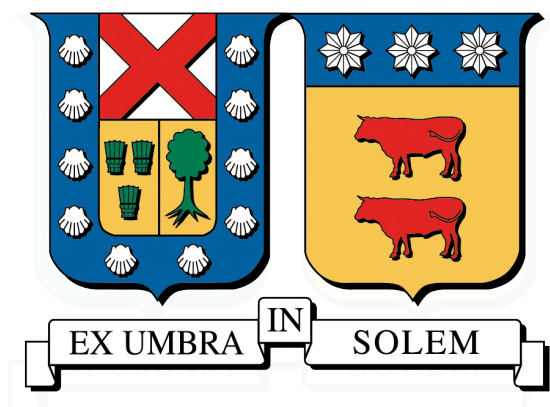


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO - CHILE



**ESTUDIO CIENCIOMÉTRICO DE MEDICIONES DE HOLLÍN
EN LLAMAS DE DIFUSIÓN AXISIMÉTRICAS LAMINARES
PARA BIOCOMBUSTIBLES SUSTITUTOS (SURROGATES)**

ANA PAULA MIRANDA SANTANA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. ANDRÉS FUENTES C.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. JUAN JOSÉ CRUZ V.

NOVIEMBRE 2020

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo busca estudiar el nivel de producción científico, que haga referencia a la medición de hollín emitido por llamas de difusión laminar axisimétrica producida por el uso de biocombustibles sustitutos, en especial mezclas que sustituyan a los biocombustibles más utilizados en el área de transporte terrestre y aéreo.

Con el propósito de hacer esto, primero se plantearon las bases teóricas para entender todos los términos utilizados a lo largo del trabajo, como por ejemplo, definir que es el calentamiento global, que son los biocombustibles, cuales son los más utilizados, que es un biocombustible sustituto y que conllevan los análisis que se pretenden realizar.

En cuanto a los análisis realizados, se llevo a cabo un estudio cienciométrico que pudiera mostrar de forma precisa el panorama de la producción de trabajos que hicieran referencia al tema ya establecido. Para lograr esto se realizó un análisis de co-ocurrencia de palabras claves, es decir, se busco cuales eran las palabras que más se repetían para describir un trabajo y como éstas se relacionaban entre si, mediante el uso de un mapa bibliográfico. Por otra parte, con tal de tener mayor claridad, se estudio la tendencia temporal de la producción de estos documentos; quienes eran los autores principales, y el número de publicaciones y las veces que han sido citados sus trabajos; cuales fueron las revistas científicas que publicaron un mayor número de los artículos sobre el tema y cuales de estas revistas concentró los trabajos más citados.

Para realizar lo anterior, se siguieron tres importantes pasos. Primero se recolectaron los datos necesarios, a través de Scopus, página web que recopila información bibliográfica y sobre las citas de la mayor parte de los trabajos científicos. En esta página se realizaron un total de 12 búsquedas que pretendían abarcar todo trabajo relevante para este análisis, de estas búsquedas 5 de ellas arrojaron resultados distintos que se analizaron de manera independiente. Una vez se tuvieran los archivos con la información de interés, éstos fueron “refinados” para eliminar cualquier factor que pudiera sesgar los resultados, siendo uno de

los más importantes la variación en la forma de escribir palabras claves, ya que produce que al analizar la co-ocurrencia de éstas existan palabras que parecieran ser diferentes pero que hacen referencia a lo mismo, siendo un ejemplo de esto biofuel y bio-fuel, por esto las bases de datos se “limpian” de este tipo de situaciones haciendo uso de la herramienta OpenRefine, agrupando todos estos términos escritos de forma distinta pero que en definitiva significan lo mismo. Luego, haciendo uso de las bases de datos, se realiza el análisis mediante la creación de mapas bibliográficos, utilizando el software VOSviewer, y gráficos relevantes a través de Microsoft Excel.

Mediante los análisis descritos se obtuvo que en todos los escenarios estudiados las palabras claves con mayor ocurrencia fueron hollín y biodiésel, mostrando una fuerte relación entre ellas, llevando a pensar que en los trabajos encontrados estas palabras suelen aparecer en forma conjunta, seguidas por palabras como polvo y combustión, mientras que palabras como sustitutos u otros tipos de biocombustibles tienen muy poca presencia. Por otra parte, se tiene que no es posible apreciar una tendencia al alza en lo que respecta a la producción de publicaciones sobre el tema a lo largo de los años, ni tampoco en la cantidad de veces que han sido citados estos trabajos, es más, tampoco se nota una relación entre los niveles de publicación de un año y la cantidad de veces que se citan trabajos similares en el mismo periodo. En cuanto a los autores de estos trabajos, no es un grupo muy amplio el que se ha dedicado a estudiar el tema, siendo aún menos los que publican más de un trabajo que haga referencia a éste. Situación similar ocurre en el ámbito de las revistas científicas, aunque existe una cantidad considerable de journals que se dedican a la publicación de este tipo de material, en general es un pequeño grupo de ellas que a lo largo de los años a difundido la mayor parte de estos artículos, siendo el mismo grupo el que concentra los trabajos más citados.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Combustibles fósiles	7
2.2. Calentamiento global	8
2.3. Energías Renovables	10
2.4. Biocombustibles	11
2.5. Biocombustibles más utilizados	14
2.6. Biocombustibles en Chile	15
2.6.1. Semillas de raps / Colza	15
2.6.2. Aceite usado	17
2.6.3. Material Lignocelulósico	18
2.7. Llama axisimétrica de difusión laminar	21
2.8. Hollín	22
2.9. Análisis de combustible sustituto (surrogate)	22
2.10. Análisis cienciométrico:	24
3. Desarrollo	27
3.1. Metodología	27
3.1.1. Obtención base de datos	27
3.1.2. Refinamiento de la base de datos	28
3.1.3. Análisis	29
3.2. Resultados	29
3.2.1. Análisis bibliográfico	29
3.2.1.1. Búsqueda 1: “laminar diffusion flame”	31
3.2.1.2. Búsqueda 2: “diffusion flame”	36
3.2.1.3. Búsqueda 3: “laminar flame”	41
3.2.1.4. Búsqueda 4: “laminar”	46
3.2.1.5. Búsqueda 5: no se hace referencia al tipo de llama	51
3.2.2. Resultados cienciométricos	57
4. Conclusiones	60
Bibliografía	64

A. Anexo**70**

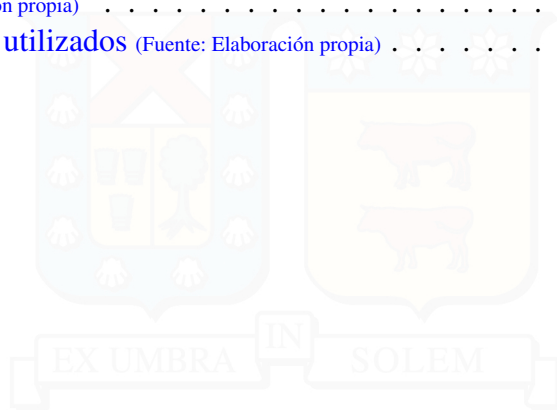
Índice de Tablas

3.1. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 1	34
3.2. Número de publicaciones por revista búsqueda 1	35
3.3. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 2	39
3.4. Número de publicaciones por revista búsqueda 2	40
3.5. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 3	44
3.6. Número de publicaciones por revista búsqueda 3	45
3.7. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 4	49
3.8. Número de publicaciones por revista búsqueda 4	50
3.9. Número publicaciones y número citas para los 10 autores más citados en búsqueda 5	54
3.10. Número de publicaciones por revista búsqueda 5	55
3.11. Número de citas ppor revista científica en búsqueda 5	56
A.1. Tabla resumen artículos encontrados	70
A.2. Continuación tabla resumen artículos encontrados	71
A.3. Continuación tabla resumen artículos encontrados	72
A.4. Continuación tabla resumen artículos encontrados	73
A.5. Continuación tabla resumen artículos encontrados	74
A.6. Continuación tabla resumen artículos encontrados	75
A.7. Continuación tabla resumen artículos encontrados	76
A.8. Continuación tabla resumen artículos encontrados	77
A.9. Continuación tabla resumen artículos encontrados	78
A.10. Continuación tabla resumen artículos encontrados	79

Índice de Figuras

2.1. Ejemplo mapa bibliográfico (Fuente: Van Eck y Waltman (2017))	26
3.1. Variación cantidad de resultados (Fuente: Elaboración propia)	30
3.2. Mapa bibliográfico búsqueda 1 (Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)	32
3.3. Número publicaciones y número citas por año búsqueda 1 (Fuente: Elaboración propia)	33
3.4. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 1 (Fuente: Elaboración propia)	34
3.5. Número de publicaciones por revista búsqueda 1 (Fuente: Elaboración propia)	35
3.6. Número de citas por revista búsqueda 1 (Fuente: Elaboración propia)	36
3.7. Mapa bibliográfico búsqueda 2 (Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)	37
3.8. Número publicaciones y número citas por año búsqueda 2 (Fuente: Elaboración propia)	38
3.9. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 2 (Fuente: Elaboración propia)	39
3.10. Número de publicaciones por revista búsqueda 2 (Fuente: Elaboración propia)	40
3.11. Número de citas por revista búsqueda 2 (Fuente: Elaboración propia)	41
3.12. Mapa bibliográfico búsqueda 3 (Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)	42
3.13. Número publicaciones y número citas por año búsqueda 3 (Fuente: Elaboración propia)	43
3.14. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 3 (Fuente: Elaboración propia)	44
3.15. Número de publicaciones por revista búsqueda 3 (Fuente: Elaboración propia)	45
3.16. Número de citas por revista búsqueda 3 (Fuente: Elaboración propia)	46
3.17. Mapa bibliográfico búsqueda 4 (Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)	47
3.18. Número publicaciones y número citas por año búsqueda 4 (Fuente: Elaboración propia)	48
3.19. Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 4 (Fuente: Elaboración propia)	49
3.20. Número de publicaciones por revista búsqueda 4 (Fuente: Elaboración propia)	50
3.21. Número de citas por revista búsqueda 4 (Fuente: Elaboración propia)	51
3.22. Mapa bibliográfico búsqueda 5 (Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)	52
3.23. Número publicaciones y número citas por año búsqueda 5 (Fuente: Elaboración propia)	53

3.24. Número publicaciones y número citas para los 10 autores más citados en búsqueda 5 (Fuente: Elaboración propia)	54
3.25. Número de publicaciones por revista búsqueda 5 (Fuente: Elaboración propia) . . .	55
3.26. Número de citas por revista búsqueda 5 (Fuente: Elaboración propia)	57
3.27. Número de publicaciones según combustible convencional a reemplazar (Fuente: Elaboración propia)	58
3.28. Quemadores utilizados (Fuente: Elaboración propia)	59



1 | Introducción

Una tendencia que parece no disminuir, sino que todo lo contrario, es el aumento del consumo energético. En efecto, durante el 2018 el consumo de energía primaria mundial creció un 2.3 %, es decir, cerca de dos veces el promedio de crecimiento desde 2010 ([International Energy Agency, 2019](#)). Este incremento tuvo como impulsor dos grandes factores: primero, una economía robusta; y segundo, condiciones climáticas mucho más extremas que en el pasado. Existen veranos e inviernos con temperaturas que exceden récords históricos, lo que significa un mayor uso de energía con la finalidad de acondicionar ambientes (uso aire acondicionado y calefacción) ([International Energy Agency, 2019](#)).

Si bien parte de este aumento de demanda energética fue aplacado por un mayor uso de energías renovables que en años anteriores (solar, hídrica, eólica, entre otras.), el crecimiento de demanda de combustible más grande lo vivió el sector de las energías fósiles, contando con el 70 % del aumento total ([International Energy Agency, 2019](#)).

El caso particular de Chile no difiere de la norma mundial. Así, las principales fuentes de energía primaria del país corresponden a combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbón), mientras que para el consumo final, se tiene que lo más utilizado refiere a derivados del petróleo y electricidad, y si bien se considera a esta última como una fuente de energía fuera del área de los combustibles fósiles, tanto en Chile como en el resto del mundo, en su mayoría la generación de electricidad se hace a base de combustibles fósiles, ya sea derivados del petróleo, carbón y/o gas natural. Además, tanto en Chile como en el resto de los países en desarrollo, se espera que se agudice el aumento en el consumo energético, el que estará ligado a un continuo desarrollo, dado que aún existe un fuerte lazo entre el

crecimiento de la actividad económica de un país y un crecimiento correspondiente en el consumo de energía ([Ministerio de Energía, 2014](#)).

En definitiva, se observa “una dominancia de combustibles fósiles en el consumo de energía primaria en el mundo, especialmente en las áreas de transporte, calefacción de hogares y para la generación de electricidad” ([Rissman, 2013](#)). Teniendo en cuenta que la formación de este tipo de combustibles toma millones de años, en lo relativo a la vida humana, se considera que la cantidad de combustibles fósiles existentes en el planeta son finitas.

Dicho esto, la mayor problemática con el uso masivo de los combustibles fósiles no se genera, por lo tanto, a raíz de un riesgo inminente de agotamiento de las reservas, sino que más bien se radica en la generación de emisiones a causa de tal utilización, comúnmente de H_2O y CO_2 , lo que está teniendo un efecto nocivo para el planeta. Sólo en 2018 las emisiones de CO_2 relativas al consumo energético crecieron 1.7 % (33.1 Gt CO_2), un alto histórico, y 70 % más alto que el aumento promedio desde 2010 (International Energy Agency, 2019). Uno de los mayores contribuidores a este incremento fueron las plantas energéticas que trabajan a base de combustibles fósiles; particularmente, las plantas que utilizan el carbón como fuente de energía fueron responsables de 2.9 % (280 Mt) del crecimiento, como resultado de lo cual la generación de electricidad contribuyó con el 30 % de las emisiones globales de CO_2 ; emisiones que hubieran sido 50 % más altas si no fuera por el aumento en el uso de energías renovables ([International Energy Agency, 2019](#)).

Es importante notar que, si bien el uso de electricidad como fuente de energía no libera emisiones, hoy en día la generación de ésta, como se mencionó con anterioridad, es en su mayor parte a base de combustibles fósiles. Es por esto último que en 2018 la generación de electricidad contó por 2/3 del aumento de las emisiones de CO_2 ([International Energy Agency, 2019](#)), de lo cual puede concluirse que un mayor uso de electricidad como fuente de energía, no significa una disminución correspondiente de las emisiones.

En el caso de Chile en específico, el sector que más contribuyó a las emisiones fue el sector de energía, en particular los sectores de generación eléctrica, transporte, minería e industria; escenario que se repite a menudo en otros países.

Uno de los grandes inconvenientes con el aumento de las emisiones de CO_2 , y, por ende, del uso de combustibles fósiles, es el hecho que este gas se queda en la atmósfera, aumentando su concentración y acrecentando el efecto invernadero que existe en nuestro planeta.

Siempre ha existido un efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra. Este es, pues, el que permite que el planeta sea habitable con una temperatura promedio de entre 290 y 300 K, mientras que sin su existencia se tendría una temperatura promedio de alrededor de 255 K (Tuckett, 2016). Muchos son los gases que permiten la existencia de este fenómeno, encontrándose entre ellos el CO_2 , el H_2O y el O_3 . Las moléculas de estos compuestos absorben parte de la radiación infrarroja emitida por el planeta, impidiendo que pase al espacio, y luego la re-radian de vuelta a la superficie terrestre. Este proceso se denomina “efecto invernadero primario” (Tuckett, 2016).

Ahora bien, desde la revolución industrial se ha generado un “efecto invernadero secundario” (Tuckett, 2016) producto de “nuevos” gases que son liberados en la atmósfera que tienen la capacidad para absorber y re-radiar radiación infrarroja de vuelta a la Tierra, además de un aumento en la concentración de algunos gases ya existentes. En particular, este segundo punto ha resultado ser un importante problema en la actualidad, dados los niveles de CO_2 que se han emitido a la atmósfera. Esto ha hecho que los niveles prácticamente constantes de dióxido de carbono crecieran de una forma drástica, incrementando el efecto invernadero secundario, lo que a su vez ha significado que una mayor radiación infrarroja sea re-radiada hacia la Tierra, elevando la temperatura promedio de la superficie terrestre y produciendo un cambio en el clima a nivel global. Cabe notar que existen gases en la atmósfera con una mayor capacidad de absorción de irradiación que el CO_2 , sin embargo, dada su concentración es el dióxido de carbono el que contribuye mayoritariamente al

aumento de la temperatura de la Tierra y una de las principales razones, si es que no la primordial, de este aumento en la concentración ha sido el uso de combustibles fósiles como la columna vertebral de las matrices energéticas alrededor del mundo.

Una mayor temperatura promedio de la superficie tiene grandes impactos en ecosistemas complejos y, a su vez, en el bienestar y sustento de la humanidad. Existen, por ejemplo, cambios en los patrones y cantidades de lluvias en muchas zonas del mundo; derretimiento de hielos; sequías; cambios en la abundancia de algunos animales y sus hábitats, en la distribución de árboles y plantas; cambios en la calidad y cantidad de los recursos hídricos en distintas partes del planeta, entre otras. Estos impactos en el ecosistema tienen grandes repercusiones para la humanidad, ya que afecta actividades como la agricultura, la producción de agua potable y actividades comerciales. Además, el cambio en la temperatura promedio de la superficie terrestre genera episodios climáticos extremos (tanto cálidos como fríos), lo que aumenta el consumo energético con fines de calefacción empeorando la situación del cambio climático.

Los impactos del cambio climático también son observables en Chile. De esta manera, se aprecian, por ejemplo, cambios en los recursos hídricos del país, lo que golpea otras actividades significativas para la población y en las que el agua es un recurso clave, como lo es la actividad agrícola y minera, y la obtención de agua potable ([Ministerio de Energía, 2014](#)).

Es debido a todo lo expuesto que resulta imperante buscar formas de reemplazar los combustibles fósiles por fuentes de energía libres de emisiones (o al menos con emisiones netas iguales a cero). Es en este escenario que las energías renovables han tomado fuerza; hoy en día se busca usar con mayor frecuencia combustibles alternativos y entre ellos aparecen los biocombustibles, utilizados (puros o mezclados con derivados del petróleo) como combustibles para motores de combustión interna, muy comunes en el área de transportes.

Si bien parecería que este tipo de combustible alternativo es la respuesta a las problemáticas expuestas, es necesario estudiar los efectos negativos que estos pueden tener antes de

su implementación. Uno de los problemas que pueden presentar el uso de biocombustibles es la emisión de hollín, material particulado que puede tener efectos nocivos tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas directamente.

Es por la importancia de este tema que en este trabajo se busca estudiar el nivel de producción científica que existe sobre la medición de las emisiones de hollín en el uso de biocombustibles, pero centrado en los trabajos que hagan uso de biocombustibles sustitutos, llamas de difusión laminar y llamas axisimétricas, ya que estas son técnicas de estudio que simplifican su reproducción y modelamiento. Para esto se reunirán todos los trabajos que existan hasta el momento respecto al tema, para luego analizar la co-ocurrencia de las palabras claves utilizadas en cada uno de los documentos, tratando de encontrar cuales son las más repetidas y cómo se relacionan entre ellas. Además, se desea estudiar las tendencias en el tiempo respecto a la publicación de este tipo de trabajos, quiénes son los autores con un mayor numero de publicaciones y citas, y también cuáles son los medios, en específico revistas científicas, que publican sobre el tema y los que reúnen un mayor número de citas, siendo la finalidad de este proceso caracterizar de manera precisa el escenario que existe al día de hoy en el estudio de las mediciones de hollín en llamas de difusión laminares axisimétricas utilizando biocombustibles sustitutos.

1.1. Objetivos

Objetivo general

Analizar la producción científica relacionada con técnicas de medición no intrusiva de producción de emisiones de nanopartículas sólidas generadas en la combustión de biocombustibles sustitutos.

Objetivos específicos

- Establecer las bases teóricas sobre las que se sostendrá este trabajo.
- Seleccionar los trabajos investigativos que se relacionen con el tema bajo estudio.
- Definir la base de datos sobre la que se realizarán los análisis correspondientes.
- Elaborar mapas bibliográficos en base a la co-ocurrencia de palabras claves.
- Diseñar gráficos que muestren información relevante sobre la producción científica del tema en estudio
- Analizar los resultados obtenidos.

2 | Marco Teórico

2.1. Combustibles fósiles

De forma tradicional, las fuentes energéticas más importantes a nivel mundial han sido los combustibles fósiles, ya sea siendo empleadas como fuentes de energía primaria (esto es, utilizadas directamente sin transformación para impulsar maquinaria, obtener calor, etc.), o bien, siendo modificadas para obtener fuentes de energía secundaria (como ocurre con la electricidad, la que se obtiene a través de tales combustibles y se usa, a su vez, como una fuente energética). Este tipo de combustibles se consideran recursos no renovables dado que el tiempo que demoran en regenerarse sobrepasa por mucho la tasa a la que son quemados. En cuanto a su producción en la naturaleza, los combustibles fósiles se han generado en procesos que duran cientos de miles de años, residuos orgánicos de plantas y animales fueron acumulándose en depósitos naturales con poco oxígeno, dando pie a una descomposición parcial bajo condiciones de alta temperatura y grandes presiones.

Dentro de este grupo conocido como “combustibles fósiles” se encuentran el petróleo, el carbón, el gas licuado y el gas natural. Dichas fuentes energéticas tienen gran popularidad en las matrices energéticas alrededor del mundo, puesto que cuentan con ventajas bien conocidas y comprobadas, entre las que se encuentran: un alto poder energético; facilidad de almacenamiento y transporte; extracción relativamente fácil y de bajo costo, lo que se da gracias al hecho de que han sido utilizados durante un periodo relativamente largo, por lo que se ha podido ir perfeccionando la tecnología empleada; y por último, dado que se siguen descubriendo nuevos depósitos accesibles, existe una baja probabilidad de

agotamiento en un periodo relevante para la vida humana.

Si bien pareciera que en cualquier escenario los combustibles fósiles son recursos energéticos superiores, se debe tener en cuenta que también tienen importantes desventajas, entre las que es posible mencionar: una distribución geográfica no homogénea, lo que potencialmente puede generar conflictos entre países productores y los países que buscan adquirir este producto; la existencia de una fluctuación de precios influenciadas por los niveles de extracción y demanda en cualquier periodo dado; su naturaleza no renovable, lo que significa que con el paso del tiempo las reservas comenzarán a disminuir y aunque no existe riesgo de agotamiento en el futuro cercano, es importante buscar alternativas renovables antes de que esto suceda; y por último, mucho más relevante hoy que nunca, el uso de combustibles fósiles emite grandes cantidades de gases que participan en el aumento de lo que se conoce como el “efecto invernadero” y el consecuente calentamiento global.

2.2. Calentamiento global

En el planeta Tierra siempre ha existido un efecto invernadero (efecto invernadero natural), el cual consiste en que gases en la atmósfera atrapan parte de la radiación solar que la superficie del planeta refleja de nuevo al espacio y la devuelven posteriormente a la Tierra, permitiendo que la temperatura promedio de la superficie terrestre sea mayor que en el caso de que no existiera este fenómeno, en gran parte permitiendo la vida en el planeta. El problema que se observa actualmente es que la actividad humana, en especial la quema de combustibles y actividades agrícolas, está produciendo un aumento desmedido de la abundancia en la atmósfera de los gases que permiten esta ocurrencia (efecto invernadero antropogénico), siendo estos gases conocidos como gases de efecto invernadero, entre los cuales se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Particularmente, el gas invernadero que está generando los mayores problemas es el CO_2 y como una gran parte de las emisiones de este gas proviene de la combustión de recursos energéticos fósiles es que el aumento del uso de estos últimos en el año 2017 hizo que

la abundancia del dióxido de carbono alcanzara un 146 %, si se compara con los niveles preindustriales ([World Meteorological Organization, 2017](#)).

Como existe un incremento en la abundancia de ciertos gases en la atmósfera con capacidad de capturar y re-irradiar radiación solar infrarroja, la fracción de ésta que se devuelve a la Tierra es mayor, generando un aumento de la temperatura promedio de la superficie terrestre sostenido en el tiempo. Este aumento de temperatura significa grandes cambios para todos los ecosistemas que habitan el planeta. Se proyecta que entre 2030 y 2052 el efecto invernadero causado por fuentes antropogénicas lleve el calentamiento global a 1,5°C ([World Meteorological Organization, 2017](#)), lo que tiene como consecuencia diferencias en características climáticas, las que incluyen aumentos en temperaturas promedio en regiones terrestres y océanos; temperaturas altas extremas; la frecuencia, intensidad y cantidad de fuertes precipitaciones, y en la intensidad y frecuencia de sequías ([World Meteorological Organization, 2017](#)). No sólo las características climáticas en sí se verán afectadas, sino que de esto se derivan otros grandes problemas. En efecto, se proyecta que exista un aumento del nivel del mar, lo que a su vez aumentaría el riesgo de inundaciones, intrusión salina (intrusión de agua salada en reservas de agua dulce) y daño estructural en zonas costeras, islas y deltas. Además, está la posibilidad de que muchas especies de insectos, plantas y animales pierdan parte de sus hábitats, dados los cambios climatológicos en ciertas regiones geográficas. Todas estas consecuencias del calentamiento global pueden ser traducidas en riesgos para la humanidad, riesgos que irán incluso más allá de tener que lidiar con condiciones climáticas extremas; se espera que existan problemas para la salud, sustento, seguridad alimentaria, suministro de agua, seguridad de las personas y crecimiento económico, lo que afectará de forma desproporcionada a las poblaciones más vulnerables y en desventaja, poblaciones indígenas y poblaciones dependientes de la agricultura o actividades costeras ([World Meteorological Organization, 2017](#)).

Para limitar las secuelas del aumento del efecto invernadero y el subsecuente calentamiento global y cambio climático, se busca limitar las emisiones de gases invernadero e implementar tecnologías para capturar emisiones residuales, especialmente de CO_2 , mante-

niendo así los niveles de los gases atmosféricos en niveles estables, previniendo un mayor aumento de sus concentraciones.

2.3. Energías Renovables

Las energías renovables son fuentes de energía alternativas que se han vuelto populares, dado que se consideran inagotables a escala humana, y además, cuentan con la gran ventaja de que en su mayoría son completamente limpias (energías verdes) o al menos tienen emisiones netas bajas o nulas, es decir, las emisiones que se producen por el uso de estas fuentes energéticas se contrarrestan en gran medida con los niveles de remoción de gases atmosféricos durante la producción de estos combustibles o la materia prima de la que provienen.

Se considera energía renovable a cualquier recurso energético que dependa del uso de depósitos que se rellenan a una velocidad comparable a la cual se consumen ([Gonzales, 2009](#)), convirtiéndolas así en recursos inagotables a escala humana. Este tipo de energías pueden provenir de ríos, movimientos oceánicos, el viento, materia orgánica, el calor interno de la Tierra o directamente del Sol. Con respecto a sus ventajas, las principales son su ya mencionada naturaleza inagotable, su limpieza y su seguridad, pues no presentan peligros de la magnitud de la energía nuclear. En cuanto a la limpieza, estas energías no producen emisiones en su uso o al menos los niveles de CO_2 emitidos son comparables con los niveles de CO_2 absorbidos por la materia prima usada para la producción del combustible, generando emisiones netas nulas.

Por otra parte, las desventajas que presentan estos recursos son relativamente bajas. Entre las más relevantes se encuentran: su irregularidad, ya que muchas energías renovables no cuentan con patrones de producción constantes, por lo que es necesario invertir en buenos métodos de almacenamiento; su naturaleza difusa, puesto que existen recursos energéticos que producen energía de baja intensidad a lo largo y ancho de grandes super-

ficies, requiriendo que se “recolecten” cantidades significativas para ser utilizables y, en menor medida, se tiene que; para poder acceder al uso de ciertas energías se necesitan instalaciones que potencialmente tienen un impacto visual negativo en las localidades en que se establecen, como por ejemplo la construcción de las granjas de vientos.

Los tipos de energías renovables más conocidos hoy en día son: energía eólica, energía solar, energía mareomotriz, energía undimotriz, energía hidráulica, energía geotérmica, biomasa, y biocombustibles.

2.4. Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos obtenidos mediante el procesamiento de la biomasa, la que se refiere a “cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos” ([Salinas y Gasca, 2009](#)). La biomasa puede tener tanto origen vegetal (como plantas o semillas), como animal (grasas).

Los combustibles obtenidos a partir de materia orgánica no son una invención reciente, sino que estos llevan tiempo siendo usados como una alternativa al uso de combustibles fósiles, especialmente en motores de combustión interna. Este recurso energético ha estado en un constante estado de estudio y desarrollo para poder encontrar las materias primas y tecnologías de conversión óptimas para la generación de un combustible eficiente y con bajos, idealmente nulos, impactos negativos tanto para la sociedad como para el ambiente.

De forma general, todos los biocombustibles funcionan de la misma forma, utilizan la energía que se almacena dentro de la materia orgánica. No obstante, existen distintos tipos de combustibles a partir de biomasa, los que se pueden categorizar dependiendo del grado de innovación tecnológica que conlleva el proceso productivo y de la clase de materia prima (biomasa) que se usa para su obtención. En la actualidad se diferencian tres generaciones de

biocombustibles, existiendo una cuarta generación emergente, lo que evidencia el continuo proceso de mejoramiento de este recurso energético.

Según la materia prima usada, las tres generaciones más desarrolladas se caracterizan de la siguiente manera:

- **Primera Generación:** para su obtención se usan cultivos alimenticios como maíz, caña de azúcar, remolacha y otros productos agrícolas con alto contenido de almidón; azúcares y aceites, también siendo posible utilizar grasas animales como la manteca y el sebo.
- **Segunda Generación:** esta generación utiliza como materia prima residuos agrícolas y forestales que no pueden ser usados como alimento. Específicamente, se hace uso de materiales lignocelulósicos, los que tienen una composición de mayor complejidad que la presente en las materias primas utilizadas para conseguir biocombustibles de primera generación. Ejemplos son la paja de trigo y las hojas, tallos y mazorcas de maíz.

En general, en esta generación la materia prima de la que proviene el combustible no compete de forma directa con la industria alimenticia, por lo que en adición a los residuos agrícolas y forestales, también se usa el aceite de cocina usado y los cultivos energéticos dedicados, los cuales son cultivos de especies no comestibles (árboles y hierbas) usualmente plantadas en suelos no aptos para cultivar alimentos, cuya única finalidad es servir como materia prima para la producción de biocombustibles.

- **Tercera Generación:** la materia prima de esta generación usa de manera significativa el CO_2 como insumo para su producción y además, busca eliminar, o al menos reducir, el uso de productos comestibles y tierra agrícola en su obtención. Un ejemplo común son las algas fotosintéticas, las que usan principalmente CO_2 y luz solar para generar moléculas orgánicas útiles (Du et al., 2016). Ésto elimina el uso de suelos útiles y agua de riego, aumentando la efectividad en la eliminación de gases de efecto invernadero.

Cabe mencionar que ha medida que han avanzado estas generaciones, se ha requerido mayores niveles de innovación.

El uso de este tipo de combustibles tiene tanto ventajas como desventajas. Las ventajas de adoptar los biocombustibles como una alternativa a los combustibles fósiles son variadas y entre las principales se encuentran: son un recurso que puede ser considerado como renovable mientras se usen materias primas de crecimiento rápido y se respeten sus ciclos de crecimiento y cosecha; crean una mayor independencia energética, dado que se pueden buscar materias primas que se adecuen a distintas condiciones climáticas y de suelo; existe la posibilidad de que cada país desarrolle sus propias reservas energéticas; gracias a que existen similitudes entre el manejo de los combustibles fósiles y los biocombustibles, estos últimos se adaptan con mayor flexibilidad a la tecnología existente ([Salinas y Gasca, 2009](#)), lo que potencialmente significaría una implementación a gran escala de estos recursos mucho más rápida; y por último, el uso de biocombustibles significa una disminución en las emisiones de CO_2 , el cual es, en este momento, el principal contribuyente al aumento del efecto invernadero, ya que si bien existen emisiones al momento de la combustión, la producción de la materia prima usada para la elaboración de los biocombustibles absorbe el CO_2 durante su crecimiento, lo que conlleva a que las emisiones netas (gases que se emiten menos los gases que se absorben) de este gas tiendan a ser nulas, o al menos mucho menores a las que se generan cuando se hace uso de recursos energéticos fósiles, reduciendo considerablemente la contribución al aumento de su concentración en la atmósfera.

En cuanto a las desventajas, en su mayoría éstas dependen de la generación a la que pertenece cada biocombustible y en particular a la materia prima que se utiliza para su obtención. De forma general, los inconvenientes de la utilización de estos combustibles se dan por el uso de vegetales comestibles como materias primas, ya que se genera una competencia entre el mercado energético y el de alimentos, potencialmente aumentando la demanda del producto alimenticio utilizado para elaborar el biocombustible (por ejemplo, el maíz), lo que podría derivar en aumentos de los precios si no existe la capacidad para producir suficiente para cubrir la nueva demanda total. Otra desventaja del uso de

biocombustibles, muy relacionada a la primera, hace referencia al uso de materias primas vegetales en general: existe una mayor demanda de agua dulce para regadíos y tierras para cultivo, esto último pudiendo resultar en situaciones de deforestación realizadas con el fin de conseguir más suelos para sembradío. Además, se debe tener en cuenta que, si bien las emisiones de CO_2 que se producen como resultado de la combustión de los biocombustibles tienden a anularse mediante la captura de este mismo gas durante el crecimiento de las materias primas que se usan para la generación de dicho combustible, el proceso completo para la obtención de los insumos (plantación, fertilización, fumigación, transporte, etc.) tiene el potencial de liberar emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo dióxido de carbono. Por último, se tiene que los procesos de obtención de los biocombustibles siguen haciendo que estos recursos energéticos no sean económicamente competitivos, cuando se comparan con los combustibles fósiles.

2.5. Biocombustibles más utilizados

Dado que uno de los sectores que más aporta al nivel de emisiones es el de transporte, es aquí donde un mayor uso de biocombustibles existe. Entre los más comunes se encuentran el bioetanol y el biodiesel. El primero corresponde a un alcohol obtenido a través de la fermentación de azúcares, que puede ser usado por sí solo en motores a gasolina o como un aditivo, mientras que el biodiésel puede ser usado en motores diésel, por sí solo o en combinación con el diésel tradicional, y se obtiene a partir de grasas animales o aceites vegetales.

Por otra parte, en la industria de la aviación, los biocombustibles más comunes corresponden a: BIO-SPK, FT-SPK y ATJ-SPK.

- **BIO-SPK:** corresponde a queroseno parafínico sintético producido a partir de aceites vegetales como la jatropha y la camelina.
- **FT-SPK:** biocombustible para aviación que utiliza biomasa sólida, la cual es gasificada y luego atraviesa un proceso de Fischer–Tropsch para obtener hidrocarburos líquidos (Carvalho et al., 2019).

- **ATJ-SPK:** este tipo de combustible utiliza alcoholes para producir un biocombustible apto para aviones, especialmente etanol e isobutanol.

2.6. Biocombustibles en Chile

Al igual que en el resto del mundo, en Chile también se busca la implementación de fuentes energéticas alternativas que puedan reemplazar a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). En este escenario los biocombustibles resultan especialmente atractivos dado que existen distintos tipos de materia prima para su elaboración, algunas de las cuales ya se encuentran disponibles en el país o al menos se tiene el potencial para su producción.

Dado el atractivo de los biocombustibles es que, dentro del país, desde hace años se realizan proyectos con la finalidad de estudiar e implementar la producción y el uso de estos recursos energéticos de forma masiva. Las fuentes de biomasa más estudiadas, y que han visto mayores avances en Chile, se detallan a continuación.

2.6.1. Semillas de raps / Colza

Cultivo utilizado principalmente en la producción de alimento para animales (pienso), aceite vegetal usado para cocinar y como biodiesel ([García, 2016](#)).

Este material también suele conocerse como canola, siendo el nombre que recibe un cultivo particular de colza con bajos niveles de ácido erúico, lo que hace que sea un subcultivo propicio para ser consumido por humanos.

La colza es una planta anual, resistente a las sequías prolongadas, sensible a los anegamientos, capaz de soportar bajas temperaturas y adaptarse a distintos tipos de suelos ([Ganduglia et al., 2009](#)).

Su atractivo como materia prima para la producción de biocombustibles reside en su

capacidad de adaptación a diferentes climas y territorios, pero también el alto contenido de aceite en sus semillas ([Ganduglia et al., 2009](#)), lo cual es importante ya que la colza suele usarse para producir biodiesel de aceite vegetal, el que suele tener características similares al diésel obtenido del petróleo ([Castellar Ortega et al., 2014](#)). Además, se tiene que el combustible obtenido de la colza tiende a tener una calidad óptima, mejor desempeño en climas fríos (se convierte en gel a una menor temperatura) y tiene una menor propensión a la formación de ácidos corrosivos ([Ganduglia et al., 2009](#)).

Por otra parte, los problemas con utilizar la colza como fuente energética se dan porque aún existen problemas tecnológicos a superar para que el proceso sea económicamente factible y eficiente a gran escala; este tipo de cultivo tiene requerimientos relativamente altos, en especial necesitan de grandes cantidades de nitrógeno; esta materia prima suele ser cara en comparación a otros tipos de biomasa existente como el girasol o la soya, siendo estas últimas poco adecuadas para su uso en Chile y además, el uso de la colza genera competencia entre la industria energética y alimenticia, no sólo porque esta materia prima puede utilizarse con fines alimenticios, sino que utilizan suelo fértil y otros recursos que pueden dedicarse a cultivos comestibles ([Ganduglia et al., 2009](#)).

Chile ya cuenta con cultivos de colza/raps, siendo esta una de las razones por la que la universidad de la frontera, en colaboración con las empresas Molino Gorbea y Copec, se centraron en la producción de biodiesel a partir de esta biomasa, incluso construyendo una planta piloto con capacidad de 200 litros por día ([CONICYT, 2009](#)). Con el biocombustible obtenido se realizaron pruebas en una camioneta y un tractor, se mezcló el biodiesel con diésel de petróleo, consiguiéndose un rendimiento (kilómetros por litro) aproximadamente 4 % menor al observado con el combustible de petróleo puro, pero siendo la mezcla más amigable con el medio ambiente ([CONICYT, 2009](#)).

A pesar de los resultados prometedores, no se tiene información de un escalamiento de este proyecto para llevarlo a un nivel comercial, ni de nuevos proyectos que utilicen la colza como materia prima.

2.6.2. Aceite usado

En definitiva, son aceites vegetales, como el obtenido de la semilla de la colza, la soya o el girasol, pero que ya han sido utilizados, sobre todo en la preparación de alimentos. Estos aceites dejan de ser aptos para el consumo humano, dado que la exposición al calor por períodos significativos de tiempo aumenta el número de polímeros en el aceite, haciéndolo inapropiado para su consumo y transformándolo en un desecho, pero también convirtiéndolo en una buena opción como materia prima para biocombustibles.

El uso de aceites vegetales desechados para la obtención de biocombustibles tiene varias ventajas: es una materia prima con un costo considerablemente menor en comparación al resto de las opciones que se encuentran en estudio, lo que es de gran importancia debido a que una parte significativa de los costos totales de producción se deben a la obtención de la materia prima y los aceites usados son entre 2,5 y 3,5 veces más baratos que los aceites nuevos (Pinzi et al., 2013); el uso de éste material de desecho elimina el factor de competencia entre la industria energética y la alimenticia, ya que como se mencionó anteriormente, este aceite ya no es apto para el consumo humano, ni tampoco requiere de suelo fértil ni otros recursos extras para su obtención; existe una gran disponibilidad y abundancia, tanto a nivel mundial como en Chile, cada año se generan enormes cantidades de aceite usado, el que tiende a ser eliminado en vertederos o alcantarillas, produciendo contaminación o problemas en la red sanitaria, lo que significa que esta materia prima está constantemente disponible de forma cuantiosa y su uso elimina los problemas que genera su desecho; y por último, se tiene que el biodiesel obtenido a partir de aceites usados exhibe las mismas propiedades que el biodiesel obtenido de aceites nuevos.

Las desventajas de la utilización de este recurso se deben, principalmente, a la existencia de impurezas en el aceite provenientes del proceso de preparación de alimentos, lo que significa que se necesita un proceso extra de limpieza y que, además, no todo el aceite desechado tiene las mismas propiedades fisicoquímicas, dado que estas últimas dependen

del tipo de aceite y no todo el aceite usado en la preparación de alimentos corresponde a un solo tipo, por lo que la conversión a biocombustible podría verse afectada. Por otra parte, exponer el aceite al calor durante largos periodos de tiempo producen un aumento de ácidos grasos libres, lo que afecta a los procesos tradicionales de conversión, los cuales suelen utilizar catalizadores, los que pueden reaccionar con los ácidos grasos libres produciendo un proceso de saponificación, obteniéndose jabones y afectando el rendimiento de la reacción (Ganduglia et al., 2009).

En Chile, el desarrollo de este recurso como fuente energética ha logrado mayores avances que las semillas de raps/colza y esto se evidencia en que la empresa de transportes Pullman Bus construyó una planta que cuenta con la producción de 100 mil litros mensuales, la cual utiliza como materia prima principal el aceite usado para obtener biodiesel, el que es de uso exclusivo de la flota de buses y camiones de la empresa en una mezcla de 5 % biocombustible y 95 % diésel de petróleo (Cavieres, 2009). En conjunto a este proyecto existen otros de menor envergadura, como la Planta INGRAS, la que también emplea aceite usado como materia prima para la obtención de biodiesel (Cavieres, 2009).

Cabe señalar que, si bien parece ser que tanto esta materia prima como los proyectos relativos a ella son promisorios, a nivel nacional aún no existe una masificación de la producción y comercialización del biodiesel obtenido a partir de aceite vegetal usado.

2.6.3. Material Lignocelulósico

Materias primas compuestas por lignina, hemicelulosa y un alto contenido de celulosa, a partir de la cual es posible obtener biocombustible.

Las ventajas del uso de materia prima lignocelulósica para la obtención de biocombustibles son diversas, partiendo por el hecho de que existen numerosas fuentes desde donde puede ser obtenida:

- **Residuos y desechos agrícolas y agroindustriales:** sobrantes que quedan en el suelo luego de la cosecha de distintos cultivos, por ejemplo: la paja del trigo o el bagazo de la caña de azúcar (material restante luego de que se extrae el jugo de la caña de azúcar).
- **Residuos forestales primarios e industriales:** elementos que se generan por el manejo sustentable de bosques o como desechos de actividades forestales o de la industria de la madera; se incluyen todos los residuos leñosos como cortezas, hojas y tallos, además de desechos como virutas o aserrín.
- **Cultivos energéticos:** árboles de ciclo corto y hierbas perennes, los cuales crecen en plantaciones que se caracterizan por tener “alta densidad y espaciamiento relativamente cercano, con hasta 33.000 árboles por hectárea” ([Ganduglia et al., 2009](#)) y cuya única finalidad es ser utilizados como materia prima para biocombustibles dado que no son especies comestibles.

Asimismo, el uso de materia lignocelulósica no compite con la industria alimenticia, siendo que no son especies comestibles y los cultivos energéticos son capaces de crecer en suelos no adecuados para la producción de alimentos; en el caso de los residuos agrícolas y forestales, ambos cuentan con una gran disponibilidad y abundancia, y su conversión en biocombustibles es una buena forma de manejar estos desechos, ya que si no son utilizados los residuos agrícolas suelen ser quemados, contribuyendo a la contaminación ambiental y al cambio climático, y los residuos forestales tienden a quedar en el suelo de los bosques transformándose en un mayor riesgo de incendio. Por su parte, los cultivos energéticos dedicados también tienen el mérito de que pueden aumentar la diversidad del paisaje, actuar como hábitat para una amplia variedad de aves y proveer de un ciclo estable de nutrientes al suelo donde crecen.

En general, las desventajas más relevantes del uso de materia lignocelulósica hacen referencia a los impactos ambientales que puede tener una expansión a gran escala, por ejemplo, los cultivos energéticos potencialmente pueden utilizar suelos dedicados a cultivos comestibles cuando no existan más tierras marginales que usar, y aumentar la demanda

de recursos como agua para regadíos; inmadurez de las tecnologías necesarias para los procesos de cosecha/recolección y conversión a biocombustibles; y el nivel de inversión inicial que se requiere para poner en marcha proyectos de esta índole. De manera más específica, las distintas fuentes desde donde se puede obtener este tipo de materia prima tienen sus propios aspectos negativos, en el caso de los residuos agrícolas y forestales una remoción significativa de estos desechos contribuye a la erosión del suelo y significa una pérdida de nutrientes y fertilidad, ya que los residuos juegan un rol importante en el reciclado de nutrientes. Además, en el caso de los restos forestales pueden usarse en otras industrias generando competencia. En cuanto a los cultivos energéticos, uno de los problemas más importantes se da porque muchas de las especies de árboles y hierbas que se plantan son consideradas especies invasoras.

En Chile ha existido un gran interés en el desarrollo de esta materia prima como recurso energético, destacando dos grandes proyectos:

- **BIOCOMSA:** consorcio formado por ENAP refineras S.A., la Universidad de Chile y Consorcio Maderero S.A. Este proyecto se centra en “desarrollar tecnologías para la producción sustentable de biomasa en plantaciones forestales orientadas a la producción de biocombustible y el aprovechamiento de subproductos” ([BIOCOMSA, 2015](#)). En resumen, este consorcio se dedicó a estudiar de forma teórica la producción de biomasa lignocelulósica en el país y las formas de conversión para obtener biocombustibles a partir de dicha materia prima.
- **Bioenercel:** al igual que BIOCOTSA, Bioenercel es un consorcio tecnológico, compuesto por las empresas CMPC Celulosa S.A., Masisa S.A., y Celulosa Arauco y Constitución S.A. en conjunto con la Universidad Católica de Valparaíso, Fundación Chile y la Universidad de Concepción ([Bioenercel, 2014](#)). El objetivo principal de este proyecto es desarrollar, captar y adoptar tecnologías, y formar capacidades humanas que permitan la implementación de biocombustibles lignocelulósicos, llegando a establecer infraestructura para su comercialización ([Bioenercel, 2014](#)).

Este proyecto se dedicó a estudiar la disponibilidad de materia prima lignocelulósica, modelar y optimizar los procesos de conversión, similar a la hecho por BIOCOMSA, La gran diferencia entre estos dos proyectos, BIOCOMSA y Bioenercel, es que este último designó como uno de sus subproyectos poner en práctica los resultados de sus investigaciones mediante el diseño y la construcción de una planta piloto, ubicada en la Universidad de Concepción, con capacidad para procesar hasta 14 kilogramos de aserrín o astillas. Esta planta busca convertir madera en bioetanol, consiguiendo un rendimiento del proceso completo de 73 %, lo que equivale a 232 litros de etanol por tonelada de madera ([Bioenercel, 2014](#)).

Sin embargo, pese a los avances hechos por proyectos como los consorcios tecnológicos antes mencionados, no se observa aún una masificación del biocombustible de materia lignocelulósica, ni de nuevos proyectos que busquen seguir avanzando a partir de los resultados ya obtenidos.

2.7. Llama axisimétrica de difusión laminar

Se habla de una llama de difusión cuando se tiene el combustible y el oxígeno que generan dicha llama no han sido mezclados con anterioridad, sino que llegan por separado a la zona donde, si la temperatura lo permite, comenzara el proceso de combustión. Una llama de difusión puede ser laminar o turbulenta, dependiendo de la velocidad con la que se inyecta el combustible, si el número de Reynolds de la llama resulta lo suficientemente pequeño esta será considerada como una llama de difusión laminar ([Cepeda, 2018](#)), de lo contrario se tiene una llama de difusión turbulenta.

Por otra parte, la llama se considera axisimétrica cuando existe simetría respecto al eje, lo que permite mayor facilidad a la hora de realizar mediciones experimentales y modelos numéricos en solo dos dimensiones debido a la simetría axial ([Jerez, 2017](#)).

2.8. Hollín

Un aspecto producto de la combustión que hay que tener en cuenta, incluso cuando se utilizan biocombustibles, es la producción de hollín.

Se asume que la formación de hollín empieza con la aparición de un primer grupo de hidrocarburos poliaromáticos (PAHs por sus siglas en inglés), este grupo crece y pasa por un proceso de nucleación para formar partículas orgánicas de carbón de nivel nanoscópico, también conocidas como partículas de hollín nacientes. Estas últimas crecen, y dado que pasan más tiempo en la región de mayor temperatura de la llama, pierden hidrógeno y se vuelven más carbonizadas, pasando a conocerse como partículas de hollín maduro. Finalmente, las partículas de hollín pierden masa y tamaño durante el proceso de oxidación y fragmentación ([Kholghy et al., 2016](#)).

Entre las razones que existen para el estudio de la producción de hollín, se encuentra el hecho de que puede afectar de forma negativa tanto a la salud de las personas, como al medio ambiente. En cuanto al aspecto de la salud, se tiene que existe relación entre la exposición a este tipo de partículas y problemas pulmonares y cardiovasculares ([Lippmann, 2014](#)). Por otra parte, también existe evidencia de que las emisiones de hollín pueden aportar a una mala calidad del aire, e incluso, contribuir a serios cambios climáticos, como la cantidad de radiación solar que llega a la tierra, la temperatura de la atmósfera y el derretimiento de hielos ([Highwood y Kinnersley, 2006](#)).

2.9. Análisis de combustible sustituto (surrogate)

Para certificar que un combustible —ya sea derivado del petróleo, de fuentes energéticas alternativas o una mezcla de ambos— es adecuado para el uso en determinados aparatos de conversión de energía (como motores) es necesario tener un buen entendimiento de sus características físicas y químicas, información que también es indispensable para seguir desarrollando combustibles y motores, nuevos o ya existentes, mejorando su eficiencia. En

otras palabras, un entendimiento profundo de las características físicas y químicas de un combustible y como éstas afectan al proceso de combustión es de suma importancia, ya sea para certificar un combustible como apto (fit-for-use); desarrollar nuevos combustibles, como los biocombustibles; establecer mezclas óptimas de combustibles de petróleo y biocombustibles o para mejorar la eficiencia de motores existentes.

Con la finalidad de obtener esta información es que se han creado diversos experimentos, teniendo éstos la desventaja de que se llevan a cabo en ambientes bien controlados, bajo condiciones de operación específicas y utilizando combustibles obtenidos de forma local, siendo éste último relevante, dado que las características de un combustible pueden cambiar dependiendo de la región, país y proveedor que lo origina, lo que puede afectar el resultado de la toma de datos. Es por esta razón que una herramienta de gran utilidad son las simulaciones computacionales, hechas a partir de un modelo que represente el combustible de interés.

Una de las dificultades más relevantes que se exteriorizan en la utilización de simulaciones computacionales es que la representación de un combustible real, con la capacidad computacional existente hoy en día, no es posible. Dado que los combustibles reales están formados por cientos de compuestos, el modelo que lo simule se volverá inabordable debido a la dimensionalidad del problema. Es por esta razón que se hace uso de un análisis de combustible sustituto (surrogate), el que conlleva el desarrollo de un nuevo combustible que sea considerablemente más simple y que replique un set acotado de las características del combustible real de interés.

Un surrogate se define como un combustible formado por un pequeño número de compuestos puros, cuyo comportamiento replica ciertas características de un combustible objetivo o target fuel que contiene muchos componentes (Pitz y Mueller, 2011). También siendo útil este análisis para eliminar potenciales desviaciones en los resultados, provenientes de variaciones que puedan existir en los combustibles comerciales, un surrogate es una mezcla específica de compuestos puros que es factible de replicar en cualquier parte de

forma consistente.

La formación de un surrogate es un proceso largo, pues no sólo se debe elegir cuidadosamente el set de propiedades objetivo que se desean replicar con el nuevo combustible, sino que también se deben seleccionar los componentes que serán parte del combustible sustituto y su concentración. Además, el modelo que caracterice al combustible real debe ser validado mediante comparaciones con datos experimentales del combustible y del surrogate seleccionado.

A lo largo de la historia del análisis de combustibles sustitutos se han producido mezclas de diversa complejidad, partiendo por combinaciones relativamente simples, como por ejemplo el surrogate PRF (Primary Reference Fuel), formado sólo por dos compuestos (n-heptano e iso-octano), el cual busca replicar las características de autoignición y knocking de gasolinas, es decir, busca reproducir el RON de combustibles de gasolina reales; y el sustituto TPRF, el que busca replicar tanto el RON como el MON, cuya composición lleva n-heptano, iso-octano y tolueno. Luego, se ha evolucionado a surrogates multicomponentes, los que se forman por una mayor cantidad de componentes que las mezclas antes mencionadas, lo que permite que el sustituto formulado replique un set más grande de características objetivo, logrando una mejor similitud entre el surrogate y el combustible real, pero también aumentando la complejidad del modelo.

2.10. Análisis cienciométrico:

Se puede definir la ciencimetría como la medición y el análisis cuantitativo de la producción científica, especialmente de artículos, para indagar las tendencias y el desarrollo de tales investigaciones ([Cardona-Román y Sánchez-Torres, 2017](#)). En otras palabras, a través de este tipo de análisis de la documentación existente sobre un tema en particular, es posible descubrir las características y la evolución de un campo de estudio dado.

Una herramienta útil para este tipo de análisis, son los mapas bibliográficos, los cuales permiten visualizar la relación de co-ocurrencia de palabras claves, información sobre los autores, información sobre citas o información bibliográfica.

Para la generación de este tipo de mapas es posible utilizar el software VOSviewer, el que permite cargar una base de datos obtenida previamente y seleccionar un criterio bajo el cual se generará el gráfico, éstos pueden ser co-autoría, co-ocurrencia, citas, información bibliográfica y co-citaciones.

Si bien los mapas resultantes son diferentes, éstos están compuestos por los mismos elementos. Se tienen los ítems, los que corresponden a los términos relevantes, como por ejemplo, palabras claves o autores, cada uno de ellos está representados por nodos, cuyo tamaño depende de que tanto se repite cada uno.

Estos nodos se agrupan en clusters de distintos colores, es decir, en distintos grupos, donde cada ítem puede pertenecer a sólo un cluster ([Van Eck y Waltman, 2017](#)). Además, cada uno de los nodos se encuentra unido a otros mediante links (líneas), pudiendo existir múltiples links para cada nodo, los cuales cuentan con un peso propio (total link strength), que si bien no se ve de forma obvia en el mapa resultante, representa que con que tanta “fuerza” se unen dos términos. Todos estos elementos se pueden observar en la Figura 2.1, que representa un ejemplo de un mapa bibliográfico.

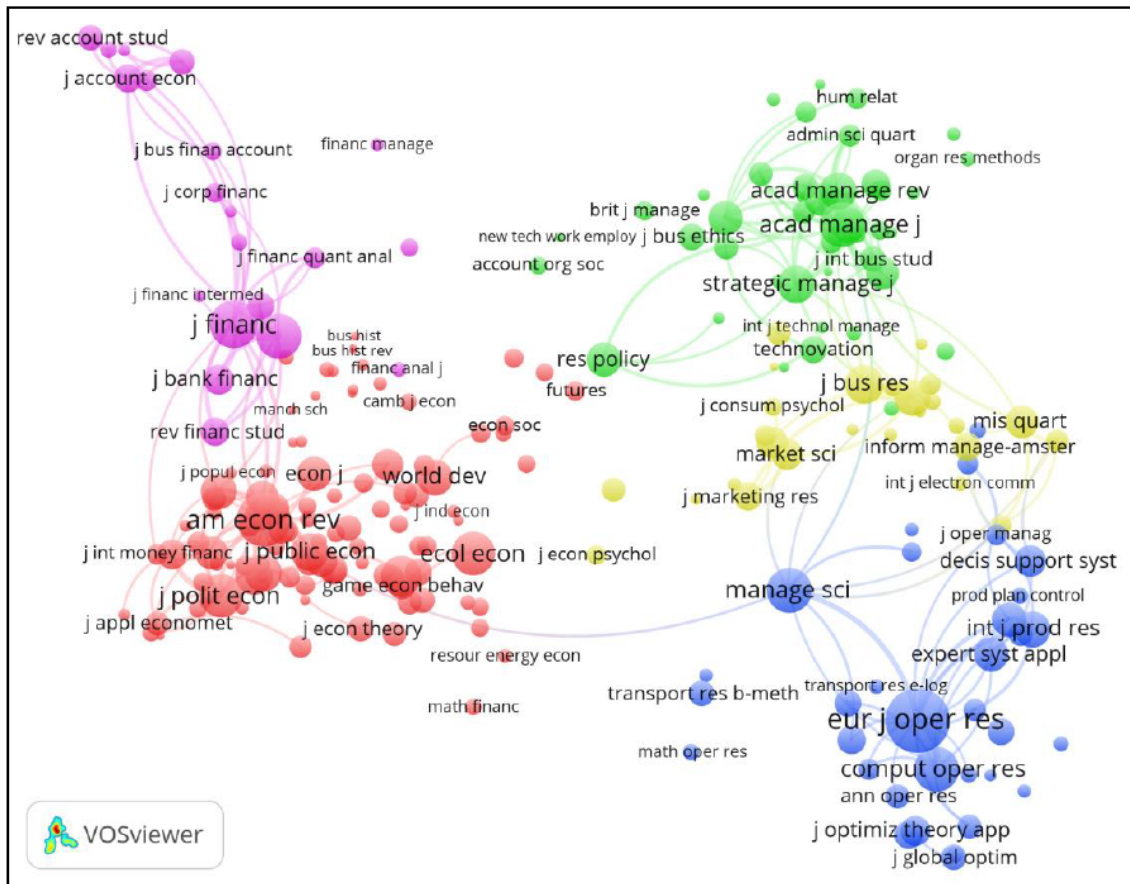


Figura 2.1: Ejemplo mapa bibliográfico

(Fuente: [Van Eck y Waltman \(2017\)](#))

3 | Desarrollo

3.1. Metodología

Para poder llevar a cabo el estudio cuantitativo sobre las mediciones de hollín en llamas de difusión axisimétricas laminares para biocombustibles sustitutos, es necesario tener una base de datos que reúna información como: títulos, autores, año de publicación, palabras claves, entre otras. Siendo las palabras claves o “keywords” uno de los campos más importantes para el análisis que se desea realizar, ya que éstas definen los términos más relevantes en una publicación, es menester asegurarse de que no exista el problema de que una palabra clave no sea considerada igual a otra, no porque no sean el mismo concepto, sino porque están escritas de formas levemente diferentes, lo que significa que una vez obtenida la base de datos, ésta debe “refinarse” o “limpiarse” para evitar este problema, permitiendo que el análisis efectuado sea preciso y refleje la realmente el paisaje de la producción científica.

3.1.1. Obtención base de datos

La base de datos utilizada en este trabajo se consiguió haciendo uso de Scopus, página web que se encarga de recopilar la información bibliográfica de citas y resúmenes (abstracts) de artículos científicos. En específico, se realizó una búsqueda que incluyera los términos soot (hollín), surrogate, axisymmetric (axisimétrica), laminar diffusion flame (llama de difusión laminar), y al menos, uno de los siguientes conceptos: biofuel, biodiesel, bioetanol, jet biofuel, BIO-SPK, FT-SPK, ATJ-SPK, HEFA, SPK o alternative fuel; esto con

tal de asegurar que se considerarán todos los trabajos que hicieran referencia a mediciones de hollín en llamas axisimétricas de difusión laminar en combustibles sustitutos, pero que tomará en cuenta sólo aquellos documentos que declarasen específicamente que se trabaja con biocombustibles en general o con algunos de los biocombustibles más usados en motores de transporte, es decir, motores a gasolina, diésel o de aviones.

Una vez que se tienen los artículos que cumplan con los criterios descritos se obtiene toda la información que Scopus ofrece referente a citas, bibliografía y palabras claves, para su posterior análisis.

3.1.2. Refinamiento de la base de datos

Como ya se mencionó anteriormente, una parte importante del análisis que se desea llevar a cabo requiere el uso de las palabras claves en cada uno de los trabajos referente al tema de estudio. El problema que se tiene con esto es que no existe una forma estándar de escribir estas palabras claves o keywords. Así ocurre con frecuencia que exista por ejemplo, el término biofuel y bio-fuel o surrogate y Surrogate, los que si bien se refieren a lo mismo, los softwares utilizados para realizar los análisis los consideran como términos diferentes que deben ser agrupados por separado. Esto toma importancia cuando se busca construir un mapa bibliográfico de co-ocurrencias, ya que con esto se pretende encontrar cuáles son los términos que más se mencionan y como éstos se relacionan con otros, por lo que al tener dos categorías diferentes que toman el mismo concepto, los resultados se ven afectados. De esa forma, un término que puede ser de gran importancia en los trabajos estudiados puede convertirse en algo de menor relevancia.

Para evitar tener este problema es que la base de datos descargada desde Scopus se “limpia” mediante OpenRefine, una herramienta que sirve para darle mayor orden y homogeneidad a la información, y en esta situación en particular se usa para juntar términos, que haciendo referencia a lo mismo, se categorizan de forma separada, lo que permite un mejor uso y análisis de los datos obtenidos.

3.1.3. Análisis

Ya obtenida una base de datos completa y “limpia” se procede a analizar la información mediante dos softwares: VOSviewer y Microsoft Excel.

A través de VOSviewer se construirá un mapa bibliométrico, el que tendrá como finalidad realizar un análisis de co-ocurrencia de palabras claves, lo que significa que el software buscará dentro de la base de datos todas las palabras claves que correspondan a cada uno de los trabajos encontrados en el tema y agrupará todas las que sean iguales, generando los nodos correspondientes. Además, evidenciará la forma en que las palabras claves se relacionan, mostrando los enlaces que tiene cada nodo con los demás y que tan fuertes son estas relaciones.

Además, haciendo uso de Microsoft Excel se estudiarán datos relevantes para conocer en más detalles la producción científica que existe sobre la medición de hollín en llamas axisimétricas de difusión laminar para biocombustibles sustitutos. Dichos datos corresponden a factores como la cantidad de trabajos sobre el tema a lo largo de los años, la cantidad de citas que se han hecho sobre estos trabajos, cuáles son los principales medios en los que se publican estos trabajos, entre otras.

3.2. Resultados

3.2.1. Análisis bibliográfico

Comenzando con las búsquedas hechas, se tiene que al integrar todos los términos de interés descritos anteriormente no existen documentos que coincidan, es decir, no hay documentos que tengan todos los términos en alguna parte del título, resumen o palabras claves. Es por esto por lo que se realizaron una serie de diferentes búsquedas, modificando

los términos utilizados, pero siempre manteniendo lo esencial del tema investigado, que en este caso sería la medición de emisiones de hollín para biocombustibles sustitutos.

En total se realizaron 12 búsquedas diferentes, de las cuales 6 arrojaron resultados. Dado que 2 de ellas consideraban los mismos documentos, se considera que existen 5 set diferentes de resultados a analizar. Estas búsquedas se hicieron eligiendo los términos que podrían cambiarse o eliminarse sin afectar demasiado lo que se desea investigar, de esta forma se eligieron los términos “axisimétrica” y “llama de difusión laminar” para eliminarse o modificarse.

Se tiene que se obtienen documentos cuando se elimina el término axisimétrico, y se utiliza uno de los siguientes: “laminar diffusion flame”, “diffusion flame”, “laminar flame” o “laminar”. Y, además, cuando se elimina .axisimétricoz cualquiera de las variación de “laminar diffusion flame” que se acaban de describir. En la Figura 3.1 se puede observar como cambia la cantidad de resultados que se obtienen al modificar los términos de búsqueda.

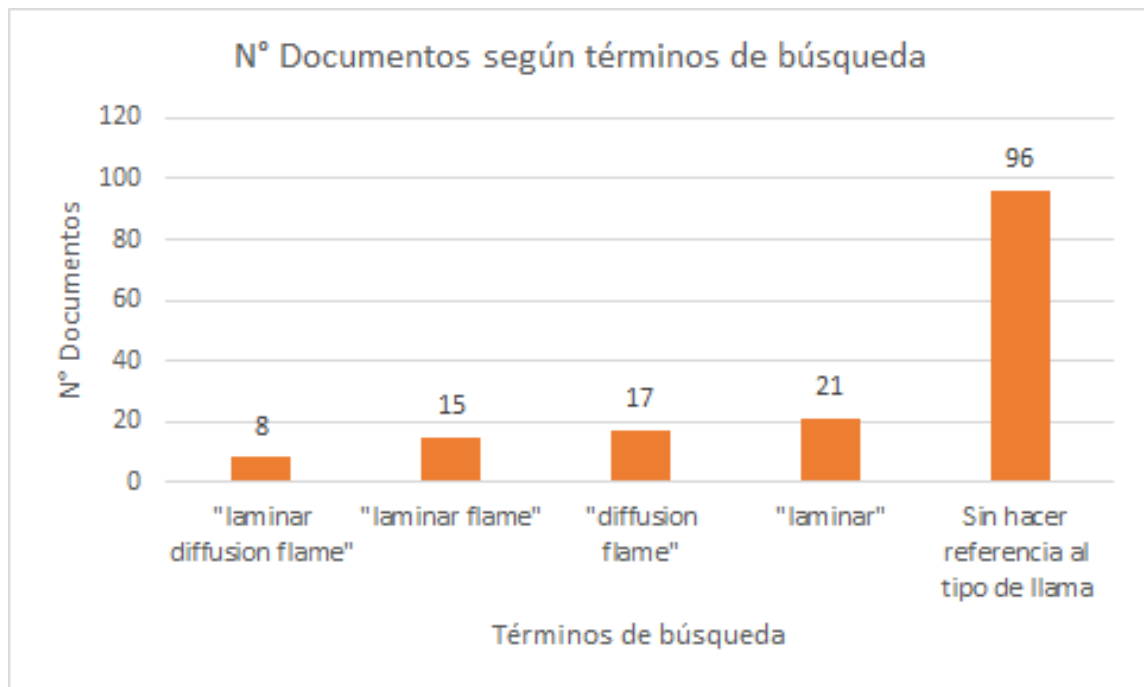


Figura 3.1: Variación cantidad de resultados
(Fuente: Elaboración propia)

El gráfico anterior (Figura 3.1) también sirve para demostrar que cantidad de resultados que se pueden obtener depende mucho de que tan específicos sean los términos utilizados.

3.2.1.1. Búsqueda 1: “laminar diffusion flame”

La primera búsqueda en arrojar resultados se compone de la siguiente manera:

TITLE-ABS-KEY(soot AND (laminar AND diffusion AND flame) AND surrogate AND (biofuel OR bio-fuel OR biodiesel OR bioethanol OR bio-diesel OR bio-ethanol OR (jet AND biofuel) OR (jet AND bio-fuel) OR bio-spk OR ft-spk OR atj-spk OR atj OR hefa OR spk OR (alternative AND fuel)))

Aquí se establece que se quiere encontrar todos los trabajos que en su título, resumen o entre sus palabras claves (TITLE-ABS-KEY) se refieran a las mediciones de hollín en llamas de difusión laminar para sustitutos de algún biocombustible.

Haciendo un análisis de co-ocurrencia de las palabras claves de cada uno de los 8 documentos resultantes, se obtiene el mapa bibliográfico que se observa en la Figura 3.2.

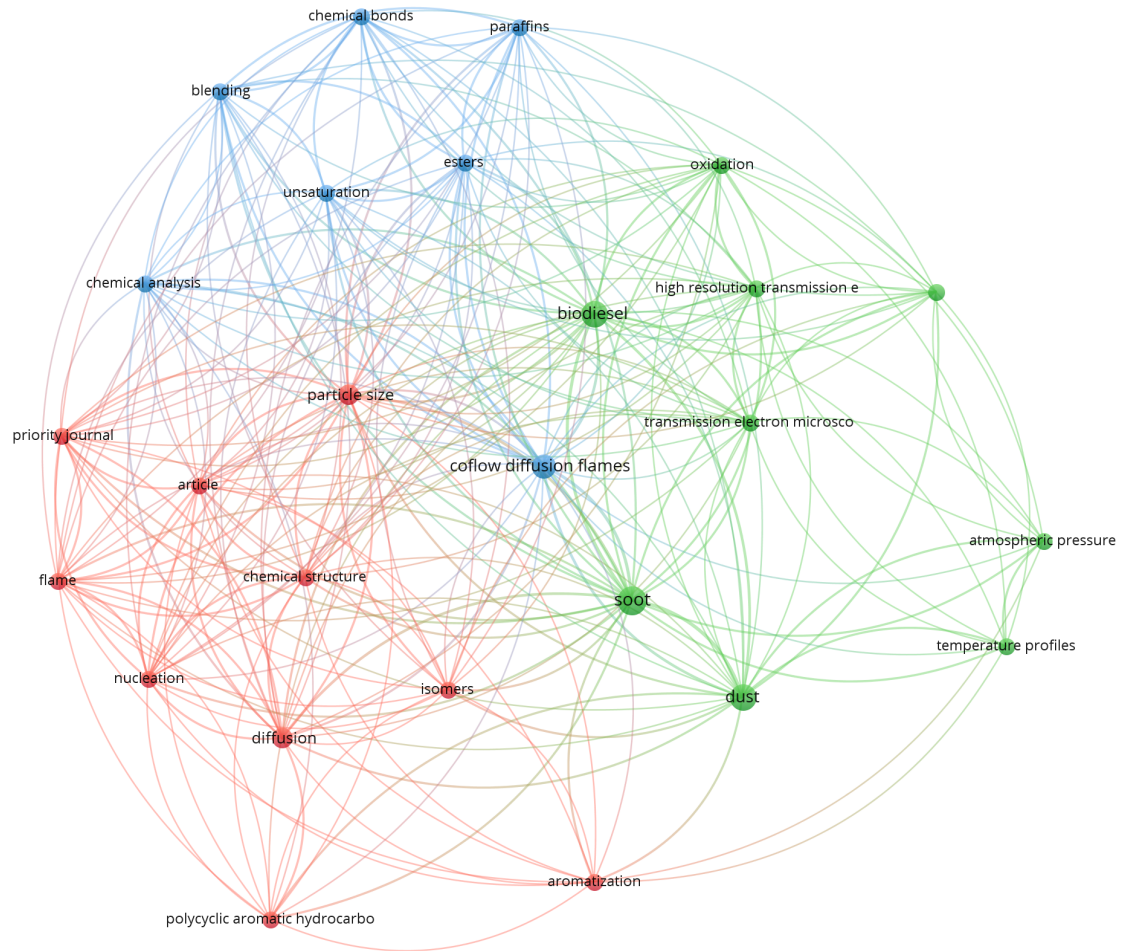


Figura 3.2: Mapa bibliográfico búsqueda 1

(Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)

Del total de 143 palabras claves, el mapa bibliográfico muestra 29 luego de que se restringiera a que aparecieran solo aquellas que son mencionadas a lo menos dos veces.

Se tiene que el termino mas utilizado el hollín, seguido de cerca por biodiesel. A estos se le suman polvo, llama de difusión en co-flujo y tamaño de partículas en tercer, cuarto y quinto lugar respectivamente. Además, se puede ver que estas palabras claves se encuentran cercanas las unas a las otras, mostrando que existe una relación importante entre estos términos.



Figura 3.3: Número publicaciones y número citas por año búsqueda 1
(Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, cuando se estudian las tendencias temporales se nota que los 8 documentos fueron publicados en un periodo de 8 años, sin existir ninguna tendencia marcada ni en el número publicaciones ni en el número de veces que se ha citado alguno de estos documentos. Como se observa en la Figura 3.3, existen años en el existe un aumento en las publicaciones o citas referente al tema, pero este no se mantiene por un periodo mas largo, por ejemplo, el año 2014 muestra un aumento en las veces que se cita un trabajo que hace referencia a la medición de hollín en llamas de difusión laminar para sustitutos de biocombustibles, pero en el año siguiente hay una importante disminución. Un ejemplo similar se puede notar en lo que respecta al número de publicaciones sobre el tema, en 2017 hay un aumento que en 2018 no se reproduce.

Cuando se consideran los autores de estos trabajos, se observa que la mayoría de los documentos fueron publicados por la misma persona (Figura 3.4), lo que se repite cuando se analiza el número de citas que corresponden a cada uno de los autores (Tabla 3.1).



Figura 3.4: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 1
(Fuente: Elaboración propia)

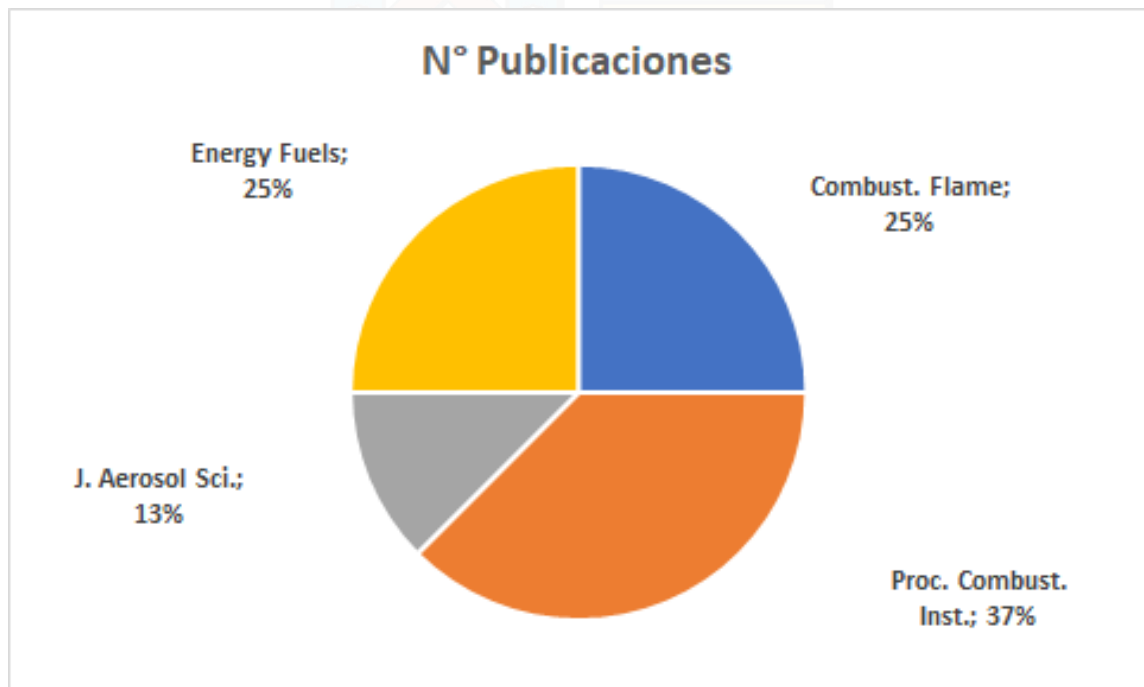
Tabla 3.1: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 1

Autor Principal	Nº Publicaciones	Nº Citas
Thomson, M.J.	5	162
Zhu, L.	2	14
Lapueta, M.	1	12

Otro factor que analizar resulta ser el medio por el cual fueron publicados los trabajos encontrados, si bien todos son artículos científicos que aparecen en revistas (journals), estas son diversas. Cuando se observa el número de publicaciones se puede notar que los 8 documentos fueron repartidos en 4 journals diferentes, como se aprecia en la Tabla 3.2, concentrándose el mayor porcentaje de artículos (37 %) en el medio “Proceedings of the Combustion Institute”.

Tabla 3.2: Número de publicaciones por revista búsqueda 1

Journal	N° Publicaciones
Proceedings of the Combustion Institute	3
Combustion and Flame	2
Energy and Fuels	2
Journal of Aerosol Science	1

**Figura 3.5:** Número de publicaciones por revista búsqueda 1

(Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, aunque “Proceedings of the Combustion Institute” es el medio que mas publicaciones sobre el tema concentra, es la revista “Combustion and Flame” es la que suma el mayor número de citas (Figura 3.6), contando por más del 40 % del total de veces que han sido citados los documentos encontrados.

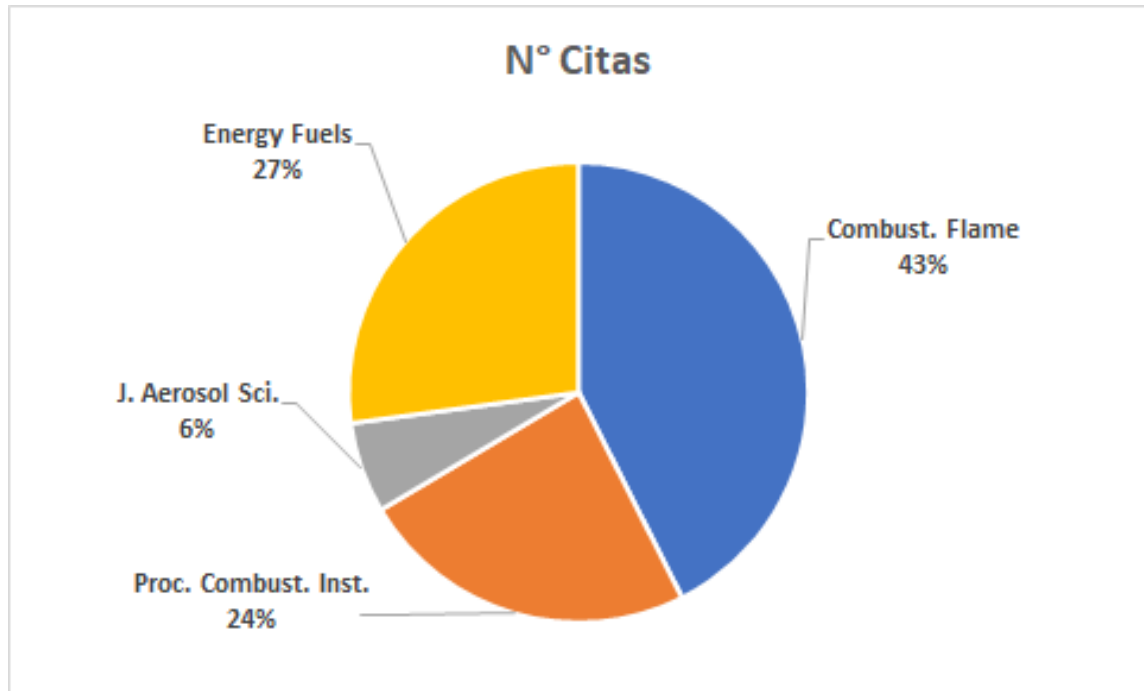


Figura 3.6: Número de citas por revista búsqueda 1
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.1.2. Búsqueda 2: “diffusion flame”

La segunda búsqueda realizada se compone de la forma:

TITLE-ABS-KEY(soot AND (diffusion AND flame) AND surrogate AND (biofuel OR bio-fuel OR biodiesel OR bioethanol OR bio-diesel OR bio-ethanol OR (jet AND biofuel) OR (jet AND bio-fuel) OR bio-spk OR ft-spk OR atj-spk OR atj OR hefa OR spk OR (alternative AND fuel)))

Al igual que en el resto de las búsquedas de las que se obtienen resultados, aquí también se elimina el termino axisimétrico y a diferencia de la primera no se utiliza el término “llama de difusión laminar” sino que se cambió por “llama de difusión”, lo que permite considerar toda llama de difusión sin importar si es laminar o turbulenta. De esta forma se obtiene un total de 17 trabajos que hacen referencia a la medición de hollín en llamas de difusión par sustitutos de biocombustibles.

Estudiando la co-ocurrencia de palabras claves a través de VOSviewer se obtiene que los 5 términos más utilizados son hollín, polvo, biodiesel, difusión y parafinas, en ese orden. Esto se puede observar en el mapa bibliográfico correspondiente (Figura 3.7) donde los nodos más grandes corresponden a las tres palabras claves con mayor ocurrencia.

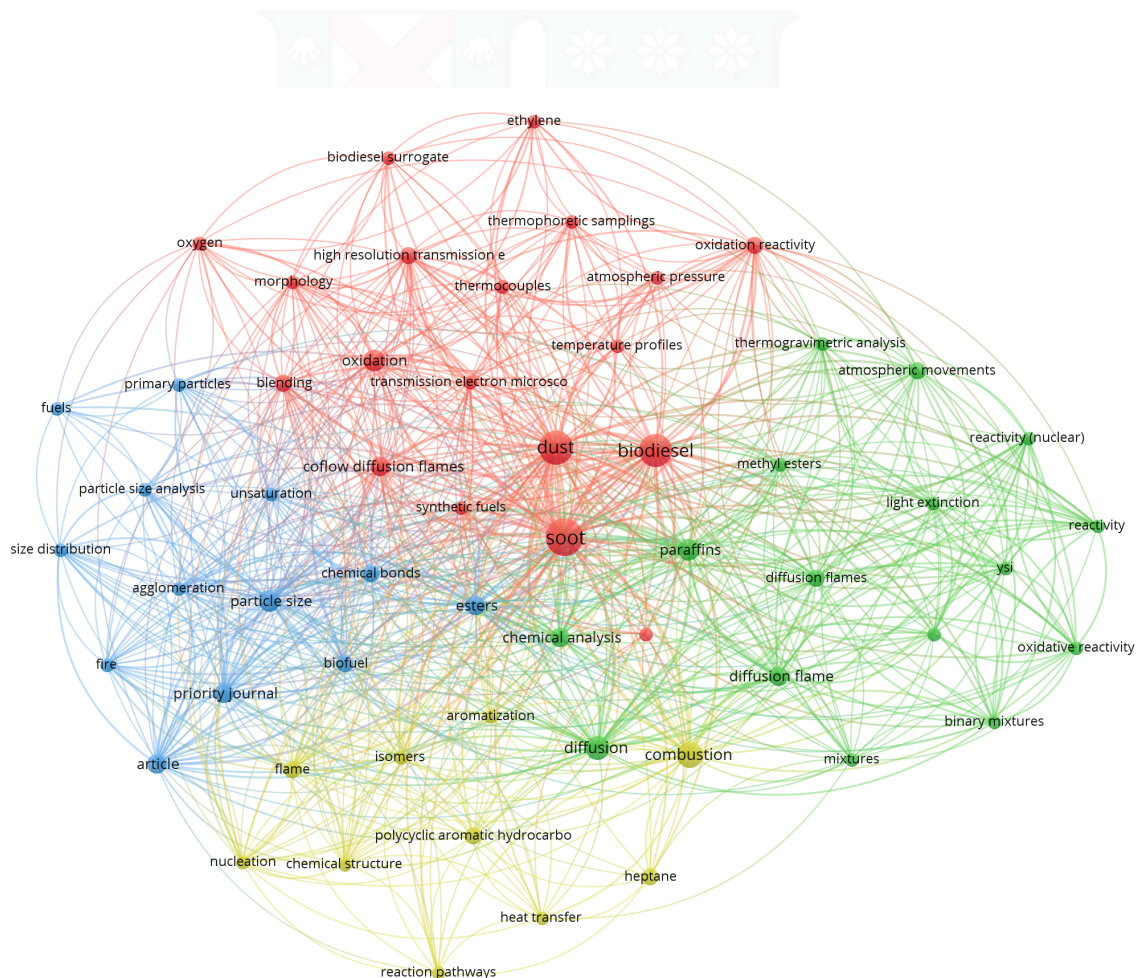


Figura 3.7: Mapa bibliográfico búsqueda 2
(Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)

Otra vez se observa las palabras claves con mayor ocurrencia se encuentran cercanas las unas a las otras. Además, se tiene que los términos principales son los que cuentan con la mayor cantidad de enlaces, y la mayor fuerza total de enlaces (Total Link Strength).

Si bien en este escenario existen trabajos publicados desde 1997 hasta 2020, no existe una tendencia positiva que indique un aumento sostenido de las publicaciones que traten

de este tema (Figura 3.8), lo mismo ocurre con el número de citas hechas a lo largo de los años, no siendo visible ni siquiera algún tipo de relación entre el número de publicaciones y el número de citas hechas en un año cualquiera.



Figura 3.8: Número publicaciones y número citas por año búsqueda 2
(Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, existe un aumento la cantidad de autores diferentes que publican sobre el tema, siguen siendo pocos los que tienen más de una publicación. Por otra parte, el número de citas hechas sobre alguno de los documentos sigue concentrándose en un autor (Figura 3.9), superando por mucho al segundo autor más citado (Tabla 3.3).

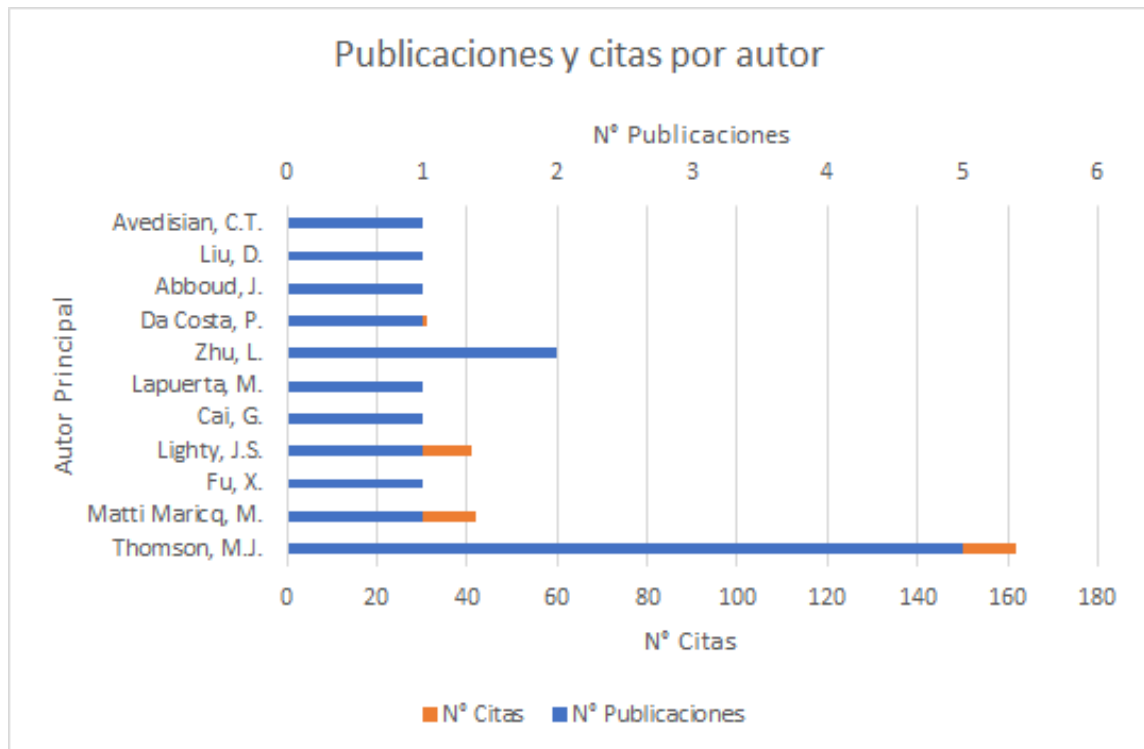


Figura 3.9: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 2
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3.3: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 2

Autor Principal	Nº Publicaciones	Nº Citas
Thomson, M.J.	5	162
Matti Maricq, M.	1	42
Lighty, J.S.	1	41
Da Costa, P.	1	31
Zhu, L.	2	14
Abboud, J.	1	13
Lapuerta, M.	1	12
Cai, G.	1	5
Liu, D.	1	1
Fu, X.	1	0
Avedisian, C.T.	1	0

Cuando se analizan las revistas en las que fueron publicados estos artículos, se tiene que los 17 trabajos encontrados se dividen en 10 revistas diferentes (Tabla 3.4). Cabe destacar que la mayor parte de los artículos fueron publicados en 4 de las 10 revistas, en específico se tiene que el 65 % de los trabajos resultantes de la búsqueda se concentran en 4 medios

de publicación, y de estos el principal es “Combustion and Flame” como se puede ver en la Figura 3.10.

Tabla 3.4: Número de publicaciones por revista búsqueda 2

Journal	Nº Publicaciones
Combustion and Flame	4
Proceedings of the Combustion Institute	3
Energy and Fuels	2
Fuel	2
Proceedings of the ASME Turbo Expo	1
AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horiz. Forum Aerosp. Expo.	1
Chemical Engineering Science	1
Journal of Aerosol Science	1
Fuel Processing Technology	1
Combustion Theory and Modelling	1

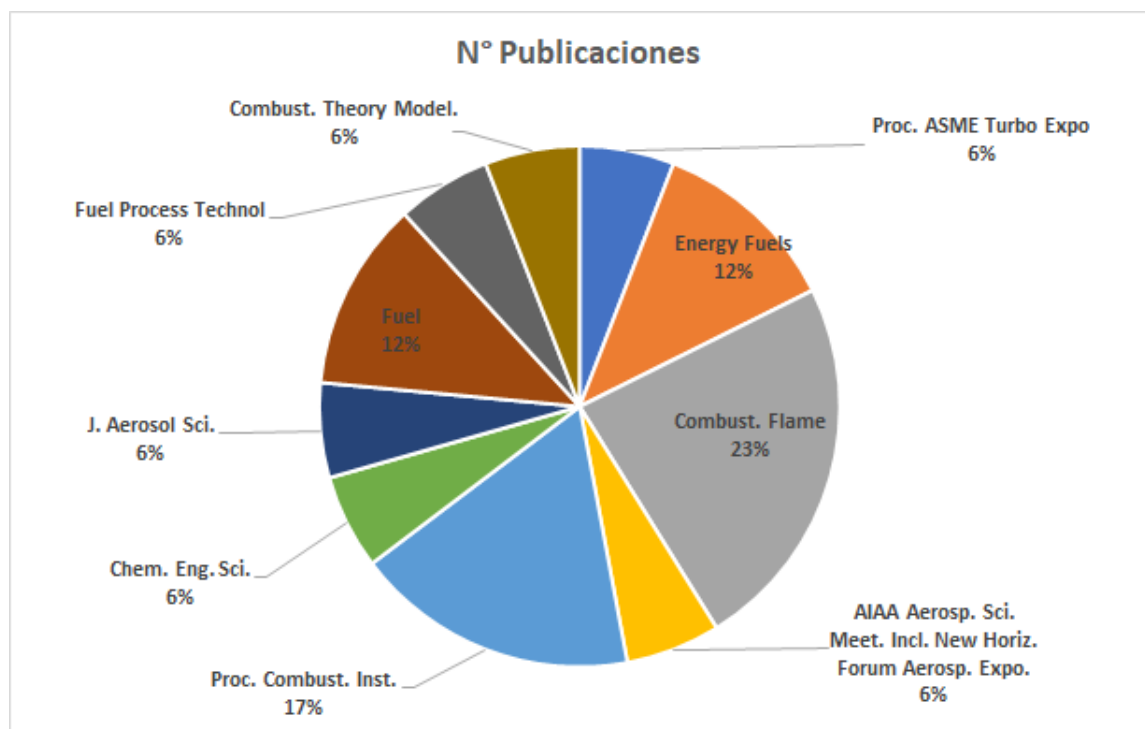


Figura 3.10: Número de publicaciones por revista búsqueda 2
(Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la cantidad de citas que acumula cada una de las revistas científicas, “Combustion and Flame” concentra el 50 % de las citas hechas sobre estos trabajos. Mientras que las mismas 4 revistas con mayores publicaciones mencionadas con anterioridad acumulan el 93 % de las citas, como puede verse en la Figura 3.11.

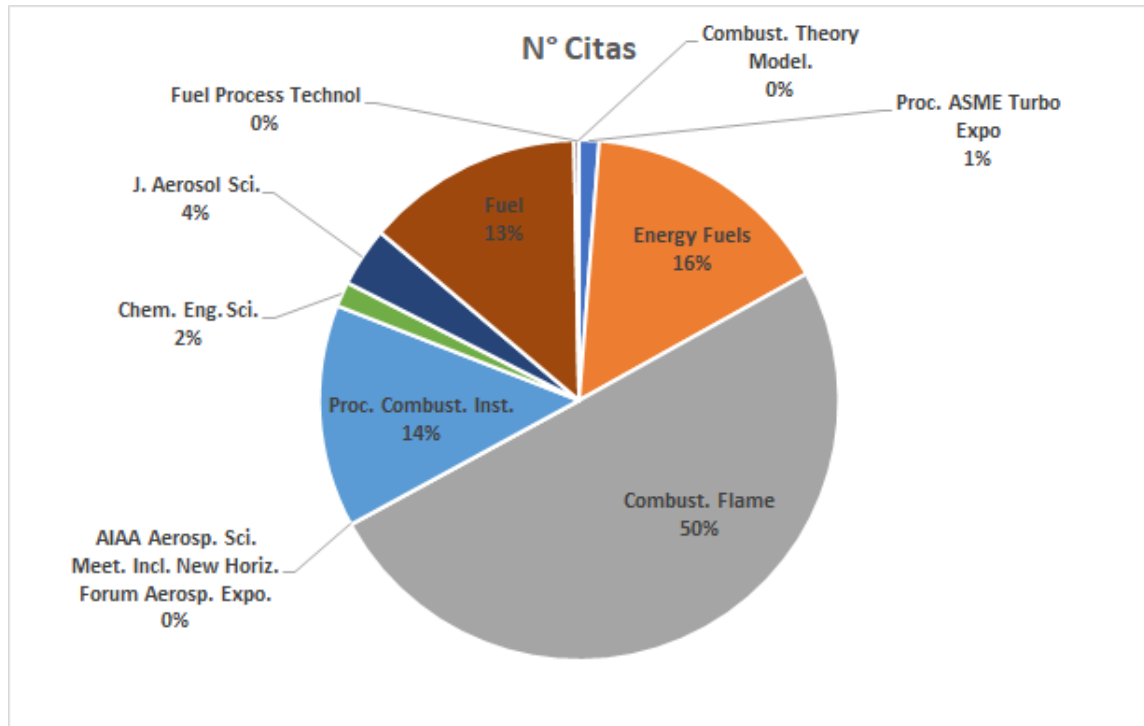


Figura 3.11: Número de citas por revista búsqueda 2
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.1.3. Búsqueda 3: “laminar flame”

Para realizar una nueva búsqueda otra vez se eliminó axisimétrico y se volvió a modificar el término que hace referencia al tipo de llama; en esta ocasión, se buscó que los artículos resultantes mencionen, ya sea en su título, resumen o palabras claves, llamas laminares. Es por esto que la búsqueda quedó de la siguiente forma:

TITLE-ABS-KEY(soot AND (laminar AND flame) AND surrogate AND (biofuel OR bio-fuel OR biodiesel OR bioethanol OR bio-diesel OR bio-ethanol OR (jet AND biofuel) OR (jet AND bio-fuel) OR bio-spk OR ft-spk OR atj-spk OR atj OR hefa OR spk OR (alternative AND fuel)))

Así, se obtuvieron 15 resultados, cuyos principales términos son hollín, biodiesel, polvo, combustión y llama de difusión en co-flujo, cosa que se aprecie en el mapa bibliográfico de la Figura 3.12, dado estos términos corresponden a los nodos de mayor tamaño.

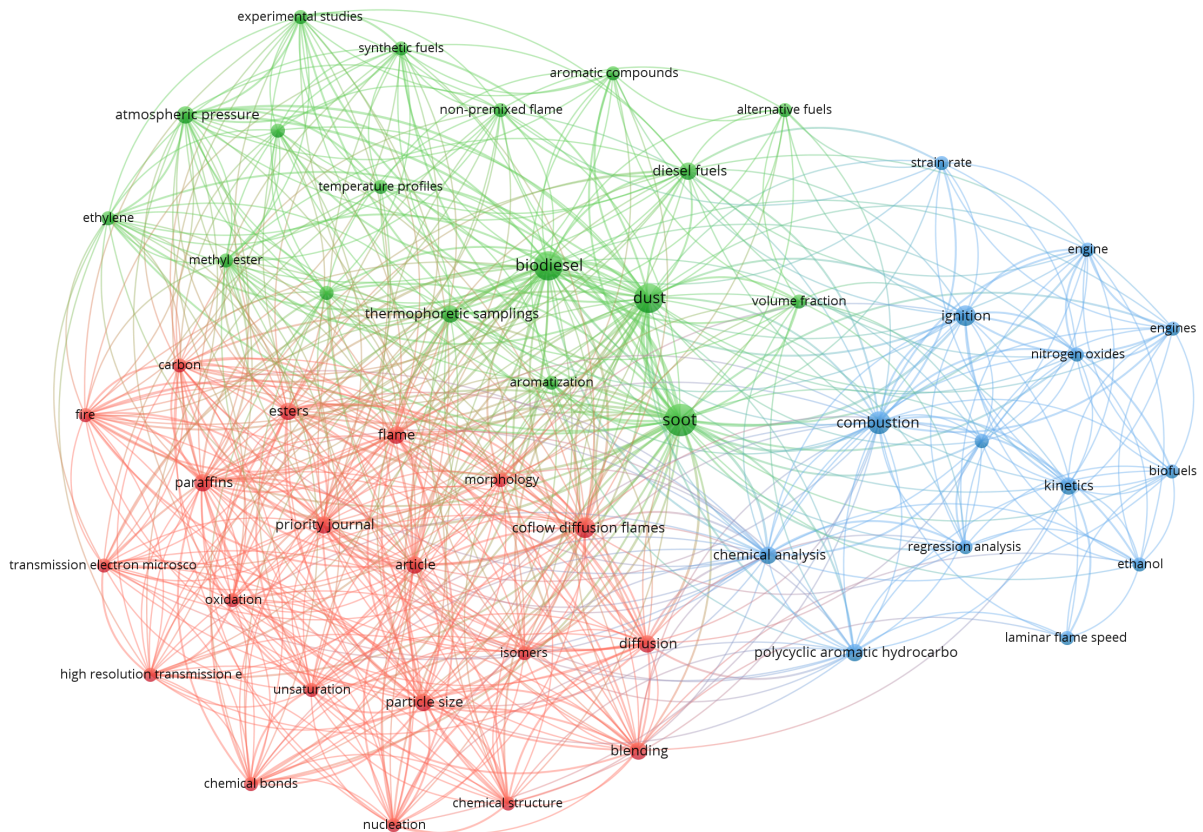


Figura 3.12: Mapa bibliográfico búsqueda 3
(Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)

En este caso, especialmente si se consideran las tres palabras clave con mayor ocurrencia, se nota que los términos hollín, biodiesel y polvo soy muy cercanos, demostrando hay una relación entre ellos dentro de los artículos que se encontraron.

La producción de estos documentos muestra una cierta estabilidad en el periodo de tiempo que abarca (Figura 3.13), se nota que de forma consistente se publico al menos un trabajo referente al tema, pero aun así sigue sin existir una tendencia al alza. En cuanto a las citas hechas de estos trabajos, no demuestran seguir ningún tipo de patrón discernible, ni tampoco ninguna relación con el número de publicaciones hechas en el mismo año.



Figura 3.13: Número publicaciones y número citas por año búsqueda 3
(Fuente: Elaboración propia)

Los 15 artículos encontrados se dividen en 8 autores diferentes (Figura 3.14), pero aun así la mayoría de estos tienen la autoría de 1 trabajo, mientras que solo dos de ellos han publicado múltiples veces sobre el tema. Además, si bien el autor más publicado se corresponde con el más citado, esta relación no se mantiene ya que el segundo autor más citado sólo cuenta con una publicación en el tema como se puede notar en la Tabla 3.5.



Figura 3.14: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 3
(Fuente: Elaboración propia)

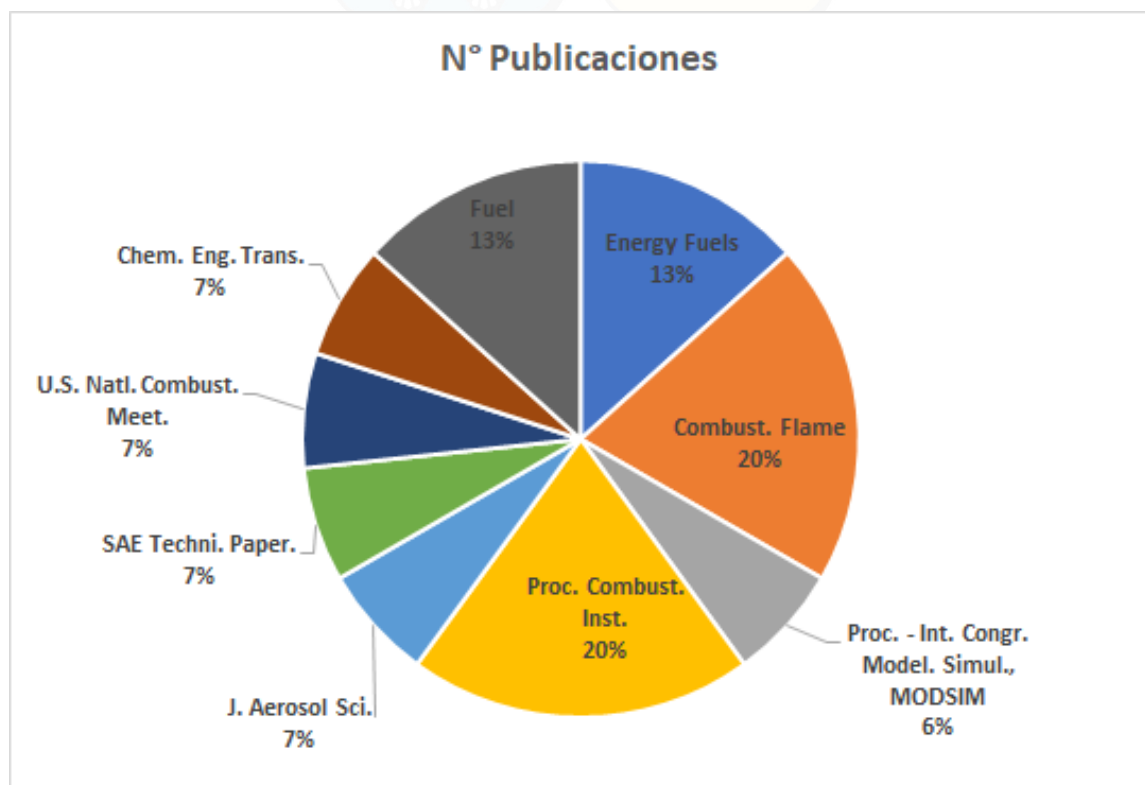
Tabla 3.5: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 3

Autor Principal	Nº Publicaciones	Nº Citas
Thomson, M.J.	5	162
Egolfopoulos, F.N.	1	65
Zhu, L.	3	14
Lapueta, M.	1	12
Del Pecchia, M.	1	6
Pelucchi, M.	1	6
Li, Y.	1	0
Khare, R.	1	0

En cuanto a las revistas científicas que se han dedicado a publicar estos trabajos, se tienen 9 journals diferentes (Tabla 3.6), de los cuales 4 concentran el mayor número de publicaciones. Esto se traduce que entre estas 4 revistas se tiene más del 60 % de publicaciones sobre el tema (Figura 3.15)

Tabla 3.6: Número de publicaciones por revista búsqueda 3

Journal	Nº Publicaciones
Combustion and Flame	3
Proceedings of the Combustion Institute	3
Energy and Fuels	2
Fuel	2
Proc. - Int. Congr. Model. Simul., MODSIM	1
Journal of Aerosol Science	1
SAE Technical Papers	1
10th U.S. National Combustion Meeting	1
Chemical Engineering Transactions	1

**Figura 3.15:** Número de publicaciones por revista búsqueda 3
(Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, cuando se considera el número de citas que corresponden a cada una de las revistas se tiene que la mayor parte de las citas están relacionadas con la revista “Combustion and Flame”, contando por el 55 % de las citas hechas sobre el tema (Figura 3.16)

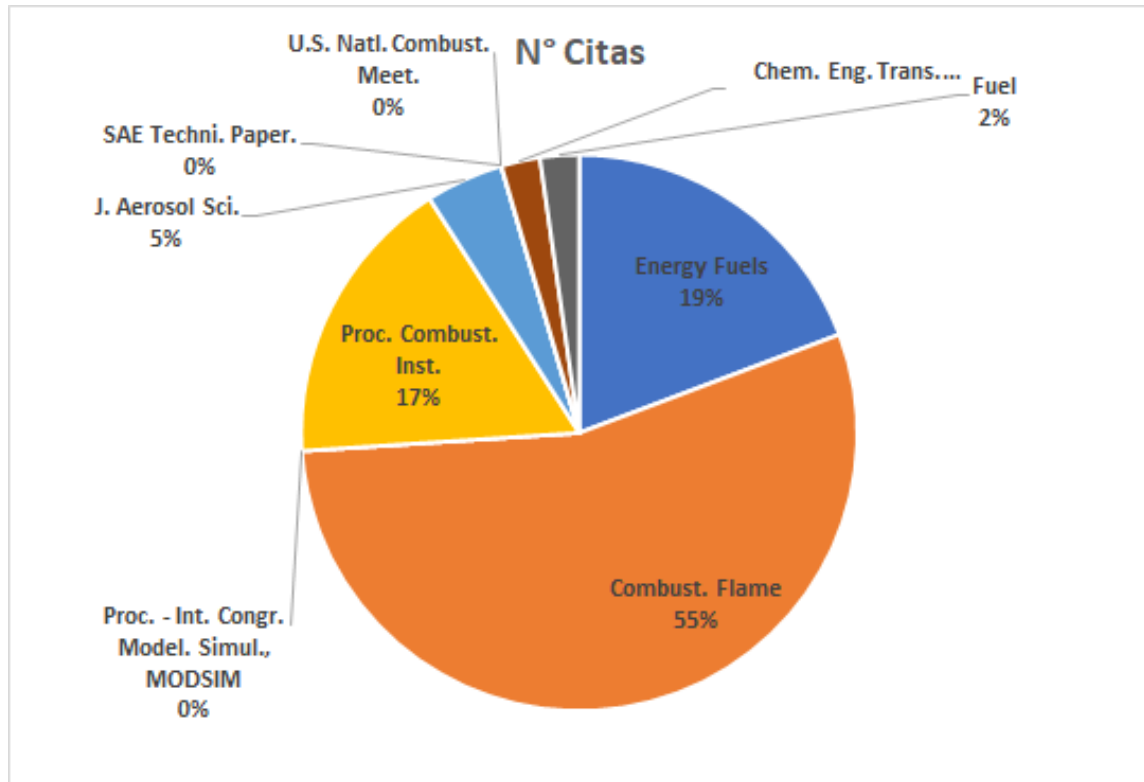


Figura 3.16: Número de citas por revista búsqueda 3
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.1.4. Búsqueda 4: “laminar”

En esta nueva búsqueda se siguió prescindiendo del término “axisimétrico” y otra vez se cambió como se hace referencia al tipo de llama, esta vez solo haciendo uso de la palabra clave “laminar”, por lo que la búsqueda finalmente quedó como se muestra a continuación:

TITLE-ABS-KEY(soot AND laminar AND surrogate AND (biofuel OR bio-fuel OR biodiesel OR bioethanol OR bio-diesel OR bio-ethanol OR (jet AND biofuel) OR (jet AND bio-fuel) OR bio-spk OR ft-spk OR atj-spk OR atj OR hefa OR spk OR (alternative AND fuel)))

Con esto se consiguieron 21 documentos, y como se puede observar en la Figura 3.17, los principales términos que aparecen son hollín, biodiésel y polvo, a lo que se le suma ignición y esteres. Como también se puede observar en el mapa bibliográfico correspon-

diente (Figura 3.17) existe una fuerte conexión entre las tres primeras palabras con mayor co-ocurrencia, lo que se evidencia por la cercanía que tienen los tres términos y por la fuerza de los enlaces que los unen.

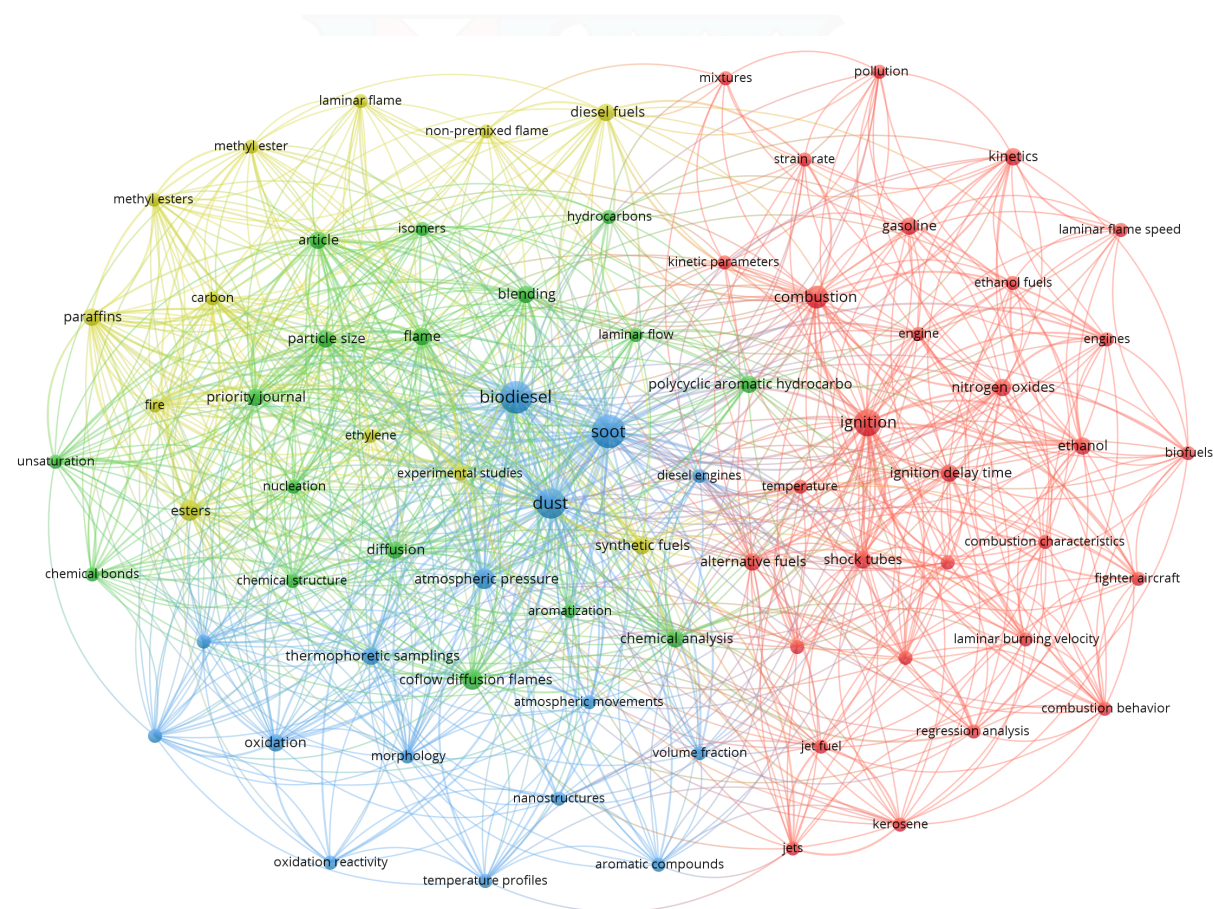


Figura 3.17: Mapa bibliográfico búsqueda 4
(Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)

Si bien se tiene que se pueden encontrar trabajos del tema desde 2005, no hay evidencia de que exista producción de nuevos artículos hasta 2011, existiendo la publicación de al menos 1 documento al año como se observa en la Figura 3.18. Además, se puede notar que desde 2017 en adelante el número de citas hechas sigue un patrón similar al número de publicaciones, ambas mostrando una leve tendencia a aumentar.



Figura 3.18: Número publicaciones y número citas por año búsqueda 4
(Fuente: Elaboración propia)

Se tiene que los 21 trabajos encontrados se reparten en 11 autores, concentrándose un número importante en dos de ellos (Figura 3.19). Cosa que no se replica del todo en el número de citas, ya que, si bien el autor más publicado es el mas citado, no existe una relación entre los dos parámetros que vaya más allá de eso (Tabla 3.7)



Figura 3.19: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 4
(Fuente: Elaboración propia)

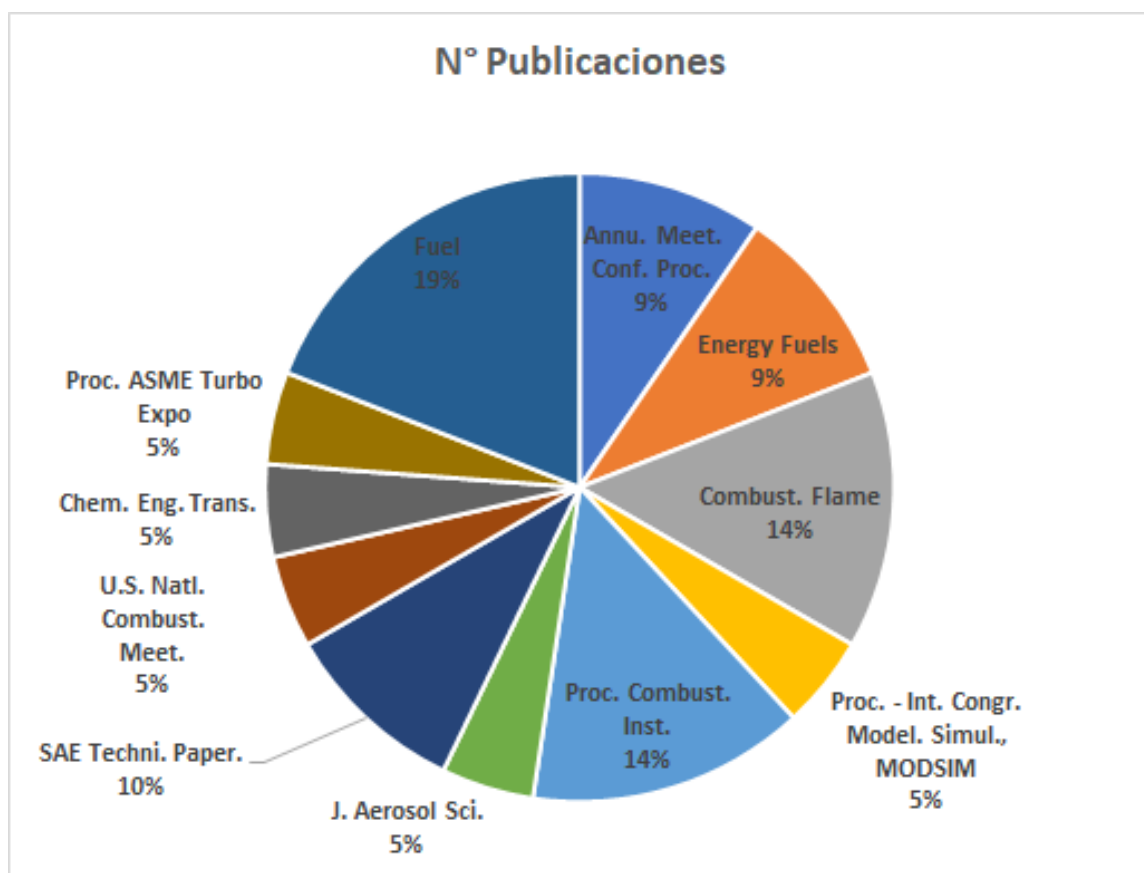
Tabla 3.7: Número publicaciones y número citas por autor búsqueda 4

Autor Principal	N° Publicaciones	N° Citas
Thomson, M.J.	5	162
Egolfopoulos, F.N.	1	65
Jiaqiang, E.	1	18
Zhu, L.	3	14
Lapueta, M.	1	12
Chen, Y.	1	10
Del Pecchia, M.	1	6
Pelucchi, M.	1	6
Braun-Unkhoff, M.	1	2
Li, Y.	1	0
Khare, R.	1	0

En cuanto a los medios a través de los cuales estos artículos fueron publicados, se tiene que los trabajos se distribuyen en 11 revistas diferentes (Tabla 3.8). Donde, si bien existe una leve concentración de trabajos en algunos de los medios de publicación, se puede notar una mayor homogeneidad. Aún así, en la Figura 3.20, se puede notar con facilidad que la revista “Fuel” es la que más a publicado sobre el tema.

Tabla 3.8: Número de publicaciones por revista búsqueda 4

Journal	N° Publicaciones
Fuel	4
Combustion and Flame	3
Proceedings of the Combustion Institute	3
AIChE Annual Meeting Conference Proceedings	2
Energy and Fuels	2
SAE Technical Papers	2
Proc. - Int. Congr. Model. Simul., MODSIM	1
Journal of Aerosol Science	1
10th U.S. National Combustion Meeting	1
Chemical Engineering Transactions	1
Proceedings of the ASME Turbo Expo	1

**Figura 3.20:** Número de publicaciones por revista búsqueda 4
(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de que es la revista “Fuel” la que concentra la mayor cantidad de publicaciones,

esto no se traduce en reunir el mayor número de citas. Como se aprecia en la Figura 3.21 casi la mitad de las citas provienen de documentos publicados en “Combustion and Flame”, mientras que “Fuel” solo cuenta por el 12 % de las citas lo que pone a la revista en cuarto lugar.

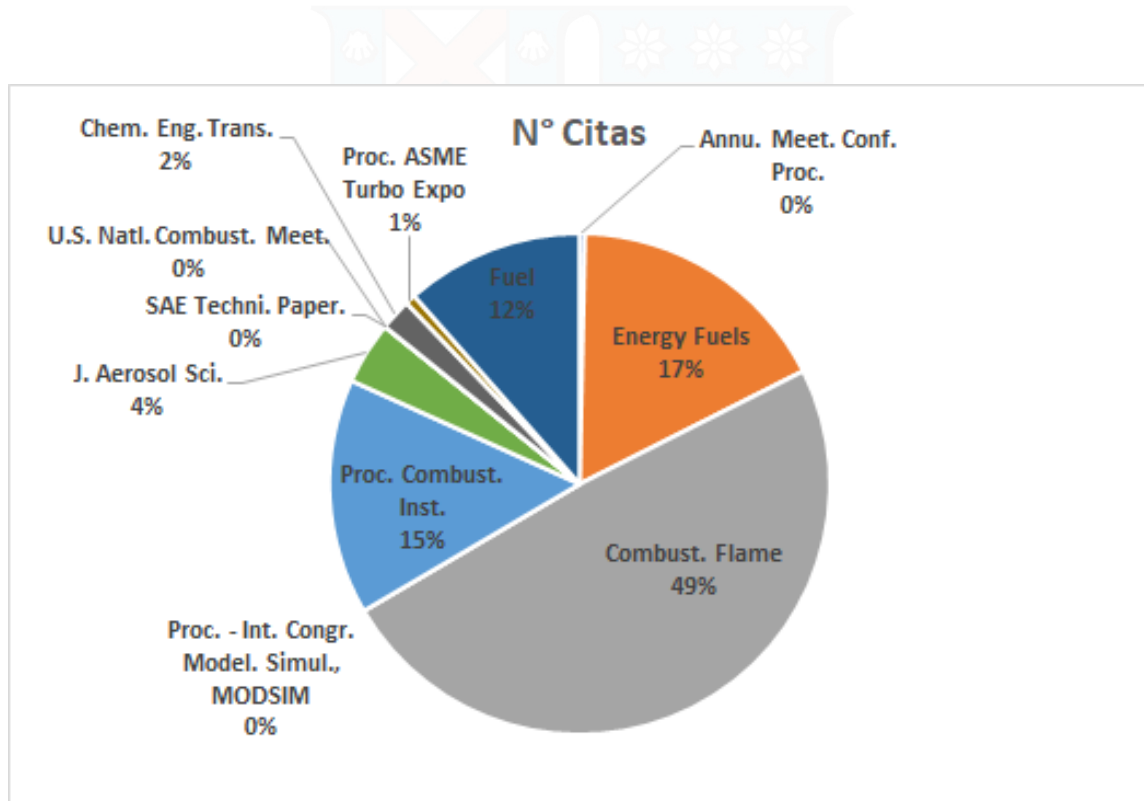


Figura 3.21: Número de citas por revista búsqueda 4
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.1.5. Búsqueda 5: no se hace referencia al tipo de llama

Con la finalidad de realizar un análisis completo, se llevo a cabo una búsqueda en la que se eliminó por completo el uso de términos que hicieran referencia al tipo de llama con el que se trabajó, por lo que se omitieron las palabras claves “axisimétrica” y “llama de difusión laminar” o cualquier derivado de estas, dejando la búsqueda de la forma que sigue:

TITLE-ABS-KEY(soot AND surrogate AND (biofuel OR bio-fuel OR biodiesel OR bioethanol OR bio-diesel OR bio-ethanol OR (jet AND biofuel) OR (jet AND bio-fuel) OR bio-spk OR ft-spk OR atj-spk OR atj OR hefa OR spk OR (alternative AND fuel)))

De aquí se obtiene un total de 96 trabajos, a los que se le realiza un análisis de co-ocurrencia de palabras claves, resultando el mapa que se puede ver en la Figura 3.22. Con este análisis se obtiene que las palabras claves que mas se repiten son hollín, biodiésel, combustión, polvo y motores diésel, las cuales, dadas sus posiciones en el mapa, pareciera ser que tienen una relación estrecha entre ellas.

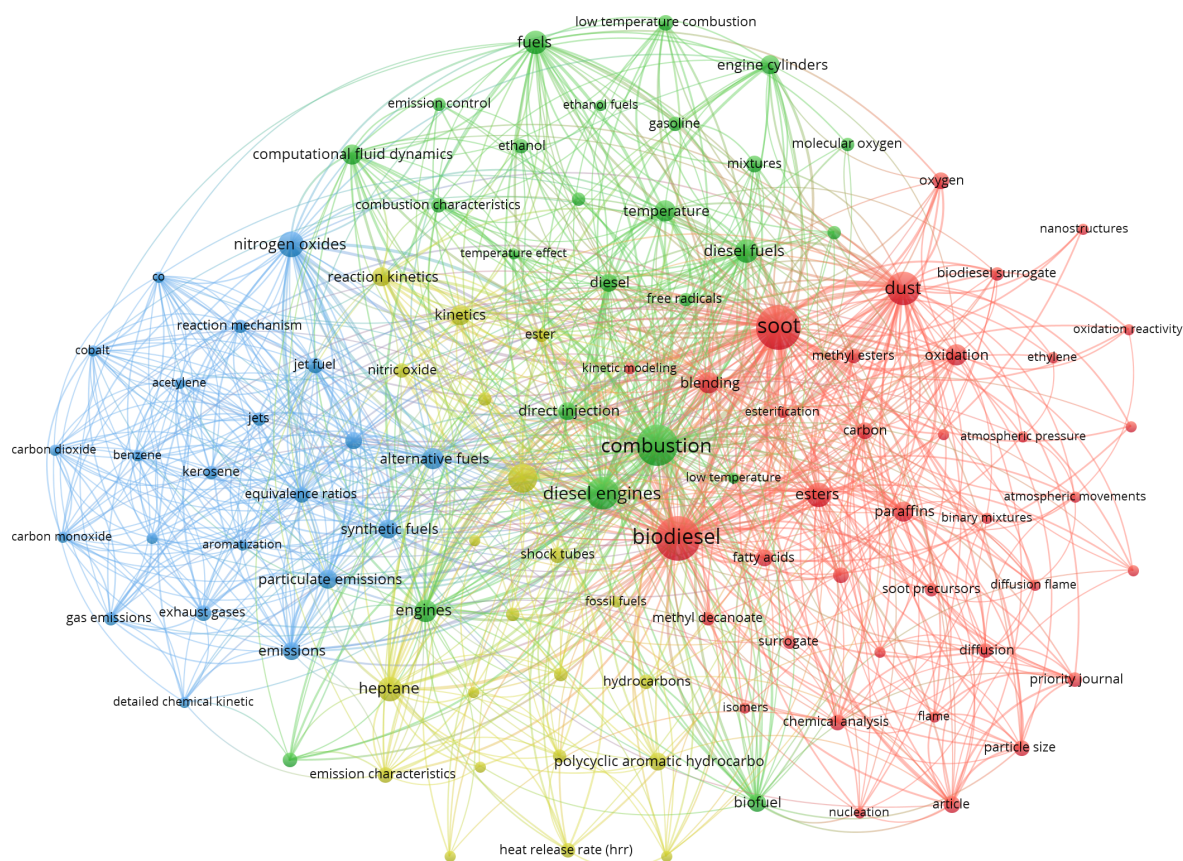


Figura 3.22: Mapa bibliográfico búsqueda 5
(Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer)

En cuanto a la tendencia temporal de estos artículos, se tiene que comienzan a ser publicados desde 1997 pero no existe ningún tipo de consistencia hasta el año 2011 donde comienzan a verse publicaciones sobre el tema todos los años. Sin embargo, aunque existe una producción relativamente continua, no existe una tendencia que se mantenga en el tiempo, especial en los últimos años (Figura 3.23). Lo mismo sucede con las veces que

estos trabajos son citados en el periodo de tiempo establecido, no existe una tendencia al aumento de las veces que se cita un trabajo de este tema, y tampoco existe un patrón discernible que se relacione con la cantidad de publicaciones en un año dado.

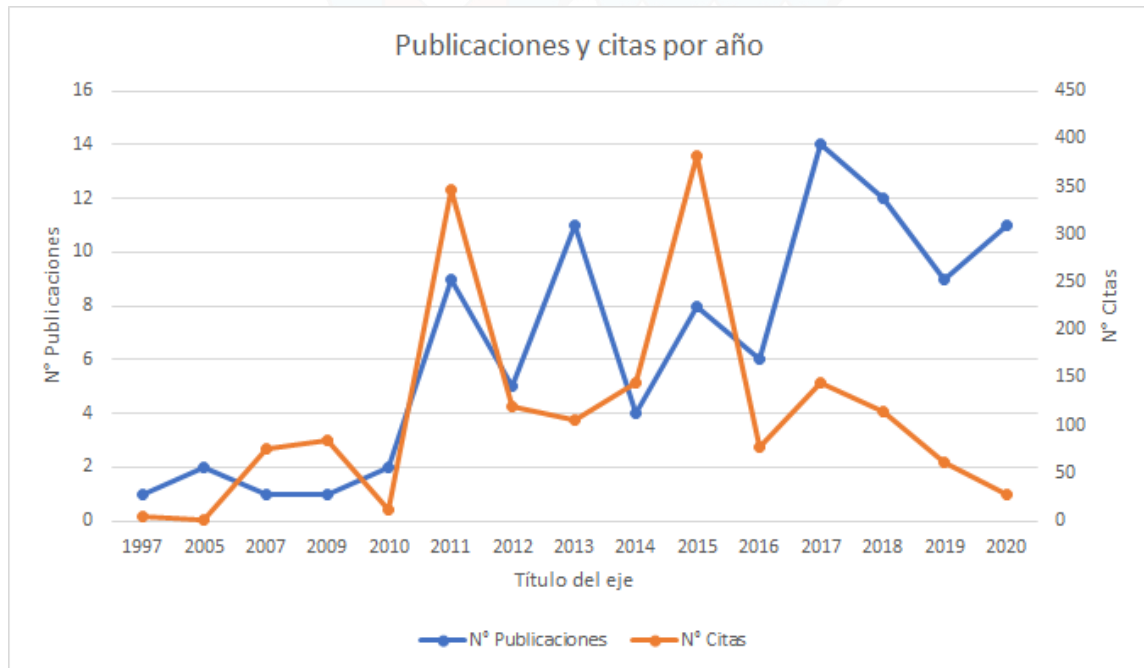


Figura 3.23: Número publicaciones y número citas por año búsqueda 5
(Fuente: Elaboración propia)

La totalidad de los trabajos encontrados pertenecen a 38 autores, los cuales en su mayoría cuentan con una publicación, siendo solo 12 de ellos los que han publicado dos o más veces respecto al tema. Por otra parte, en la Tabla 3.9 y en la Figura 3.24 se puede notar que no existe una relación entre el número de publicaciones con las que cuente un autor y las veces totales que sus trabajos han sido citados, es más queda en evidencia que el autor más citado solo ha publicado una vez un trabajo que haga referencia al tema que se estudia.

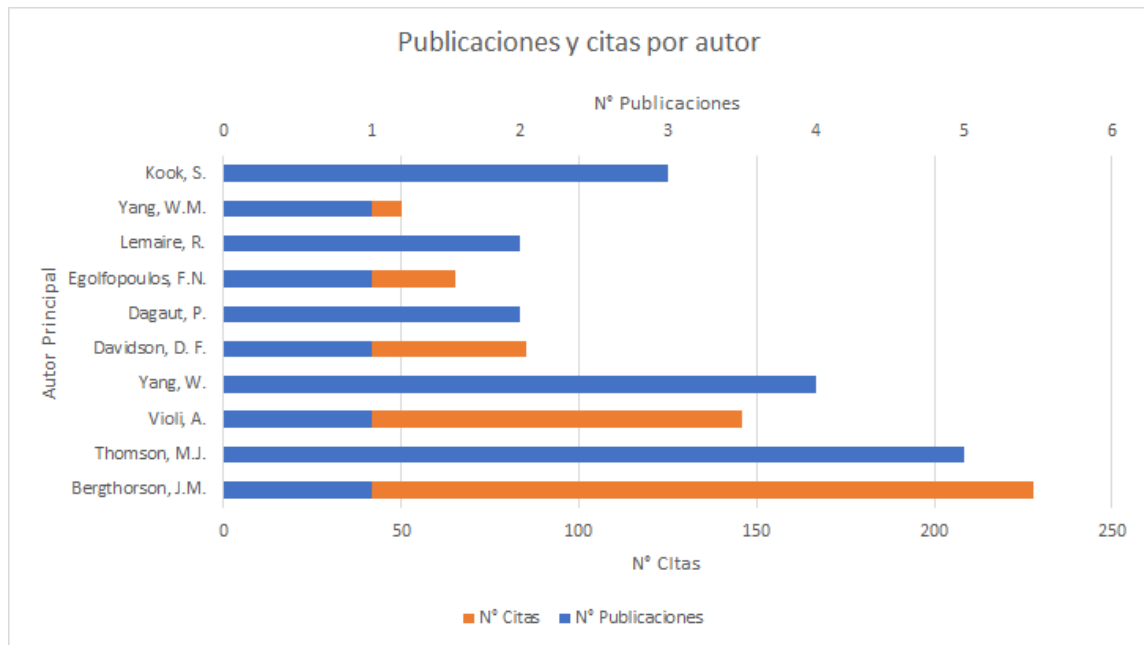


Figura 3.24: Número publicaciones y número citas para los 10 autores más citados en búsqueda 5
(Fuente: Elaboración propia)

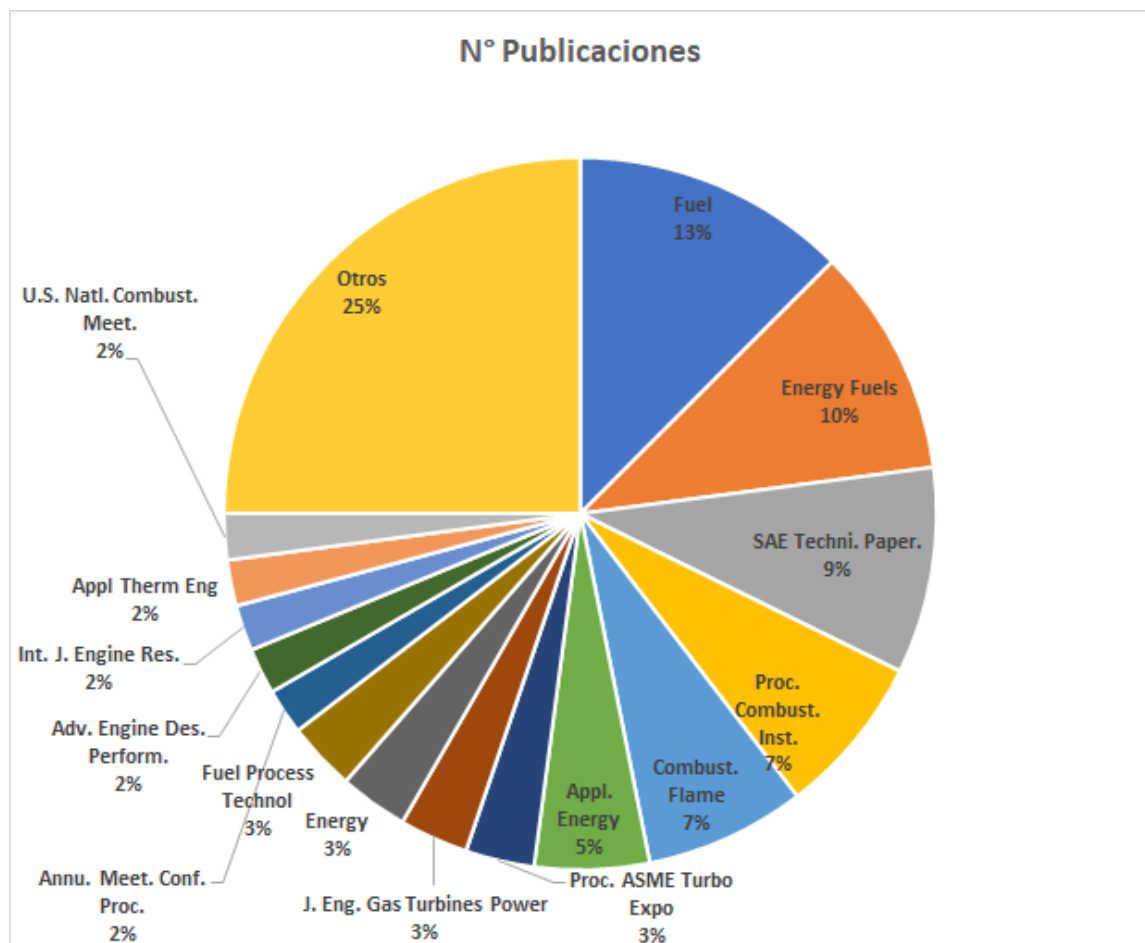
Tabla 3.9: Número publicaciones y número citas para los 10 autores más citados en búsqueda 5

Autor Principal	N° Publicaciones	N° Citas
Bergthorson, J.M.	1	228
Thomson, M.J.	5	162
Violi, A.	1	146
Yang, W.	4	137
Davidson, D. F.	1	85
Dagaut, P.	2	81
Egolfopoulos, F.N.	1	65
Lemaire, R.	2	53
Yang, W.M.	1	50
Kook, S.	3	48

En lo que se refiere a las revistas que publicaron estos trabajos, se tiene que se reparten en 39 medios, pero la mayor parte de los artículos se concentran en 15 de ellos, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.10 .

Tabla 3.10: Número de publicaciones por revista búsqueda 5

Journal	N° Publicaciones
Fuel	12
Energy and Fuels	10
SAE Technical Papers	9
Proceedings of the Combustion Institute	7
Combustion and Flame	7
Applied Energy	5
Proceedings of the ASME Turbo Expo	3
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power	3
Energy	3
Fuel Processing Technology	3
AIChE Annual Meeting Conference Proceedings	2
Advanced Engine Design and Performance	2
International Journal of Engine Research	2
Applied Thermal Engineering	2
10th U.S. National Combustion Meeting	2
Otros	24

**Figura 3.25:** Número de publicaciones por revista búsqueda 5

(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede ver en el fig. x las 15 revistas que acumulan más publicaciones cuentan por el 75 % de los trabajos encontrados, mientras que el resto, en conjunto cuenta solo por el 25 %. Además, se tiene que la revista “Fuel” es la que suma mas trabajos publicados. Patrón que no se repite cuando se trata del número de citas que acumula cada una de las revistas científicas, en este caso se tiene que 93 % de las citas hechas hacen referencia a trabajos encontrados en una de 11 revistas, las que se pueden ver en la Tabla 3.11, siendo el journal “Combustion and Flame” el medio que cuenta con los trabajos más citados, acumulando el 16 % de las citas como se aprecie en la Figura 3.26.

Tabla 3.11: Número de citas ppor revista científica en búsqueda 5

Journal	N° Citas
Combustion and Flame	263
Renewable and Sustainable Energy Reviews	228
Applied Energy	190
Energy and Fuels	186
Proceedings of the Combustion Institute	184
Fuel	153
Progress in Energy and Combustion Science	146
Journal of Physical Chemistry A	75
Energy Conversion and Management	50
Applied Thermal Engineering	39
Fuel Processing Technology	29
Otros	88

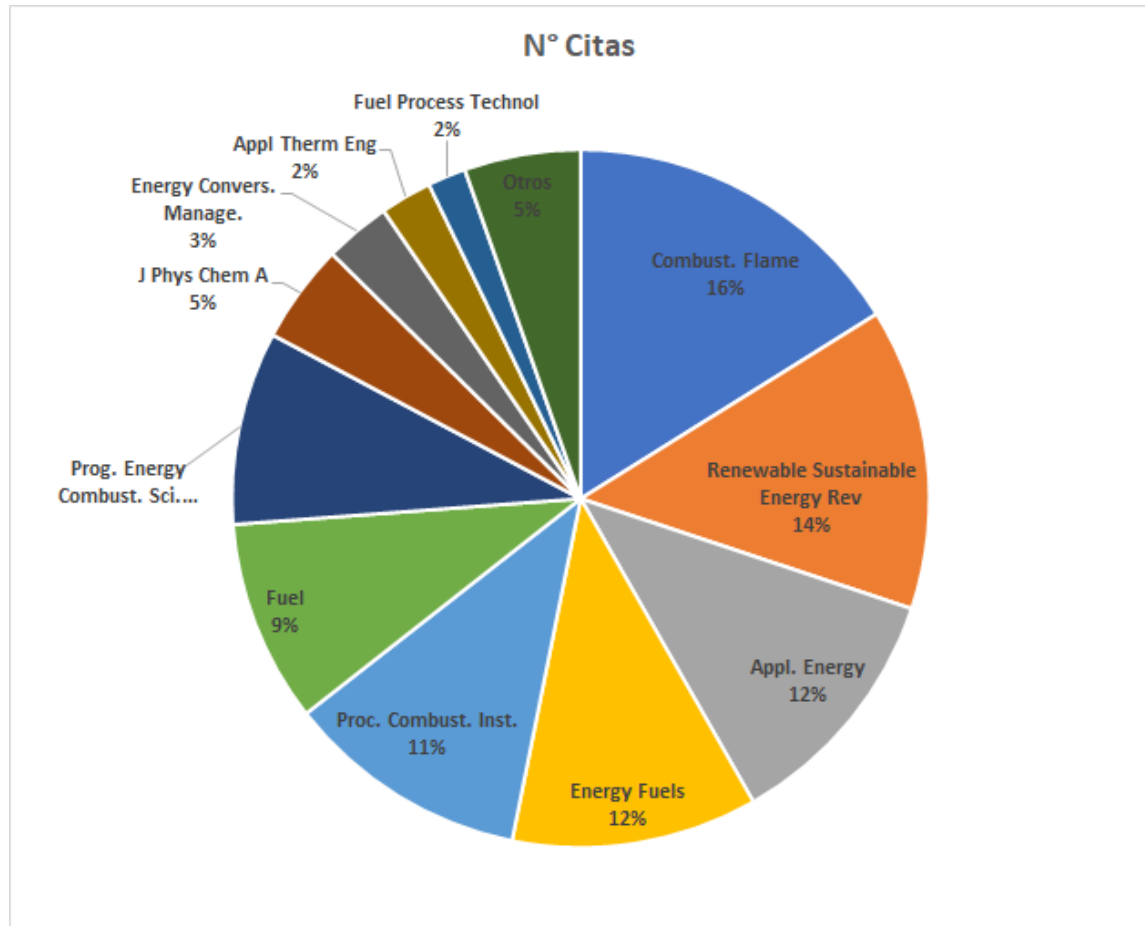


Figura 3.26: Número de citas por revista búsqueda 5
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.2. Resultados cuantitativos

Si bien ya se tiene una idea del panorama de la producción científica del tema que se estudia, se desea realizar un análisis más profundo. Para esto se realizó una tabla resumen, la cual se encuentra en el Anexo A, donde se recopiló información relevante sobre cada uno de los artículos encontrados. Dicha información consiste en 5 campos diferentes: el biocombustible en el que se enfoca el documento, que combustible convencional podría reemplazar, el tipo de quemador utilizado en el trabajo, las variables que se miden y las técnicas utilizadas. En cuanto a la mezcla de biocombustibles y las técnicas los datos encontrados son relativamente heterogéneos, mientras que en lo que respecta al combustible convencional a reemplazar, el tipo de quemador y las variables medidas, se puede observar que existen tendencias muy marcadas.

En cuanto al tema de los combustibles convencionales, se tiene que en la mayoría de los casos las publicaciones encontradas buscan estudiar alternativas al diésel, y si bien se existen casos en que se estudian biocombustibles para usarse como reemplazo a la gasolina y a los combustibles de aviación, la diferencia es considerable. Esto se puede observar claramente en la Figura 3.27.



Figura 3.27: Número de publicaciones según combustible convencional a reemplazar
(Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, en cuanto a los quemadores utilizados, se tiene que en la mayoría de los casos se hace uso de un motor diésel, y en segundo lugar quemadores en co-flujo (Figura 3.28).



Figura 3.28: Quemadores utilizados
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, las variables que son medidas en los artículos estudiados tienen una clara tendencia, en la mayor parte de los casos existe un foco en la medición de parámetros referentes a las emisiones de hollín, como su morfología o su fracción en volumen (volume fraction).

Es importante destacar que algunos de los trabajos encontrados no fueron incluidos en este análisis, siendo el motivo de esto existen trabajos duplicados (es el mismo artículo pero en distintas etapas del proceso de publicación) y otros que simplemente no son relevantes para el tema en estudio, contienen los términos de búsqueda pero no profundizan más allá de una mención.

4 | Conclusiones

La primera observación que se puede hacer al finalizar este análisis es que la cantidad de trabajos que se han publicado respecto al tópico no es muy grande, cosa que se vuelve aún más relevante cuando se piensa que el tema del uso de combustibles alternativos debería ser de suma importancia para la comunidad científica, particularmente desde hace algunos años hasta la fecha, lo que hace pensar que aún existe una gran área que todavía requiere mucha atención, en especial si es que se desea poner un alto al cambio climático y adaptarse a sus consecuencias. Lo anterior se evidencia de forma todavía más notoria cuando se comienza con las búsquedas, pues no existen trabajos que estudien las mediciones de hollín en llamas de difusión laminar axisimétricas producidas por biocombustibles sustitutos o, más precisamente, no existe ningún documento que aborde el tema de las mediciones de hollín en llamas axisimétricas de ningún tipo, cosa que a su vez da cuenta que mientras más específica sea una búsqueda, existe menos probabilidad de encontrar trabajos respecto al tema.

Por otra parte, cuando se elimina el término axisimétrico y se comienza a tener datos, se nota que no existe ningún tipo de forma estándar para escribir los términos importantes, por lo que las búsquedas deben incluir todas las distintas formas de escritura que puede tener cualquier palabra clave relevante, lo que, a su vez, se puede traducir en un problema en el acceso que se tiene a los trabajos sobre cualquier tema en particular.

En cuanto a los análisis hechos, se tiene que todos los trabajos encontrados se centran en el estudio del hollín para biodiésel, dado que estos son los dos términos que tienen mayor ocurrencia, lo que hace pensar que muchos otros biocombustibles como el bio-etanol y biocombustibles para aviones no son temas a los que se le preste mayor atención. También,

dada la fuerza del enlace entre los términos hollín y biodiésel, se puede tener cierta certeza de que estos se presentan de forma conjunta en los artículos estudiados, lo que reafirma la observación de que en su mayor parte el tema que concentra mayor interés son las mediciones de hollín en biodiésel y que, si bien se hace referencia a mezclas sustitutas para dicho biocombustible, éste no es un tema central o que se le dé mayor protagonismo. Esto sucede de forma transversal en todas las búsquedas hechas y sin importar cuántas palabras claves en total existan.

Cuando se observan los resultados del análisis temporal hecho en relación a cada una de las búsquedas, se tiene que, aunque los períodos de estudios pueden variar de una búsqueda a otra, se constata el mismo problema. En efecto, no existe ninguna tendencia clara ni sostenida que indique que con el paso de los años el tema de estudio va concentrando mayor número de trabajos; en todos los casos existen años puntuales en que se nota un aumento relativamente significativo del número de artículos sobre el tema, pero no es algo que se mantenga de un año a otro e incluso, en los años en que hay un aumento de documentos que hagan referencia a la medición de hollín a partir de sustitutos de biocombustibles se nota que se llega a un máximo de alrededor de 14 publicaciones al año. Se nota algo similar para el número de veces que alguno de estos trabajos ha sido citado a lo largo del tiempo: se ven aumentos puntuales en años específicos, pero esto no logra mantenerse por periodos lo suficientemente largos para notar una tendencia al alza.

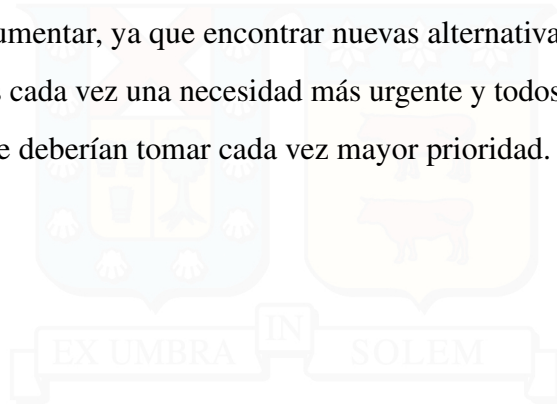
Otras observaciones importantes que se pueden hacer a partir del análisis realizado dicen respecto a los autores principales de estos trabajos y los medios (revistas científicas) en los que estos son publicados. En lo referente a los autores, se tiene que existe un grupo acotado de personas que trabajan en el tema en el que se centra este estudio y dicho grupo se estrecha aún mas cuando se considera sólo a quienes han publicado más de un trabajo al respecto; aun así, no parece existir ningún tipo de relación entre el número de artículos en los que participó un autor en particular y las veces que sus trabajos son citados. En cuanto a las revistas científicas, se tiene que son pocas las que concentran más de un trabajo, siendo estas mismas las que acumulan el mayor número de citas. En particular, se tiene que son

dos las que destacan en la mayoría de las búsquedas hechas, siendo estas “Combustion and Flame” y “Fuel”, ambos medios acumulando la mayoría de las citas hechas sobre el tema.

Es relevante mencionar que al analizar de forma más profunda los trabajos encontrados se puede notar que las observaciones hechas con anterioridad tienen un alto nivel de precisión, por ejemplo, las palabras claves que cuentan con mayor ocurrencia son un buen reflejo del enfoque que tienen la mayor parte de los artículos, permitiendo depositar confianza en las conclusiones que se obtienen. De la misma manera, este tipo de análisis tiene limitación, las cuales provienen del hecho de que se trabaja solo con información general como lo son términos específicos que se pueden encontrar en el título, resumen o palabras claves, si no se estudia cada uno de los artículos no se puede saber en realidad que tan relevantes son los para el tema en estudio.

En conclusión, en lo que dice relación al panorama de la producción científica de las mediciones de hollín para biocombustibles sustitutos es un tema, en el mejor de los casos, muy poco explorado, lo que se vuelve peor cuando se comienza a añadir términos que lo hagan más específico, como por ejemplo buscar trabajos que utilicen llamas de difusión laminar axisimétrica, donde los resultados son nulos. Por otro lado, se tiene que al ser un tema poco explorado, los autores que publican trabajos al respecto son un grupo acotado que se estrecha aun más al buscar sólo aquellos que hayan dado autoría a más de un artículo sobre el tema, sucediendo lo mismo con las revistas científicas que publican estos trabajos: se tiene un grupo reducido que concentra la mayoría de los documentos, presentando no sólo un problema por lo acotado del número de resultados encontrados, sino que también una situación que afecta a las investigaciones que se pueden construir sobre estos trabajos, siendo un ejemplo importante el uso del análisis sustituto o surrogate. Efectivamente, esta es una herramienta útil a la hora de estudiar nuevos biocombustibles, ya que subsana la complejidad inherente al estudio de los éstos; sin embargo, para su uso se necesitan tener mezclas sustitutas que repliquen de forma precisa características de combustión, como lo son las emisiones de hollín. Si no se tiene bibliografía que demuestre la efectividad de un cierto sustituto, primero se tiene que pasar por el proceso de asegurar que este

sea una mezcla adecuada, lo que es complejo y lleva tiempo, mientras que si se tienen trabajos anteriores, se puede generar nuevo conocimiento en base a estos. Por último, se vuelve a reiterar que resulta por lo menos llamativo que la producción científica que haga referencia al tema de interés para este análisis cuantitativo sea tan pequeña y no muestre ninguna tendencia a aumentar, ya que encontrar nuevas alternativas para reemplazar a los combustibles fósiles es cada vez una necesidad más urgente y todos los temas relacionados a esto pareciera ser que deberían tomar cada vez mayor prioridad.



Bibliografía

- Abboud, Johnny; Schobing, Julie; Legros, Guillaume; Matynia, Alexis; Bonnety, Jérôme; Tschamber, Valérie; Brillard, Alain; Leyssens, Gontrand; y Da Costa, Patrick (2018). Impacts of ester's carbon chain length and concentration on sooting propensities and soot oxidative reactivity: Application to Diesel and Biodiesel surrogates. *Fuel*, 222(January), 586–598. [A.3](#)
- BIOCOMSA (2015). *Consorcio Tecnológico de Biocombustibles S . A . BIOCOTSA*. Technical report. [2.6.3](#)
- Bioenercel (2014). *Memoria 2014 Bioenercel*. Technical report. [2.6.3](#)
- Björgen, Karl Oskar Pires; Emberson, David Robert; y Løvås, Terese (2019). Optical Measurements of In-Flame Soot in Compression-Ignited Methyl Ester Flames. *Energy and Fuels*, 33, 7886–7900. [A.3](#)
- Cain, Jeremy; Dewitt, Matthew J.; Blunck, David; Corporan, Edwin; Striebich, Richard; Anneken, David; Klingshirn, Christopher; Roquemore, W. M.; y Vander Wal, Randy (2013). Characterization of gaseous and particulate emissions from a turboshaft engine burning conventional, alternative, and surrogate fuels. *Energy and Fuels*, 27(4), 2290–2302. [A.9](#)
- Cardona-Román, Diana Marcela y Sánchez-Torres, Jenny Marcela (2017). Análisis cuantitativo de la producción científica acerca de la investigación sobre la evaluación de la implementación del e-learning en el periodo 2000-2015. *Educación*, 26(51), 7–34. [2.10](#)
- Carvalho, Francielle; da Silva, Fabio T.F.; Szklo, Alexandre; y Portugal-Pereira, Joana (2019). Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1454–1475. [2.5](#)
- Castellar Ortega, Grey C.; Angulo Mercado, Edgardo R.; y Cardozo Arrieta, Beatriz M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospectiva*, 12(2), 90–114. [2.6.1](#)
- Cavieres, Patricio (2009). El Biodiesel en Chile. [2.6.2](#)
- Cepeda, Francisco Ignacio (2018). *Mediciones de temperatura de hollín en llamas forzadas de difusión laminar*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa María. [2.7](#)

- Cheng, A. S.; Dumitrescu, Cosmin E.; y Mueller, Charles J. (2014). Investigation of methyl decanoate combustion in an optical direct-injection diesel engine. *Energy and Fuels*, 28(12), 7689–7700. [A.7](#)
- Cheng, X.; Gan, S.; y Ng, H.K. (2020). A numerical study on the quasi-steady spray and soot characteristics for soybean methyl ester and its blends with ethanol using CFD-reduced chemical kinetics approach. *Energy*, 200. [A.1](#)
- CONICYT (2009). Chile ya produce biodiésel a base de raps. [2.6.1](#)
- da Cruz, Antonio Pires; Dumas, Jean Pierre; y Bruneaux, Gilles (2011). Two-Dimensional In-Cylinder Soot Volume Fractions in Diesel Low Temperature Combustion Mode. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 2023–2047. [A.8](#)
- Dagaut, Philippe y Gail, Sandro (2007). Chemical kinetic study of the effect of a biofuel additive on Jet-A1 combustion. *Journal of Physical Chemistry A*, 111(19), 3992–4000. [A.10](#)
- Del Pecchia, M.; Pessina, V.; Berni, F.; D’Adamo, A.; y Fontanesi, S. (2020). Gasoline-ethanol blend formulation to mimic laminar flame speed and auto-ignition quality in automotive engines. *Fuel*, 264(August), 116741. [A.10](#)
- Du, C.; Zhao, X.; Liu, D.; Lin, C. S.K.; Wilson, K.; Luque, R.; y Clark, J. (2016). Introduction: An overview of biofuels and production technologies. An overview of biofuels and production technologies. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 3–12). Elsevier, segunda edición. [2.4](#)
- Farooq, A.; Davidson, D. F.; Hanson, R. K.; Huynh, L. K.; y Violi, A. (2009). An experimental and computational study of methyl ester decomposition pathways using shock tubes. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32 I(1), 247–253. [A.6](#)
- Feng, Qiyao; Jalali, Aydin; Fincham, Adam M.; Wang, Yang Lee; Tsotsis, Theodore T.; y Egolfopoulos, Fokion N. (2012). Soot formation in flames of model biodiesel fuels. *Combustion and Flame*, 159(5), 1876–1893. [A.9](#)
- Ganduglia, Federico; León, José; Gasparini, Raúl; Rodríguez, María; Huarte, Guillermo; Estrada, José; y Filgueiras, Ernani (2009). *Manual de biocombustibles*. Technical report, ARPEL. [2.6.1](#), [2.6.2](#), [2.6.3](#)
- Gao, Zhan; Zhu, Lei; Liu, Chunpeng; Li, Ang; He, Zhuoyao; Zhang, Congfei; y Huang, Zhen (2017a). Comparison of Soot Formation, Evolution, and Oxidation Reactivity of Two Biodiesel Surrogates. *Energy and Fuels*, 31(8), 8655–8664. [A.4](#)
- Gao, Zhan; Zhu, Lei; Zou, Xinyao; Liu, Chunpeng; y Huang, Zhen (2017b). Partial Premixing Effects on the Evolution of Soot Morphology and Nanostructure in Co-Flow Flames of a Biodiesel Surrogate. *SAE Technical Papers*, 2017-Octob. [A.4](#)

- Gao, Zhan; Zhu, Lei; Zou, Xinyao; Liu, Chunpeng; Tian, Bo; y Huang, Zhen (2019). Soot reduction effects of dibutyl ether (DBE) addition to a biodiesel surrogate in laminar coflow diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(1), 1265–1272. [A.2](#)
- García, I. L. (2016). Feedstocks and challenges to biofuel development. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 85–118). Elsevier, second edición. [2.6.1](#)
- Gónzales, Jaime (2009). *Energías Renovables*. Barcelona: Reverté. [2.3](#)
- Hawi, Meshack; Abdel-Rahman, Ali K.; Bady, Mahmoud; y Ookawara, Shinichi (2017). Prediction of diesel combustion and emission characteristics in CI Engine using computational fluid dynamics simulations. *ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability, ES 2017, collocated with the ASME 2017 Power Conference Joint with ICOPE 2017, the ASME 2017 15th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, and the ASME 201*, (pp. 1–11). [A.5](#)
- Highwood, Eleanor J. y Kinnersley, Robert P. (2006). When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health. *Environment International*, 32(4), 560–566. [2.8](#)
- Hu, J.; Abubakar, S.; y Li, Y. (2020). A novel reduced i-propanol-n-butanol-ethanol (IBE)/diesel mechanism for engine combustion and emissions prediction. *Fuel*, 278. [A.1](#)
- International Energy Agency (2019). *Global Energy & CO2 Status Report 2018*. Technical report, International Energy Agency. [1](#)
- Jerez, Alejandro Andrés (2017). *Estudio numérico del efecto del índice de oxígeno en la producción de hollín de llamas laminares de difusión de etileno con modelo seccional de aerosoles*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa María. [2.7](#)
- Jiang, Bo; Liu, Dong; y Lin, Zixia (2020). Soot particles diagnostics in ethylene inverse diffusion flame blending with biodiesel surrogates of saturated methyl butyrate and unsaturated methyl crotonate. *Fuel Processing Technology*, 202(February), 106379. [A.1](#)
- Kerschgens, B.; Cai, L.; Pitsch, H.; Janssen, A.; Jakob, M.; y Pischinger, S. (2015). Surrogate fuels for the simulation of diesel engine combustion of novel biofuels. *International Journal of Engine Research*, 16(4), 531–546. [A.7](#)
- Kholghy, Mohammad Reza; Veshkini, Armin; y Thomson, Murray John (2016). The core-shell internal nanostructure of soot - A criterion to model soot maturity. *Carbon*, 100, 508–536. [2.8](#)
- Kholghy, Mohammad Reza; Weingarten, Jason; y Thomson, Murray John (2015). A study of the effects of the ester moiety on soot formation and species concentrations in a laminar coflow diffusion flame of a surrogate for B100 biodiesel. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(1), 905–912. [A.6](#)

- Lapuerta, Magín; Barba, Javier; Sediako, Anton D.; Kholghy, Mohammad Reza; y Thomson, Murray J. (2017). Morphological analysis of soot agglomerates from biodiesel surrogates in a coflow burner. *Journal of Aerosol Science*, 111, 65–74. [A.4](#)
- Lauga, Vincent; Iojoiu, Eduard Emil; Brillard, Alain; y Leyssens, Gontrand (2017). Impacts of oxygenated compounds concentration on sooting propensities and soot oxidative reactivity: Application to Diesel and Biodiesel surrogates. *Fuel*, 193, 241–253. [A.5](#)
- Lemaire, R.; Bejaoui, S.; y Therssen, E. (2013). Study of soot formation during the combustion of Diesel, rapeseed methyl ester and their surrogates in turbulent spray flames. *Fuel*, 107, 147–161. [A.8](#)
- Li, Juncheng; Han, Zhiyu; Shen, Cai; y Lee, Chia Fon (2014). A study on biodiesel NOx emission control with the reduced chemical kinetics model. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136(10), 1–7. [A.7](#)
- Li, T. X.; Zhu, D. L.; Akafuah, N. K.; Saito, K.; y Law, C. K. (2011). Synthesis, droplet combustion, and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2039–2046. [A.8](#)
- Lippmann, Morton (2014). Toxicological and epidemiological studies of cardiovascular effects of ambient air fine particulate matter (PM2.5) and its chemical components: Coherence and public health implications. *Critical Reviews in Toxicology*, 44(4), 299–347. [2.8](#)
- Liu, Dong; Wang, Wei; Ying, Yaoyao; y Luo, Minye (2018). Nanostructure and reactivity of carbon particles from co-pyrolysis of biodiesel surrogate methyl octanoate blended with n-butanol. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 26(5), 278–290. [A.4](#)
- Matti Maricq, M. (2011). Physical and chemical comparison of soot in hydrocarbon and biodiesel fuel diffusion flames: A study of model and commercial fuels. *Combustion and Flame*, 158(1), 105–116. [A.4](#)
- Ministerio de Energía (2014). *Energía 2050*. Technical report, Ministerio de Energía. [1](#)
- Mohan, Balaji; Yang, Wenming; Yu, Wenbin; Tay, Kun Lin; y Chou, Siaw Kiang (2015). Numerical investigation on the effects of injection rate shaping on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled CI engine. *Applied Energy*, 160, 737–745. [A.6](#)
- Ng, Hoon Kiat; Gan, Suyin; Ng, Jo Han; y Pang, Kar Mun (2013). Simulation of biodiesel combustion in a light-duty diesel engine using integrated compact biodiesel-diesel reaction mechanism. *Applied Energy*, 102, 1275–1287. [A.8](#)
- Pinzi, Sara; Leiva-candia, David; López-garcía, Isabel; Redel-macías, M Dolores; y Dorado, M Pilar (2013). Latest trends in feedstocks for biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(1), 126–143. [2.6.2](#)

- Pitz, William J. y Mueller, Charles J. (2011). Recent progress in the development of diesel surrogate fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(3), 330–350. [2.9](#)
- Ren, Yi; Abu-Ramadan, Ehab; y Li, Xianguo (2010). Numerical simulation of biodiesel fuel combustion and emission characteristics in a direct injection diesel engine. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 4(2), 252–261. [A.2](#)
- Ren, Y. y Li, X. G. (2011). Numerical study on the combustion and emission characteristics in a direct-injection diesel engine with preheated biodiesel fuel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 225(4), 531–543. [A.7](#)
- Riebl, Sebastian; Braun-Unkhoff, Marina; y Riedel, Uwe (2017). A Study on the Emissions of Alternative Aviation Fuels. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(8). [A.10](#)
- Rissman, Jeffrey (2013). We Will Not Run Out of Fossil Fuels. [1](#)
- Saffaripour, Meghdad; Veshkini, Armin; Kholghy, Mohammadreza; y Thomson, Murray J. (2014). Experimental investigation and detailed modeling of soot aggregate formation and size distribution in laminar coflow diffusion flames of Jet A-1, a synthetic kerosene, and n-decane. *Combustion and Flame*, 161(3), 848–863. [A.9](#)
- Saffaripour, M; Zabeti, P; Kholghy, M; y Thomson, M J (2011). An experimental study of the laminar , sooting , coflow diffusion flames of synthetic jet fuels. *Measurement*, (pp. 5584–5593). [A.9](#)
- Salinas, Edmar y Gasca, Victor (2009). Los Biocombustibles. *El Cotidiano*, (157), 75–82. [2.4](#)
- Storch, Michael; Hinrichsen, Florian; Wensing, Michael; Will, Stefan; y Zigan, Lars (2015). The effect of ethanol blending on mixture formation, combustion and soot emission studied in an optical DISI engine. *Applied Energy*, 156, 783–792. [A.10](#)
- Su, Hu Chien; Kook, Sanghoon; Chan, Qing Nian; Hawkes, Evatt R.; Le, Minh Khoi; y Ikeda, Yuji (2018). A comparison of high-temperature reaction and soot processes of conventional diesel and methyl decanoate. *Fuel*, 226(April), 635–643. [A.3](#)
- Tuckett, Richard P. (2016). The Role of Atmospheric Gases. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition* (pp. 375–397). Elsevier. [1](#)
- Van Eck, N.J. y Waltman, L. (2017). Manual for VOSviewer versión 1.6.6. *CWTS Meaningful Metrics. Universiteit Leiden*, (October), 48. [\(document\)](#), [2.10](#), [2.1](#)
- Wang, Xin; Liu, Haifeng; Zheng, Zunqing; y Yao, Mingfa (2015). A skeletal mechanism of a biodiesel surrogate fuel for compression ignition engines. *Energy and Fuels*, 29(2), 1160–1171. [A.6](#)
- Wang, Xin; Yao, Mingfa; Li, Shanju; y Gu, Jingbo (2013). Experimental and modeling study of biodiesel surrogates combustion in a CI engine. *SAE Technical Papers*, 2. [A.8](#)

World Meteorological Organization (2017). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016*. Technical Report 13, World Meteorological Organization. [2.2](#)

Zhang, Hailong; Pereira, Ophélie; Legros, Guillaume; Iojoiu, Eduard Emil; Galvez, Maria Elena; Chen, Yaoqiang; y Da Costa, Patrick (2019a). Structure-reactivity study of model and Biodiesel soot in model DPF regeneration conditions. *Fuel*, 239(July 2018), 373–386. [A.2](#)

Zhang, Renlin; Pham, Phuong X.; Kook, Sanghoon; y Masri, Assaad R. (2019b). Influence of biodiesel carbon chain length on in-cylinder soot processes in a small bore optical diesel engine. *Fuel*, 235(November 2017), 1184–1194. [A.2](#)

Zhang, Yilong; Zhang, Renlin; Rao, Lingzhe; Kim, Dongchan; y Kook, Sanghoon (2017). The influence of a large methyl ester on in-flame soot particle structures in a small-bore diesel engine. *Fuel*, 194, 423–435. [A.5](#)

A | Anexo

Tabla A.1: Tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
I-Propanol-n-butanol-ethanol /diesel (Hu et al., 2020)	Diésel	Premixed laminar burner; jet stirred reactor	In-cylinder pressure; heat release rate; NOx and soot emissions	Computational singular perturbation; Reaction path analysis; DRGEPSA
SME; 90 % SME/ 10 % ethanol blends; 70 % SME/ 30 % ethanol blends (Cheng et al., 2020)	Diésel	Jet stirred reactor	Spray combustion; soot formation/ oxidation	Temperature sensitivity analysis
Ethylene; 25 % MB/ 75 % ethylene; 50 % MB/ 50 % ethylene; 25 % MC/ 75 % ethylene; 50 % MC/ 50 % ethylene (Jiang et al., 2020)	Diésel	IDF burner	Flame temperature; soot production; morphology and oxidation reactivity of soot particles	Transmission Electron Microscopy (TEM); thermocouple; HR-TEM; X-ray Diffraction; Thermo-gravimetric Analyzer

Tabla A.2: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
Methyl butanoate (Ren et al., 2010)	Diésel	Direct injection (DI) engine	In-cylinder pressure; heat release rate; pollutants formation	Computational Fluid Dynamics (CFD)
70 % (70 % n-decane/ 30 % α - methyl-naphthalene) / 30 % methyldecanoate; 93 % (70 % n-decane/ 30 % α - methyl-naphthalene) / 7 % methyldecanoate (% mol) (Zhang et al., 2019a)	Diésel	Co-flow diffusion burner; diesel engine	Soot oxidation reactivity	TPO; laser granulometry; HRTEM; XRD; Raman
(0 to 40 mol %) dibutyl ether (DBE)/ biodiesel (Gao et al., 2019)	Diésel	Coflow diffusion flames burner	Soot volume fraction distribution; chemical effects of DBE addition on the concentration of key species for soot inception and growth	Laser induced incandescence (LII)
Fatty acid methyl esters (FAME) (Zhang et al., 2019b)	Diésel	Single-cylinder, light-duty, optical diesel engine	Effects of biodiesel carbon chain length on the development of high-temperature flame and soot	Planar laser-induced fluorescence of OH (OH-PLIF) and laser-induced incandescence (soot-PLII)

Tabla A.3: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
Rapeseed oil methyl ester (RME); methyl oleate (MO); methyl decanoate (MD) (Bjørngen et al., 2019)	Diésel	Single-cylinder research engine	Soot production rate	High-speed diffuse back-illuminated extinction imaging system
Methyl decanoate (Su et al., 2018)	Diésel	Optically accessible single-cylinder light-duty common-rail diesel engine	High temperature flame structures; soot distributions	H-PLIF; PLII; line-of-sight integrated chemiluminescence imaging of cool-flame signals and electronically excited OH (OH*)
70 % n-decane/30 % α -methylnaphthalene/3 to 30 % (on molar basis) methylbutanoate (MB); 70 % n-decane/30 % α -methylnaphthalene/3 to 30 % (on molar basis) methyloctanoate (MO); 70 % n-decane/30 % α -methylnaphthalene/3 to 30 % (on molar basis) methyldecanoate (MD) (Abboud et al., 2018)	Diésel	Co-flow diffusion flame burner	Yield Sooting Index (sooting propensity)	LEM; elemental analysis (CHONS); TGA; Raman spectroscopy; Temperature Programmed Oxidation (TPO)

Tabla A.4: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
Methyl octanoate/0 to 50 % (mole fraction) n-butanol (Liu et al., 2018)	Diésel	Quartz tube flow reactor	Nanostructure and reactivity of carbon particles (soot)	LRTEM; HRTEM; XRD; TGA
50 %/50 % molar blend of n-decane and methyl octanoate (Lapuerta et al., 2017)	Diésel	Co-annular burner	Morphology of soot particles	TEM
Methyl butanoate (MB); ethyl butanoate (EB) (Gao et al., 2017a)	Diésel	Co-flow diffusion flame burner	Soot particle morphology evolution; soot oxidation reactivity; degree of disorder in soot structure	Thermophoretic sampling technique; TEM; thermogravimetric analysis; Raman spectroscopy analysis
Methyl butanoate (Mat-ti Maricq, 2011)	Diésel	Coflow burner	Soot formation; soot size distributions; soot composition; soot electrical charge	Differential mobility analysis; laser ablation particle mass spectrometry
Methyl decanoate (Gao et al., 2017b)	Diésel	Bunsen burner	Soot morphology; nanostructure evolution	Thermophoretic sampling technique; TEM analysis; HR-TEM

Tabla A.5: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
3 to 30 % (in mole %) of methyl decanoate (MD)/binary mixture of 70 % of n-decane and 30 % of a-methylnapht-halene (a-MN) (Lauga et al., 2017)	Diésel	Co-flow diffusion flame burner	Sooting propensities; oxidative reactivity of soot	LEM
Methyl decanoate (Zhang et al., 2017)	Diésel	Small-bore optical diesel engine	Soot morphology; nanoscale soot parameters such as carbon fringe length, tortuosity, and fringe-to-fringe separation distance	Thermophoretic sampling; TEM
N-heptane (Hawi et al., 2017)	Diésel	Single cylinder four stroke diesel engine	In-cylinder pressure profiles; heat release rate; Nox emission; soot and unburned hydrocarbon (UHC) emission	Computational Fluid Dynamics (CFD)

Tabla A.6: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
25 % methyl decanoate (MD)/25 % methyl-9-decenoate (MD9D)/50 % n-heptane (Mohan et al., 2015)	Diésel	Direct injection, four stroke, four cylinder inline, turbocharged engine	Nox emissions; soot emissions	CFD simulations
Methyl acetate; methyl propionate; methyl butanoate (Farooq et al., 2009)	Diésel	Shock tube	CO ₂ yield	Tunable diode laser absorption
50 % n-decane/ 50 % methyl-octanoate (molar) (Kholghy et al., 2015)	Diésel	Coannular burner	Soot formation; species concentrations	Laser extinction method; threepoint Abel inversion method
Methyl decanoate (Wang et al., 2015)	Diésel	Optical constant volume combustion chamber; shock tube; jet-stirred reactor	Soot measurements; ignition delays; mole fractions of the reactants and the intermediate species	KIVA code for 3-D biodiesel combustion simulation

Tabla A.7: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
2- methyltetrahydrofuran (2-MTHF), 70 % 2-MTHF and 30 % di-n-butylether (DnBE) by liquid volume (Kerschgens et al., 2015)	Diésel	Single-cylinder diesel engine	Combustion and pollutant formation	Computational fluid dynamics (CFD)
Methyl decanoate (Cheng et al., 2014)	Diésel	Optically accessible heavy-duty diesel engine	Combustion; emissions	Pressure-based and engine-out emissions measurements; exhaust LII; in-cylinder natural luminosity (NL); in-cylinder chemiluminescence (CL)
Methyl butanoate (Ren y Li, 2011)	Diésel	Direct-injection diesel engine	Effect of the biodiesel fuel injection temperature on the combustion; emissions characteristics	Three-dimensional simulation
Soybean biodiesel (Li et al., 2014)	Diésel	Diesel engine	NOx emissions	Computational fluid dynamics (CFD)

Tabla A.8: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
95 % (n-decane 70 % + α -methylnaphthalene 30 %)/5 % vegetable oil methyl ester (da Cruz et al., 2011)	Diésel	Optical single cylinder Diesel engine	Soot volume fraction (SVF)	CFD; PLII; LEM
Biodiesel from waste vegetable oils (Li et al., 2011)	Diésel	Premixed, flat-flame burner in the downward direction	Burning rate; flame size; sooting tendency	
Coconut methyl ester (CME); palm methyl ester (PME); soybean methyl ester (SME) (Ng et al., 2013)	Diésel	Light-duty diesel engine	Combustion characteristics; emissions formation processes	Computational fluid dynamics (CFD)
(10-100 %) rapeseed methyl ester (RME)/diesel (Lemaire et al., 2013)	Diésel	McKenna hybrid burner	Soot formation process in turbulent spray flames	LII; LIF
Soybean biodiesel; methyl decanoate; 20 % methyl decanoate/80 % n-heptane (Wang et al., 2013)	Diésel	Single-cylinder common-rail CI engine	Ignition delay; smoke emissions	AVL SESAM-FTIR; AVL 415S

Tabla A.9: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
Fatty acid esters (Feng et al., 2012)	Diésel	Counter-flow burner	Soot volume fractions; sooting propensity	Laser extinction method
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK); SPK plus naphthenic cut (50 % by volume); SPK plus hexanol (20 % by volume) (Saffaripour et al., 2011)	Jet Fuel	Coannular burner	Soot volume fraction; species concentration; temperature profiles	Laser extinction measurement method; gas chromatography; fine wire thermocouples
58 % n-decane; 33 % isooctane (i-C ₈ H ₁₈); 9 % n-propylcyclohexane (in mol %) (Saffaripour et al., 2014)	Jet Fuel	Coannular burner	Concentration of soot particles; size of soot particles; aggregate structure of soot particles	Laser extinction measurement; R-type thermocouple; TEM
70,8 % n-dodecane/29,2 % m-xylene; 70,8 % n-dodecane/29,2 % methylcyclohexane; 70,8 % n-dodecane/29,2 % 2,2,4-trimethylpentane; 70,8 % n-dodecane/29,2 % n-heptane (Cain et al., 2013)	Jet Fuel	Turboshaft engine	Operability; gaseous and particulate matter (PM) emissions; soot microstructure	TEM

Tabla A.10: Continuación tabla resumen artículos encontrados

Biocombustibles	Combustible convencional	Tipo de quemador	Variables medidas	Técnicas usadas
Fischer-Tropsch fuels (Riebl et al., 2017)	Jet Fuel	Jet engine combustors	Emission patterns of CO ₂ , H ₂ O, NO _x , CO, unburned hydrocarbons (soot)	Chemical kinetic reaction model
Kerosene/rapeseed oil methyl ester (RME) mixture (80/20, mol/-mol) (Dagaut y Gail, 2007)	Jet Fuel	Jet-stirred reactor	Kinetics of oxidation; formation of potential soot precursors	Probe sampling; on-line and off-line GC analyses
20 vol % of ethanol in isooctane (Storch et al., 2015)	Gasolina	Single cylinder optical engine based on a modified BMW/P-SA series-production direct injection engine with four valves per cylinder	Mixture formation; sooting combustion behavior	LII; LIF
(0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 85 %) ethanol/ TRF (Del Pecchia et al., 2020)	Gasolina	GDI engines	Laminar flame speed	CFD