

Estudio del comportamiento de la tensión superficial en mezclas de diésel con moléculas terpénicas: efecto de la estructura molecular, concentración y temperatura.

Lina Marcela Benavides Sánchez y Johan Andrey Ortega Rodríguez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director:

Duban Fabián García Navas

Doctor en Ingeniería Química

Codirector:

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos

Tutor:

Magín Lapuerta Amigo

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la fortaleza y sabiduría para superar cada reto que encontré en el camino. A mi papá, Elvis Benavides, cuyo esfuerzo, sacrificio y amor me han permitido llegar hasta donde estoy. A mi mamá, Alba Luz Sánchez, por su apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado con su amor y palabras de aliento.

A mi hermana, Mariana Vera, por ser mi confidente y compañera en cada paso de este proceso con sus consejos y su compañía. A mi hermano, Gerson Vera, por darme la fortaleza y el ánimo necesarios para continuar, y por ser un aliento en los momentos más desafiantes.

A mi pareja, Armando Arenas, por estar a mi lado en los momentos buenos y difíciles brindándome su amor y comprensión. A mi compañero de proyecto, Johan Ortega, por su amistad e inalcanzable dedicación sin los cuales este logro no habría sido posible. A mis amigos perdurables, quienes con su amistad y apoyo me ayudaron a mantenerme firme en los momentos más retadores.

Lina Marcela Benavides Sánchez.

Dedicatoria

A mis padres, Ruth Rodríguez y Wilson Ortega, cuyo amor y apoyo incondicional formaron la base de mi ser y me enseñaron el valor del sacrificio.

A mi hermano Santiago Ortega quien me acompañó y ayudó en este proceso.

A mi abuela Benilde, cuyo recuerdo vive en mi corazón.

A Lina Benavides por acompañarme y ser parte de este proyecto.

A los amigos que la vida me regaló en este camino.

Johan Andrey Ortega Rodríguez

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han sido fundamentales en la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, al profesor Duban García, nuestro director, por su guía, paciencia y apoyo constante durante todo el proceso. A los profesores Ronald Mercado y Magín Lapuerta, nuestros codirectores, por su valiosa colaboración, conocimiento y orientación en cada etapa del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y, en especial, a la Escuela de Ingeniería Química, por brindarnos las herramientas y el entorno académico necesario para nuestra formación profesional. Al laboratorio Grupo Recobro Mejorado y al grupo FIRST, por ofrecernos los recursos y el espacio para desarrollar parte importante de este trabajo.

Agradecemos también a la Universidad de Castilla-La Mancha por su colaboración y apoyo académico, y a Ecopetrol S.A., cuya contribución fue clave para el avance de esta investigación.

Tabla de contenido

Introducción	11	
1	Objetivos	13
1.1	Objetivo general	13
1.2	Objetivos específicos	13
2	Marco Teórico	13
2.1	Tensión superficial	13
2.2	Medición de la tensión superficial	14
2.3	Efecto de diversas variables en la tensión superficial	17
2.4	Análisis estadístico	19
3	Estado del arte	20
4	Metodología	23
4.1	Muestras	23
4.2	Equipos	25
4.3	Protocolos de medición	27
4.3.1	<i>Densidad</i>	27
4.3.2	<i>Tensión superficial</i>	27
4.4	Tratamiento de los resultados	28
5	Análisis de resultados	30
5.1	Tensión superficial de las sustancias	30
5.2	Tensión superficial de las mezclas	35
5.3	Efecto de interacciones de factores en la tensión superficial	37
6	Conclusiones	44
7	Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas		47
Apéndices		51

Lista de figuras

Figura 1. Diámetros de curvatura de la Ley Young Laplace _____	15
Figura 2. Estructura molecular de los principales terpenos _____	23
Figura 3. Tensión superficial experimental y de referencia a 25°C _____	31
Figura 4. Tensión superficial a 25°C según: a) número de carbonos y b) porcentaje de oxígeno _____	32
Figura 5. Tensión superficial a 25°C según: a) relación C/H y b) cantidad de insaturaciones _	34
Figura 6. Tensión superficial con variaciones en concentración y a temperaturas de: a) 25°C, b) 40°C y c) 60°C _____	35
Figura 7. Cubo factorial de análisis múltiple _____	37
Figura 8. Análisis del modelo: a) Análisis residual y b) Análisis de probabilidad normal ____	38
Figura 9. Pareto de efectos estandarizados _____	39
Figura 10. Influencia de factores simples: a) molécula, b) temperatura y c) concentración ____	40
Figura 11. Influencia de factores combinados: a) AB, b) AC y c) BC _____	41
Figura 12. Curvatura de puntos medios 3D para: a) Oxitrementina y b) Trementina _____	43
Figura 13. Curvatura de puntos medios 2D para: a) molécula, b) temperatura y c) concentración _____	44

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades de la trementina, oxitrementina y diésel _____ 23

Tabla 2. Factores y niveles para el análisis estadístico _____ 29

Lista de apéndices

Apéndice A. Sustancias usadas en la experimentación: 1) diésel, 2) acetona y 3) moléculas terpénicas _____	51
Apéndice B. Muestras de sustancias: 1) oxitrementina, 2) trementina y 3) mezclas _____	52
Apéndice C. Herramientas usadas para el lavado: 1) acetona y 2) vasos precipitados _____	52
Apéndice D. Equipos para medición de la densidad: 1) plancha de calentamiento, 2) balanza y 3) horno _____	53
Apéndice E. Instrumentos para la medición de la densidad: 1) termómetro, 2) picnómetro y 3) micropipeta _____	53
Apéndice F. Equipos para la medición de la tensión superficial: 1) OCA 25, 2) computador y 3) baño termostatzado _____	54
Apéndice G. Instrumentos para la medición de la tensión superficial. 1) jeringa y 2) aguja ____	54
Apéndice H. Datos técnicos del equipo OCA 25 _____	55
Apéndice I. Interfaz del software dpiMAX _____	56

Resumen

Título: Estudio del comportamiento de la tensión superficial en mezclas de diésel con moléculas terpénicas: efecto de la estructura molecular, concentración y temperatura*

Autor: Lina Marcela Benavides Sánchez, Johan Andrey Ortega Rodríguez**

Palabras clave: Tensión superficial, terpenos, diésel, temperatura, concentración.

Descripción:

El proyecto se enfocó en el estudio del comportamiento de la tensión superficial de moléculas terpénicas al ser afectadas por variaciones de temperatura y en contenido dentro de mezclas con diésel. Para ellos se analizan los efectos de la estructura molecular, la concentración y la temperatura en la tensión superficial. Esta evaluación se debe al reconocimiento de dichas moléculas como opciones prometedoras para su uso como aditivos en combustibles de motores de combustión interna, ya que sus propiedades pueden contribuir a disminuir las emisiones tales como el material particulado. El estudio se realizó mediante un plan de experimentación que incluyó la evaluación de moléculas como oxitrementina, trementina, α -pineno, β -pineno, limoneno, terpineno, nopol y terpineol, con variaciones en concentración y temperatura, seguido de un análisis estadístico basado en diseños experimentales factoriales, tanto 2^k como 2^k con puntos medios. Los resultados demuestran que la estructura molecular influye de manera considerable en la tensión superficial, ya que parámetros como la cantidad de carbonos, el contenido de oxígeno, la relación C/H y el número de insaturaciones, así como su posición en la molécula, afectan esta propiedad. Además, la comparación entre oxitrementina y trementina reveló que la oxitrementina genera menores variaciones en la tensión superficial de las mezclas, lo cual es favorable para aplicaciones de combustible al permitir las mismas estrategias de inyección en el motor que el combustible sin los aditivos. Finalmente, aunque todos los factores estudiados influyeron en la tensión superficial, la temperatura tiene un impacto sobresaliente en comparación a la concentración o la estructura molecular, siendo el factor predominante en las variaciones observadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico. Director: Duban Fabián García Navas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos.

Abstract

Title: Study of the behavior of surface tension in diesel mixtures with terpene molecules: effect of molecular structure, concentration and temperature*

Author(s): Lina Marcela Benavides Sánchez, Johan Andrey Ortega Rodríguez**

Keywords: Surface tension, terpenes, diesel, temperature, concentration.

Description:

The project focused on the study of the behavior of the surface tension of terpene molecules when affected by variations in temperature and content within mixtures with diesel. For this purpose, the effects of molecular structure, concentration and temperature on surface tension are analyzed. This evaluation is due to the recognition of these molecules as promising options for use as additives in internal combustion engine fuels, since their properties can contribute to reducing emissions such as particulate matter. The study was carried out using an experimental plan that included the evaluation of molecules such as oxyturpentine, turpentine, α -pinene, β -pinene, limonene, terpinene, nopol and terpineol, with variations in concentration and temperature, followed by a statistical analysis based on factorial experimental designs, both 2^k and 2^k with midpoints. The results show that the molecular structure considerably influences the surface tension, since parameters such as the amount of carbons, the oxygen content, the C/H ratio and the number of unsaturations, as well as their position in the molecule, affect this property. In addition, the comparison between oxyturpentine and turpentine revealed that oxyturpentine generates smaller variations in the surface tension of the mixtures, which is favorable for fuel applications by allowing the same injection strategies in the engine as the fuel without the additives. Finally, although all the factors studied influenced surface tension, temperature has a notable impact compared to concentration or molecular structure, being the predominant factor in the observed variations.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Academic program.

Director: Duban Fabián García Navas. PhD in Chemical Engineering.

Co-director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. PhD in Product and Process Engineering.

Introducción

El crecimiento acelerado de la población global y los avances tecnológicos han generado un aumento exponencial en la demanda energética, siendo los combustibles fósiles la fuente de energía más utilizada a nivel mundial (Yang et al., 2021). El uso excesivo de estas fuentes ha incrementado en 2,7% anual las emisiones globales derivadas de carbono durante la última década (Curtin et al., 2019). En Colombia, el panorama energético es más favorable gracias al desarrollo en la generación de energía a partir de fuentes hídricas. (González Celis et al., 2020) Sin embargo, este solo constituye el 11% de la matriz energética del país frente a un 48% para derivados del petróleo, de los cuales el 14% es destinado al uso por vehículos de carga, generando alrededor de 7 Gt CO_{2-eq} emitidas a la atmósfera como resultado de su combustión (Corredor, 2018).

Debido a la alta dependencia nacional por los combustibles fósiles, es crucial explorar nuevas alternativas para mejorar su eficiencia, buscando una reducción en la emisión de CO₂ equivalente. En este contexto, el uso de aditivos en los combustibles parece tener relevancia como una alternativa favorable. El diésel es el combustible más usado comercialmente a nivel nacional y global, sin embargo, presenta altos índices de contaminación. Por consiguiente, se ha despertado un interés en investigar el uso de diversos aditivos que permitan reducir sus emisiones, donde se han obtenido mejoras significativas en términos de material particulado, hollín, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono (Guru Karakaya et al., 2002). Esto se logra mediante una reestructuración molecular en la mezcla aditivo-diésel, la cual ocasiona variaciones en diferentes propiedades fisicoquímicas y termodinámicas como lo son la densidad y la tensión superficial.

Entre las opciones más prometedoras se encuentran las mezclas de combustibles como el diésel con componentes livianos tales como alcoholes o sustancias de origen terpénico. Específicamente, algunos terpenos son de origen renovable y se pueden obtener a partir de

materiales de desecho como los de la industria resinera, permitiendo obtener biocombustibles con un potencial notable en términos de desempeño energético y emisiones ambientales.

Con estos componentes renovables se busca modificar la calidad del proceso de inyección y mezcla con el aire admitido en motores a partir de la modificación de las propiedades del diésel, tales como la volatilidad y la tensión superficial. Precisamente, la tensión superficial puede influenciar el tamaño de las partículas durante la atomización del combustible, lo que permite un mayor contacto con el aire y, en consecuencia, una combustión más eficiente. Dicha reestructuración no es fija, obteniéndose diferentes estructuras de combustible al modificar variables como temperatura, concentración y el tipo de molécula empleada (Ejim, 2008).

Por consiguiente, este trabajo presenta como objetivo estudiar el comportamiento de la tensión superficial en mezclas de diésel con moléculas terpénicas, analizando los efectos de la estructura molecular, la concentración y la temperatura. Con base en ello, se precisa analizar ¿Qué comportamiento presenta la tensión superficial de las mezclas de combustible diésel con moléculas terpénicas a diferentes composiciones y temperaturas?

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento de la tensión superficial en mezclas de diésel con moléculas terpénicas, analizando los efectos de la estructura molecular, la concentración y la temperatura.

1.2 Objetivos específicos

1. Establecer las condiciones experimentales necesarias para la medición de la tensión superficial de terpenos y sus mezclas con combustible diésel.
2. Analizar el efecto de la estructura molecular de diferentes terpenos en la tensión superficial mediante mediciones y análisis estadístico.
3. Evaluar el efecto en la tensión superficial de la concentración de mezclas de terpenos con combustible diésel a través de ensayos experimentales.
4. Determinar el efecto de la temperatura en sistemas terpenos/diésel sobre la tensión superficial a partir de mediciones.

2 Marco Teórico

2.1 Tensión superficial

El fenómeno de la tensión superficial se manifiesta en la configuración de gotas esféricas, donde las moléculas líquidas se comportan como estructuras elásticas sometidas a tensiones. Esta se mide mediante la cuantificación de la fuerza de atracción paralela a la superficie, derivada de las fuerzas de interacción molecular (σ en N/m). A una escala microscópica, el equilibrio entre fuerzas asimétricas de atracción en la superficie y repulsión en el interior minimiza el área superficial, dando lugar a geometrías esféricas. Por consiguiente, el análisis del comportamiento de esta propiedad implica la consideración de factores como presión, temperatura, presencia de impurezas y tipo de moléculas involucradas en las sustancias (Çengel & Cimbala, n.d.).

2.2 Medición de la tensión superficial

En general, para la medición de la tensión superficial se siguen tres variables como lo son la fuerza, la presión y la deformación. Para la fuerza se tienen en cuenta dos métodos, el de placa y el del anillo, ambos relacionando la tensión superficial con la fuerza empleada en la extracción de un dispositivo, el cual varía dependiendo del método escogido (Salager & Anton, 2005).

El método de fuerza en placa, conocido como método de Whihelmy, implica la inserción de una placa de platino en la muestra, retirándola de tal manera queden en contacto mínimo. Generalmente se utiliza una placa de 0,1 mm de espesor en relación con su longitud y un ángulo de contacto entre el líquido y la placa tendiente a cero para maximizar la fuerza aplicada (ver Ecuación 1). Para el método del anillo, conocido también como el método de Nöuy, la principal diferencia radica en el uso de un alambre en forma de anillo de platino con iridio (ver Ecuación 2) en vez de la placa (Salager & Anton, 2005).

$$\sigma = \frac{F}{2L} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\sigma = f \frac{F}{2 \times 2\pi r} = f \frac{F}{4\pi r} \quad \text{Ecuación 2}$$

En cuanto a la medición indirecta de la tensión superficial mediante la presión, los métodos están basados en el concepto de capilaridad de Laplace y en la presión de burbuja. En estas técnicas se aplican fuerzas hidrostáticas y complementarias en determinado punto de un sistema bifásico para calcular la tensión superficial.

En el método de efecto capilar se analiza el ascenso/descenso de un líquido dentro de un tubo capilar determinado por un ángulo de contacto y la superficie sólida que, según sus fuerzas de cohesión, adhesión y sus fuerzas hidrostáticas, se permite establecer una relación entre la altura

del tubo capilar y la tensión superficial (ver Ecuación 3). De la misma forma, el método de presión de burbuja parte del principio de ascenso por capilaridad, realizando una inserción del capilar en la muestra formando una burbuja que debe superar las presiones del capilar e hidrostática. Dicha presión es usada en la ecuación de Laplace (ver Ecuación 4) (Salager & Anton, 2005).

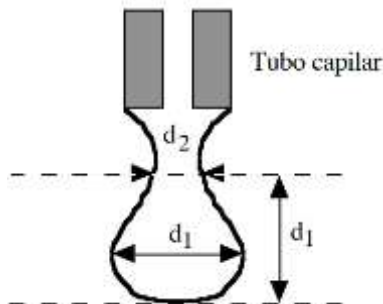
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \cos \theta \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\sigma = \frac{Rg}{2} (\rho_m h_m - \rho h) \quad \text{Ecuación 4}$$

Por último, se encuentran los métodos basados en la deformación y se fundamentan en la ley de Young-Laplace, de la cual se desglosan los tres métodos principales: el de gota giratoria, el de gota colgada y el de gota pendiente. Los principales parámetros de deformación de la ley de Young-Laplace se muestran en la Figura 1.

Figura 1.

Diámetros de curvatura de la ley Young Laplace



La ley relaciona dos balances de energía, en los cuales se encuentra la diferencia de fases en el menisco de un tubo capilar con el líquido y la formación de una burbuja con variación en su radio, que a su vez incluye la diferencia de presiones en fase líquida y gaseosa con la tensión superficial y la curvatura de una superficie (ver Ecuaciones 5-6). Esta última se define como el

inverso del radio máximo en una figura tridimensional el cual puede presentar dos máximos ortogonales o solo uno (Viades-Trejo & Gracia-Fadrique, 2007).

$$\Delta P = \sigma H \quad \text{Ecuación 5}$$

$$H = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{Ecuación 6}$$

El método de la gota giratoria, empleado para tensiones superficiales bajas, requiere introducir una gota de un líquido menos denso en un tubo saturado de otro líquido más denso para ser sometido a una rotación controlada (Viades-Trejo & Gracia-Fadrique, 2007). Allí, una fuerza centrífuga alarga la gota adoptando una forma tubular, momento en donde se presenta un equilibrio de fuerzas (H. Hu Howard & D. Joseph Daniel, 1993). Para la medición la gota alargada debe cumplir con la relación $L \geq 4D$ (ver Ecuación 7) (Elmendorp & De Vos, 1986).

$$\sigma = \frac{1}{4} \Delta \rho \omega^2 r^3 \quad \text{Ecuación 7}$$

El método de la gota colgada se basa en la disposición de una gota sobre una superficie sólida con el fin de analizar la diferencia de densidades en el medio y relacionar el radio con la altura de la gota. Cuando estas variables no tienen dependencia (i.e. altas alturas), el radio no permite que la altura presente una tendencia hacia cero y los cálculos de la tensión superficial se limitan a una relación directa (ver Ecuación 8) (Salager & Anton, 2005).

$$\sigma = \frac{1}{2} \Delta \rho g h^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

Finalmente, el método de la gota pendiente se basa en el comportamiento de una gota que cuelga de un tubo capilar extendiéndose bajo su propio peso por efectos gravitacionales. Los radios necesarios en las mediciones se posicionan de manera horizontal en relación con el tubo capilar,

donde se forma una gota colgante inicialmente y luego se extiende verticalmente. La relación entre el diámetro máximo de la gota y el diámetro de la gota extendida proporciona las medidas necesarias para los cálculos de la tensión superficial (ver Ecuación 9) (Salager & Anton, 2005).

$$\sigma = \frac{1}{2} \Delta\rho g h^2 \left[1 + 0,61 \frac{h}{r} \left(1 - \frac{4h^2}{r^2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

2.3 Efecto de diversas variables en la tensión superficial

Es importante tener en cuenta que la medición de la tensión superficial podrá verse afectada según propiedades específicas de la sustancia y de las condiciones ambientales en las que se esté llevando a cabo la medición. En efecto, la tensión superficial está influenciada por la estructura molecular y la concentración de las mezclas, siendo estas encargadas de determinar la forma de interacción molecular, ocasionando variaciones en propiedades fisicoquímicas propias de la mezcla. Por otro lado, factores ambientales como la temperatura y la humedad pueden inducir variaciones significativas tanto en dichas propiedades como en la misma tensión superficial (J. A. D. García et al., 2012).

La estructura molecular influye en la tensión superficial según el tamaño de moléculas y las fuerzas intermoleculares presentes entre las mismas. Las fuertes interacciones en las moléculas se ven reflejadas en un alto valor de tensión superficial, mientras que las interacciones más débiles muestran valores bajos de la misma. Según Levin, la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos difieren su tensión superficial entre 15 y 50 mN/m en los cuales se encuentra incluidas las moléculas a trabajar en este proyecto junto al diésel. Además, se resalta que en los casos de moléculas grandes la sumatoria de fuerzas de Van Der Waals o London pueden superar a las fuerzas por enlaces de hidrógeno (Patiño camino, 2021).

Las fuerzas intermoleculares juegan un papel importante dentro de la tensión superficial, a pesar de no afectarla directamente y son clasificadas en tres categorías. La primera de ellas son las fuerzas de Van Der Waals, que representan las interacciones entre moleculares no polares que se crean a partir de fluctuaciones momentáneas en la distribución de electrones, razón por la cual se consideran las más débiles. Por otro lado, las fuerzas de enlace de hidrógeno son consideradas más fuertes, ya que las interacciones ocurren entre moléculas de hidrógeno unidos a otros átomos electronegativos como oxígeno o nitrógeno. Por último, las fuerzas dipolo–dipolo son interacciones entre moléculas polares en las cuales los extremos opuestos son atraídos entre sí. Todas ellas afectan tanto las sustancias puras como las mezclas (Chang & Goldsby, 2013).

Otro factor importante que afecta la tensión superficial es la concentración, aunque también depende del tipo de mezcla. A pesar de que tanto el diésel como las fuentes naturales de las sustancias terpénicas son mezclas complejas, en este caso se asumirán las mezclas de ellas como mezclas binarias, es decir, las mezclas compuestas por la fuente terpénica y el diésel se representan mediante el comportamiento de estos dos conglomerados.

Para analizar la concentración, en las mezclas se deben tener en cuenta los efectos de la polaridad, debido a que estos permiten determinar si las fuerzas moleculares son afectadas por el mezclado. Por ejemplo, en el caso de las mezclas únicamente no polares (i.e., de fuerzas de Van Der Waals) las fuerzas entre moléculas son comparables a las de los líquidos puros, de la misma manera que las mezclas de líquidos no polares (i.e., de fuerzas dipolo–dipolo o fuerzas de enlace de hidrógeno) reflejan tensiones superficiales similares o incluso mayores. En cambio, las mezclas no semejantes (i.e., polar junto con no–polar) disminuyen las fuerzas de cohesión en la superficie, lo que afecta negativamente la tensión superficial (Chang & Goldsby, 2013).

En cuanto a la mezcla de moléculas terpénicas y diésel, se espera que especies como el α -pineno, β -pineno, limoneno, terpineno, nopol y terpineol modifiquen el comportamiento del diésel. En efecto, estas moléculas comúnmente encontradas en aceites esenciales de plantas y resinas poseen estructuras que incluyen múltiples unidades de isopreno (lo que les otorga una amplia gama de propiedades fisicoquímicas) que pueden ser capaces de alterar la cohesión del diésel y así su tensión superficial (Meylemans et al., 2012).

Por último, la temperatura también influye sustancialmente la medición de la tensión superficial, pues a medida que la temperatura aumenta se genera un incremento en la energía cinética de las moléculas. Este aumento provoca una variación en las fuerzas intermoleculares (i.e., en las fuerzas de Van Der Waals, enlaces dipolo-dipolo y de enlace de hidrógeno), que son las responsables de las fuerzas de cohesión entre las moléculas y la superficie del líquido ocasionando que la tensión superficial de la sustancia tienda a disminuir (Birdi, 2008).

2.4 Análisis estadístico

A partir de factores como la temperatura, composición y tipo de molécula se establecen condiciones experimentales controladas para el estudio del efecto sobre la tensión superficial. Estas deben tener un rango adecuado y dadas las variaciones que pueden influenciar la tensión superficial, se propone el uso de un diseño experimental que permita el tratamiento de los datos recolectados en los múltiples sistemas.

El control de los factores en la variación del experimento es primordial para lograr identificar y cuantificar los efectos de cada uno de ellos sobre la variable de estudio y sobre la variabilidad propia del experimento. Existen múltiples diseños experimentales que permiten realizar un análisis estadístico robusto a partir de una muestra experimental relativamente pequeña. En este caso, se

usa un diseño experimental factorial (ver Ecuación 10), que permite estimar los efectos principales de las variables y detectar las posibles interacciones entre las mismas, optimizando los recursos al requerir una cantidad de muestra apropiada para el análisis y permitiendo el uso de parámetros estadísticos para realizar predicciones y efectos entre variables (“Diseño de Experimentos Montgomery,” 2005).

$$\prod_{i=1; j=1}^{n; r} \Psi_i^{k_j} \quad \text{Ecuación 10}$$

3 Estado del arte

La aplicación de componentes aditivos en combustibles ha desempeñado un papel significativo en la optimización de rendimientos y eficiencias energéticas de los procesos de combustión, donde se buscan nuevas alternativas renovables apropiadas para el desafío actual de la energía para el transporte. Particularmente, las moléculas terpénicas se convirtieron en un blanco de investigación desde hace unas tres décadas debido a que contienen algunas propiedades similares a los combustibles convencionales, lo que facilita su uso, mejorando inclusive el desempeño en la combustión al mismo tiempo que provienen de fuentes renovables (Schenkel et al., n.d.).

Las investigaciones del efecto de las sustancias terpénicas en combustibles convencionales se basan en el análisis de la influencia de la concentración de dichas sustancias en combustibles convencionales, por ejemplo, en sus mezclas con diésel, y en el análisis del desempeño del motor y las emisiones al usar dichas mezclas.

En efecto, algunos autores han reportado el efecto de los terpenos en propiedades como la viscosidad, la densidad, en número de cetano y la capacidad calorífica de combustibles. Por

ejemplo, Meyleman muestra como el limoneno, el β -pineno o la trementina presentan un bajo punto de congelación, sugiriendo que pueden ser usados en mezclas de combustibles de aviación (Meylemans et al., 2012). Por otro lado, Pahima *et. al.* muestran que los terpenos utilizados coinciden en el punto de ceniza, punto de ebullición y densidad con los del biodiésel y diésel, a la vez que presentan mayor energía específica (Pahima et al., 2019). A su vez, Tracy y Chen muestran que la presencia de algunos monoterpenos hidrogenados en diésel (>10%) presenta una disminución en el punto de enturbiamiento y en la viscosidad de la mezcla (Tracy et al., 2009).

Adicionalmente, la mezcla de aceite de pino (compuesto principalmente por trementina) y diésel posee propiedades como viscosidad, punto de inflamación y punto de ebullición menores a las del diésel, al mismo tiempo que su poder calorífico es comparable (Vallinayagam et al., 2014). En adición, las mezclas mayores a un 30% de aceite de trementina producen una alta tasa neta de liberación de calor en comparación al diésel, mientras también se observan cambios en la densidad que pueden afectar la ignición (Anand, Saravanan, and Srinivasan 2010).

En cuanto a los efectos en el desempeño del motor, Anand encontró una menor producción de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (UHC), óxidos de nitrógeno (NO_x), hollín y material particulado (PM) al mezclar el diésel con 30% de aceite de trementina (Anand, Saravanan, and Srinivasan 2010). Adicionalmente, las mezclas volumétricas de 50% diésel y 50% aceite de pino evidencian una disminución de 45.9%, 32.4% y 41.5% en las emisiones de CO, UHC y PM, respectivamente (Vallinayagam et al., 2014). Por otra parte, Bulkus *et. al.* muestran que la adición de un 5% de trementina al diésel reduce el hollín en el escape en un 10% y también disminuye el consumo específico del combustible, debido a la evaporación y combustión eficaz de las partículas de la mezcla (Butkus et al., 2007).

En todos estos estudios no se ha indagado directamente sobre el efecto de las sustancias usadas como aditivo en la tensión superficial del combustible. Esta propiedad puede tener un efecto importante sobre la combustión, particularmente si se analiza la etapa atomización del combustible previa a la mezcla con aire para la combustión.

De hecho, Wagner afirma que los componentes de los combustibles presentes en la gasolina y el diésel se ven influenciados por la presencia de otros tipos de moléculas como los terpenos, modificando particularmente la tensión superficial. Así, en la inyección del combustible, un paso fundamental antes de la ignición en motores de combustión interna y donde se regula la cantidad y dispersión del combustible en la cámara de combustión, la tensión superficial del combustible es clave. Esta tensión está relacionada con la resistencia de su superficie a la ruptura, lo que afecta directamente la pulverización de la sustancia durante la inyección. Por ejemplo, una menor tensión superficial favorece la formación de gotas más finas, impactando la calidad de la mezcla aire-combustible. Posteriormente, el aumento de la temperatura durante la combustión conduce a la degradación térmica del combustible, que para gotas fina se facilita su ignición (Wagner et al., 2019).

Por otra parte, Lee *et. al.* concluyen que una menor tensión superficial favorece la atomización del combustible, aumentando el área de contacto entre éste y el oxígeno. Consecuentemente, el incremento en la atomización del combustible conlleva a una reducción de materiales particulados generados en el motor (Lee et al., 2002).

Finalmente, en la combustión dentro de un motor se derivan variaciones importantes en la temperatura, por lo que las propiedades del combustible son alteradas, afectando a su vez la tensión superficial. Esto indica que el efecto de la temperatura debe ser indagado al analizar la

tensión superficial de los combustibles. Por ejemplo, Puchana concluye que un aumento en la temperatura provoca la disminución en la tensión superficial de algunas soluciones (Johana & Rosero, 2013). Por otro lado, se realizaron mediciones de tensión superficial de biodiesel y gasoil con mezclas de aceites vegetales, concluyendo que existe una relación inversa con la temperatura. De la misma forma, la tendencia de biodiesel es similar al de gasoil, con valores ligeramente menores debido a cambios de concentración y aditivos (Schenkel et al. 2005b).

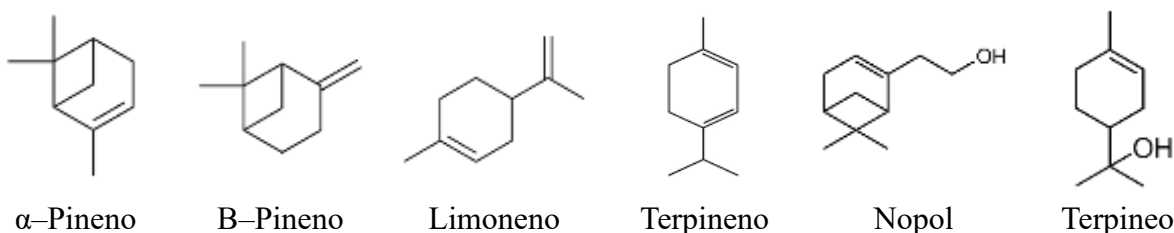
4 Metodología

4.1 Muestras

Las muestras usadas para el estudio son sustancias en grado reactivo adquiridas de Sigma-Aldrich, como α -pineno (98%), β -pineno (99%), limoneno (97%), terpineno (97%), nopol (98%) y terpineol de isómeros anhídridos, cuya composición es en masa (ver Apéndice A). Las estructuras moleculares de estas sustancias se muestran en la Figura 2.

Figura 2.

Estructura molecular de los principales terpenos



Adicionalmente, se usaron muestras de diésel sin aditivos suministrado por Ecopetrol S.A.

(Refinería de Barrancabermeja, Colombia), trementina adquirida de Resinas Naturales S.L. (Cuellar, España) y oxitrementina sintetizada en trabajos anteriores (D. García, Bustamante, et al., 2020; D. García, Ramos, et al., 2020a). Algunas de sus propiedades se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.*Propiedades de la trementina, oxitrementina y diésel*

Propiedad	Diésel	Oxitrementina	Trementina
Fórmula molecular media	$C_{15}H_{27.6}$	$C_{10.4}H_{16.9}O_{0.5}$	$C_{10}H_{16}$
Contenido de C [% peso]	86.1	83.7	88.2
Contenido de H [% peso]	13.9	11.4	11.8
Contenido de O [% peso]	0.0	4.9	0.0
Peso molecular [kg/kmol]	208.6	149.3	136
Relación estequiométrica (aire/combustible)	14.51	13.30	ND
Densidad [kg/m ³]	829	913	860 – 900
Viscosidad cinemática [cSt]	2.5	3.5	2.5
Lubricidad (diámetro de desgaste) [μm]	443	302	ND
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	42.9	39.7	44.4
Poder calorífico inferior [MJ/l]	35.6	36.2	ND
Numero de cetano derivado	64.4	19.8	ND
Punto de nube [°C]	-22.6	-35.8	38
Punto de fluidez [°C]	-19.6	-94.8	ND
Punto de obstrucción del filtro frio [°C]	-22.6	-36	ND
Punto de cristalización [°C]	-28.2	ND	ND
Punto de inflamabilidad [°C]	79.5	37	38
Presión de vapor [kPa]	0	2.7	<1
Punto de humo [mm]	22.3	33.33	ND

Nota: Adaptado de (D. García, Ramos, et al., 2020b)

Adicionalmente, se realizaron mezclas de diésel-trementina y diésel-oxitrementina en concentraciones de 2.5%, 5%, 10%, 15%, 20%, 50% y 80% (porcentajes en volumen). Las cantidades fueron ajustadas a rangos de volúmenes para ser aforados en balones volumétricos de 10 ml, usando micropipetas Transferpette modelo BRAND (1000μl y 10ml) (ver Apéndice B).

El protocolo de medición inicia con una fase de lavado. Para la manipulación de todas las sustancias se usaron vasos de precipitado de 50 ml los cuales se limpiaron previamente con agua y jabón, seguido de un enjuague con acetona de concentración 99,9% (adquirido de SUQUIN S.A.S.); este proceso se repitió siete veces en cada ensayo (ver Apéndice C).

4.2 Equipos

El proceso de medición se llevó a cabo en el laboratorio del Grupo de Recobro Mejorado de la Universidad Industrial de Santander (sede de Guatiguará). Allí se contó con un picnómetro LMS de 5 ml y una balanza analítica electrónica digital AGROTECH (capacidad de 0,1–2000 g). Para el ajuste de la temperatura se utilizó una placa calefactora de cerámica AREC 7 (VELP SCIENTIFICA) equipada con un agitador magnético (capacidad volumétrica de 15 l, rango de velocidad de agitación de 50– 1500 rpm y temperatura <550°C). Por otra parte, para asegurar estabilidad de la temperatura de las muestras se usó un horno de convección por gravedad ThermoFisher Heratherm OGS60, el cual también fue usado para el secado de los materiales (ver características de la placa y el horno en los Apéndices D–E).

Por otra parte, para la medición de la tensión superficial se usó el método de la gota pendiente dada su rapidez, desempeño y resolución en los rangos de trabajo y con muy poca muestra, características adecuadas para las muestras del estudio (i.e., diésel y terpenos). Además, el equipo usado (OCA 25 de DataPhysics Instruments GmbH) proporciona una buena estabilización en la formación de la gota para beneficio de la medición de la curvatura que contribuye a la exactitud de la medición. El equipo cuenta con cuatro partes principales, a saber: plataforma de muestras, cámara de alta resolución, sistema de dosificación y baño termostático. La plataforma de muestras cuenta con un sistema para ajustar su posición en tres direcciones mediante ejes de precisión con volante, lo que le permite el montaje de accesorios como cámaras ambientales, termostatos, unidades de posicionamiento y retención de muestras.

El equipo cuenta con una cámara de alto rendimiento que permite un aumento de seis veces, enfoque fino continuo integrado y un ángulo de observación modificable. Además, incluye un

sistema de medición de video, actualizable hasta con 3000 fotogramas por segundo e iluminación LED con intensidad modificable mediante el software dpiMAX (ver Apéndices F–G).

Para la dosificación de líquidos se pueden usar cuatro sistemas diferentes de inyección: el sistema manual simple y doble (SD-DM y DD-DM, respectivamente), el sistema electrónico directo múltiple (DDE/x) y el sistema de dosificación de nanolitros. Este último permite generar gotas ultra pequeñas sin ser un problema para la medición, gracias a la alta resolución óptica de la cámara, el cual fue seleccionado para el estudio.

Finalmente, se cuenta con un baño termostatzado que permite regular la temperatura en el sistema de dosificación del líquido, ofreciendo la posibilidad de mediciones en un rango operable entre 25°C y 70°C. El límite inferior está dado por el ambiente, mientras que el superior corresponde a la temperatura permitida por el sistema de transporte de fluido (ver Apéndice E–F).

En relación con las especificaciones técnicas del equipo, en el Apéndice H se incluyen las dimensiones máximas de la muestra, la plataforma de muestras, el rango de recorrido de la muestra, la precisión del sistema de video, los rangos de medición de las tensiones superficiales, los pesos máximos de la muestra, los cambios de visión y otros datos técnicos que ayudan a soportar la elección del instrumento para las mediciones del presente estudio. Adicionalmente, el equipo cuenta con conexión a ordenador, el cual tiene integrado el software dpiMAX (ver Apéndice I), que guía al operador en la medición, realiza los cálculos a partir de la Ley de Young-Laplace y permite observar de forma inmediata las mediciones. Dicho software requiere del registro de información de la muestra como la densidad (medida experimentalmente para cada muestra).

4.3 Protocolos de medición

4.3.1 Densidad

La densidad debe medirse previamente a la medición de la tensión superficial, puesto que esta es un parámetro de entrada. Esta medición se realizó bajo un esquema cíclico que consta de la preparación de la muestra, el lavado y secado de los materiales (incluyendo el del picnómetro), el ajuste de la temperatura y la medición. El secado de los materiales se realiza en el horno durante 10 minutos a 65°C, previamente impregnados con acetona para facilitar dicho proceso.

El picnómetro se pesó en seco, posteriormente se llenó con la muestra y se adecuó la temperatura a los valores de interés (i.e., 40°C y 60°C) en la plancha y/o dentro del horno. La temperatura fue monitoreada con la ayuda de un termómetro. Finalmente, el picnómetro se llevó a la balanza para registrar el peso del recipiente completamente lleno. La diferencia de los pesos permite determinar la densidad (ver Ecuación 11). Este procedimiento fue realizado para cada una de las muestras puras y mezclas a diferentes concentraciones y con variaciones de temperatura.

$$\rho = \frac{G_{\text{picnometro lleno}} - G_{\text{picnometro vacio}}}{V_{\text{picnometro}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

4.3.2 Tensión superficial

Para la medición de la tensión superficial se utilizó una jeringa de precisión DS 500/GT de 500 µl hermética a los gases de DataPhysics instruments y una jeringa dosificadora SNS 050/026 de la misma marca con diámetro interno y externo de 0.26 mm y 0.50 mm, respectivamente. El protocolo de medición inicia con el montaje de la jeringa y la aguja, asegurándose de que ambos componentes estuvieran correctamente ensamblados. A continuación, se procedió al lavado de la jeringa mediante llenados y vaciados repetidos en tres ocasiones con acetona. Posteriormente, se repitió el mismo procedimiento utilizando la muestra, purgando el sistema para garantizar que no

hubiera contaminantes que puedan afectar los resultados. Posteriormente, se realiza el llenado y montaje de la jeringa en el sistema de dosificación, esperando ~10 min para que la muestra alcance la temperatura requerida, al tiempo que se realiza la configuración del software.

Finalmente, se realiza la dosificación de la muestra para la formación y evaluación de las gotas, realizando tres repeticiones, para analizar tres gotas diferentes, permitiendo incluir la variabilidad del ensayo. Finalmente, se extrajeron los datos proporcionados por el software, que incluyeron la tensión superficial, la temperatura de medición y el volumen de cada gota.

4.4 Tratamiento de los resultados

Se llevaron a cabo tres procedimientos que incluyen el análisis de sustancias puras, la evaluación del efecto de la concentración (valores de concentración a diferente temperatura) y un estudio de efectos múltiples e interacciones de los principales factores (concentración, temperatura y estructura molecular). Para los dos primeros casos se llevó a cabo un análisis de varianza de un factor, permitiendo descomponer la variabilidad total de los datos en componentes asociados a diferentes factores y subgrupos. Primero, se agruparon los datos en función de los niveles de los factores relevantes (análisis de sustancias puras o análisis de concentraciones) y se dividen en subgrupos. Luego, se compararon las variaciones mediante el análisis de varianza, identificando posibles efectos significativos sobre la tensión superficial. En esta evaluación se busca descifrar patrones y tendencias para interpretar la influencia de los factores en la respuesta.

Posteriormente, para el análisis de efectos múltiples se realizó un diseño factorial 2^3 que permite estudiar simultáneamente de tres factores, cada uno con dos niveles. Allí se evaluó el efecto del tipo de molécula en la mezcla (oxitrementina o trementina dentro del diésel), la temperatura (25°C o 60°C) y la concentración (5% o 20%v/v). Estos rangos se escogieron por la

pertinencia de sus valores en posibles aplicaciones reales en el campo de los combustibles. Por ejemplo, se ha reportado que los terpenos pueden ser usados hasta 20% en combustible diésel sin cambios en el motor (Ballesteros et al., 2020).

Tabla 2.

Factores y niveles para el análisis estadístico

Molécula	Concentración [%v/v]	Temperatura [°C]
Oxitrementina	5	25
		60
	20	25
		60
Trementina	5	25
		60
	20	25
		60

El diseño factorial consideró las ocho posibles combinaciones de niveles y factores, permitiendo estimar las influencias de cada factor sobre la tensión superficial y sus interacciones. En efecto, se revisó la influencia de un factor actuando sobre los otros, identificando interacciones directas entre pares. Adicionalmente, se realizó un análisis de varianza para determinar si estas interacciones son significativas, buscando comprobar que la variación no es atribuida a errores en las mediciones, incluyendo un intervalo de confianza 5% como margen de error para efectos ocasionados por error manual en la medición (“Diseño de Experimentos Montgomery,” 2005)

Finalmente, se identificaron los factores más influyentes y las combinaciones en las que estos se ven más afectados a partir de las magnitudes de los efectos del modelo estadístico. Además, se obtuvo el modelo de regresión que describe la variación de la tensión superficial, lo que permite hacer estimaciones en función de los niveles establecidos para cada factor, como se observa en la Ecuación 12.

$$Y = \mu + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i<j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i<j<l} \beta_{ijl} X_i X_j X_l + \dots + \beta_{12\dots k} X_1 X_2 \dots X_k + \varepsilon \quad \text{Ecuación 12}$$

5 Análisis de resultados

5.1 Tensión superficial de las sustancias

El análisis de la tensión superficial de las sustancias puras (i.e., sin mezclarse con otras sustancias ni disolventes) se realiza mediante las mediciones experimentalmente de la propiedad y su comparación con valores de referencia tomados de literatura. Además, se analizan los resultados según la estructura molecular y su efecto en la tensión superficial. Dicho análisis se basa en variables como el porcentaje de oxígeno, la relación carbono-hidrógeno (C/H), la cantidad de insaturaciones (o dobles enlaces) y el tamaño molecular (a partir del número de carbonos).

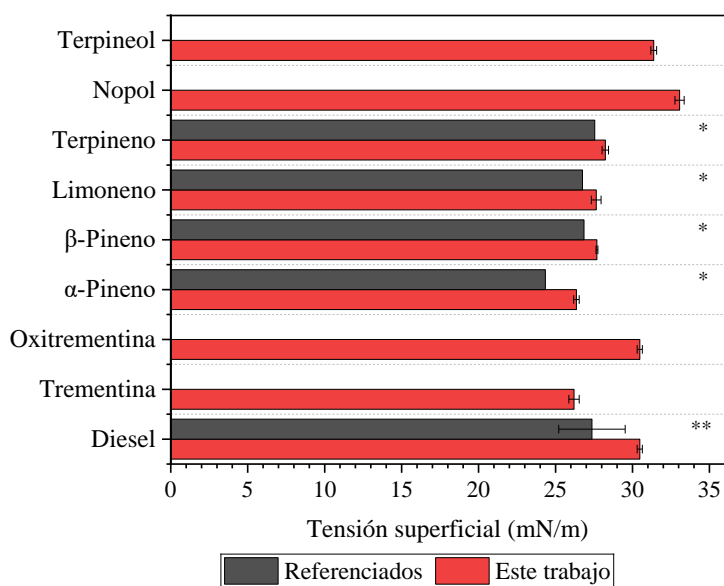
La Figura 3 muestra la variación de la tensión superficial medida a 25°C según el tipo de molécula, que a su vez se compara con valores de investigaciones previas (Wang et al., 2006)(Yaws & Richmond, 1994). Allí se observa que la trementina, α - y α -pineno, terpineno y limoneno tienen una tensión superficial menor que las del terpineol y nopol (inclusive del diésel). Por otro lado, el nopol presenta la mayor tensión superficial, mientras que el terpineol y la oxitrementina poseen valores muy similares a los del diésel, lo que sugiere una poca variación en la tensión superficial de sus mezclas.

Por otra parte, las mediciones tomadas en este estudio presentan similares valores respecto a sus correspondientes reportes en trabajos reportados en la literatura (Wang et al., 2006)(Yaws & Richmond, 1994), En efecto, se observó un error promedio de todas las muestras analizadas por debajo del 6% y en todos los casos con un valor levemente mayor en las mediciones del presente estudio. Dichas variaciones se pueden atribuir a errores sistemáticos presentes en la

experimentación debidos a inexactitudes de calibración, variaciones ambientales, particularidades del operador y defectos del protocolo, entre otras. Asimismo, se puede resaltar que las desviaciones encontradas son muy bajas y en todo caso la tendencia respecto a los reportes es la misma, lo cual indica una alta consistencia y confiabilidad en el registro de la tensión superficial.

Figura 3.

Tensión superficial experimental y de referencia a 25°C



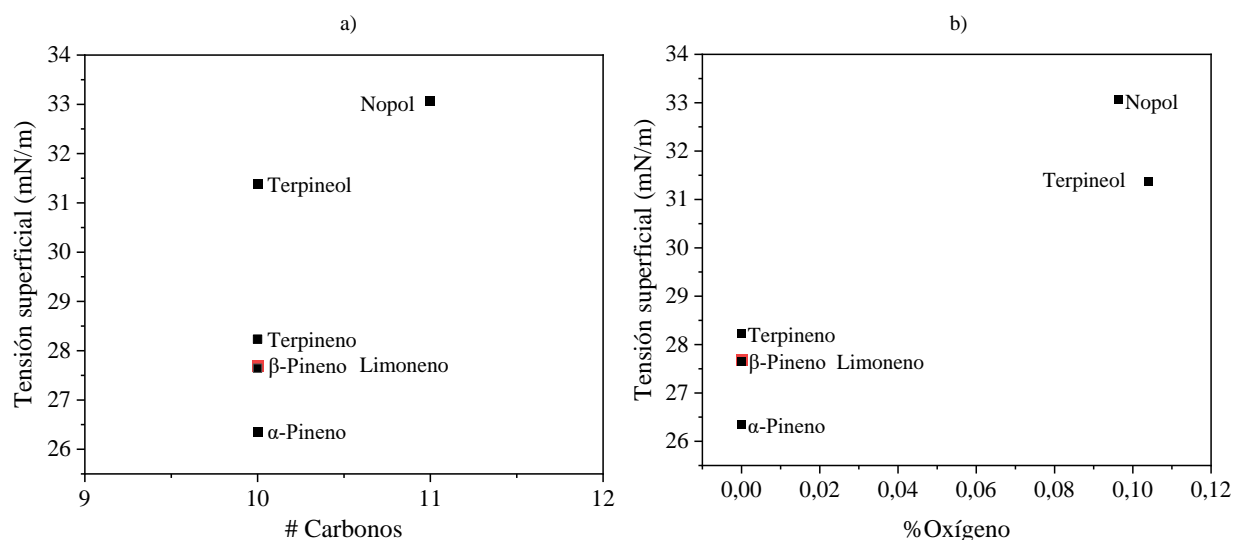
*Yaws & Richmond, 1994 **Wang et al., 2006

Para el análisis del efecto de la estructura molecular en la tensión superficial se presenta la Figura 4 con las mediciones a 25°C para diferentes moléculas respecto a los parámetros de cantidad de carbonos y contenido de oxígeno. Este análisis es importante dado que se esperan efectos en la tensión superficial con diversos parámetros de las moléculas, lo que puede dar luces sobre posibles transformaciones deseadas en las materias prima de combustibles. Por ejemplo, se espera que el tamaño molecular afecte sustancialmente la tensión superficial, puesto que un aumento en esta propiedad conlleva a una mayor cantidad en puntos de contacto, permitiendo formar enlaces

intermoleculares más débiles en la superficie del líquido, lo que se suele asociar a una disminución en la tensión superficial (Patiño camino, 2021).

Figura 4.

Tensión superficial a 25°C según: a) número de carbonos y b) porcentaje de oxígeno



En la Figura 4a se muestra el comportamiento de la tensión superficial respecto al número de átomos de carbonos de cada molécula ensayada. Allí se aprecia que el nopol, que posee 11 carbonos (la de mayor contenido de carbono respecto a las demás moléculas analizadas), posee la tensión superficial más alta, lo que sugiere que la cantidad de carbonos en la molécula puede ser importante, así como la presencia de otros elementos en la estructura tales como el oxígeno. Adicionalmente, el α -pineno, β -pineno, terpineno y limoneno comparten la misma cantidad de carbonos (10 carbonos) y la ausencia de oxígeno, y en estos casos las tensiones superficiales fueron inferiores a las moléculas con oxígeno en su estructura. Esto se puede corroborar con la Figura 4b, donde se aprecia que el nopol y el terpineol (con una tensión de superficial de 33.06–31.37 mN/m), y para los cuales no se encontraron valores reportados, poseen tensiones superficiales de entre 20–27% mayor que la del α -pineno (terpeno con menor tensión superficial).

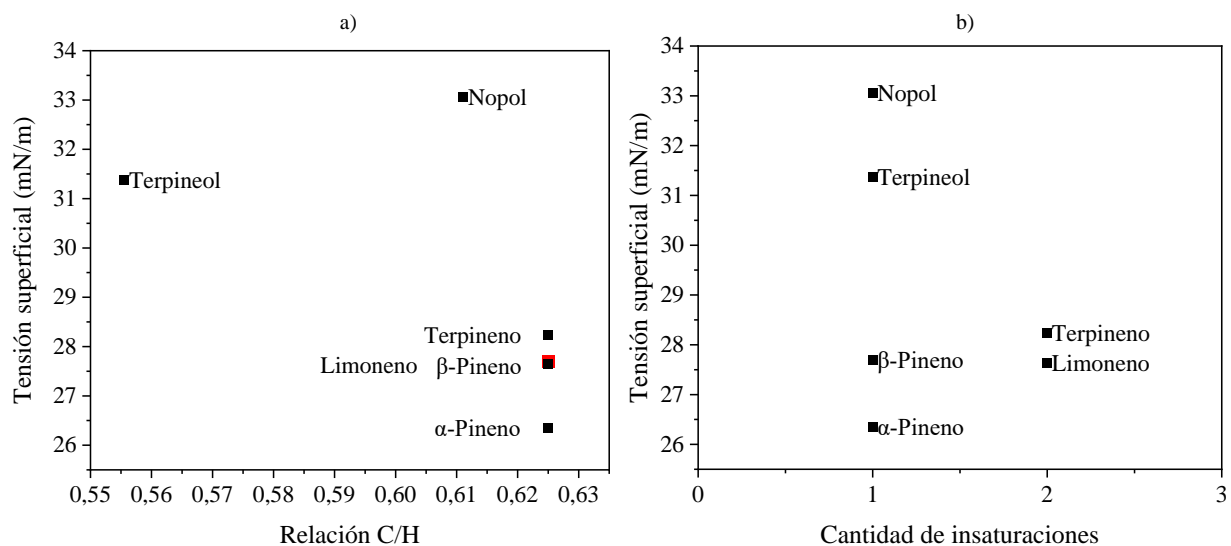
Por otra parte, el átomo de oxígeno se encuentra en los extremos de la molécula en forma de radical en ambos casos (nopol y terpineol), lo cual dificulta un análisis del efecto de su posición estructural en la tensión superficial. Lo que sí se puede apreciar es que la distancia interatómica entre el grupo hidroxilo y el anillo principal de la molécula es mayor para el nopol que para el terpineol (D. García, Lapuerta, et al., 2020), lo que podría favorecer el posicionamiento de las moléculas para generar mayores interacciones entre sí, por ejemplo, mayores interacciones tipo puentes de hidrógeno, incrementando la tensión superficial del líquido.

Respecto a las diferencias de tensión superficial observadas en los valores de los terpenos (i.e., α -pineno, β -pineno, terpineno y limoneno), estas se pueden atribuir a características como la posición e isomería de las moléculas, como es el caso del α -pineno (isómero *trans*) y β -pineno (isómero *cis*), en las cuales al variar la posición del doble enlace (ver Figura 2), se genera una diferencia de $\sim 7\%$ en la tensión superficial, siendo el α -pineno el de menor tensión superficial y con su insaturación ubicada dentro del anillo de la molécula química, lo que le otorga una mayor estabilidad química y probablemente una menor capacidad de interacción molecular.

Por otra parte, la relación carbono/hidrógeno también puede ejercer un efecto importante en la tensión superficial. En la Figura 5a se observa que el terpineol posee una menor relación en esta propiedad que el nopol, lo cual es un indicativo de menores interacciones internas en su molécula, y, por consiguiente, ayuda a explicar la menor tensión superficial del terpineol respecto al nopol. Para el caso de los terpenos (i.e., α -pineno, β -pineno, terpineno y limoneno) se tiene una misma relación de C/H en todas ellas (i.e., de 62.5%), sugiriendo que este parámetro no influye en estas moléculas.

Figura 5.

Tensión superficial a 25°C según: a) relación C/H y b) cantidad de insaturaciones



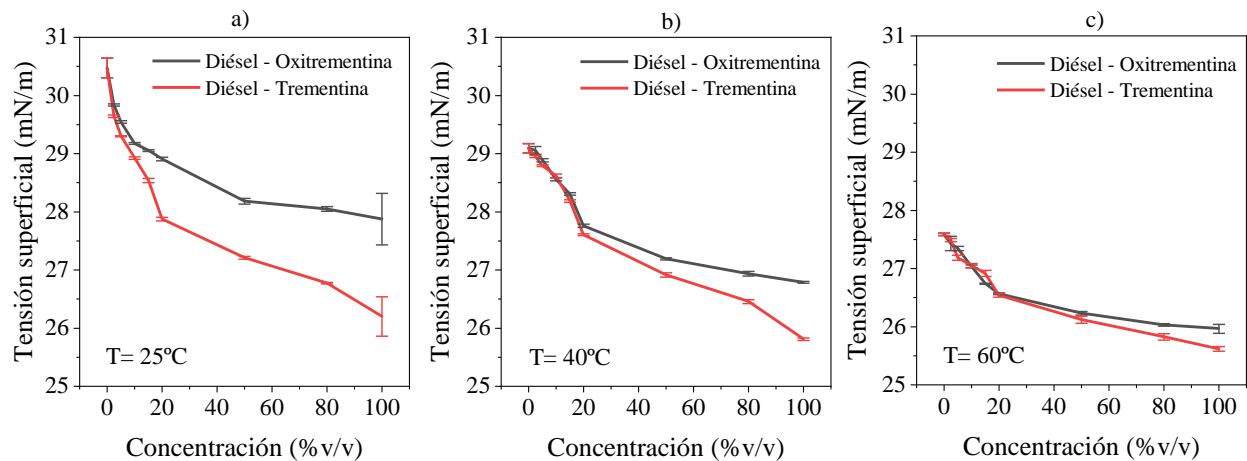
Respecto a la cantidad de insaturaciones, la Figura 5b muestra que este parámetro puede influir ligeramente en la tensión superficial. Por ejemplo, se observa que el terpineno y el limoneno, que contienen cada uno de a dos insaturaciones en su estructura química (ver Figura 2), tienden a poseer mayor tensión superficial en comparación con el β -pineno y el α -pineno, que solo poseen una. Sin embargo, el análisis también indica que la posición de dichas insaturaciones es clave (como ya se mencionó para la diferencia de tensiones superficiales del α - y β -pineno). Por ejemplo, en el terpineno las dos insaturaciones se encuentran dentro del anillo principal (ver Figura 2), mientras que en el limoneno una insaturación es interna y la otra externa al anillo. Esto hace que la cantidad de hidrógenos externos sea mayor en el terpineno que en el limoneno, lo cual le permitiría una mayor interacción intermolecular al terpineno, lo que se deriva en una mayor tensión superficial, como se aprecia en la Figura 5.

5.2 Tensión superficial de las mezclas

En la Figura 6 se muestra la tensión superficial respecto a la concentración en mezclas trementina/diésel y oxitrementina/diésel, medidas a temperaturas de 25°C, 40°C y 60°C. Allí se observa una disminución en la tensión superficial a medida que aumenta la concentración de la molécula terpénica (tanto trementina como oxitrementina) en todas las temperaturas ensayadas. Adicionalmente, se puede distinguir un comportamiento asintótico en la tensión superficial respecto a la concentración, con una disminución en la pendiente a medida que se aumenta la concentración de la molécula terpénica. Esto sugiere que a bajas concentraciones (i.e., menores a 20% v/v) las “pequeñas” moléculas terpénicas se logran acomodar más fácilmente en las “grandes” moléculas del diésel, permitiendo un mayor efecto de interacción y, por consiguiente, en la tensión superficial, efecto que se atenúa en la medida en que se incrementa la relación entre ellas.

Figura 6.

Tensión superficial con variaciones en concentración y a temperaturas de: a) 25°C, b) 40°C y c) 60°C



Adicionalmente, se destaca que la oxitrementina genera menores cambios en la tendencia de la tensión superficial respecto a los que genera la trementina, sugiriendo que su mezcla tiene menor

impacto en el comportamiento de la combustión del diésel respecto a la mezcla con trementina. Esto es un hallazgo importante para la transformación química de oxi-funcionalización de la trementina, puesto que la operación de los motores de combustión interna esta optimizada para las características del combustible diésel, así que una variación en menor grado de la concentración de terpeno en el combustible supone menores cambios en las estrategias de operación del motor, como la de inyección, al ser operado con mezclas de diésel y oxitrementina.

Por otra parte, la tensión superficial decrece a medida que aumenta la temperatura (comparar Figura 6a–c), pues el incremento de temperatura genera un aumento en la energía cinética de las moléculas, debilitando sus fuerzas intermoleculares (Birdi, 2008). En efecto, se evidencia que a medida que aumenta la temperatura, los cambios en la tensión superficial son menos marcados, llegando inclusive a variaciones mínimas entre las mezclas del diésel con trementina o con oxitrementina a 60°C (ver Figura 6c), lo cual sugiere que a altas temperaturas el efecto de la estructura molecular puede ser mínimo.

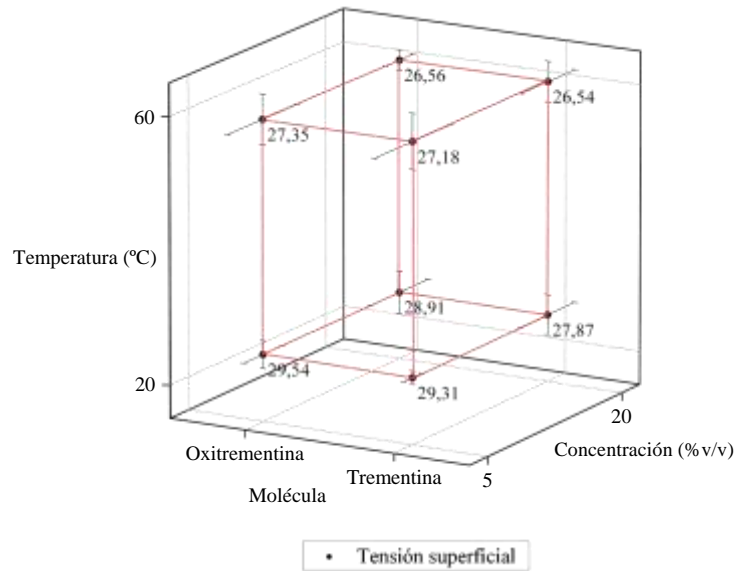
Se resalta la oxitrementina por su similitud a la tensión superficial del diésel, pues sus cambios en tendencia son menores a los cambios de la trementina y esto permite una mejor eficiencia y confiabilidad en su uso, pues los motores están diseñados para la aplicación de sustancias afines al diésel y una variación en sus propiedades podría causar complicaciones en el mismo. En contraste, se evidencia que a medida que aumenta la temperatura, los cambios en la tensión son menos marcados, y la oxitrementina tiende a ser aún menos marcada que la trementina con este aumento, motivo que indica la posible existencia de un punto de saturación en donde adiciones de más aditivo no produce notables cambios en la tensión superficial a altas temperaturas.

5.3 Efecto de interacciones de factores en la tensión superficial

Un esquema del análisis estadístico de múltiples factores realizado sobre la tensión superficial de las muestras se presenta en la Figura 7.

Figura 7.

Cubo factorial de análisis múltiple



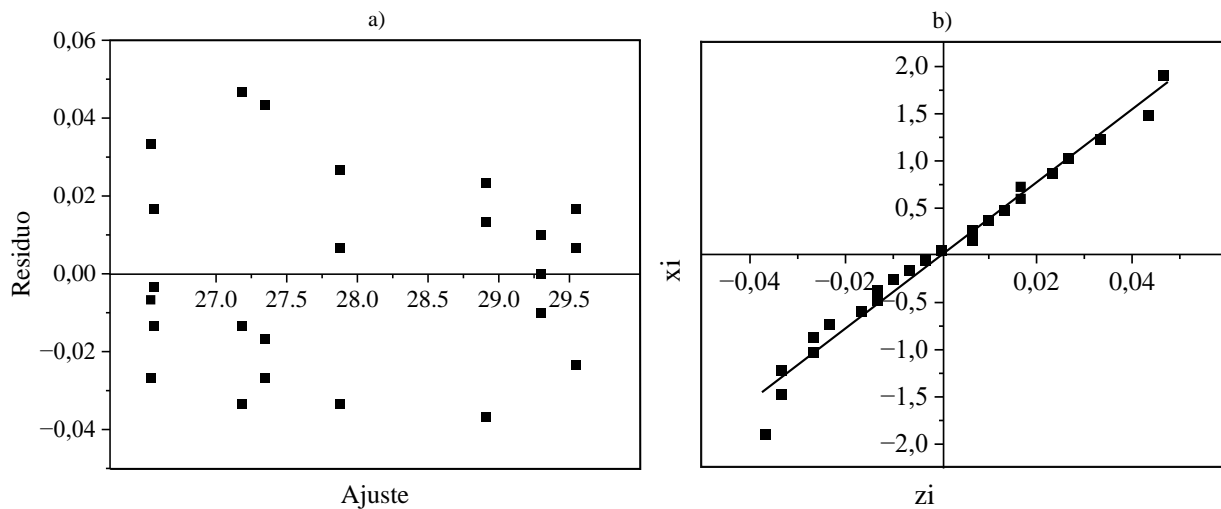
El análisis consiste en la evaluación de los principales factores que pueden afectar la tensión superficial del combustible. Así, se seleccionaron dos niveles de la estructura molecular (oxitrementina y trementina), temperatura (25°C y 60°C) y concentración (5% v/v y 20% v/v), combinados en un diseño factorial del tipo 2^3 (dos niveles y tres factores). Cada uno de los vértices del cubo de la Figura 7 representa la media ajustada para la combinación de los niveles de los tres factores y sus líneas conectadas a los vértices ilustran las interacciones entre los factores, donde una de las variables se encuentra constante mientras las otras dos varían a lo largo de la misma.

Para el análisis, la Figura 8a muestra los residuales obtenidos de la regresión e interpretación de los datos de la tensión superficial tomados en los experimentos, en relación con los valores medios predichos por el modelo 2^k (ver Ecuación 12). Allí se muestra una distribución

adecuada de los residuos, lo cual indica que el modelo usado para el ajuste de datos no posee patrones estructurados en los errores y es congruente a la experimentación. Además, la dispersión de los residuos se mantiene uniforme, sugiriendo que el intervalo de confianza ajustado en 5% para los parámetros del modelo es confiable, lo que conlleva a mayor credibilidad y validez de las pruebas estadísticas usadas.

Figura 8.

Análisis del modelo: a) Análisis residual y b) Análisis de probabilidad normal



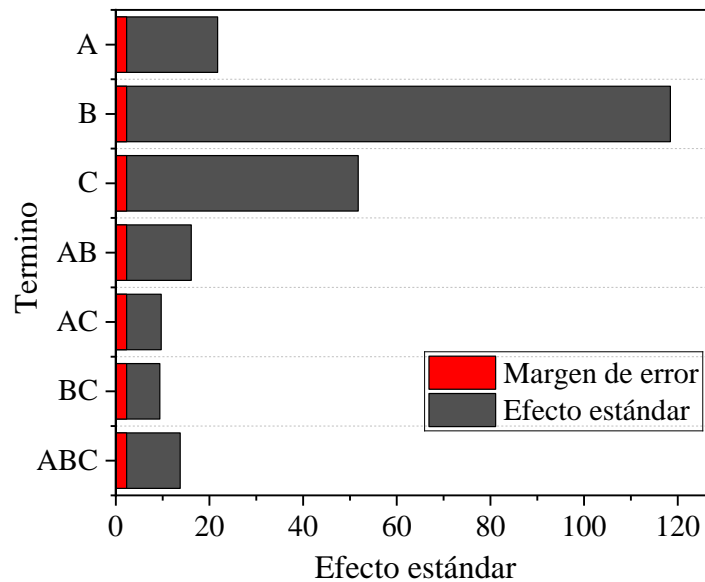
Por otra parte, el análisis de la probabilidad normal de la predicción, el cual determina la tendencia estándar de los datos, es mostrado en la Figura 8b. En ella se aprecian los puntos alineados a lo largo de una trayectoria recta (0.977), lo cual indica que se realizó una replicación impecable en la experimentación y que además esta tuvo un bajo porcentaje de resultados anormales. Además, se identifica un porcentaje mínimo de error, atribuido a fallas de los experimentadores y a variaciones intrínsecas de las sustancias estudiadas. Con ello se puede complementar la validez de los datos junto a la selección de pruebas estadísticas.

Posteriormente, se realizó un análisis de efectos a partir de los parámetros obtenidos del modelo estadístico. En la Figura 9 se observa una representación gráfica estándar para visualizar

los impactos de cada factor, siendo A el tipo de molécula, B la temperatura y C la concentración, y sus combinaciones que representan las interacciones de cada una de ellas, con AB, AC y BC la representación de los efectos dobles y ABC el efecto múltiple. El efecto estandarizado mostrado en el eje x indica el alcance logrado por el efecto de cada factor/interacción con respecto a la tensión superficial. Las barras grises representan la magnitud del efecto y las barras rojas representan el margen de error tolerable establecido en 5%.

Figura 9.

Pareto de efectos estandarizados



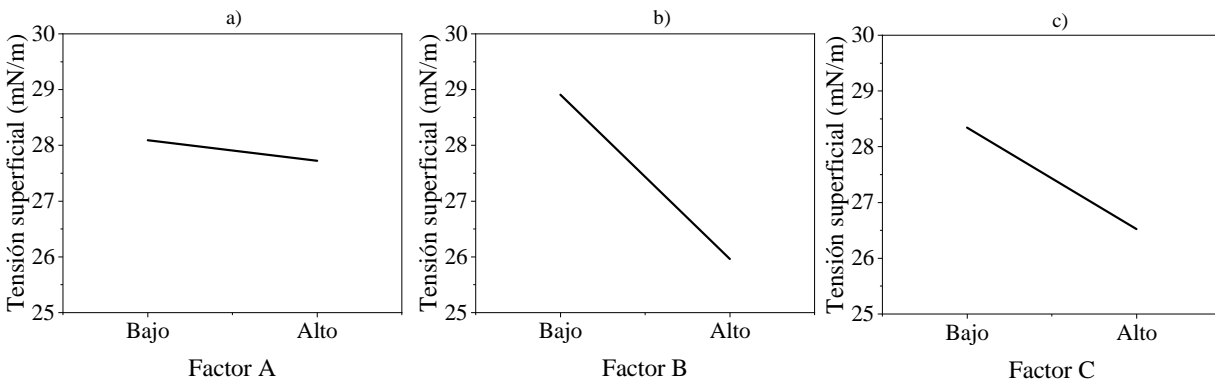
En la Figura 9 se destaca el factor B como el más influyente, lo que significa que, al aumentar la temperatura, cambia de manera apreciable la tensión superficial. También se destaca la interacción AB (tipo de molécula/temperatura), lo que implica que la interacción entre ambos factores actúa complementariamente con respecto a la tensión superficial. Esto hecho corrobora el efecto observado en el comportamiento asintótico de las mezclas de terpenos y diésel (ver Figura 6). Adicionalmente, y a pesar de que los demás efectos/interacciones se observen relativamente

pequeños, estos presentan influencias significativas para el caso de estudio, es decir, todos los factores y sus interacciones afectan la tensión superficial de la mezcla.

Posteriormente, se realizó un análisis puntual de cada factor sobre la tensión superficial, representados en los gráficos a), b) y c) de la Figura 10, respectivamente. En ellas se observa una tendencia decreciente en la tensión superficial a medida que aumenta el nivel de cada factor.

Figura 10.

Influencia de factores simples: a) molécula, b) temperatura y c) concentración



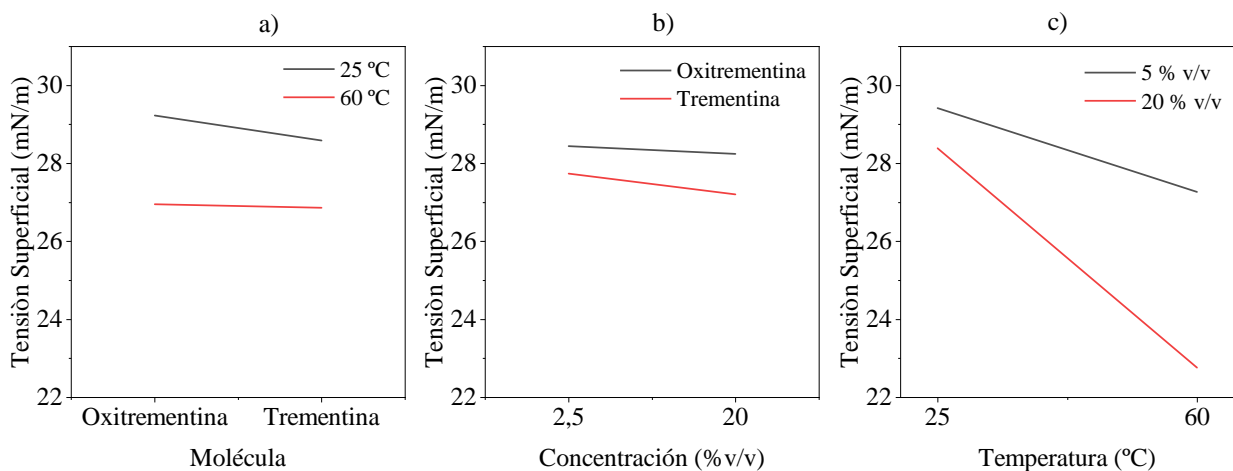
Adicionalmente, la Figura 10a muestra que el factor A (tipo de terpeno) disminuye apenas en cerca del 2% la tensión superficial, apuntando a un efecto negativo de baja influencia. Por otra parte, la Figura 10b respalda el hallazgo de que la temperatura (factor B) es la más influyente en la tensión superficial, con una pendiente decreciente marcada con un 10% de variación. Finalmente, en la Figura 10c se observa un efecto negativo con una pendiente decreciente moderada (variación del 8%,), indicando que, si bien la concentración (factor C) no es un factor tan influyente, si genera cambios evidentes en la tensión superficial.

Por otra parte, el análisis de las interacciones dobles AB, AC y BC se muestra en la Figura 11. Estas interacciones representan el impacto de un efecto sobre la tensión superficial según el nivel de otro factor. Por ejemplo, para el caso AB, al cambiar el tipo de molécula (factor A) se

obtiene una disminución de tensión superficial, lo que plantea que la trementina (representado por el nivel alto de A) tiene una baja tendencia a la formación de superficies cohesivas comparado con la oxitrementina (representado por el nivel bajo de A). Por otro lado, en la Figura 11a se evidencia que cuando la temperatura se encuentra baja (factor B) se disminuye la tensión superficial más marcadamente al cambiar el tipo de molécula, lo que representa una variación del efecto más contundente sobre la tensión superficial. Esto a su vez indica que, a altas temperaturas la variación de la tensión superficial se minimiza, lo que concuerda con los hallazgos experimentales del efecto de la concentración (ver Figura 6). Asimismo, la interacción de ambos factores indica que la diferencia de la tensión superficial entre la oxitrementina y trementina es menor cuando se presentan temperaturas elevadas atribuyéndosele a un tipo de estabilización.

Figura 11.

Influencia de factores combinados: a) AB, b) AC y c) BC



En el caso de la interacción AC, a bajas concentraciones (factor C) la reducción de la tensión superficial al cambiar el tipo de molécula (factor A) es más notable en la Figura 11b. Lo cual implica que, a concentraciones reducidas, el tipo de molécula tiene un efecto más evidente sobre la tensión superficial. Por el contrario, a concentraciones altas la reducción de la tensión

superficial es más sutil, lo que sugiere que a concentraciones elevadas el tipo efecto del tipo de molécula no genera tanto impacto en la tensión superficial. Por ende, se denota que, a concentraciones más elevadas, la diferencia de la tensión superficial entre ambas moléculas es menor.

Finalmente, para el caso de la interacción BC, en la Figura 11c se evidencia que a aumentos de temperaturas (factor B) la tensión superficial disminuye para niveles altos y bajos, lo que indica que a altas temperaturas se disminuye la tensión superficial. Por otro lado, se observa que a concentraciones altas (factor C) los valores de la tensión superficial son menores para todas las temperaturas, lo que denota que a aumentos de concentración se disminuye la tensión superficial. La grafica muestra una interacción complementaria por parte de ambos factores, pues a altas concentraciones y temperaturas, el cambio de la tensión superficial es más notorio, lo que conlleva a señalar que esta interacción es aditiva.

Por último, para el análisis global de todos los factores e interacciones junto a la tensión superficial se consideró realizar el modelo experimental 3^k (definido como un diseño 3^3). sin embargo, este modelo es costoso y extenso desde el punto de vista experimental, debido a la necesidad de realizar 27 experimentos y sus 3 réplicas. Adicionalmente, también se observó que realizando el experimento 2^3 el comportamiento de la tensión superficial es no-lineal, lo cual puede sugerir que usar dos puntos no es tan confiable para el análisis debido a los errores que se pueden cometer al no analizar la curvatura. Por ende, se usó un modelo intermedio el cual consiste en analizar dicha curvatura sin la producción de tantas muestras, dicho modelo estadístico es conocido como diseño 2^k con puntos medios.

La Figura 12-13 representan la variación al usar el diseño experimental 2^k con puntos medios tanto para la oxitrementina (ver Figura 12a) como para la trementina (ver Figura 12b). En ellas se incluye el análisis de 18 puntos experimentales, los cuales fueron realizados bajo los parámetros de tipo de molécula (incluyendo las mezclas de oxitrementina y trementina con diésel), la temperatura (a 25°C, 40°C y 60°C) y la concentración (5% v/v, 10% v/v y 20%v/v).

A pesar de las variaciones que se puedan obtener a partir de los diseños con y sin puntos medios, la curvatura que se genera entre los factores B y C es relativamente baja. Esta leve curvatura permite que un diseño experimental lineal como el diseño factorial 2^3 , sin puntos medios, aun sea una opción viable ofreciendo resultados confiables de manera mucho más eficiente, al requerir menor cantidad de ensayos experimentales. Adicionalmente, aunque el diseño con puntos medios detalla de una mejor manera la relación entre los niveles y la tensión superficial, el diseño sin puntos medios sigue proporcionando resultados que se encuentran dentro del margen de error del 5%, valor que se ha establecido como tolerable para el tratamiento de los datos. Por lo que, a pesar de las diferencias, ambos enfoques pueden considerarse adecuados, especialmente cuando se busca la eficiencia de los recursos sin comprometer la precisión.

Figura 12.

Curvatura de puntos medios tridimensional para: a) Oxitrementina y b) Trementina

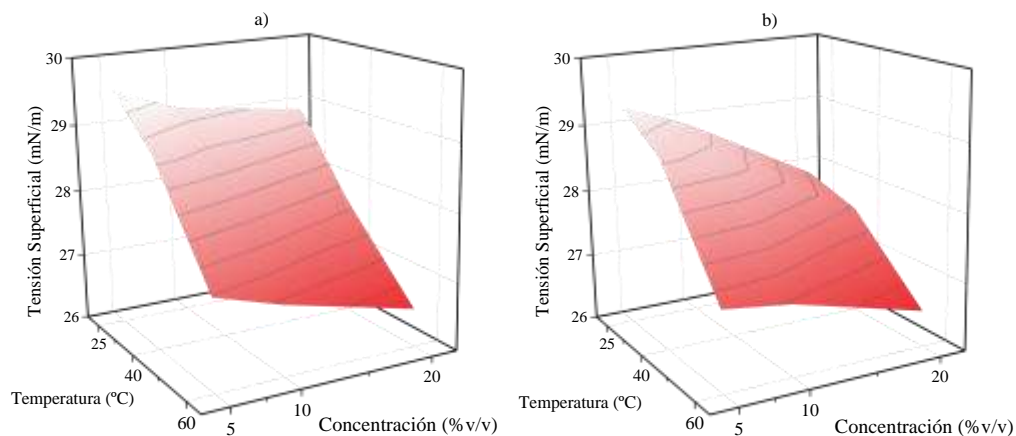
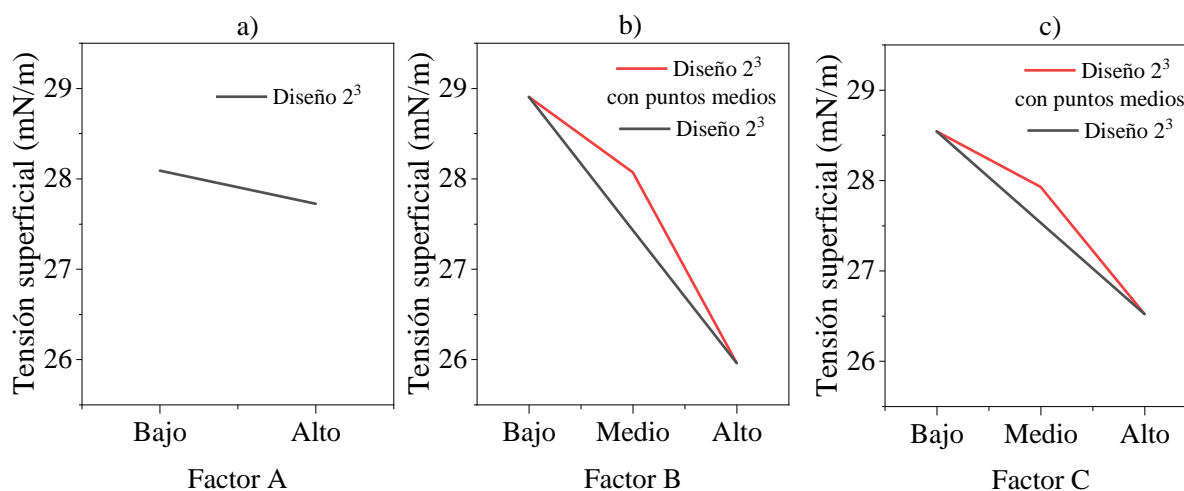


Figura 13.

Curvatura de puntos medios bidimensional de: a) molécula, b) temperatura y c) concentración



6 Conclusiones

Inicialmente, se seleccionó el método de gota pendiente para la medición de la tensión superficial debido a su alta precisión, versatilidad e idoneidad para las sustancias estudiadas, así como su bajo consumo de muestra por ensayo. Para este método se establecieron las condiciones experimentales adecuadas, tanto para las mediciones en si como para el tratamiento de las muestras. En efecto, se identificó que se debe realizar una muy buena limpieza y purga de los elementos de medición para tener buena exactitud y precisión en los resultados. Además, la temperatura para cada ensayo logró ser ajustada a los valores de interés mediante el uso del horno, la plancha de calentamiento y el baño, y su rango fue identificado entre 25°C y 60°C como parte de las restricciones que posee el montaje.

La estructura molecular de las moléculas terpénicas influye de manera determinante en la tensión superficial, ya que factores como la cantidad de carbonos, el contenido de oxígeno, la relación carbono-hidrógeno (C/H) y la cantidad y posición de insaturaciones (dobles enlaces) afectan esta propiedad. Se observó que moléculas con mayor contenido de oxígeno y mayor

número de insaturaciones tienden a presentar mayores tensiones superficiales. Además, la posición de estos elementos en la estructura molecular puede ser clave para determinar su comportamiento.

Al comparar la oxitrementina con la trementina en términos de diversas concentraciones, se concluyó que la oxitrementina genera menores variaciones en la mezcla con diésel, lo que resulta favorable para su aplicación como aditivo en este tipo combustible. Este impacto en la tensión superficial supone ser una ventaja, ya que para aplicación en combustibles este permite mantener las estrategias operativas del motor (principalmente la de inyección), garantizando su rendimiento tanto en desempeño como en emisiones. Este comportamiento se debe a la estructura molecular de los principales componentes de la muestra como el nopol, que parecen favorecer interacciones intermoleculares más controladas en comparación con la trementina

El análisis estadístico a partir del diseño factorial ha evidenciado que la temperatura es el factor más influyente en la tensión superficial de las mezclas de terpenos, seguido por la interacción entre el tipo de molécula, observando una relación directa entre la temperatura y la variación de la tensión superficial, independientemente del terpeno considerado y la concentración. Adicionalmente, la interacción entre el tipo de molécula y la concentración revela que las diferencias en la tensión superficial son más significativas a bajas concentraciones de terpenos, mientras que, a concentraciones elevadas, el tipo de terpeno se vuelve menos relevante, lo que se explica por la facilidad de interacción entre moléculas del diésel y de los terpenos cuando estos últimos se encuentran en pequeñas proporciones. Esto implica que en formulaciones de combustibles con bajos niveles de terpenos, la selección del tipo de molécula es clave para la tensión superficial y su posterior comportamiento en la inyección.

7 Recomendaciones

Investigar los posibles modelos que puedan representar el comportamiento de la tensión superficial de moléculas terpénicas y sus mezclas con combustible diésel en función de los factores analizados en el presente estudio.

Evaluar la influencia de la tensión superficial de las moléculas terpénicas y su mezcla con diésel en los procesos de inyección y combustión, analizando el tamaño de gota, la mezcla con aire y el desempeño de combustión.

Agregar análisis de tensión superficial a moléculas terpénicas que incluyan otras características como diferente número de carbono, diferente posición de grupos hidroxilo y diferente cantidad y posición de insaturaciones para verificar los hallazgos observados en el presente trabajo.

Referencias bibliográficas

- Anand, B. P., Saravanan, C. G., & Srinivasan, C. A. (2010). Performance and exhaust emission of turpentine oil powered direct injection diesel engine. *Renewable Energy*, 35(6), 1179–1184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.010>
- Ballesteros, R., García, D., Bustamante, F., Alarcón, E., & Lapuerta, M. (2020). Oxyfunctionalized turpentine: Evaluation of properties as automotive fuel. *Renewable Energy*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.026>
- Birdi, K. A. S. (2008). Surface tension and interfacial tension of liquids. In K.S. Birdi (Ed.), *handbook of surface and colloid* (2 edition, Vol. 1, pp. 77–78). CRC LLC.
- Butkus, A., Pukalskas, S., & Bogdanovičius, Z. (2007). The influence of turpentine additive on the ecological parameters of diesel engines. *Transport*, 22(2), 80–82. <https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638103>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (n.d.). *Mecánica de Fluidos*.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química, 11va Edición* (11th ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107–125. <https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257>
- Curtin, J., McInerney, C., Ó Gallachóir, B., Hickey, C., Deane, P., & Deeney, P. (2019). Quantifying stranding risk for fossil fuel assets and implications for renewable energy investment: A review of the literature. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 116). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109402>
- diseño de experimentos montgomery. (2005). *Montgomery, D.C., 2a. ed.*(México:Limusa Wiley).
- Ejim, C. Enoch. (2008). *Effect of liquid viscosity, surface tension and nozzle size on atomization in two-phase nozzles*.
- Elmendorp, J. J., & De Vos, G. (1986). Measurement of Interfacial Tensions of Molten Polymer Systems by Means of the Spinning Drop Method. *Polymer Engineering & Science*, 26(6), 415–417.
- García, D., Bustamante, F., Villa, A. L., Lapuerta, M., & Alarcón, E. (2020). Oxyfunctionalization of Turpentine for Fuel Applications. *Energy and Fuels*, 34(1). <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03742>
- García, D., Lapuerta, M., Villa, A. L., Alarcón, E., & Bustamante, F. (2020). Influence of molecular structure of oleoresin-derived compounds on flame properties and emissions

- from laminar flames. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(27).
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09555-w>
- García, D., Ramos, Á., Rodríguez-Fernández, J., Bustamante, F., Alarcón, E., & Lapuerta, M. (2020a). Impact of oxyfunctionalized turpentine on emissions from a Euro 6 diesel engine. *Energy*, 201, 117645. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117645>
- García, D., Ramos, Á., Rodríguez-Fernández, J., Bustamante, F., Alarcón, E., & Lapuerta, M. (2020b). Impact of oxyfunctionalized turpentine on emissions from a Euro 6 diesel engine. *Energy*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117645>
- García, J. A. D., Valenzuela, M. A. Á., & Díaz, J. L. P. (2012). Caracterización de los factores que afectan a la exactitud ya la precisión en el resultado de la medida de tensión superficial con instrumentos basados en el método ADSA. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 16(2), 29.
- González Celis, R., De Bogotá, U., & Lozano, J. T. (2020). *Matriz energética mundial y el cambio climático: estado actual autor*.
- Guru Karakaya, G., Altıparmak, D., & Alicilar, A. (2002). *Improvement of Diesel fuel properties by using additives*. 43(8), 1021–1025. www.elsevier.com/locate/enconman
- H. Hu Howard, & D. Joseph Daniel. (1993). evolution of a liquid drop in a spinning drop method. *Colloid and Interface Science*, 162(2), 331–339.
- Instruments GmbH, D. (2023). *Manual de funcionamiento OCA 2 5*.
www.onlinedoctranslator.com
- Johana, M., & Rosero, P. (2013). *Efecto de la temperatura sobre la tensión superficial, la viscosidad y el volumen molar parcial de polioles en solución acuosa*.
- Lee, S.-W., Tanaka, D., Kusaka, J., & Daisho, Y. (2002). Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine. In *JSAE Review* (Vol. 23).
- Meylemans, H. A., Quintana, R. L., & Harvey, B. G. (2012). Efficient conversion of pure and mixed terpene feedstocks to high density fuels. *Fuel*, 97, 560–568.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.062>
- Pahima, E., Hoz, S., Ben-Tzion, M., & Major, D. T. (2019). Computational design of biofuels from terpenes and terpenoids. *Sustainable Energy and Fuels*, 3(2), 457–466.
<https://doi.org/10.1039/c8se00390d>
- Patiño camino, R. M. (2021). *Efecto de las interacciones moleculares sobre las propiedades macroscópicas de las mezclas alcohol-diésel* Rayda Margareth Patiño Camino [Doctoral dissertation]. Universidad de Castilla-La Mancha.

- Salager, J. L., & Anton, R. (2005). *Cuaderno firp s205-b cuaderno firp s205-b universidad de los andes facultad de ingeniería escuela de ingeniería química Lab. Formulación, Interfases, Reología y Procesos Mérida-Venezuela (2005) Métodos de medición de la tensión superficial o interfacial en español.*
- Schenkel, C. D., Gayoso, R. E., Ritacco, H., Sorichetti, P. A., Romano, S. D., & Kurlat, D. H. (n.d.). *Tensión superficial dinámica en biodiesel.*
- Schenkel, C. D., Gayoso, R. E., Ritacco, H., Sorichetti, P. A., Romano, S. D., & Kurlat, D. H. (2005). TENSIÓN SUPERFICIAL DINAMICA EN BIODIESEL. *ANALES AFA*, 16(1).
- Tracy, N. I., Chen, D., Crunkleton, D. W., & Price, G. L. (2009). Hydrogenated monoterpenes as diesel fuel additives. *Fuel*, 88(11), 2238–2240. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.002>
- Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Yang, W. M., Saravanan, C. G., Lee, P. S., Chua, K. J. E., & Chou, S. K. (2014). Impact of ignition promoting additives on the characteristics of a diesel engine powered by pine oil-diesel blend. *Fuel*, 117(PART A), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.076>
- Viades-Trejo, J., & Gracia-Fadrique, J. (2007). Spinning drop method. From Young-Laplace to Vonnegut. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302(1–3), 549–552. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.03.033>
- Wagner, Z., Bendová, M., Rotrekl, J., & Orvalho, S. (2019). Densities, Vapor Pressures, and Surface Tensions of Selected Terpenes. *Journal of Solution Chemistry*, 48(7), 1147–1166. <https://doi.org/10.1007/s10953-019-00900-3>
- Wang, F., Wu, J., & Liu, Z. (2006). Surface tensions of mixtures of diesel oil or gasoline and dimethoxymethane, dimethyl carbonate, or ethanol. *Energy and Fuels*, 20(6), 2471–2474. <https://doi.org/10.1021/ef060231c>
- Yang, X., Pang, J., Teng, F., Gong, R., & Springer, C. (2021). The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110438>
- Yaws, C. L., & Richmond, P. C. (1994). Surface tension-organic compounds. In *physical properties of chemical compounds: Vol. I* (Issue 2). American Chemical Society. www.knovel.com.

Anand, B. P., Saravanan, C. G., & Srinivasan, C. A. (2010). Performance and exhaust emission of turpentine oil powered direct injection diesel engine. *Renewable Energy*, 35(6), 1179–1184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.010>

Apéndices**Apéndice A.**

Sustancias usadas en la experimentación: A) diésel, B) acetona y C) moléculas terpénicas

A)



B)



C)



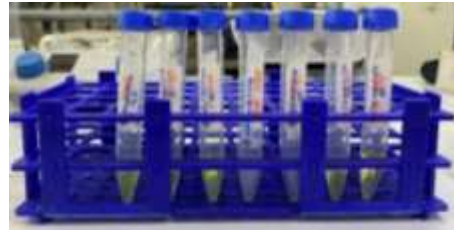
Apéndice B.

Muestras de sustancias: A) oxitrementina, B) trementina y A) mezclas

A)



B)



C)

**Apéndice C.**

Herramientas usadas para el lavado: A) acetona y B) vasos precipitados

A)



B)



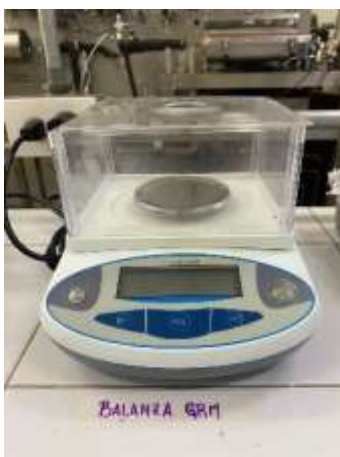
Apéndice D.

Equipos para medición de la densidad: A) plancha de calentamiento, B) balanza y C) horno

A)



B)



C)

**Apéndice E.**

Instrumentos para la medición de la densidad: A) termómetro, B) picnómetro y C) micropipeta

A)



B)



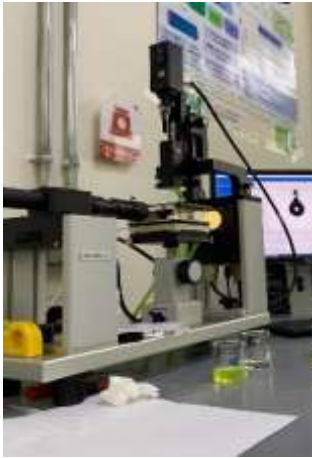
C)



Apéndice F.

Equipos para la medición de la tensión superficial: A) OCA 25, B) computador y C) baño termostatizado

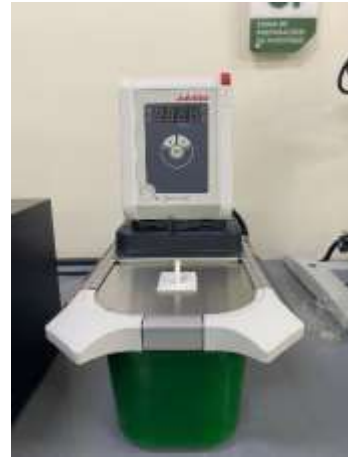
A)



B)



C)

**Apéndice G.**

Instrumentos para la medición de la tensión superficial: A) jeringa y B) aguja

A)



B)



Apéndice H.*Datos técnicos del equipo OCA 25*

Dimensiones máximas de la muestra (LxWxH)	<ul style="list-style-type: none"> • 220 x ∞ x 70 mm³ • 330 x ∞ x 70 mm³ (OCA 25L)
Dimensiones de la mesa de muestra (LxW)	<ul style="list-style-type: none"> • 100 x 100 mm²
Rango de recorrido de la mesa de muestra en dirección X–Y–Z	<ul style="list-style-type: none"> • 100 x 104 x 42 mm³ • 220 x 159 x 42 mm³ (OCA 25L)
Rango de medición para ángulos de contacto	<ul style="list-style-type: none"> • 0...180°; ± 0.1° Precisión de medición del sistema de video
Rango de medición de tensiones superficiales e interfaciales	<ul style="list-style-type: none"> • 1-10⁻²...2-10³ mN/m; resolución: min ± 0.01 mN/m
Peso máximo de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • 3.0 kg; 15.0 kg con mesa de muestra sujeta
Sistema óptico y de procesamiento de imágenes	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminación LED con intensidad controlada manualmente y por software, incluida compensación automática de la variación de temperatura • Cámara USB 3.0, resolución máxima 2048 x 1088 pixeles, velocidad máxima de fotogramas: 1220 fps • Objetivo zoom de 6 aumentos con enfoque fino integrado (± 6 mm) • Campo de visión: 2.50 x 1,316.09 x 8.54 mm² • Distorsión óptica < 0.05%
Dimensiones (LxBxH)	<ul style="list-style-type: none"> • 660 x 220 x 365 mm³ • 725 x 285 x 365 mm³ (OCA 25L)
Peso	<ul style="list-style-type: none"> • 16 kg • 18 kg (OCA 25L)
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • 100... 240 V AC; 50...60 HZ; 70 W

Nota: Adaptado de Manual de funcionamiento OCA 2 5 (Instruments GmbH, 2023)

