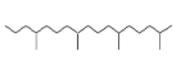
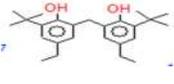
Los resultados obtenidos en este trabajo usando ACU como materia prima son comparables a los reportados en trabajos de investigación previos. Por ejemplo, Zhang et al. [77] evaluaron el uso de ACU con un catalizador NiMo/ USY@Al-SBA-15 para la producción de SAF; los autores demostraron que el catalizador empleado tuvo una excelente estabilidad al utilizar este tipo de materia prima. Además, el catalizador permitió tener una mayor isomerización de los productos obteniendo una relación de iso /n-parafinas del 2.7 [77]. De igual forma, en otro estudio los autores evaluaron el potencial de la hidroconversión del ACU para la producción de SAF utilizando un catalizador NiMo/SBUY-MCM-41, con el cual obtuvieron un rendimiento de conversión de SAF menor al 60%, siendo un valor similar a lo obtenido en este trabajo [101].

3.4.2. HDO de extracto microalgal de *Coelastrella* sp CORE 3

Se identificaron 15 productos formados en la reacción de HDO con el extracto microalgal de *Coelastrella* sp CORE 3, estos compuestos se conforman desde 7 carbonos hasta 25 carbonos. En la tabla 3.10 se muestran los compuestos formados, se observa que durante esta reacción se formó un compuesto perteneciente a la biogasolina, mientras que para los compuestos dentro del rango C8-C16 se formaron 6 compuestos, siendo el dodecano en un 31.41% el compuesto que más se formó. Por otro lado, se formaron 8 compuestos pertenecientes al diésel verde obteniendo dentro de esta categoría compuestos de 17 hasta 25 carbonos, siendo el 6-metil ocatadecano el que se formó en mayor medida en un 47.9%. De igual forma se obtuvieron compuestos oxigenados, los cuales se presentaron en mayor medida dentro de la clasificación de diésel verde, siendo este un parámetro que incide en la calidad del combustible.

La formación de biogasolina dentro de esta reacción se puede deber a la composición de la materia prima, ya que, si analizamos los compuestos obtenidos en la transesterificación de la fracción lipídica, se puede observar que se obtuvieron algunos compuestos C8, C10 y C12 los cuales al ser sometidos a una hidroxigenación normalmente mantienen números de átomos de carbono cercanos a los originales, pudiendo generar algunos cambios en su estructura.

Tabla 23 Clasificación de los compuestos obtenidos en la HDO del extracto microalgal

	Fórmula	Estructura química	Familia	Nombre	Tiempo de retención (min)	% área por fracción
Bio-gasolina	C7H14O		isoparafina	2-butil-3-metil oxirano	14.78	100
SAF	C13H28		isoparafina	2,6,7- trimetil decano	10.87	9.35
	C12H26		n-parafina	Dodecano	11.66	31.41
	C12H24O3		isoparafina	Ácido hidroxidodecanoico	33.34	9.67
	C13H28		Isoparafina	2,4,6-trimetil decano	14.55	17.06
	C14H30		n-parafina	Tetradecano	16.17	10.28
	C16H34		n-parafina	Hexadecano	25.31	22.22
Diésel verde	C17H14O		isoparafina	2-butil-3-metil oxirano	6.07	5.07
	C18H36O2		isoparafina	Éster métilico de ácido 15-hexadecanoico	4.03	3.07
	C19H34O2		isoparafina	Éster metilico de ácido 9,12-octadecanoico	9.87	7.50
	C19H40		isoparafina	6-metil octadecano	63.08	47.96
	C17H36		isoparafina	2,6,10- trimetil tetradecano	1.98	1.51
	C17H32O2		isoparafina	Éster metilico de ácido ciclopentaneundecanoico	1.33	1.01
	C21H44		isoparafina	2,6,10,14-tetrametil heptadecano	12.58	9.57
	C25H36O2		isoparafina	Fenol, 2-2 metilenebis (6-1,1-dimetil)-4 etil	0.46	0.35

En la tabla 3.11 se analizan los datos obtenidos en la HDO del extracto microalgal, se puede deducir que durante esta reacción se formó más diésel verde que SAF, obteniendo un rendimiento del 21.6%. El oxígeno presente en el SAF fue menor a obtenido durante la HDO de ACU, mientras que con el extracto microalgal se produjo más oxígeno dentro del diésel verde con 1.66% siendo un valor mayor a lo reportado por Vitthal et al. [100].

Por otro lado, se observó la presencia de isoparafinas dentro de la biogasolina, SAF y diésel verde, teniendo una mayor presencia de estas en el diésel verde, las cuales al estar presente dentro de este biocombustible provocan una disminución en el número de cetano disminuyendo la calidad en el combustible. Cabe mencionar que, la relación isoparafinas a n-parafinas nos indica el nivel de ramificación que tiene el combustible, por lo que para el SAF se busca que sea un producto altamente ramificado. En este caso se obtuvo una relación 0.56, lo cual nos indica un producto con poca presencia de estructuras ramificadas. Esto puede reflejarse en el caso del SAF en un producto que no cumpla el punto de congelamiento exigido por las normas de calidad correspondientes.

Tabla 24 Clasificación de los compuestos obtenidos mediante HDO de extracto microalgal

# C	Producto	Rendimiento (%)	O ₂ (%)	Isoparafinas	isoparafinas multiramificadas (%)	n-parafinas	Relación iso / n-parafinas
C5-C7	1	2.4	0.33	1	100	0	-
C8-C16	6	21.6	0.46	3	100	3	0.56
C17-C35	8	76	1.66	8	35.78	0	-

En la Figura 3.14 se analiza una comparación de los datos obtenidos utilizando extracto microalgal y ACU. Se puede observar que el rendimiento obtenido para el extracto microalgal fue mayor para la formación de diésel verde, mientras que para el ACU se obtuvo un mayor rendimiento en la formación de SAF. Además, se observa cómo al utilizar extracto microalgal se formó biogasolina mientras que con ACU la formación de cadenas C5-C7 no ocurrió.

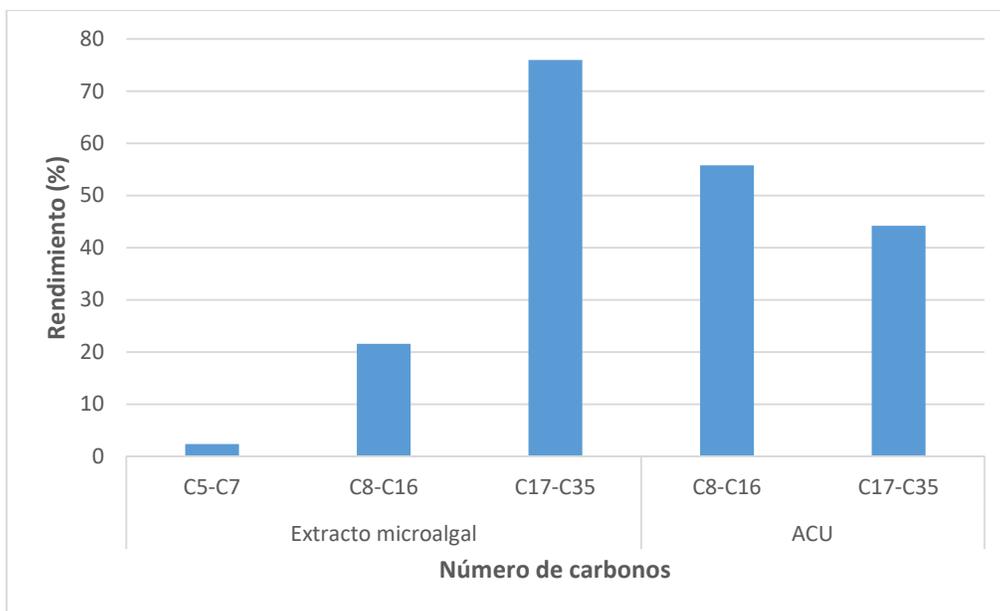


Figura 3.114 Comparación de productos obtenidos con ACU y extracto microalgal

En la literatura se han reportado distintos resultados de la producción de SAF a partir de distintas especies de microalgas por medio de HDO. En la tabla 3.12 se muestran algunos de estos resultados, en los cuales se obtuvo un rendimiento de formación de SAF entre 15 y 35 % [102].

Tabla 25 HDO con distintas especies de microalgas

Especie microalga	Catalizador	Resultado obtenido
<i>Botryococcusbraunii</i>	CoMo / γ -Al ₂ O ₃	67% gasolina, 15% SAF, 15% diésel verde y 3% aceites residuales
<i>Nannochlropsis</i> sp.	CoMoP/ Al ₂ O ₃	6% gasolina, 35% SAF y 87% diésel verde

El rendimiento de SAF obtenido en este caso (21.6%) podría incrementarse si se hiciera una segunda etapa de reacción, en este caso una reacción de hidroconversión donde se lleva a cabo tanto reacciones de isomerización como reacciones de rompimiento en presencia de hidrógeno y de un catalizador bifuncional, con el fin de romper las cadenas largas de diésel verde y tratar de isomerizarlas a una longitud de C8-C16. Esta combinación de dos etapas de reacción consecutivas, es decir, HDO seguida de hidroconversión corresponde al proceso referido como HEFA (Hydrotreated Esters and Fatty Acids).

3.5. Conversión de la reacción de HDO

Como se expuso anteriormente dentro del proceso referido como hidrodeshidrogenación o HDO, en realidad existen 3 posibles rutas de reacción que han sido identificadas: descarboxilación, descarbonilación e hidrodeshidrogenación propiamente dicha. Para poder determinar la conversión de las reacciones fue necesario definir en qué porcentaje ocurrían estas tres rutas de reacción, por lo que, con base en comportamientos generalmente observados en la selectividad de la HDO se asumió que el 22.57% ocurre por vía descarbonilación, el 9.6% por descarboxilación y el 67.83% por hidrodeshidrogenación.

Posteriormente, con base al carbón presente en el reactante se determinó cuánto reaccionó para formar los compuestos obtenidos y así se pudo determinar la conversión de reacción para las distintas materias primas. De igual forma, se estimó la remoción de oxígeno.

3.5.1. Conversión de reacción de HDO de ACU

En la ecuación 3 se analizan los datos obtenidos, donde se obtuvo una concentración inicial de $4,500 \frac{\mu\text{gTO}}{\text{ml}}$ obteniendo este dato de la sumatoria de las moléculas que reaccionaron a partir de las 3 etapas de HDO y utilizando trioleína (TO) como molécula modelo representativa del ACU. Mientras que para la concentración final se obtuvo el dato de la cantidad de miligramos de ACU que entraron al sistema y los miligramos de los productos formados, haciendo a continuación un balance de carbono para determinar el carbono en forma de TO que tuvo que reaccionar para dar lugar a los productos observados, tomando siempre en consideración la selectividad de las tres reacciones consideradas en el proceso HDO.

Para la reacción de HDO de ACU se obtuvo una conversión del 82%

$$x = 1 - \frac{4,500 \frac{\mu\text{gTO}}{\text{ml}}}{25,426.26 \frac{\mu\text{gTO}}{\text{ml}}} = 0.82 \quad (3)$$

Para la remoción de oxígeno en la HDO de ACU, se estimó que el reactivo tuvo una concentración de oxígeno del 14.71% y el oxígeno total estimado en los productos obtenidos fue de 1.56%, obteniendo así una remoción del 89.38%.

3.5.2. Conversión de la reacción de HDO de extracto microalgal

En la ecuación 4 se muestran los datos obtenidos para el caso del extracto microalgal donde se obtuvo una concentración inicial de 486233.41 µg alimentación con extracto lipídico, obteniendo este dato de la sumatoria de las moléculas que reaccionaron a partir de las 3 etapas de HDO. Mientras que para la concentración final se obtuvo el dato de la cantidad de microgramos de extracto microalgal que entraron al sistema y la cantidad de extracto que reaccionó.

Para esta reacción de HDO para extracto microalgal se obtuvo una conversión del 9%

$$x = 1 - \frac{486233.41 \text{ µg de extracto que no reaccionó}}{536200 \text{ µg de extracto alimentado}} = 0.09 \quad (4)$$

Para la remoción de oxígeno en la HDO de extracto microalgal, se estimó que el reactivo tuvo una concentración de oxígeno del 14.71% y el oxígeno total estimado en los productos obtenidos fue de 2.45%, obteniendo así una remoción del 83.3%.

3.6. Desafíos hacia el uso de SAF

México ha firmado distintos convenios y planes para incentivar el uso de combustibles sostenibles dentro de la industria de la aviación. Uno de estos fue el que firmó en 2009 donde se comprometió con la Organización de Aviación Civil a promover el desarrollo sustentable dentro de la industria de aviación. De igual forma, México fue uno de los países que forma parte del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) el cual entrará en vigor obligatoriamente en 2024.

En dichos planes existen pautas que deben cumplirse para lograr el uso de SAF en la industria de aviación mexicana, siendo 5 puntos principales para lograr esto: 1. Insumos y materias primas; 2. Producción y refinación de SAF; 3. Mezcla de SAF con turbosina; 4. Almacenamiento de SAF y 5. Suministro de SAF. De acuerdo con el presidente general de ASA, Villazón 2023, en México existen 2 pautas limitantes para que esto ocurra, falta impulsar la investigación hacia la producción, diversificación y optimización de la obtención de materia primas, así como los procesos para la elaboración de SAF [103].

A la par, debe comenzar a trabajarse de forma intrínseca en políticas públicas que incentiven su uso y desarrollo, así como estimular las inversiones en biorefinerías con el fin de lograr la rentabilidad de la producción de los biocombustibles. Ya que el uso de SAF es algo que ya está ocurriendo en México, pero en lugar de producirlo se está importando de Estados Unidos, lo cual

representa un costo para las aerolíneas pues se estima que el precio es 3 veces más que la turbosina y además su transporte incrementa las emisiones de GEI, reduciendo así la mitigación de estos.

CONCLUSIONES

- Después de cultivar 20 L de *Coelastrella* sp CORE 3 en un medio de cultivo ARS con fuentes limitantes de nitrógeno, se produjeron 7.61 g de biomasa total, equivalente a una productividad de $60 \text{ mgL}^{-1}\text{día}^{-1}$. Estos valores superan las cifras reportadas en la literatura.
- La caracterización del ACU permitió determinar la calidad de esta materia prima, pues estuvo dentro de los valores reportados de densidad, viscosidad, saponificación, humedad y acidez.
- Se estableció una metodología para la síntesis del catalizador NiMo/ ZAS-15, el cual mostró tener buena actividad catalítica para la producción de SAF.
- El rendimiento de SAF mediante HDO con el catalizador y con las condiciones de reacción empleadas fue mayor al alimentar ACU que extracto microalgal de *Coelastrella* sp CORE 3, obteniéndose 55.8% de SAF a partir de ACU y 21.6% a partir de extracto microalgal.
- El SAF obtenido a partir de ACU demostró tener una mayor cantidad de isoparafinas, las cuales brindan un mejor rendimiento al combustible. Además, se estimó una remoción de oxígeno del 89.38%. Mientras que el SAF obtenido de extracto microalgal tuvo una remoción de 83.3%.
- El SAF obtenido del extracto microalgal no obtuvo una mayor presencia de isoparafinas, estas se presentaron en el diésel verde, lo cual provoca una disminución en el número de cetano y, por ende, disminuye la calidad del combustible. Además, la relación de isoparafinas a n-parafinas indicó poca presencia de estructuras ramificadas incidiendo en la calidad del combustible.
- De acuerdo a una revisión previa de la literatura especializada, este es el primer reporte sobre el uso de *Coelastrella* sp CORE 3 para la obtención de SAF.

PERSPECTIVAS

Se recomienda para futuros trabajos, lo siguiente:

Estudiar la etapa de cultivo con diferentes variantes como intensidad de luz, continuar con el estudio de cómo mejorar la productividad lipídica, por ejemplo, variando las concentraciones de nitrógeno, con el fin de encontrar las condiciones óptimas de cultivo.

De igual forma, seguir desarrollando y mejorando la extracción lipídica, a pesar de que la extracción química es eficaz, se deben de estudiar otros procesos que permitan procesar mayor cantidad de biomasa y reducir el uso de solventes.

Es recomendable analizar todas las fracciones obtenidas con el fin de tener un perfil más completo sobre el extracto lipídico, y así poder caracterizar de manera más integral la materia prima.

De igual forma, estudiar más el comportamiento de la reacción de HDO, esto con el fin de justificar el uso o no uso de las reacciones one pot o una etapa.

Por último, es recomendable utilizar herramientas y metodologías para evaluar el impacto de mitigación del uso de estas alternativas frente al uso de combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ferrari, L. (2013) Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas, *Revista Mexicana de Física* 59, 36-43
2. ATAG (2020) Aviation Benefits Beyond Borders. <https://aviationbenefits.org/> Consultado: 27 de octubre de 2021
3. OACI (2019) Informe anual del 2018: El mundo del transporte aéreo en 2018. <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/ES/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx> Consultado: 25 de octubre de 2021
4. ICCT (2019) Emisiones de CO₂ de la aviación comercial en 2018. <https://theicct.org/sites/default/files/ICCT-AnnualReport-2018.pdf> Consultado: 25 de octubre de 2021
5. INCECC (2019) Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Gases de Efecto Invernadero. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> Consultado: 23 de octubre de 2021
6. ASA (2020) Litros y Servicios por Venta de Combustibles, Gobierno de México. https://www.asa.gob.mx/es/ASA/Litros_y_Servicios_por_Venta_de_Combustibles Consultado: 22 de octubre de 2021
7. IPCC (2000) Good Practices Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/> Consultado: 22 de octubre 2021
8. Álvarez, M. (2009) Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional, *Economía Informa* 4, 63-89
9. REMBIO (s.f.) ¿Qué son los biocombustibles líquidos? <https://rembio.org.mx/biocombustibles-liquidos/> Consultado: 20 de octubre del 2021
10. Mar, E. (2021) Mapa de ruta de bio jet en México: construcción, análisis y puntos de reflexión, *CIENCIA ergo-sum* 28
11. Pearlson, M. (2011) Assessment of Hydroprocessed Renewable Distillate Fuels, Massachusetts Institute of Technology, Tesis de Ingeniería, Massachusetts, Estados Unidos.

12. NCBI (2017) Toxicological Profile for JP-5, JP-8 and jet fuels, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp121.pdf> Consultado: 25 de enero de 2022
13. Rodríguez, L. (2017) Síntesis de un catalizador bifuncional para Hidro (Desoxigenación) de aceites. Tesis de Maestría, CICY, México.
14. NESTE(2020) 10 things you need to know about sustainable aviation fuel <https://journeytozerostories.neste.com/aviation/10-things-you-need-know-about-sustainable-aviation-fuel#615c2648> Consultado: 28 de junio de 2022
15. RSB (s.f.) The RSB Standard. <https://rsb.org/the-rsb-standard/about-the-rsb-standard> Consultado: 28 de junio de 2022
16. Clúster Bioturbosina (s.f.) ¿Qué es la bioturbosina? en: <https://clusterbioturbosina.ipicyt.edu.mx/pagina/public/bioturbosina> Consultado: 25 de octubre de 2021
17. Moreno, A., Gutiérrez, C., Gómez-Castro, F. (2021) Combustible de aviación a partir de residuos avícolas, *Ciencia* 72, 18-25
18. Sepúlveda, I. (2012) Bioturbosina. Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*,3, 579-594
19. FORBES (2020) La aviación aceleró hacia las cero emisiones, FORBES, 2020 <https://www.forbes.com.mx/negocios-2020-anio-aviacion-acelero-cero-emisiones/> Consultado: 16 de octubre de 2021
20. Aviación 21 (2021) Convierten restos de comida en bioturbosina. <https://a21.com.mx/index.php/innovacion/2021/03/23/convierten-restos-de-comida-en-bioturbosina> Consultado: 13 de octubre de 2021
21. Statista Research Department (2022) México: principales aeropuertos 2021 por flujo de pasajeros. <https://es.statista.com/estadisticas/1076873/aeropuertos-mexico-trafico-pasajeros/#:~:text=En%202021%2C%20el%20Aeropuerto%20Internacional,22%2C3%20millones%20de%20pasajeros> Consultado: 29 de junio de 2022
22. ASUR (s.f.) Aeropuerto Cancún. <http://www.asur.com.mx/es/aeropuertos/cancun/pasajeros-cancun.html> Consultado: 29 de junio de 2022
23. Grupo Aeroportuario del Sureste (s.f.) Aeropuerto Internacional de Cancún. https://es.wikipedia.org/wiki/Aeropuerto_Internacional_de_Canc%C3%BA Consultado: 29 de junio de 2022

24. ASA (2021) Litros y Servicios por Venta de Combustibles.
https://www.asa.gob.mx/es/ASA/Litros_y_Servicios_por_Venta_de_Combustibles
 Consultado: 29 de junio de 2022
25. Instituto Mexicano del Petróleo (s.f.) Reporte de Inteligencia Tecnológica Bioturbosina.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324018/Inteligencia_Tecnologica_Bioturbosina_Final.pdf Consultado: 21 de septiembre de 2021
26. Diario Oficial de la Federación (2018) Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541659&fecha=22/10/2018#gsc.tab=0 Consultado: 30 de junio de 2022
27. Informador (2012) Airbus y mexicana interjet realizan prueba de biocombustible con éxito.
<https://www.informador.mx/Economia/Airbus-y-mexicana-Interjet-realizan-primera-prueba-de-biocombustible-con-exito-20110401-0008.html> Consultado: 1 de julio de 2022
28. BBC (2011) México pionero: vuelo sostenible.
https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/08/110802_biocombustible_aviacion_mexico_an Consultado: 14 de noviembre de 2022
29. Sims, B. (2011) OriginOil to help Mexico commercialize algae-based jet fuel.
<https://biodieselmagazine.com/articles/7614/originoil-to-help-mexico-commercialize-algae-based-jet-fuel> Consultado: 29 de junio de 2022
30. Forbes México (2022) Aeroméxico, IATA y Boeing impulsarán uso de combustible sostenible. <https://www.forbes.com.mx/aeromexico-iata-y-boeing-impulsaran-uso-de-combustible-sostenible/> Consultado: 09 de septiembre de 2022
31. Garibay-Hernández, A., Vazquez-Duhalt, R., Sánchez Saavedra, M., Serrano-Carreón, L., Martínez, A. (2009) Biodiésel a partir de microalgas, BioTecnología 31
32. Instituto de Energía (2012) Cultivos energéticos para biocombustibles.
<https://imd.uncuyo.edu.ar/upload/cultivos-energeticos-final1.pdf> Consultado: 14 de julio de 2022
33. López, A. (2017) Potencial de cepas de microalgas aisladas de la costa de Yucatán para la producción de biodiésel. Tesis de Maestría, CICY, México.
34. López-Cruz, K., Rojas-Vargas, J., Bogantes-Sánchez, J. (2019) Gestión Integral de residuos aceite de cocina vegetal en las sodas del Campus Omar Dengo de la Universidad Nacional de Costa Rica, Uniciencia 33, 18-29

35. Reoil (s.f.) ¿Quiénes somos Reoil? <http://www.reoil.net/institucional.html> Consultado: 15 de julio de 2022
36. Biofuels de México (s.f.) Campaña de recolección de Aceite Vegetal Usado. <http://www.recoleccionaceite.com/somos.html> Consultado: 15 de julio de 2022
37. Renov (s.f.) Reciclaje de Aceite de Cocina Usado. <https://www.renovmexico.com/conocenos.html> Consultado: 15 de julio de 2022
38. Moreco (s.f.) Biodiesel Moreco. <https://moreco.com.mx/nosotros/> Consultado: 15 de julio de 2022
39. Energía Girón (s.f.) Biocombustibles Avanzados <http://energiagiron.com/nosotros/> Consultado: 15 de julio de 2022
40. Tacias, V., Rosales, A., Torrestiana, B. (2016) Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio, Revista Internacional de Contaminación Ambiental 32
41. Chhetri, A., Watts, C., Islam, R., (2008) Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production, Energies. <https://doi.org/10.3390/en1010003>
42. CNET (2011) Alaska Airlines flies' planes fueled by cooking oil. <https://www.cnet.com/culture/alaska-airlines-flies-planes-fueled-by-cooking-oil/> Consultado: 08 de julio de 2021
43. Muci, F. (2017) Así avanzan los biocombustibles en la aviación. <https://a21.com.mx/aeronautica/2017/12/20/asi-avanzan-los-biocombustibles-en-la-aviacion> Consultado: 08 de julio de 2022
44. Pérez, M. (s.f.) Primer vuelo de avión que utiliza aceite de cocina reciclado como combustible. <https://blogthinkbig.com/aceite-de-cocina-como-combustible-en-aviones> Consultado: 08 de julio de 2022
45. Natural Gas Intel (s.f.) Air France-KLM Completes Eight-Hour Flight Powered by Used Cooking Oil. <https://www.naturalgasintel.com/air-france-klm-completes-eight-hour-flight-powered-by-used-cooking-oil/> Consultado: 08 de julio de 2022
46. Airbus (2022) First A380 powered by 100% Sustainable Aviation Fuel takes to the skies. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-03-first-a380-powered-by-100-sustainable-aviation-fuel-takes-to-the> Consultado: 08 de julio de 2022
47. Jimenez, M., Castillo, A., (2021) Biomasa microalgal con alto potencial para la producción de biocombustibles, Scientia Agropecuaria 12
48. Pedrero-Álvarez, J. (2017) Cultivo de microalgas en fotobiorreactor de 20 L para la síntesis de bio-keroseno parafínico sintetizado. Tesis de Maestría, CICY, México.

49. Díaz, R. (2020) Influencia de la concentración de melaza pretratada y fósforo para la producción de lípidos en *Coelastrella*. Tesis de Maestría, CICY, México.
50. Falcón-Valdés, A. (2019) Producción de Bioturbosina a partir de lípidos de *Scenedesus obliquus* (Turpin) Kützing mediante hidrodeshidrogenación. Tesis de Maestría, CICY, México.
51. Wang, J., Huang, Y., Fang, Y., (2017) Selective extraction of neutral lipid from wet algae paste and subsequently hydroconversion into renewable jet fuel, *Renewable Energy* 118
52. Bwapwa, J., Akash, A., Trois, C., (2019) Jet fuel blend from algal Jet fuel and Jet A1 in 50/50 volumen ratio, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 14
53. Aircoment (s.f.) ANA realizó un vuelo utilizando combustible de aviación sostenible producido a partir de microalgas. <https://aircomment.info/ana-realizo-un-vuelo-utilizando-combustible-de-aviacion-sostenible-producido-a-partir-de-microalgas/> Consultado: 29 de junio de 2022
54. Organización para el Desarrollo de Nuevas Energías y Tecnologías Industriales (2021) Combustible de aviación sostenible producido a partir de residuos de madera y microalgas suministrado a vuelos regulares. https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100437.html Consultado: 29 de junio de 2022
55. Ancona-Caché, K., López-Adrián, S., Espinosa-Aguilar, M., Garduño-Solorzano, G., Toledano-Thompson, T., Narváez-Zapata, J., Valdez-Ojeda, R. (2017) Molecular phylogeny and morphologic data of strains of the genus *Coelastrella* (Chlorophyta, Scenedesmeceae) from a tropical region in North America (Yucatan Peninsula), *Botanical Sciences* 95
56. Goeckw, F., Noda, J., Paliocha, M., Gislerod, H. (2020) Revision of *Coelastrella* (Scenedesmeceae, Chlorophyta) and first register of this green coccoid microalga for continental Norway, *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 36
57. Sang-Ah, L., So-Ra, K., Nakyeong, L., Jun-Woo, L., Ve, L., Hee-Mock, O., Chi-Yong, A. (2021) Tratamiento de dos pasos con microalgas (*Coelastrella* sp.) de aguas residuales de cerdos sin tratar, lo que da como resultado niveles más altos de lípidos y triacilglicerol para la posible producción de biodiesel de mayor calidad, *Tecnología Ambiental* 331
58. Elamati, V., Moorthy, J., Nagamalai, S., Balasubramaniam, A., Innacimuthu, G., Velusamy, S., Perumal, V. (2021) Biodegradación de aceite de motor usado y producción de biocombustibles por microalgas *Coelastrella* sp M60 y *Scenedesmus* sp. VJ1, *Ingeniería Química y Tecnología* 44

59. Rodríguez-Palacio, M., Cabrera-Cruz, R., Rolón-Aguilar, J., Tobías-Jaramillo, R., Martínez-Hernández, M., Lozano-Ramírez, C. (2022) The cultivation of five microalgae species and their potential for biodiesel production, *Energy Sustainability and Society* 12
60. Jaimes, N., Kafarov, V. (2015) Desarrollo preliminar de una metodología de suministro de CO₂ a cultivos de *Botryococcus braunii* para la producción de biocombustibles, *Revista ION* 28
61. Del Rayo, M. (2017) Análisis del perfil lipídico de la microalga *Coelastrum sp.* para la producción de biocombustibles. Tesis de Maestría, CICY, México
62. Maltsev, Y., Krivova, Z., Maltseva, S., Maltseva, K., Gorshkova, E., Kulikovskiy, M. (2021) Acumulación de lípidos por *Coelastrella multistriata* durante la inanición de nitrógeno y fósforo, *Scientific report* 11
63. Peng, B., Yao, Y., Zhao, C., Lercher, J. (2012) Towards Quantitative Conversion of Microalgae Range Alkanes with Bifunctional Catalyst, *Angewandte Chemie* 51, 2072-2075
64. Peng, B., Yuan, X., Zhao, C., Lercher, J. (2012) Stabilizing Catalytic Pathways via Redundancy Microalgae Oil to Alkanes, *Am Chemistry* 134, 9400-9405
65. Zuo, H., Liu, Q., Wang, T., Liu, J., Ma, L. (2012) Catalytic hydrodeoxygenation of vegetable oil over Ni catalysts to produce second generation biodiesel, *Journal of fuel chemistry and technology* 40, 1067-1073
66. Qiying, L., Hualiang, Z., Qi, Z., Tiejun, W. (2014) Hydrodeoxygenation of palm oil to hydrocarbon fuels over of Ni/SAPO-11 catalyst, *Chemistry Journal of Catalyst* 35, 748-756
67. Seok, K., Jae, Y., Hong-shik, L., Taewoo, Y. (2016) Production of renewable diesel via catalytic desoxygenation of natural tryglicerides, *Application Energy* 116, 199-285
68. Rungnapa, K., Atthapon, S., Vorrnuthc, I., Kajornsak, F. (2014) Deoxygenation of Waste Chicken Fats to Green Diesel Effect of water and Free Fatty Acid Content, *Energy Fuels* 29, 833-840
69. Gousi, M., Kordouli, E., Bourikas, K., Symianak, E., Spyros, L. Kordulis C., Lycourghiotis A. (2020) Green Diesel Production over Nickel-Alumina Nanostructured Catalysts Promoted by Copper, *Energies* 13
70. Balam-Chan, R., Elizalde-Martínez, I. (2018) Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrotreatmento, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 6
71. SENER (2017) Mapa de ruta tecnológica de bioturbosina. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324219/MRT_Bioturbosina_Final.pdf. Consultado: 13 de mayo de 2022

72. ICAO (2023) Procesos de conversión aprobados. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> Consultado: 13 de mayo de 2022
73. Gúzman, M., Kafarov, V., Guzmán, A., Garzón, L. (2013) Influencia de la temperatura en el hidrot ratamiento de aceite crudo de palma usando catalizadores comerciales tipo NiMo/Al₂O₃, ION 26, 7-14.
74. Hsin-Wei, H-. Yu-Hsuan, C., Wei-Cheng,W. (2021) Techno-economic analysis of used cooking oil to jet production under uncertainty through three, two and one step conversion processes, Journal of Cleaner Production 289
75. Clúster de Bioturbosina (s.f.) Perspectiva logística de la bioturbosina en México. https://clusterbioturbosina.ipicyt.edu.mx/congreso/public/docs/presentaciones/sep5/18.Presentaci%C3%B3n_Log%C3%ADstica%201er%20Congreso%20Adrian%20Chavira.pdf Consultado: 09 de mayo de 2022
76. Marchisio, F. (2022) Enzimas para desgomado industrial de aceites vegetales. Tesis de Maestría, Universidad del Rosario, Colombia
77. Zhang, Z., Wang, Q., Chen, H., Zhang, X. (2017) Hydroconversion of waste cooking oil into Bio-jet Fuel over a Hierarchical NiMo/USYAl-SBA-15 Zeolite, Chemical Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600601>
78. Morales-Ortuño, J., Ortega-Domínguez, R., Hernández-Hipólito, P., Bokhimi, X., Klimova, T. (2016) HDS performance of NiMo catalysts supported on nanostructured materials containing titania, Catalysis Today 271. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.07.028>
79. Sardhar, S., Vijayan, P., Suresh, C., Santhanaraj, D., Shanthi, K. (2009) Effect of order or impregnation of Mo an Ni on the hydrodenitrogenation activity of NiO-MoO₃/ AlMCM-41 catalyst, Industrial & Engineering Chemistry Research 48, 2774-2780.
80. Arredondo, B., Voltolina, D. (2017) Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
81. Molina, E., Sánchez, J., García, F., Fernández,J., Acién, F. (1994) Effect of growht rate on the eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid content of *Isochrysis galbana* in chemostat culture, Applied Microbiology and Biotechnology. <https://doi.org/10.1007/BF00166076>
82. López, A. (1994) Variación estacional de la producción de biomasa y de la calidad de dos especies de microalgas cultivadas en laboratorio e invernadero. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, México.

83. Luo, L., He, H., Yang, C., Wen, S., Zeng, G., Wu, M., Zhou, Z., Lou, W. (2016) Nutrient removal and lipid production by *Coelastrella* sp in anaerobically an aerobically treated swine waste, *Bioresource Technology* 216, 135-141
84. Vishambhar, S., Kumar, M., Choudhary, S., Singh, V., Meena, M., Vinayak. (2022) Effect of nitrogen, phosphorus and sodium bicarbonate on lipid production and fatty acid profile in *Coelastrella terrestris* *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 45
85. Sang, L., So, K., Nakyeong, L., Jun, K., Ve, L., Hee, O., Chi, A. (2021) Two-step microalgal (*Coelastrella* sp.) treatment of raw piggery wastewater resulting in higher lipid and triacylglycerol levels for possible production of higher-quality biodiesel, *Bioresource Technology* 332
86. Angelaalincy, M., Nishtha, P., Ajthkumar, V., Ashkkumar, B., Ganesh, I., Brindhadevi, K., Lan., N., Pugazhendhi, A., Varalakshmi, P. (2023) Phycoremediation of Arsenic and biodiesel production using green microalgae *Coelastrella* sp. M60- an integrated approach, *Fuel* 333
87. Tepsuthammarat., K., Reungsang, A., Plangklang, P. (2023) Microalga *Coelastrella* sp. Cultivation on Unhydrolyzed Molasses-Bases Medium towards the Optimization of conditions for Growth and Biomass Production under Mixtrophic Cultivation, *Molecules*. <https://doi.org/10.3390/molecules28083603>.
88. Silva, S., Ueda, L., Bacaro, B., Hase, L., Aquino, E., Oller, C. (2023) Sugarcane vinasse as feedstock for microalgae cultivation: from wastewater treatment to bioproducts generation, *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 22
89. Metzger P., Allard B., Casadevall E., Berkaloff C., Coute A. (1990) Strucutre and chemistry of a new chemical race of *Botryococcus-braunii* (Chlorophyceae) that produces lycopaiene, a tetraterpenoid hydrocarbon, *Journal of Phycology* 26, 258-266
90. Mansur, D., Arifuddin, M., Susilaningih, D., Pangihutan, S. (2017) Production of Biodiesel from *Coelastrella* sp. *Microalgae*, American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.5011925>
91. Murcia, O., Chaves, C., Rodríguez-Pérez, W., Murcia, M., Alvarado, E. (2013) Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina, *Revista Colombiana de biotecnología* 9
92. Quach, N., Nguyen T., Nguyen D., Hoai L. (2020) Synthesis and Chracterization of Mesoporous Silica SBA-15 and ZnO/SBA-15 Photocatalytic Materials form the Ash of Brickyards, *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2020/8456194>

93. Delmás, D., Muñoz, H., Lizardo H. (2009) Síntesis de ZSM-5 para uso catalítico y caracterización por DRX y FTIR, *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química* 12
94. Seung-Moon, K., Yun-Jo, L., Jong, B., Potdar, H., Ki-Won, J. (2008) Synthesis and characterization of a highly active alumina catalyst for methanol dehydration to dimethyl ether, *Alternative Chemicals*. <https://sci-hub.se/10.1016/j.apcata.2008.06.032>
95. Ruíz, S. (2023) Determinación de los parámetros cinéticos de la transesterificación de aceites de cocina usado (ACU) mediante un catalizador heterogéneo de nanotubos de titanatos de sodio. Tesis de maestría, CICY, México.
96. Gil, R. (2020) Producción de olefinas de cadena corta mediante deshidratación y oligomerización catalíticas de bioetanol. Tesis de doctorado, CICY, México.
97. Rodríguez, V. (2017) Síntesis de un catalizador bifuncional para (hidro) desoxigenación de aceites. Tesis de maestría, CICY, México.
98. Ji, L., Xiang, L., Ri, Y., Ling, Jia, Hui, C., Hui, L., Yan, H., Ming, H., Hua, L., Wen, Z. (2023) Active phase morphology engineering of NiMo/ Al₂O₃ through the introduction of boosting hydrodesulfurization of 4-6-DMDBT, *Petroleum Science*. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.023>
99. Ali, S., Zagho, M., Al-Marri, M., Arafat, I., Khader, M. (2015) Development of Nickel-based catalysts for Methane Steam Reforming, *International Gas Processing Symposium*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63461-0.50011-0>
100. Vitthal, S., Yadav, A., Kumar, G. (2020) Combustion, performance and emission analysis of preheated KOME biodiesel as an alternate fuel for a diesel engine, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 141
101. Zhang, Z., Wang, Q., Zhang, X. (2019) Hydroconversion of Waste Cooking Oil into Bio-jet Fuel over NiMo/SBUY-MCM-41, *Catalysts*. <https://doi.org/10.3390/catal9050466>
102. Hwa, K., Yang, Y., Chyuan, H., Fye, B., Hsin, C., Tung, C., Chuan, T., Jaromír, J. (2021) Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: challenges and perspective, *Renewable and suitable energy reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111396>
103. Chávez, P. (2023) Se requiere política pública de impulso a la producción de SAF en México. <https://a21.com.mx/index.php/aeronautica/2023/09/27/se-requiere-politica-publica-de-impulso-la-produccion-de-saf-en-mexico> Consultado: 18 de octubre de 2023
104. Treacy, M., Higgins, J. (2011) Collection of simulated XRD powder patterns for Zeolites, *Elservier Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53067-7.X5470-7>

ANEXOS

I. Medio TAP

La preparación de este medio consistió en agregar en orden los reactivos, después se aforó con agua destilada y de ser necesario se ajustó el pH a 7 con KOH 1 M para alcalinizar el medio.

Composición medio TAP [34]

Solución stock	Volumen 1 L
Tris base 1M	20 mL
Buffer de fosfato II	1 mL
Metales traza Hutner	1 mL
Solución A	10 mL
Ácido acético glacial	1 mL

II. Medio ARS

Para la etapa de 4500 mL se empleó ARS, la cual se compone de los reactivos mostrados a continuación.

Composición Agua Residual Sintética [19]

Solución stock	Fórmula	Volumen 1 L
Cloruro de sodio	NaCl	10 mg
Cloruro de calcio di-hidratado	CaCl ₂ 2H ₂ O	2690 mg
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO ₄ 7H ₂ O	1000 mg
Fosfato dipotásico	K ₂ HPO ₄	100 mg
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	50 mg

Fosfato de sodio	Na ₂ HPO ₄	30 mg
Cloruro de amonio	NH ₄ Cl	192 mg
Glucosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	10 mg
Agua destilada		1000

III. Pruebas de calidad del ACU

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	0.91588	g/cm³
Viscosidad	31.76	cp
Índice de saponificación	195.22	-
Humedad	0.028	%
Índice de acidez	1.39	%

IV. Preparación Carborondum

1. Se trituró el carburo de silicio con un martillo y se colocó entre papel aluminio, hasta lograr obtener partículas pequeñas.
2. Se tamizó entre mallas 40-60
3. Se lavó con agua del grifo hasta que el agua saliera limpia o lo menos turbia posible.
4. Se colocó en el baño ultrasónico por 30 min.
5. Se drenó el agua, se colocó en una caja Petri y se metió al horno a 110°C.

V. WHSV

El WSHV se expresa como:

$$WSHV = \frac{m}{m_{cat}}$$

Donde m es el flujo másico reactivo y m_{cat} es la masa del catalizador colocado en el reactor.

Despejamos m_{cat} y obtenemos:

$$m_{cat} = \frac{m}{WSHV}$$

Obteniendo así, una masa de catalizador de 1.02 g, un WHSV de 4h^{-1} y un flujo másico de 4.08 g/hr.

VI. Fracciones cromatografía

Fracción	Vial
1	1-32
2	33-36
3	41-49
4	37-40 / 50-72
5	73-87

VII. Tarjeta cristalográfica ZSM-5 [104].

Página 238

CHEMICAL COMPOSITION: $[\text{H}_{0.32}] [\text{Si}_{95.68}\text{Al}_{0.32}\text{O}_{192}]$

REFINED COMPOSITION: $[\text{Si}_{96}\text{O}_{192}]$

CRYSTAL DATA: $P1\ 2_1/n\ 1$ (No. 14) unique axis **b**, cell choice 2
 $a = 19.879\ \text{Å}$ $b = 20.107\ \text{Å}$ $c = 13.369\ \text{Å}$
 $\alpha = 90^\circ$ $\beta = 90.67^\circ$ $\gamma = 90^\circ$
X-ray single crystal refinement, $R_w = 0.045$

REFERENCE: H. van Koningsveld, J. C. Jansen and H. van Bekkum, *Zeolites* **10** 235-242 (1990).

<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2θ	<i>d</i>	<i>M</i>	<i>I</i> _{rel}	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2θ	<i>d</i>	<i>M</i>	<i>I</i> _{rel}	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2θ	<i>d</i>	<i>M</i>	<i>I</i> _{rel}
-1	0	1	7.93	11.153	2	37.1	-5	0	1	23.27	3.823	2	16.1	5	4	2	31.78	2.816	4	0.4
0	1	1	7.94	11.132	4	100.0	5	0	1	23.42	3.798	2	18.2	-7	0	1	32.15	2.784	2	0.7
1	0	1	8.01	11.033	2	31.9	-5	1	1	23.69	3.756	4	8.1	-3	6	2	32.74	2.735	4	1.6
0	2	0	8.80	10.054	2	47.8	5	1	1	23.84	3.732	4	10.4	3	6	2	32.87	2.724	4	1.2
2	0	0	8.90	9.939	2	51.6	-3	0	3	23.93	3.718	2	1.4	3	3	4	32.99	2.715	4	0.4
-1	1	1	9.07	9.753	4	13.9	0	3	3	23.98	3.711	4	23.0	0	6	3	33.46	2.678	4	1.3
1	1	1	9.14	9.673	4	14.1	5	2	0	24.07	3.697	4	0.9	-1	0	5	33.77	2.654	2	0.9
1	2	0	9.86	8.971	4	1.4	3	0	3	24.20	3.678	2	2.1	0	7	2	33.97	2.639	4	0.4
0	2	1	11.01	8.035	4	1.2	-3	1	3	24.35	3.656	4	7.6	-5	5	2	34.34	2.612	4	1.6
-2	1	1	11.88	7.450	4	1.1	3	1	3	24.61	3.618	4	8.2	5	5	2	34.55	2.596	4	1.1
2	1	1	11.99	7.378	4	0.6	-2	5	1	24.77	3.595	4	1.0	-3	7	1	34.66	2.588	4	0.9
2	2	0	12.52	7.068	4	0.5	2	5	1	24.82	3.587	4	0.5	-5	1	4	35.16	2.552	4	0.6
0	0	2	13.25	6.684	2	7.3	-2	3	3	25.54	3.488	4	1.5	-1	5	4	35.17	2.552	4	0.9
0	1	2	13.96	6.343	4	11.0	-3	2	3	25.54	3.487	4	0.4	0	8	0	35.72	2.513	2	1.6
-1	1	2	14.61	6.062	4	0.7	2	3	3	25.71	3.465	4	0.9	8	0	0	36.15	2.485	2	1.1
0	3	1	14.79	5.991	4	13.7	3	2	3	25.79	3.454	4	1.0	0	3	5	36.17	2.483	4	1.4
-3	0	1	14.85	5.964	2	2.7	-3	4	2	25.85	3.446	4	3.1	7	4	0	36.34	2.472	4	0.7
3	0	1	14.99	5.909	2	4.9	3	4	2	26.02	3.425	4	4.1	-3	1	5	36.36	2.471	4	0.6
-3	1	1	15.50	5.718	4	5.0	-1	5	2	26.22	3.399	4	1.2	3	0	5	36.38	2.469	2	0.4
3	1	1	15.63	5.669	4	5.0	-5	1	2	26.32	3.385	4	0.4	2	8	0	36.89	2.437	4	0.4
-2	0	2	15.89	5.577	2	2.0	5	1	2	26.59	3.352	4	0.7	0	7	3	37.24	2.414	4	1.3
0	2	2	15.92	5.566	4	6.1	0	6	0	26.60	3.351	2	2.8	-5	3	4	37.44	2.402	4	0.5
3	2	0	16.02	5.532	4	1.3	6	0	0	26.91	3.313	2	2.7	-5	6	2	37.50	2.399	4	0.8
2	0	2	16.07	5.517	2	1.4	0	1	4	27.05	3.297	4	5.1	-7	1	3	37.63	2.390	4	0.9
-2	1	2	16.50	5.374	4	1.5	-1	1	4	27.37	3.258	4	0.6	3	5	4	37.65	2.389	4	0.7
2	1	2	16.66	5.320	4	2.0	0	6	1	27.44	3.251	4	1.1	5	3	4	37.83	2.378	4	0.9
-2	3	1	17.24	5.143	4	0.6	-5	2	2	27.44	3.250	4	0.8	-7	4	2	38.70	2.327	4	0.4
2	3	1	17.32	5.119	4	1.1	5	2	2	27.70	3.220	4	0.7	8	4	1	41.15	2.193	4	0.4
0	4	0	17.64	5.027	2	3.6	0	2	4	28.14	3.171	4	0.6	0	7	4	41.45	2.178	4	0.7
4	0	0	17.85	4.969	2	5.4	-2	1	4	28.42	3.140	4	1.1	0	10	0	45.09	2.011	2	3.2
1	4	0	18.20	4.873	4	0.7	2	1	4	28.62	3.118	4	0.4	0	8	4	45.14	2.009	4	3.4
0	4	1	18.86	4.705	4	0.6	-5	3	2	29.22	3.057	4	3.0	-8	0	4	45.22	2.005	2	0.9
-1	3	2	19.24	4.613	4	2.2	5	3	2	29.46	3.032	4	3.3	-8	4	3	45.32	2.001	4	1.1
1	3	2	19.31	4.596	4	1.5	3	6	0	29.88	2.990	4	0.7	10	0	0	45.64	1.988	2	4.6
-1	0	3	20.37	4.359	2	2.2	0	5	3	29.93	2.985	4	6.6	8	4	3	45.73	1.984	4	0.8
0	1	3	20.41	4.350	4	1.9	-5	0	3	29.94	2.984	2	4.0	8	0	4	45.76	1.983	2	1.4
1	0	3	20.48	4.337	2	1.3	-1	3	4	30.17	2.962	4	0.8	-3	4	6	46.50	1.953	4	1.4
-3	2	2	20.74	4.282	4	0.8	1	6	2	30.19	2.960	4	0.4	8	2	4	46.69	1.945	4	0.5
-2	4	1	20.85	4.259	4	2.6	-5	1	3	30.28	2.952	4	2.6	3	4	6	46.80	1.941	4	0.8
2	4	1	20.92	4.246	4	3.4	5	0	3	30.30	2.949	2	1.9	-5	8	3	47.28	1.922	4	0.8
3	2	2	20.94	4.242	4	0.7	5	1	3	30.64	2.918	4	0.9	-3	9	3	47.48	1.915	4	0.6
0	2	3	21.82	4.074	4	2.1	-2	5	3	31.21	2.865	4	1.0	5	8	3	47.53	1.913	4	0.6
3	4	0	22.20	4.005	4	2.8	-5	2	3	31.27	2.861	4	0.4	3	9	3	47.62	1.909	4	0.8
0	5	1	23.10	3.851	4	44.7	2	5	3	31.35	2.853	4	0.6	-5	3	6	48.54	1.875	4	1.4
3	3	2	23.19	3.836	4	1.0	-5	4	2	31.55	2.836	4	0.6	5	3	6	49.02	1.858	4	1.0

VIII. Tarjeta cristalográfica gamma alúmina

29-0063				Wavelength= 1.5418				
γ -Al ₂ O ₃				2 θ	Int	h	k	l
Aluminum Oxide				19.596	35b	1	1	1
				31.962	45b	2	2	0
				37.635	65b	3	1	1
				39.524	40b	2	2	2
				45.827	80b	4	0	0
				60.511	10b	5	1	1
				66.822	100b	4	4	0
Rad.: CuK α λ : 1.5418 Filter: d-sp:								
Cut off: IntL:				I/I ₀₀₁ :				
Ref: Rooksby, X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay, 264 (1951)								
Sys.: Cubic				S.G.: Fd $\bar{3}m$ (227)				
a:	b:	c:	A:					
7.924			C:					
Z: 10.0 mp:								
Ref: Ibid.								
Dx: 3.709 Dm:				SS/POM: F γ = 0(0.092 . 9)				
Al ₂ Mg O ₄ type.								
* Revised from 4.33.								
PSC: cF54.50. See original PDF card for Graphical diffractometer trace. Mwt: 101.96. Volume[CD]: 497.55.								
© 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved								
PCPDFWIN v. 2.4								