



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ACEITE DE RICINO CON XANTOFILAS COMO ADITIVOS ANTIOXIDANTES, PARA SU USO COMO LUBRICANTES VERDES”

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Ing. Sandra Rojas Osorio

Director de tesis:

Dra. Karla Judith Moreno Bello

Enero 2024

Celaya, Gto.

DEDICATORIA

A mi hija Zulia, que con su sonrisa ilumina cada día de mi existencia y con sus abrazos me llena de fuerza para salir adelante. Ella es mi motivo para superarme personal y profesionalmente.

A mi esposo Diego, por ser mi compañero de vida y darme ese impulso extra para lograr siempre mis metas, por su apoyo y amor incondicional.

A mis papás, Rocío y Javier, porque gracias a su ejemplo, esfuerzo, apoyo y motivación, he podido alcanzar todos los sueños que me he propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mi asesora, la Dra. Karla Judith Moreno Bello, quien confió en mí desde que ingresé al programa y me permitió explotar todas mis capacidades cognitivas para desarrollar este trabajo de investigación bajo su tutela.

Agradezco también al Dr. Luis Daniel Aguilera Camacho, al Dr. J. Santos García Miranda y a la Dra. Ma. Teresa Hernández Sierra, por brindarme el apoyo y las herramientas para desarrollar mi proyecto de investigación.

Extiendo mi agradecimiento al Tecnológico Nacional de México en Celaya, mi alma máter, por permitirme regresar a sus instalaciones para seguir cultivando y desarrollando mis habilidades como profesionista en un ambiente estudiantil de respeto y armonía.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría en un programa nacional de posgrado de calidad.

Agradezco infinitamente a todos mis compañeros estudiantes (licenciatura, maestría, doctorado), porque aprendí lo mejor de cada uno y eso me permitió enriquecer mi crecimiento personal a la par de mi desarrollo profesional.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Planteamiento del problema	9
1.3 Justificación	10
1.4 Hipótesis	11
1.5 Objetivo general	12
1.6 Objetivos específicos	12
1.7 Alcance y limitaciones	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Lubricantes	13
2.2 Aceites vegetales	14
2.3 Aditivos	15
2.4 Metodología Seis Sigma (Six Sigma. 6σ)	16
2.5 Técnicas estadísticas para el análisis de datos	18
2.6 Análisis de varianza (ANOVA)	19
2.7 Regresión	21
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	23
3.1 Aceite base, aditivos y formulaciones	24
3.2 Evaluación del desempeño tribológico de los lubricantes verdes	25
3.3 Análisis estadístico	25
3.4 Ponderación de resultados obtenidos	26
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	27
4.1 Análisis estadístico del coeficiente de fricción (μ_k)	27
4.2 Análisis estadístico de desgaste (ancho de huella y tasa de desgaste)	40
CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Características de un lubricante	13
Figura 2.2 Propiedades de un lubricante.....	14
Figura 2.3 Pasos para la metodología DMAIC	17
Figura 3.1 Metodología	23
Figura 3.2 Reactivos y equipos utilizados para desarrollar la metodología	23
Figura 4.1 Gráfica comparativa de coeficientes de fricción de formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales	28
Figura 4.2 Análisis de varianza de un solo factor (coeficiente de fricción vs concentración), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales.....	31
Figura 4.3 Análisis de varianza de un solo factor (coeficiente de fricción vs aditivo), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales.....	33
Figura 4.4 Análisis de regresión para coeficiente de fricción en formulaciones con aceite de ricino como base y diferentes aditivos vegetales.....	35
Figura 4.5 Gráficas de predicción de coeficiente de fricción con diferentes concentraciones de aditivos	37
Figura 4.6 Gráfica comparativa del ancho de huella de formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales.....	41
Figura 4.7 Análisis de varianza de un solo factor (ancho de huella vs concentración), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales.....	43
Figura 4.8 Análisis de varianza de un solo factor (ancho de huella vs aditivo), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales	45
Figura 4.9 Análisis de regresión para ancho de huella en formulaciones con aceite de ricino como base y diferentes aditivos vegetales.....	47
Figura 4.10 Gráficas de predicción de ancho de huella con diferentes concentraciones de aditivos	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Identificación de formulaciones y valores de coeficiente de fricción promedio	28
Tabla 4.2 Identificación de aditivos para análisis estadístico	29
Tabla 4.3 Identificación de concentraciones para análisis estadístico	29
Tabla 4.4 Validación de la ecuación de regresión	36
Tabla 4.5 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (luteína)	38
Tabla 4.6 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (zeaxantina)	39
Tabla 4.7 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (astaxantina)	40
Tabla 4.8 Validación de la ecuación de regresión	48
Tabla 4.9 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (luteína)	49
Tabla 4.10 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (zeaxantina)	50
Tabla 4.11 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (astaxantina)	51
Tabla 4.12 Tasa de desgaste de formulaciones a base de aceite de ricino y xantofilas como aditivos naturales	52
Tabla 4.13 Ponderaciones	53

RESUMEN

El diseño e implementación de nuevas tecnologías que se han desarrollado en las últimas décadas ha traído consigo nuevos desafíos en cuanto al funcionamiento y desempeño de componentes mecánicos. Con todos estos avances se ha popularizado el uso de sustancias químicas altamente contaminantes, utilizadas para el funcionamiento de máquinas y herramientas en la industria, generando un daño severo en el medio ambiente. Aunado al uso de sustancias sintéticas, uno de los principales problemas a los que se enfrenta el sector industrial es el desgaste de piezas que tienen contacto entre sí, con un impacto negativo debido a la pérdida de energía por fricción de las piezas móviles, porque representa un daño al medio (contribuye a un consumo mayor de energía debido a la ineficiencia de la maquinaria y a la necesidad de producir piezas de refacción, generando mayor producción de CO₂ a nivel global) contribuyendo a problemáticas de interés mundial como el calentamiento global y el efecto invernadero; por ello, diferentes áreas de investigación alrededor del mundo han puesto en marcha estudios para encontrar materiales y métodos que ayuden a contrarrestar y revertir los daños [1]. Existen estrategias de vanguardia que están enfocadas a disminuir el impacto humano y al mismo tiempo atacar la pobreza (uno de los más grandes problemas que se tienen en la sociedad) a nivel global, como la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, que consta de 17 objetivos que abarcan diferentes rubros y ayudan a mantener la dirección sobre las acciones planeadas y ejecutadas de los diferentes países miembros de la ONU; el presente estudio tiene una fuerte influencia para impactar en los objetivos 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), 12 (Producción y consumo responsable) y 13 (Acción por el clima) [2]. Uno de los casos más estudiados como alternativa ecológica es el aceite de ricino, que desde el punto de vista tribológico ha mostrado tener grandes beneficios ya que es una sustancia no tóxica, de origen vegetal y amigable con el medio ambiente que puede ser utilizado como lubricante industrial en aplicaciones que requieran de niveles altos de fricción, pues presenta una buena resistencia a la oxidación en operaciones que requieran altas temperaturas y mejora el comportamiento de la fuerza de fricción en los sistemas de trabajo. El aceite de ricino se puede mezclar con algunos aditivos de origen natural que mejoran su capacidad oxidativa o ayudan a reducir la fuerza de

fricción; el aditivo se selecciona de acuerdo con la característica que se quiera acentuar [3] [4]. Para este estudio, son dos las principales características de interés: el coeficiente de fricción y el factor de desgaste. Dichas propiedades son obtenidas a través de ensayos de tribología para analizar los mecanismos de desgaste en las piezas utilizadas, así como la interacción de la mezcla en la superficie del material de prueba. Dentro de las principales ventajas que ofrece este aceite se encuentra la capacidad de producción a gran escala (sin poner el riesgo cultivos para consumo humano) y su alta biodegradabilidad, lo que elimina el riesgo de contaminar el medio ambiente en caso de que ocurra un accidente durante su manejo como residuo industrial. Actualmente, se continúa analizando el comportamiento del aceite de ricino enriquecido con diferentes aditivos y concentraciones, para evaluar su eficiencia en diferentes sistemas y condiciones de trabajo. Bajo estas circunstancias, se puede tener un sinnúmero de combinaciones con las cuales es fácil perder de vista la que tenga el mejor comportamiento considerando todas las variables de interés (coeficiente de fricción, tasa de desgaste, ancho de huella, costo de los materiales, facilidad de producción, etc.) por lo que es preciso tener la capacidad de diferenciar aquellas que puedan tener algún comportamiento similar aunque sus valores numéricos sean diferentes para generar opciones, o aquellas que sobresalgan del promedio; para realizar esta tarea, es muy útil el uso de herramientas estadísticas que permitan discernir entre variables que influyen y aquellas que no en el comportamiento de las formulaciones estudiadas. Desde este punto de vista, la importancia del análisis estadístico radica en la selección de la formulación con el mejor desempeño a través del análisis de datos y la toma de decisiones sustentada en este proceso, con la ayuda de ecuaciones de predicción que simulen el comportamiento de los biolubricantes, y así se pueda tener un panorama más abierto sobre el estudio de estas sustancias.

ABSTRACT

The design and implementation of new technologies that have been developed in recent decades have brought with them new challenges in terms of the operation and performance of mechanical components. With all these advances, the use of highly polluting chemical substances, used for the operation of machines and tools in industry, has become popular, causing severe damage to the environment. In addition to the use of synthetic substances, one of the main problems faced by the industrial sector is the wear of parts in contact with each other, with a negative impact due to the loss of energy by friction of moving parts, because it represents damage to the environment (contributes to increased energy consumption due to the inefficiency of machinery and the need to produce spare parts, generating more CO₂ production globally) contributing to global issues such as global warming and the greenhouse effect; Therefore, different research areas around the world have launched studies to find materials and methods to help counteract and reverse the damage [1]. There are cutting-edge strategies that are focused on reducing human impact and attack poverty (one of the biggest problems in society) at a global level, such as the 2030 Agenda for Sustainable Development, which consists of 17 objectives that cover different areas and help to maintain the direction of the planned and executed actions of the different member countries of the UN; this study has a strong influence on objectives 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), 12 (Responsible Production and Consumption) and 13 (Climate Action) [2]. One of the most studied substances as an ecological alternative is castor oil, which from the tribological point of view has shown to have great benefits since it is a non-toxic substance, of vegetable origin and environmentally friendly that can be used as an industrial lubricant in applications that require high levels of friction, since it presents good resistance to oxidation in operations that require high temperatures and improves the behavior of the friction force in working systems. Castor oil can be mixed with some additives of natural origin that improve its oxidative capacity or help to reduce the friction force; the additive is selected according to the characteristic to be emphasized [3] [4]. For this study, two main characteristics are of interest: the friction coefficient and the wear factor. These properties are obtained through tribology tests to analyze the wear mechanisms in the parts used, as well as the interaction of the mixture on the

surface of the test material. Among the main advantages offered by this oil are its large-scale production capacity (without endangering crops for human consumption) and its high biodegradability, which eliminates the risk of contaminating the environment in the event of an accident occurring during its handling as industrial waste. Currently, the behavior of castor oil enriched with different additives and concentrations continues to be analyzed to evaluate its efficiency in different systems and working conditions. Under these circumstances, it is easy to confuse which formulation has the best performance considering all the variables of interest (coefficient of friction, wear rate, wear track width, cost of materials, ease of production, etc.), so it is necessary to have the ability to differentiate those that may have some similar behavior although their numerical values are different to generate options, or those that stand out above the average. To perform this item, it is very useful the statistical tools that allow to discern between variables that influence and those that do not influence the behavior of the formulations studied. From this point of view, the importance of statistical analysis consists in the selection of the formulation with the best performance through data analysis and decision making based on this process with the help of prediction equations that simulate the behavior of green lubricants, thus providing an integral view on the study of these substances.

INTRODUCCIÓN

Debido a la demanda global que se tiene por cubrir la manufactura de diversos productos para la población, las industrias trabajan a una velocidad exorbitante para satisfacer estos pedidos, por lo que requieren tener disponibles todos los insumos que permitan obtener la máxima eficiencia de la maquinaria. Dentro de estos insumos, una sustancia fundamental son los lubricantes, fluidos o grasas sin los cuales la producción no podría llevarse a cabo correctamente ni en el tiempo que se requiere. Resultado de la gran complejidad de los procesos de manufactura modernos y dada la creciente necesidad de convertirse en empresas verdes o limpias, el sector industrial tiene presión por elegir las sustancias ecológicas o amigables con el ambiente con las cuales trabajar y que le permitan cumplir ambos objetivos.

A nivel global, se han desarrollado diferentes estrategias que velan por el medio ambiente y generan acciones para detener y revertir el daño que se ha hecho en las últimas décadas. No se puede negar que los avances tecnológicos y las grandes industrias han beneficiado de manera positiva las vidas de miles de millones de personas, sin embargo, el daño al medio ambiente ha sido inversamente proporcional, es decir, en la misma medida, pero negativamente. A todo esto, se suma la preocupación por la aceleración que ha sufrido en los últimos años el calentamiento global y los estragos que ha causado en las condiciones climáticas; es por ello por lo que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha trabajado con todos los países miembros para generar la Agenda 2030 y de esta manera enfocar a las poblaciones de los diferentes países en lograr los 17 objetivos que la conforman y que se listan a continuación: 1 – Fin de la pobreza, 2 – Hambre cero, 3 – Salud y bienestar, 4 – Educación de calidad, 5 – Igualdad de género, 6 – Agua limpia y saneamiento, 7 – Energía asequible y no contaminante, 8 – Trabajo decente y crecimiento económico, 9 – Industria, innovación e infraestructura, 10 – Reducción de las desigualdades, 11 – Ciudades y comunidades sostenibles, 12 – Producción y consumo responsables, 13 – Acción por el clima, 14 – Vida submarina, 15 – Vida de ecosistemas terrestres, 16 – Paz, justicia e instituciones sólidas y 17 – Alianzas para lograr los objetivos. Cabe

mencionar que, desde el 2015 que se lanzó esta iniciativa, todos los países han alineado sus propias estrategias para enfocarse en el cumplimiento de las metas establecidas por la ONU [2].

Una de las corrientes de investigación reciente es respecto al tema de los lubricantes verdes o biolubricantes. Estas sustancias tienen como objetivo cumplir las mismas necesidades básicas de un lubricante normal (formulado a base de aceites minerales o sintéticos, con impacto negativo al medio ambiente) y cubrir la necesidad de ser biodegradable o, por lo menos, no contaminar más el medio en el que se desecha. Después de un arduo trabajo de investigación, los científicos han descubierto este tipo de propiedades en los aceites de origen vegetal, tal es el caso del aceite de canola, ajonjolí y ricino [5]. Adicionalmente, otro descubrimiento importante en este campo hace referencia a la mezcla del aceite vegetal con distintos aditivos de origen natural que permiten explotar sus beneficios y acentuar algunas características que favorecen su uso potencial como lubricante industrial. Dentro de las principales características que se busca al mezclar un aditivo con un aceite vegetal están: disminuir la fuerza de fricción, tener un menor desgaste y que la mezcla no se oxide.

Uno de los aceites vegetales que más beneficios ha mostrado en el rubro de la lubricación es el aceite de ricino, cuyas propiedades lo hacen muy versátil como lubricante al momento de utilizarlo en aplicaciones como rodamientos, sistemas de transmisión, procesos de estampado, entre otros [4]. Sin embargo, para resaltar dichas características, se debe mezclar con aditivos tales como curcumina, luteína, zeaxantina, astaxantina (estas últimas tres también conocidas como xantofilas), cuyo principal propósito es ser agentes antioxidantes en la formulación para evitar la degradación durante el uso [6].

Haciendo referencia a la cantidad de opciones que se tienen para elegir en cuanto a lubricantes verdes, de la misma forma se tienen un sinnúmero de materiales que tienen contacto entre ellos durante los procesos de manufactura. Tal es el caso del sistema

de acero AISI 4140 recocido (4140R) y el carburo de tungsteno (WC). El acero AISI 4140R es uno de los materiales más utilizados en elementos mecánicos debido a su gran dureza y sus propiedades de resistencia [4]. Por otra parte, el WC es un compuesto químico inorgánico que comprende partes iguales de átomos de tungsteno y carbono; es uno de los metales más resistentes, duraderos y fiables que existen, siendo aproximadamente tres veces más rígido que el acero y su dureza está ligeramente por debajo del diamante, siendo así un material apto para variadas aplicaciones, entre las que destaca la fabricación de herramientas [7].

Sin embargo, el tener muchas opciones de donde elegir conlleva a una problemática: ¿cuál es la mejor opción? ¿Cuál es la que tiene el mejor desempeño? ¿Cuál es la que se debe utilizar? Para responder a estos cuestionamientos, existen herramientas estadísticas que ayudan a discernir entre las opciones y ayudan a identificar la que es más conveniente de acuerdo con el objetivo que se quiera conseguir. Una de estas herramientas es conocida como diseño estadístico de experimentos [8] que realiza el análisis de los datos a través de una técnica conocida como análisis de varianza (ANOVA) que muestra la variación de las medias de las muestras, así como la dispersión de los datos [9].

El cuerpo del presente trabajo consta de cuatro capítulos y una sección de conclusiones. En el capítulo uno se encuentra la descripción del marco de referencia del estudio, donde se muestran los ensayos e investigaciones más recientes e interesantes en el campo de la tribología utilizando aceite de ricino como base de formulaciones verdes y los estudios realizados con apoyo del análisis estadístico; también se puede encontrar la justificación, el planteamiento del problema y los objetivos del proyecto, entre otros. El capítulo dos se refiere al marco teórico que sustenta todos los conocimientos plasmados, incluye temas como algunas técnicas estadísticas de análisis de datos, el análisis de varianza, la regresión, lubricantes, aceites vegetales, entre otros. En el capítulo tres se encuentra la metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto y las explicaciones de cada etapa. En el capítulo

cuatro se exponen y discuten con detalle todos los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto y en el apartado de conclusiones se encuentran los puntos más sobresalientes de los resultados.

CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 Antecedentes

El uso de los lubricantes verdes ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a la creciente necesidad que hay por buscar otras formas de disminuir las pérdidas de energía sin utilizar sustancias de origen mineral o fósil, cuya decadencia está a la vuelta de la esquina por los daños ocasionados al medio y porque son fuentes no renovables. Como solución a esta problemática, existen numerosos experimentos científicos que estudian el comportamiento de aceites vegetales (al natural o en mezclas con aditivos) como lubricantes de uso industrial y evalúan características de interés tales como estabilidad térmica, capacidad oxidativa, mecanismos de desgaste y factor de desgaste, entre otros.

En 2018, Ma. Teresa Hernández et al. reportaron que el comportamiento de la fricción del acero AISI 4140 probado con una contraparte de WC con lubricación de aceite de ricino a dos diferentes temperaturas fue notablemente mejor al compararlo con datos obtenidos del mismo ensayo, pero utilizando un aceite comercial como referencia; también mostró que el aceite de ricino tiene una mayor resistencia a la oxidación que el aceite comercial [4]. Otro estudio en 2019 mostró que el aceite de ricino (como lubricante verde) tiene un gran potencial para aplicaciones en la industria metalmecánica tales como procesos de estampado de láminas delgadas y transmisión de engranes; se analizaron las características físicas y químicas de las formulaciones, así como su desempeño durante una prueba de desgaste, midiendo la tasa de desgaste y si se presentó algún cambio en la dureza del material después de la prueba. Los resultados de este experimento llevaron a concluir que los lubricantes verdes presentaron los valores más bajos del coeficiente de fricción y un desgaste menor en las piezas, con mecanismos de desgaste muy similares; también se observó que la biolubricación eliminó casi totalmente el daño en la microdureza del acero (sin modificar la dureza del material) y se demostró que la mejor respuesta en la relación fricción-desgaste fue con el aceite de ricino puro [5].

Durante el 2020, Nazmus Sakib et al. desarrollaron un trabajo que evaluó las propiedades de cinco biolubricantes, así como el cambio en el índice de viscosidad al agregar acrilato de polimetilo como aditivo. Como resultado, se observó que varios aceites vegetales poseen buenas propiedades, como la viscosidad, para ser utilizados en el ámbito industrial de la lubricación, el incremento y también comprobó que, al agregar este aditivo, las propiedades naturales de los aceites bases mejoraban considerablemente [10].

En 2021, se encontró que al mezclar aceite de ricino con un grupo de xantofilas (pigmento fotosintético utilizado como aditivo natural para incrementar la capacidad antioxidante), el índice de viscosidad del aceite aumentaba y al mismo tiempo se reducía el espesor de la película lubricante de las mezclas (en comparación con el aceite puro en ambos casos). La capacidad de protección contra el desgaste del aceite de ricino aumentó con la adición de todas las xantofilas y, especialmente con la adición de astaxantina, la tasa de desgaste disminuyó en comparación con el aceite de ricino puro; el efecto más notable fue que el comportamiento de oxidación del aceite de ricino se enriqueció utilizando estas sustancias como aditivos [6].

En el 2022, se realizó un estudio que probó un aditivo excepcional en combinación con las exquisitas propiedades del aceite de ricino: la curcumina. Este estudio consideró formulaciones de aceite de ricino y curcumina/ astaxantina/ zeaxantina/ luteína/ dilaquiditiofosfato de zinc (ZDDP) y una mezcla de aceite de ricino – aceite de ajonjolí y curcumina. Derivado de ello, se encontró un aumento considerable en la viscosidad de los lubricantes formulados, gracias al poder espesante de la curcumina; también se tuvo una mejora en el comportamiento del coeficiente de fricción de los aceites verdes y se mostró que el desgaste fue la propiedad con más beneficios (debido a la adición de curcumina), ya que las tasas de desgaste disminuyeron hasta en un 96%, reflejándose en el mecanismo de desgaste que presentaban los aceros después de la prueba. Todos estos beneficios fueron posibles gracias al efecto gelatinizante de la curcumina en los aceites vegetales, ya que da lugar a una capa más gruesa que mejora

las propiedades de fricción y desgaste en el biolubricante. Incluso se observó una notable mejora en el rendimiento oxidativo de los aceites [3].

Durante este mismo año, se realizaron varios estudios que ahondaron el uso de las técnicas estadísticas como parte del análisis de un lubricante para elegir las mejores combinaciones de parámetros. Uno de ellos, cuyo objetivo fue examinar la eficacia de algunos aceites vegetales menos conocidos utilizados como lubricantes. A partir de algunas propiedades fisicoquímicas como viscosidad, los fluidos de corte desarrollados a base de aceites vegetales (sandía y jatrofa) se analizaron estadísticamente mediante 24 análisis factoriales completos. El objetivo era determinar la interacción de las propiedades fisicoquímicas en los fluidos de corte desarrollados. El efecto de las variables naturales sobre el índice de acidez y la viscosidad de los fluidos de corte se analizó en profundidad mediante ANOVA, gráficos de contorno y de superficie. A partir de las respuestas obtenidas del experimento explicadas por las variables independientes (agente emulsionante, agente anticorrosión, biocida y agente antiespumante), el fluido de corte a base de aceite de semilla de sandía tuvo una precisión del 89%, mientras que el fluido de corte a base de aceite de jatrofa tuvo una precisión del 75% [11].

Sobre esta misma línea de análisis estadístico, en otro estudio realizado sobre el comportamiento de desgaste de pares metálicos bronce – 100Cr6 bajo diferentes condiciones de lubricación para rodamientos, se evaluaron las características de desgaste de los cojinetes de fricción monobloque utilizados en los trenes de laminación de alambrón en condiciones en las que el aceite lubricante contenía un 2,5% de cascarilla, 5% de cascarilla, o ninguna cascarilla. Los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente, a tres velocidades de deslizamiento diferentes y con tres cargas diferentes. Para analizar los mecanismos de desgaste se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), y el método de superficie de respuesta (RSM) para analizar los resultados de las pruebas, como la pérdida volumétrica de material, el coeficiente de fricción y el perfil de la superficie. En este estudio, que se llevó a cabo en un entorno

lubricante que contenía partículas sólidas, el parámetro más eficaz fue el parámetro ambiental. Se concluyó que el aumento del número de partículas sólidas provocó un aumento de la pérdida volumétrica y del coeficiente de fricción [12].

Para finalizar el año, un experimento en los embragues de disco húmedo presentó un nuevo enfoque para la identificación y validación de modelos lineales de fricción mediante análisis de varianza (ANOVA) y regresión por pasos. Para ello, se utilizaron datos experimentales de tres sistemas de fricción diferentes con revestimiento de fricción a base de papel y carbono. Los modelos obtenidos pueden utilizarse como entrada para simulaciones térmicas, por ejemplo, pero también pueden ayudar a comprender mejor los principales factores que influyen y son aplicables a diversos sistemas de fricción. Para su validación, los modelos obtenidos se aplicaron a datos medidos y se observó una buena correspondencia entre el comportamiento de fricción simulado y medido, de acuerdo con el rango de velocidades estudiado. El procedimiento presentado puede adaptarse fácilmente, para diferentes factores y modos de funcionamiento, así como para otras aplicaciones [13].

El estudio más reciente de 2023 analizó el comportamiento tribológico y morfológico del acero inoxidable AISI 316L durante un proceso de torneado con cantidad mínima de lubricación, utilizando como lubricantes una emulsión de aceite – agua, aceite mineral, aceite de simaruba (comúnmente llamado aceituno), aceite de pongamia y aceite de neem, basado en un arreglo ortogonal de L_{25} de Taguchi. Se comprobó que los gráficos de efectos principales y el análisis de varianza (ANOVA) pueden utilizarse con éxito para identificar los parámetros de entrada óptimos del proceso y su porcentaje de contribución (P%) en los parámetros de salida durante el proceso estudiado. Los resultados concluyeron que la mejor opción era el aceite de neem, ya que fue el más eficaz para reducir las fuerzas de corte, el desgaste de la herramienta y la rugosidad superficial durante el torneado de acero inoxidable AISI 316L bajo condiciones mínimas de lubricación [14].

Estos sólo son algunos de los principales trabajos de investigación que en años recientes han mostrado al mundo una opción viable como alternativa al uso excesivo de sustancias minerales o sintéticas, con aceites amigables con el ambiente y que pueden igualar o incluso, porque no, mejorar las propiedades de los lubricantes comerciales y de uso industrial que existen hoy en día.

1.2 Planteamiento del problema

Hoy en día, se tienen muchas opciones de aceites lubricantes en el mercado, cada una formulada para aplicaciones determinadas, pero con dos objetivos en común: disminuir el desgaste de las piezas móviles de las máquinas y los herramientas e incrementar el tiempo de vida útil de los componentes. Sin embargo, una de las principales desventajas de estos lubricantes es que son altamente contaminantes y esto se contrapone en la balanza con su eficiencia, ya que presentan un desempeño considerablemente bueno.

Existe una necesidad en la industria manufacturera por reducir el costo del cambio de componentes por daño o desgaste, ya que los paros, programados o no, de la maquinaria equivalen a detener la producción y esto se ve reflejado en pérdidas económicas. De igual forma, cada pieza que debe ser reemplazada porque ya no funciona adecuadamente representa un gasto. Si este proceso de paros de máquinas y cambios de piezas es constante, la empresa tiene grandes pérdidas económicas. Se sabe que no se tienen máquinas o componentes de trabajo perpetuo, y lo más que puede hacer una industria es programar sus paros para que tengan el menor impacto posible en sus ganancias [15].

Además de todos los problemas de las industrias mencionados en el párrafo anterior, se tiene también el compromiso de cumplir con los objetivos acordados en la Agenda 2030 de la ONU, que, a causa de la naturaleza de la presente investigación, se puede tener principal impacto positivo en los objetivos 9, 12 y 13, ya que la presente

investigación contribuye al desarrollo y validación de sustancias biodegradables y su uso industrial [2]. Siguiendo este mismo enfoque y haciendo mención de que actualmente el sector industrial se encuentra atravesando por la cuarta revolución industrial (el internet de las cosas – enfoque en automatización y robotización de procesos, análisis de datos, digitalización, uso de Inteligencia Artificial), la realidad es que está comenzando ya la era de la Industria 5.0, que llega a complementar a la actual 4.0 con la ventaja de que suma la investigación y la innovación al servicio de la transición hacia una industria sostenible centrada en el ser humano [16].

Por ello, nace la inquietud por encontrar un lubricante que cumpla ambos requisitos: ser biodegradable (manejo como residuo peligroso sin daño al ambiente) y que mantenga o incremente el tiempo de vida útil de los componentes que soportan algún tipo de fricción en cargas pesadas de trabajo. Sin embargo, una desventaja de tener tantas opciones es el reto de elegir la mejor, tarea que podría parecer sencilla hasta que se revisa la cantidad de requisitos que se deben cumplir por un lubricante. Para ello, se cuenta con la herramienta del análisis estadístico, que ayuda a discernir entre las variables, a fin de entregar la solución que mejor se adapte para resolver el problema.

1.3 Justificación

Dentro de los siete desperdicios de la manufactura, se encuentran los tiempos muertos por paros de máquinas, ya sea que formen parte del programa de mantenimiento preventivo o que se tenga que realizar una intervención de última hora para cambiar un componente porque presentó algún daño, lo cierto es que, durante este lapso, la máquina no está produciendo y eso se traduce en pérdidas monetarias. Aunado a esto, cada pieza que debe ser cambiada como refacción, representa un costo para la empresa. Si, además, estos cambios son continuos porque se tiene una mala lubricación del sistema, todas las ganancias se verán mermadas debido a que el dinero que se genera de la venta de producto se gasta directamente en refacciones.

Un buen sistema de lubricación permite asegurar la fiabilidad y disponibilidad de los diferentes equipos de trabajo. Considerando esto, podemos decir que la vida útil de los elementos mecánicos está determinada por la calidad y eficiencia del sistema de lubricación [17].

Por otra parte, el manejo de los químicos y lubricantes utilizados por las empresas para minimizar las fallas por desgaste son sustancias altamente contaminantes, ya que no se pueden degradar en la naturaleza por el origen químico que tienen y presentan características de inflamabilidad y toxicidad. Si alguno de estos aceites tiene contacto con alguna parte de la tierra, permanece en el medio (reduciendo su calidad y productividad) y puede infiltrarse a aguas subterráneas, y puede llegar a formar una delgada capa superficial impidiendo el intercambio de oxígeno, así como bloquear el paso de la luz [18]. Vale la pena mencionar que el aceite de motor usado tarda 100 años en descomponerse por completo [19]; en el mar tiene una permanencia de 10 – 15 años flotando sobre el agua [20] y si se llega a quemar (cinco litros, por ejemplo) contamina el equivalente a la cantidad de aire que respira una persona durante tres años [21].

De esta problemática, surge la necesidad de buscar opciones de lubricantes biodegradables con aditivos que sean amigables con el ambiente y que no causen daño alguno si por un mal manejo, llegaran a tener contacto con suelos y/o mantos acuíferos.

1.4 Hipótesis

El comportamiento del aceite de ricino como base de un biolubricante, al mezclarse con aditivos antioxidantes de origen natural, disminuye el coeficiente de fricción cinemática y el desgaste de las piezas, en relación directa con la concentración del aditivo (a mayor concentración del aditivo, mayor reducción del coeficiente de fricción y desgaste).

1.5 Objetivo general

Realizar un análisis estadístico para lubricantes verdes con base de aceite de ricino, tres aditivos naturales y tres concentraciones diferentes en un sistema de trabajo de acero AISI 4140 recocido (4140R) con una contraparte de carburo de tungsteno (WC).

1.6 Objetivos específicos

- Obtener el coeficiente de fricción de las formulaciones a través de un ensayo de tribología
- Determinar el factor de desgaste de cada formulación a través del ancho de huella
- Realizar un análisis estadístico comparativo del coeficiente de fricción y el factor de desgaste
- Seleccionar la formulación más adecuada para el tribosistema con base en los resultados obtenidos del análisis estadístico

1.7 Alcance y limitaciones

Este proyecto tiene como objetivo enfocarse en el análisis estadístico de las diferentes formulaciones ensayadas con base de aceite de ricino y adicionadas con xantofilas (luteína, zeaxantina y astaxantina) probadas con un tribosistema formado por el acero AISI 4140 recocido y una contraparte de carburo de tungsteno (WC), debido a que son dos de los materiales más utilizados para la fabricación de componentes que están sometidos a contacto y diversas condiciones de operación en la industria.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Lubricantes

Un lubricante es toda sustancia que se coloca entre dos superficies móviles para disminuir la fuerza de fricción y el desgaste. Las funciones de un lubricante son controlar la temperatura, proveer protección contra la herrumbre y la corrosión, controlar contaminantes, disminuir la fricción y el desgaste, transmitir fuerza y sellar. Los lubricantes normalmente tienen dos componentes: el (los) aditivo (s) (1% - 25%) y el (los) aceite (s) base (99% - 75%); los aditivos le proporcionan características determinadas para aplicaciones en específico. Por lo regular, el aceite utilizado para fabricar un lubricante es de origen mineral o es alguna sustancia derivada de síntesis petroquímicas [22]. La nueva vertiente que está tomando gran importancia en este rubro es la que incluye aceites vegetales (ricino, ajonjolí, canola, girasol, etc.) como bases para los lubricantes.

Las propiedades que debe tener un lubricante son: alta estabilidad térmica, alta resistencia a la oxidación, alto índice de viscosidad, bajo punto de fluidez, buenas propiedades antifricción y anti-desgaste. En la figura 2.1 se muestran las principales características que debe tener un lubricante y en la figura 2.2 se observan las propiedades de los lubricantes mencionadas al inicio de este párrafo, entre otras [23].



Figura 2.1 Características de un lubricante



Figura 2.2 Propiedades de un lubricante

2.2 Aceites vegetales

Los aceites han sido utilizados por los humanos desde épocas ancestrales como parte de su alimentación y como combustibles; son productos de origen vegetal o animal, cuyos componentes principales son triésteres de ácidos grasos y el glicerol y se les denomina como “triglicéridos”. Un aceite puede estar formado por un solo tipo de triglicérido, o por una mezcla de estos. Si esta mezcla es sólida, o de consistencia pastosa, a temperatura ambiente (20°C), se trata de una “grasa”. Por el contrario, si es líquida a temperatura ambiente, es un “aceite”. De esta forma, grasas y aceites son químicamente lo mismo, pero con apariencia física diferente [24].

Las sustancias a partir de las cuales se producen los aceites son semillas o frutos. En realidad, todas las semillas y frutos contienen aceite, pero sólo los llamados oleaginosos sirven para la producción industrial de aceite. Entre las semillas de plantas cultivadas por su aceite, las más conocidas son: el cacahuete, la colza, el ricino, la soja y el girasol. La composición química de los aceites vegetales corresponde en la mayoría de los casos a una mezcla de 95% de triglicéridos y 5% de ácidos grasos libres, de esteroides, ceras y otros componentes minoritarios. Los triglicéridos son

triésteres formados por la reacción de ácidos grasos sobre las tres funciones como alcohol del glicerol [25].

Existen distintas categorías de aceite base según su origen: bases minerales, bases sintéticas, bases regeneradas y bases naturales. Ahondando un poco más sobre las bases naturales, los aceites de origen natural presentan mayor biodegradabilidad en comparación con los aceites minerales, por lo que se ha activado de nuevo el interés por su empleo. Gracias a la estructura química del aceite vegetal, presentan una alta viscosidad e índice de viscosidad, así como estabilidad térmica; el mayor inconveniente de éstos es la pobre estabilidad oxidativa que presentan [26].

2.3 Aditivos

Los aditivos son compuestos de naturaleza orgánica o inorgánica que se disuelven o se mantienen en suspensión en el aceite con el objetivo de potenciar, suprimir o introducir propiedades a este. La proporción de aditivos en los aceites actualmente es de entre el 0.1 al 30%, en función de la aplicación. La clasificación de los aditivos se realiza según la función que desempeñan: detergentes, dispersantes, mejoradores del índice de viscosidad, anti-desgaste, inhibidores de la herrumbre, inhibidores de la corrosión, antioxidantes, depresores del punto de congelación y antiespumantes [26].

2.3.1 Xantofilas

Los carotenoides son pigmentos vegetales que suelen encontrarse en frutas y verduras. Se componen de 2 clases, xantofilas y carotenos. Mientras que los carotenos se componen sólo de carbono e hidrógeno, las xantofilas incluyen grupos hidroxilo, lo que las hace ligeramente más hidrófilas que los carotenos. Las xantofilas tienen propiedades similares a las de los lípidos, ya que son insolubles en agua. Debido a la estructura conjugada de dobles enlaces carbono-carbono, las xantofilas apagan las especies reactivas del oxígeno, especialmente el oxígeno singlete, que puede causar peroxidación lipídica. Las propiedades antioxidantes de las xantofilas pueden

minimizar el daño del estrés oxidativo. Las xantofilas, son inhibidores de especies reactivas de oxígeno y de reactivas del nitrógeno y antioxidantes que rompen cadenas. La astaxantina es un potente antioxidante debido a los 2 grupos ceto de su estructura anular [27].

Las xantofilas se encuentran de forma natural en muchas plantas, pero en mayor cantidad en las hojas de las plantas verdes, en donde actúan para modular la cantidad de energía solar que se recibe. Estos pigmentos proporcionan sus tonos amarillentos y parduzcos a las hojas secas. Aunque la Xantofila es propia del reino vegetal y los animales no la producen, se pueden encontrar en su organismo debido a su ingestión [28].

Entre las principales xantofilas se encuentran sustancias como la luteína, zeaxantina, astaxantina, cantaxantina y otros muchos carotenoides. La luteína es uno de los dos principales carotenoides que se encuentran en el ojo humano (mácula y retina); se cree que funciona como un filtro de luz, protegiendo los tejidos oculares del daño de la luz solar [29]. La zeaxantina, al igual que la luteína, se deposita en los ojos para formar pigmento macular, lo que hace que nuestros ojos funcionen lo mejor posible; esta sustancia se encuentra naturalmente en verduras comunes [30]. La astaxantina es un antioxidante que a pesar de tener una estructura similar a la del betacaroteno, se diferencia de éste por tener una mayor capacidad antioxidante [31].

2.4 Metodología Seis Sigma (Six Sigma. 6σ)

La metodología Seis Sigma tiene como objetivo reducir la variabilidad de un proceso a cero defectos. Se trata de un enfoque que se basa tanto en la opinión del cliente (encuestas) como en datos medibles (indicadores) y fiables. Esta metodología se utiliza para reducir y eliminar los defectos en los procesos de producción (u otros) y en los mismos productos. Por consiguiente, tiene como objetivo mejorar la calidad general del producto y de los servicios. En 1986, Motorola, una firma estadounidense cuya

sede se encuentra en los suburbios de Chicago, creó la metodología “seis sigma”. Fue así como la firma registró la marca *Six Sigma®*. El objetivo principal del método era aumentar la satisfacción del cliente mejorando la calidad de los procesos de producción. El primer campo de aplicación de esta metodología fueron los procesos industriales, pero luego su uso se extendió a otras áreas como los procesos logísticos, administrativos, comerciales e incluso el ahorro de energía. Esta metodología consiste en: medir las expectativas del cliente, medir el desempeño de los procesos comerciales de la empresa en función de las expectativas del cliente, utilizar herramientas estadísticas para analizar las causas que influyen en el desempeño, implementar soluciones para corregir las causas fundamentales del incumplimiento y utilizar herramientas de medición para verificar que las soluciones implementadas tengan el efecto esperado en la mejora del desempeño de algún proceso. La metodología Seis Sigma emplea la herramienta DMAIC (por sus siglas en inglés) la cual consiste en 5 fases: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (define, measure, analyze, improve, control) [32]. En la figura 2.3 se tiene un diagrama que muestra la secuencia de pasos a seguir a través de la metodología DMAIC [33].

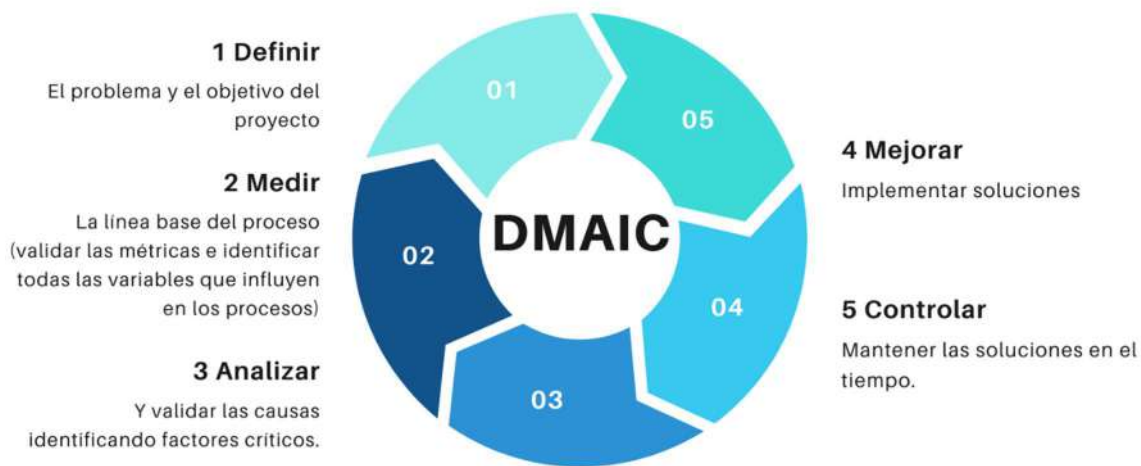


Figura 2.3 Pasos para la metodología DMAIC

En las industrias que cuentan con certificaciones *Cinturón Amarillo (Yellow Belt)* es más común el uso del sistema PDCA (por sus siglas en inglés: Plan, Do, Check, Act) que el DMAIC. Estas metodologías se apoyan en herramientas estadísticas para

realizar los análisis de datos y la mejora en los mismos de acuerdo con las mejoras realizadas.

2.5 Técnicas estadísticas para el análisis de datos

En 1662, John Graunt publicó su estudio con la primera tabla de vida que se conoce, donde recopiló datos de más de 30 años y logró analizar las causas de natalidad y mortalidad y hacer predicciones de estas. En esta época comenzó el desarrollo de la teoría de la probabilidad. En 1713, se propuso el teorema de Bernoulli y la distribución binomial, y entre 1731 y 1736, Thomas Bayes utilizó la probabilidad inductivamente y estableció la base matemática para la inferencia probabilística; además, estudió el problema de la determinación de la probabilidad de las causas a través de los efectos observados, conocido como la probabilidad inversa [34].

En 1733, De Moivre descubrió la función de densidad de probabilidad normal y, en 1738, propuso un caso particular del teorema central del límite, conocido como el teorema de De Moivre-Laplace, pero no fue hasta finales de ese siglo e inicios del XIX que se empezaron a sentar las bases teóricas de las probabilidades, con los trabajos de Lagrange y Laplace, cuya aplicación se limitó en ese momento a los juegos de azar. También a mediados del siglo XVIII comenzó el auge de la estadística descriptiva en asuntos sociales y económicos [34].

A finales del siglo XIX, se registraron cambios importantes en la estadística, al fusionarse con la teoría de la probabilidad, hasta la primera mitad del siglo XX, cuando se produjo un desarrollo vertiginoso de las técnicas estadísticas como consecuencia del intercambio entre las escuelas estadísticas de diferentes países. Con la consolidación axiomática de la teoría de la probabilidad, en 1933, se establecieron las bases actuales de las probabilidades y surgió la era moderna de la estadística con la estadística inferencial. A partir de este momento, surgieron las técnicas que permiten el estudio de relaciones entre dos variables (la causa y el efecto), como la correlación

y la regresión lineal para las variables cuantitativas y la prueba de la X^2 para el caso de las variables cualitativas. Las pruebas de hipótesis fueron creadas entre 1915 y 1933 como resultado de dos visiones antagónicas, la de Ronald Fisher y la de Jerzy Neyman con Egon Pearson. Dichas pruebas permitieron probar la asociación entre dos variables, al codificar y organizar los datos en una tabla de contingencia de dos filas por dos columnas (2×2), según la presencia o ausencia de ambas variables (la causa y el desenlace) [34].

2.6 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza (ANOVA, Analysis Of Variance, según la terminología inglesa) es uno de los aspectos más interesantes dentro del tema de las pruebas de hipótesis, por el ingenio desplegado en su desarrollo y, quizás, por las variadas formas que puede tomar. El ingenioso fue Ronald Aylmer Fisher (1890-1962), un genetista que fue uno de los estadísticos más influyentes del siglo XX. No existe un solo ANOVA, sino que el ANOVA comprende una serie de técnicas cuya aplicación particular depende del diseño experimental. El ANOVA permite analizar la variación en una variable de respuesta (variable continua aleatoria) medida en circunstancias definidas por factores discretos (variables de clasificación). El ANOVA se puede utilizar cuando se tiene alguna de las siguientes situaciones: cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones o cuando hay dos o más grupos en quienes se hacen mediciones repetidas en dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto y cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos tratamientos diferentes, es decir, cuando el efecto de cada uno por separado y su posible interacción es importante [35].

En este tipo de pruebas, se elige un porcentaje de confiabilidad, que por lo regular se encuentra en un rango de 90 – 95%, para obtener como nivel de significancia el elemento α , que es complementario al porcentaje de confiabilidad y tiene valores de 5 – 10%, dependiendo del porcentaje considerado para la prueba (0.05 o 0.10). El valor

p se considera clave para determinar si una variable o experimento es o no significativo para el análisis, debido a que representa la probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula; esto quiere decir que entre más bajo sea el valor de p, se tiene una evidencia más fuerte de que los valores obtenidos van en contra de la hipótesis nula [36].

Parte de la información relevante obtenida después de ejecutar esta prueba es la “tabla Resumen del modelo”, donde se muestran cuatro indicadores importantes que ayudan a evaluar el análisis: *S*, *R-cuad.*, *R-cuad. (ajust)* y *R-cuad. (pred)*. *S* representa la desviación estándar de la distancia entre los valores de datos y los valores ajustados; se mide en las unidades de la respuesta; mientras más bajo sea el valor de *S*, mejor describirá el modelo la respuesta. *R-cuadrada* (*R-cuad.*) es el porcentaje de variación en la respuesta que se explica por el modelo; se calcula como 1 menos la relación de la suma de los cuadrados del error (que es la variación que no es explicada por el modelo) a la suma total de los cuadrados (que es la variación total en el modelo); mientras mayor sea el valor de *R-cuad.*, mejor se ajustará el modelo a los datos; *R-cuad.* siempre está entre 0% y 100%. El *R-cuadrada ajustado* (*R-cuad. (ajust)*) es el porcentaje de la variación en la respuesta que es explicada por el modelo, ajustado para el número de predictores en el modelo relativo al número de observaciones. El *R-cuad. (ajust)* se calcula como 1 menos la relación del cuadrado medio del error (MSE) con el cuadrado medio total (CM Total); se utiliza *R-cuad. (ajust)* cuando se desea comparar modelos que tengan diferentes números de predictores (*R-cuad.* siempre aumenta cuando se agrega un predictor al modelo, incluso cuando no haya una mejora real en el modelo); el valor de *R-cuad. (ajust)* incorpora el número de predictores del modelo para ayudar a elegir el modelo correcto. El *R-cuadrada pronosticado* (*R-cuad. (pred.)*) se calcula con una fórmula que equivale a eliminar sistemáticamente cada una de las observaciones del conjunto de datos, estimar la ecuación de regresión y determinar qué tan bien predice el modelo la observación eliminada: el valor de *R-cuad. (pred.)* varía entre 0 y 100% (aunque los cálculos de *R-cuad. (pred.)* pueden producir valores negativos, para estos casos Minitab muestra cero.); utilice *R-cuad. (pred.)* para determinar qué tan bien el modelo predice la respuesta para nuevas

observaciones; los modelos que tienen valores más grandes de R-cuad. (pred.) tienen mejor capacidad de predicción¹ [37].

2.7 Regresión

Un análisis de regresión genera una ecuación para describir la relación estadística entre uno o más predictores y la variable de respuesta y para predecir nuevas observaciones. La regresión lineal generalmente utiliza el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios, del cual se obtiene la ecuación al minimizar la suma de los residuos al cuadrado [38].

Los resultados de la regresión identifican la dirección, el tamaño y la significancia estadística de la relación entre un predictor y una respuesta: el signo de cada coeficiente indica la dirección de la relación, los coeficientes representan el cambio medio en la respuesta para una unidad de cambio en el predictor mientras se mantienen constantes otros predictores incluidos en el modelo, el valor p de cada coeficiente prueba la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a cero (sin efecto). Por lo tanto, los valores p bajos indican que el predictor es una adición significativa al modelo y la ecuación predice nuevas observaciones dados los valores predictores especificados [38].

Existen tres tipos de regresión: simple, múltiple y de mínimos cuadrados ordinarios. La regresión lineal simple examina la relación lineal entre dos variables continuas: una respuesta (Y) y un predictor (X). Cuando las dos variables están relacionadas, es posible predecir un valor de respuesta a partir de un valor predictor con una exactitud mayor que la asociada únicamente a las probabilidades. La regresión proporciona la línea que “mejor” se ajusta a los datos. Esta línea se puede utilizar después para:

¹ Un R-cuad. (pred.) que sea sustancialmente menor que R-cuad. puede indicar que el modelo está sobreajustado. Un modelo sobreajustado se produce cuando se agregan términos para efectos que no son importantes en la población.

examinar cómo cambia la variable de respuesta a medida que cambia la variable predictora y predecir el valor de una variable de respuesta (Y) para cualquier variable predictora (X). La regresión lineal múltiple examina las relaciones lineales entre una respuesta continua y dos o más predictores. Si el número de predictores es grande, antes de ajustar un modelo de regresión con todos los predictores, se deberían utilizar las técnicas de selección de modelo paso a paso o de los mejores subconjuntos para excluir los predictores que no estén asociados con las respuestas. En la regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLS), la ecuación estimada se calcula determinando la ecuación que minimiza la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos de los datos de la muestra y los valores pronosticados por la ecuación [38].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En la figura 3.1 se muestra un resumen de la metodología a seguir en el proyecto, mientras que en la figura 3.2 se ejemplifican los reactivos y equipos que se utilizaron.



Figura 3.1 Metodología

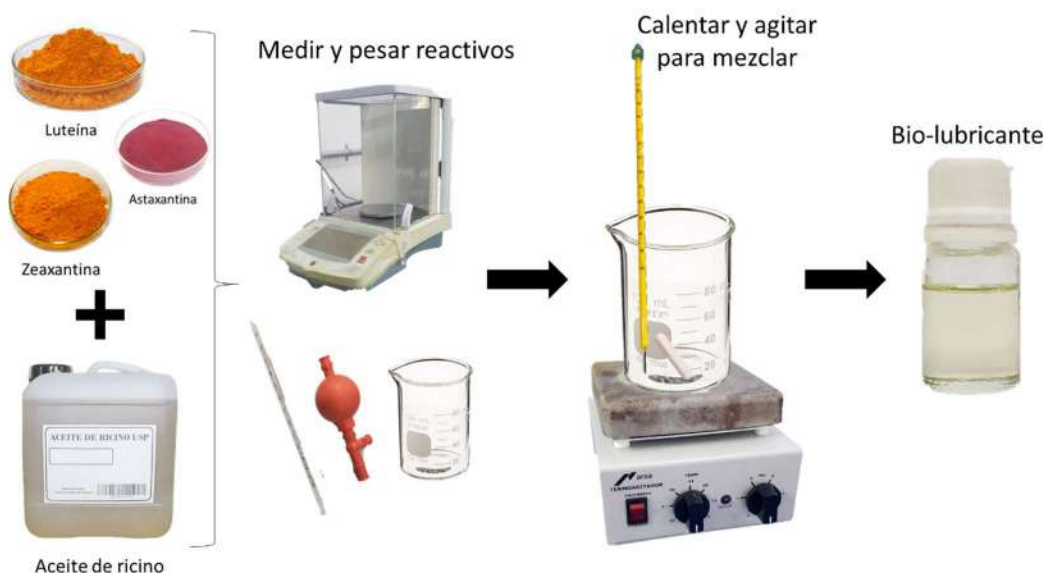


Figura 3.2 Reactivos y equipos utilizados para desarrollar la metodología

Para el desarrollo de la primera etapa de este estudio se eligió un sistema de trabajo formado por los aceros AISI 4140 (como muestra) y un pin de carburo de tungsteno (WC). El detalle de la preparación de las probetas se describe en el apartado 3.2 *Evaluación del desempeño tribológico de los lubricantes verdes*. Las formulaciones de lubricantes verdes se describen a continuación en el apartado 3.1 *Aceite base, aditivos y formulaciones*.

Durante la etapa dos, la obtención de datos experimentales se realizó a través de ensayos de tribología con cada una de las formulaciones para obtener el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste y así poder llegar a la etapa del análisis estadístico, cuyo detalle se encuentra en el apartado 3.3 *Análisis estadístico de los resultados*. Las características de los ensayos de tribología realizados se describen a detalle en el apartado 3.2 *Evaluación del desempeño tribológico de los lubricantes verdes*.

Una vez obtenidos los datos de los ensayos de tribología, se procedió a analizar los resultados obtenidos para poder llegar a la quinta y última etapa, la generación de conclusiones y siguientes pasos.

3.1 Aceite base, aditivos y formulaciones

Para la formulación de los biolubricantes, se seleccionaron la luteína, la zeaxantina y la astaxantina como aditivos lubricantes porque se encuentran entre las xantofilas más comunes, son abundantes y tienen gran capacidad antioxidante. Los aditivos se obtuvieron de la flor nativa mexicana (*Tagetes erecta* L.), conocida como Cempasúchil. Para obtener las formulaciones de interés, las xantofilas en polvo fueron mezcladas con el aceite de ricino puro adquirido en Abreiko, Guadalajara (Jalisco), México. Se eligió una concentración molal de 0.001 (568 mg/kg aproximadamente) de cada xantofila (esta decisión se tomó con base en una prueba de solubilidad llevada a cabo en el laboratorio previamente). La mezcla de las formulaciones se realizó a 80 °C mediante agitación magnética a 100 rpm durante una hora. Todas las formulaciones

obtenidas fueron de consistencia homogénea. Una observación digna de notar fue el color que tomó cada formulación de acuerdo con el color característico de cada aditivo [6].

3.2 Evaluación del desempeño tribológico de los lubricantes verdes

Para tener la misma referencia de medición en todas las formulaciones, se prepararon superficialmente las probetas de acero AISI 4140, con una rugosidad R_a de $0.03\ \mu\text{m}$. Todas las probetas eran discos de 25.4 mm de diámetro con 0.5 mm de espesor, obtenidos de una barra de acero comercial. Los pines de carburo de tungsteno (WC) usado como contraparte para el experimento tenían un diámetro de 3 mm y una rugosidad R_a de $0.03\ \mu\text{m}$. Para poder evaluar las características lubricantes de las formulaciones, se utilizó una prueba de fricción cinemática, a través de la cual se estimó el coeficiente de fricción cinemática y el factor de desgaste. Esta prueba se realizó en un tribómetro con una configuración pin-on-disk de CSM Instruments Needham (MA), USA bajo el estándar de la ASTM G-99. Todos los materiales se limpiaron antes de realizar la prueba con metanol, para prevenir cualquier tipo de contaminación. Las condiciones bajo las cuales se realizaron las pruebas fueron una carga normal de 1 N (que representó un esfuerzo de contacto de 900 MPa) sobre el pin de WC con un radio para la huella de desgaste de 2 mm (a partir del centro de la probeta), con una velocidad de $0.025\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Al trabajar con este equipo, las muestras fueron sumergidas en 60 ml de cada biolubricante, que se mantuvo a una temperatura de $100\ ^\circ\text{C}$ durante toda la prueba con ayuda de una resistencia eléctrica [6].

3.3 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los datos, se utilizó la herramienta estadística de ANOVA y regresión lineal, esto con la finalidad de encontrar el lubricante verde que tenga el comportamiento óptimo en cuanto a desgaste y coeficiente de fricción, y al mismo tiempo obtener una ecuación que permita predecir el comportamiento de un lubricante verde con base en ciertas características predeterminadas (esfuerzo de cedencia de los materiales para prueba, temperatura del lubricante durante el ensayo

de tribología, coeficiente de fricción cinemática, factor de desgaste, etc.). Este análisis se realizó a través del programa Minitab Statistical Software, que es un programa de computadora diseñado para ejecutar análisis estadísticos básicos y avanzados.

3.4 Ponderación de resultados obtenidos

Al finalizar el análisis estadístico, se llevó a cabo una ponderación arbitraria en la cual se asignó la calificación de 100 y el color verde al aditivo y la concentración que presentaran el valor óptimo para cada característica evaluada (coeficiente de fricción, ancho de huella y desgaste), se asignó el color amarillo y la calificación de 75 al 2do de cada categoría con los valores óptimos, se le dio un 50 y el color anaranjado al tercero y el color rojo con una calificación de 25 se determinó para el aditivo y la concentración que presentaran los valores menos favorables en cada caso. Posteriormente, cada aditivo y cada concentración obtuvieron una calificación sumatoria la cual ayudó a determinar el mejor de cada uno considerando el puntaje más alto. En el capítulo 4 apartado 4.2.5 Resumen de resultados se muestra una explicación detallada de este proceso y las tablas donde se concentra la información.

Gracias a este proceso de resumen y a los resultados del análisis estadístico, se logró llegar a la conclusión del mejor aditivo y la mejor concentración.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Para evaluar los resultados, se separaron las variables de estudio: el apartado 4.1 contiene el análisis correspondiente al coeficiente de fricción y el apartado 4.2 contiene la información relacionada con el desgaste. Ambas variables se consideraron de salida (respuesta), y el aditivo y la concentración se utilizaron como variables predictoras (de entrada).

Para expresar la composición de una disolución² se pueden emplear distintos conceptos, tales como: concentración másica (C), fracción másica (X_i), porcentaje en peso (%), etc.; dos de las formas más comunes para hacer referencia a la concentración del soluto³ son la molaridad (M) y molalidad (m) [39]. En el presente trabajo se consideran las concentraciones molales (m) de los aditivos, para ser congruentes con la información mostrada en la referencia [5]. Por ello, en las siguientes tablas y figuras donde se reporten valores de concentración, los números estarán seguidos por una “m”, para indicar que se refiere a “molal”.

4.1 Análisis estadístico del coeficiente de fricción (μ_k)

4.1.1 Análisis de varianza (ANOVA)

En la tabla 4.1 se puede observar el detalle de las formulaciones evaluadas: el aceite de ricino es la base de la formulación enriquecida con tres aditivos de origen vegetal (luteína, zeaxantina y astaxantina) cuyas concentraciones se muestran entre paréntesis, en la tercera columna se ubica el coeficiente de fricción promedio que le corresponde.

² Mezcla que resulta de disolver una sustancia en un líquido. Tomado del diccionario en línea *Oxford Languages*.

³ Sustancia que está disuelta en otra. Tomado del diccionario en línea *Oxford Languages*.

Tabla 4.1 Identificación de formulaciones y valores de coeficiente de fricción promedio

Aceite base	Aditivo (concentración)	Coeficiente de fricción promedio ($\bar{\mu}_k$)
Aceite de ricino (CO)	Ricino (sin aditivo)	0.0955
	Luteína ($1 \times 10^{-3}m$)	0.1086
	Zeaxantina ($1 \times 10^{-3}m$)	0.1122
	Astaxantina ($1 \times 10^{-3}m$)	0.1162
	Astaxantina ($1 \times 10^{-4}m$)	0.0996
	Astaxantina ($5 \times 10^{-4}m$)	0.1194

En la figura 4.1, se muestra una gráfica comparativa del comportamiento del coeficiente de fricción para cada formulación. Las formulaciones que presentan el nivel más bajo (considerando el coeficiente de fricción promedio) son el aceite de ricino puro (sin aditivos) y el aceite de ricino con astaxantina $1 \times 10^{-4}m$.

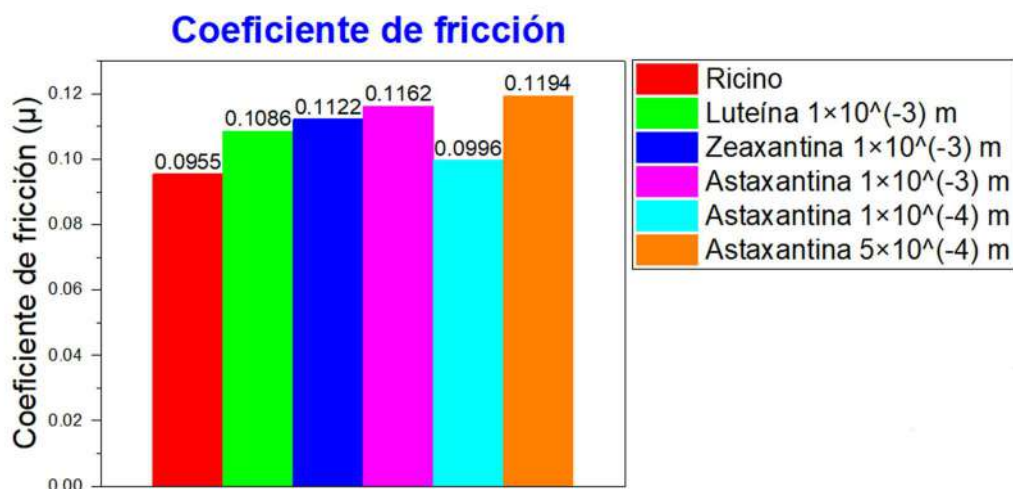


Figura 4.1 Gráfica comparativa de coeficientes de fricción de formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales

Para realizar el análisis estadístico, se asignó un número de identificación a cada aditivo para las formulaciones, los cuales se muestran en la tabla 4.2. En la tabla 4.3 se muestra la identificación de las concentraciones utilizadas en el experimento. En las siguientes figuras, se referirá a cada formulación con su identificación correspondiente.

Tabla 4.2 Identificación de aditivos para análisis estadístico

ID aditivo	Aditivo
0	Sin aditivo
1	Luteína
2	Zeaxantina
3	Astaxantina

Tabla 4.3 Identificación de concentraciones para análisis estadístico

ID concentración	Concentración
0	Sin aditivo
1	1×10^{-3} m
2	1×10^{-4} m
3	5×10^{-4} m

El primer análisis realizado fue el de varianza (ANOVA) considerando la interacción entre el coeficiente de fricción vs la concentración; las premisas consideradas para las hipótesis se muestran en la figura 4.2 inciso a, resaltando que se propuso igualdad de varianzas para comenzar y un nivel de significancia del 95% (en otras palabras, $\alpha = 0.05$). En la tabla correspondiente al inciso b, se muestra el valor $p = 0.000$ de la concentración, que confirma que es significativo para el estudio (con un porcentaje de contribución de 76.68%, calculado con el valor SC ajustado y el total); es importante recordar que la forma de identificar si una variable es significativa o no en un ANOVA, refiere directamente al valor p que tiene: si el valor p de la variable es menor que el nivel de significancia, la variable es significativa; por el contrario, si el valor p es mayor que el nivel de significancia, los efectos de la variable no son representativos para el estudio y se puede descartar su influencia en el sistema. En la tabla del inciso c se muestra el valor S , que al ser tan bajo demuestra que el modelo describe de manera adecuada la respuesta; también se tienen los valores de R^2 , R^2 ajustado y R^2 predeterminado, de 76.68% que, en complemento con S , confirman que la respuesta efectivamente está descrita de manera correcta por el modelo de análisis. En el inciso d se encuentra una tabla donde se observan el valor medio de los datos

experimentales (coeficiente de fricción) de cada concentración y su desviación estándar, así como los intervalos de confianza de cada formulación; las concentraciones que tuvieron los coeficientes de fricción más bajos fueron 0 y 2, con 0.0954 y 0.0995, respectivamente; las cuatro concentraciones mostraron desviaciones estándar muy bajas, oscilando entre el 0.003 y 0.0055. Por último, en el inciso e, se muestra la gráfica de intervalos donde se puede apreciar el valor del coeficiente de fricción de cada formulación y su nivel respecto a las demás concentraciones.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	3	12.494	4.16463	200197.46	0.000
Error	182642	3.799	0.00002		
Total	182645	16.293			

a)

b)

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0045610	76.68%	76.68%	76.68%

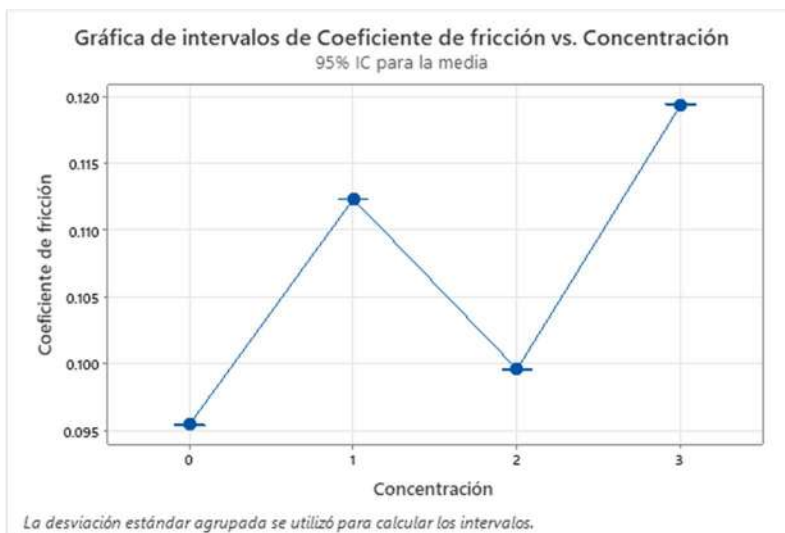
c)

Medias

Concentración	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	30441	0.095485	0.003455	(0.095434, 0.095537)
1	91323	0.112327	0.005349	(0.112297, 0.112357)
2	30441	0.099596	0.004130	(0.099545, 0.099647)
3	30441	0.119356	0.003161	(0.119305, 0.119407)

Desv.Est. agrupada = 0.00456099

d)



e)

Figura 4.2 Análisis de varianza de un solo factor (coeficiente de fricción vs concentración), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales: a) consideraciones del método utilizado para el análisis; b) valor p; c) resumen del modelo de análisis; d) tabla de medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza de las muestras; e) gráfica de intervalos de coeficiente de fricción vs concentración.

Se realizó un segundo análisis de varianza considerando la interacción entre el coeficiente de fricción y el aditivo. En la figura 4.3 inciso a se muestran las hipótesis para la evaluación, resaltando que se propuso igualdad de varianzas para comenzar y un nivel de significancia del 95% (en otras palabras, $\alpha = 0.05$), de manera similar que para el análisis de coeficiente de fricción vs concentración. En la tabla correspondiente al inciso b, se muestra el valor $p = 0.000$ del aditivo, que confirma que es significativo para el estudio (con un porcentaje de contribución de 39.94%, calculado con el valor SC ajustado y el total). En la tabla del inciso c se muestra el valor S, que al ser tan bajo demuestra que el modelo describe de manera correcta la respuesta; también se tienen los valores de R^2 , R^2 ajustado y R^2 predeterminado, de 39.94%; para este caso en particular, el porcentaje de R^2 se considera como bajo, sin embargo, en complemento con S y el análisis de la interacción coeficiente de fricción vs concentración, el modelo ayuda a describir la respuesta. En el inciso d se encuentra una tabla donde se observan el valor medio de los datos experimentales (coeficiente de fricción) de cada aditivo y su desviación estándar, así como los intervalos de confianza de cada

formulación; los aditivos que tuvieron los coeficientes de fricción más bajos fueron 0 y 1, con 0.0954 y 0.1086, respectivamente; los cuatro aditivos mostraron desviaciones estándar muy bajas, oscilando entre 0.0030 y 0.0095. Por último, en el inciso e, se muestra la gráfica de intervalos donde se puede apreciar el valor del coeficiente de fricción de cada formulación y su nivel respecto a los demás aditivos, mostrando que el que posee el valor más bajo es el 0, mientras que los aditivos 2 y 3 tienen un nivel muy parecido.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Aditivo	3	6.508	2.16925	40487.89	0.000
Error	182642	9.786	0.00005		
Total	182645	16.293			

a)

b)

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0073197	39.94%	39.94%	39.94%

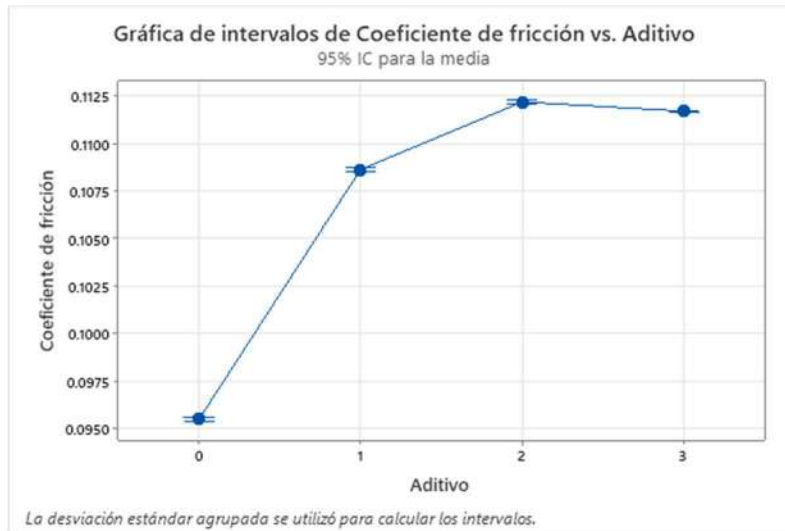
c)

Medias

Aditivo	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	30441	0.095485	0.003455	(0.095403, 0.095568)
1	30441	0.108631	0.006057	(0.108549, 0.108713)
2	30441	0.112189	0.003376	(0.112107, 0.112271)
3	91323	0.111704	0.009335	(0.111657, 0.111752)

Desv.Est. agrupada = 0.00731969

d)



e)

Figura 4.3 Análisis de varianza de un solo factor (coeficiente de fricción vs aditivo), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales: a) consideraciones del método utilizado para el análisis; b) valor p; c) resumen del modelo de análisis; d) tabla de medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza de las muestras; e) gráfica de intervalos de coeficiente de fricción vs aditivo.

Una vez realizado este estudio, se procedió a ejecutar de forma complementaria un análisis de regresión para poder obtener una ecuación que pudiera ser utilizada para predecir el comportamiento del coeficiente de fricción bajo las condiciones de prueba mencionadas anteriormente.

4.1.2 Regresión y ecuación de predicción

Para trabajar con el análisis de regresión se eligieron dos variables del sistema: aditivo y concentración, ya que se consideró que eran las más representativas para determinar el comportamiento del lubricante verde durante los ensayos de tribología. En el inciso a de la figura 4.4 se encuentra la ecuación de predicción obtenida a través del análisis de regresión (en la ecuación 4.1 se encuentra la forma simplificada de la ecuación de predicción, donde CoF corresponde a coeficiente de fricción, A a aditivo y C a concentración), la cual muestra la relación entre predictores lineales y de

segundo orden con los coeficientes estimados para cada término. En el inciso b se tiene el resumen del modelo, el cual muestra un valor S muy pequeño (0.0073) lo cual indica que ajusta adecuadamente al comportamiento de la variable de salida; por otro lado, se encuentran también los valores R^2 , R^2 -ajustado y R^2 -predeterminado, que determinan el porcentaje de variación en la respuesta que puede ser explicado por el modelo lineal, con un valor de 39.88%; para obtener un porcentaje más alto de R^2 , se propuso un modelo de regresión que involucraba predictores lineales, de segundo orden e interacciones cruzadas, cuyo porcentaje de R^2 fue de 81.98%, sin embargo, al momento de evaluar el comportamiento del coeficiente de fricción con dicha ecuación, el error entre los valores experimentales y los teóricos correspondientes a cuatro de las seis formulaciones, era mayor al 30%, por lo cual se descartó ese análisis. En el inciso c se muestra la tabla con la información del análisis de varianza de la regresión, donde se puede observar en la primera columna los tres términos considerados como significativos (aditivo, concentración y la interacción “aditivo*concentración”) y confirmados por su valor $p = 0.000$. En el inciso d está el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, que es una gráfica que representa que tan significativo es o no una variable bajo el siguiente método: en el lado izquierdo de la gráfica se ubican los términos y sus interacciones seguidos de una línea roja punteada que marca el nivel de significancia de dichos términos: “si es significativo, la barra que lo representa sobrepasará el nivel de la línea punteada; si no es significativo, la barra que lo representa quedará sin sobrepasar el nivel de la línea punteada y se deberá eliminar del análisis ese término/interacción para incrementar el porcentaje de ajuste del modelo, siempre y cuando no sea significativo de manera individual”, la línea punteada utilizada como referencia depende directamente del nivel de significancia seleccionado en un inicio; al observar la gráfica se concluye que los tres términos considerados son significativos porque sobrepasan por mucho el nivel de la referencia.

$$CoF = 0.095485 + 0.004771 A + 0.013455 C - 0.004114 A * C \quad (4.1)$$

Ecuación de regresión

$$\text{Coeficiente de fricción} = 0.095485 + 0.004771 \text{ Aditivo} + 0.013455 \text{ Concentración} - 0.004114 \text{ Aditivo} \times \text{Concentración}$$

a)

Resumen del modelo

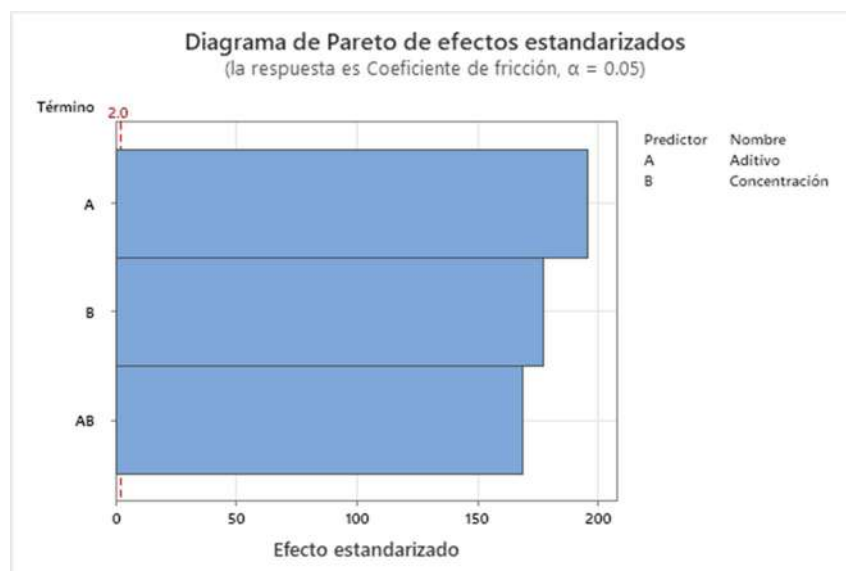
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0073237	39.88%	39.88%	39.87%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	6.497	2.16571	40377.96	0.000	
Aditivo	1	2.059	2.05927	38393.42	0.000	
Concentración	1	1.692	1.69193	31544.61	0.000	
Aditivo*Concentración	1	1.531	1.53079	28540.41	0.000	
Error	182642	9.796	0.00005			
Falta de ajuste	2	6.861	3.43038	213434.87	0.000	
Error puro	182640	2.935	0.00002			
Total	182645	16.293				

b)

c)



d)

Figura 4.4 Análisis de regresión para coeficiente de fricción en formulaciones con aceite de ricino como base y diferentes aditivos vegetales: a) ecuación de regresión (considerando las interacciones entre las variables); b) resumen del modelo; c) análisis de varianza; d) diagrama de Pareto de los efectos estandarizados.

Para comprobar la funcionalidad de la ecuación de regresión, se procedió a introducir los datos de las variables para comparar el resultado contra el coeficiente de fricción promedio calculado con los datos experimentales, y obtener el porcentaje de error

entre el valor experimental (real) y el de la ecuación (teórico). Los resultados de este ejercicio se pueden observar en la tabla 4.4, donde se muestra el ID correspondiente al aditivo, su concentración, el valor del coeficiente de fricción experimental y el valor calculado utilizando la ecuación de regresión.

Para el cálculo del coeficiente de fricción utilizando la ecuación de regresión, se utilizaron los números de identificación mostrados en la tercera columna de la tabla 4.4, ya que se consideró la sustancia sola y no la mezcla “aditivo + concentración”, como en el análisis de varianza. Las concentraciones utilizadas en la ecuación son las mostradas en la segunda columna de dicha tabla (concentración molar).

Tabla 4.4 Validación de la ecuación de regresión

Aditivo	Concentración (m)	ID Aditivo	CoF experimental (real)	CoF ecuación (teórico)	% Error
Ninguno	0	0	0.0955	0.0955	0.00
Luteína	1×10^{-3}	1	0.1086	0.1003	7.70
Zeaxantina	1×10^{-3}	2	0.1122	0.1050	6.38
Astaxantina	1×10^{-3}	3	0.1162	0.1098	5.47
Astaxantina	1×10^{-4}	3	0.0996	0.1098	10.25
Astaxantina	5×10^{-4}	3	0.1194	0.1098	8.01

La última columna de la tabla 4.4 muestra el porcentaje de error que tiene el cálculo del coeficiente de fricción experimental comparado con el obtenido a través de la ecuación de regresión. La formulación que presenta mayor variación entre ambos datos es el aditivo “astaxantina” con una concentración de “ 1×10^{-4} m”, con un 10.25% de error respecto al valor experimental.

4.1.3 Uso de la ecuación de regresión para predicción

En la figura 4.5 se pueden observar las gráficas obtenidas para corroborar la validez de la ecuación de predicción. Se tomaron 28 concentraciones diferentes de los aditivos

y el valor experimental de cada uno, en la gráfica el valor experimental tiene un color azul claro y los datos obtenidos con la ecuación se representan en color azul oscuro. En cada gráfica se muestra el valor promedio del coeficiente de fricción experimental y el obtenido con las diferentes concentraciones. El coeficiente de fricción que presenta mayor diferencia es utilizando la astaxantina, ya que con la concentración de 1×10^{-4} m se obtiene un valor promedio muy bajo, a diferencia de los obtenidos con las concentraciones de 5×10^{-4} m y 1×10^{-3} m, en cuyo caso son similares. Los datos con los cuales se realizó el cálculo de las predicciones se pueden consultar en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7.

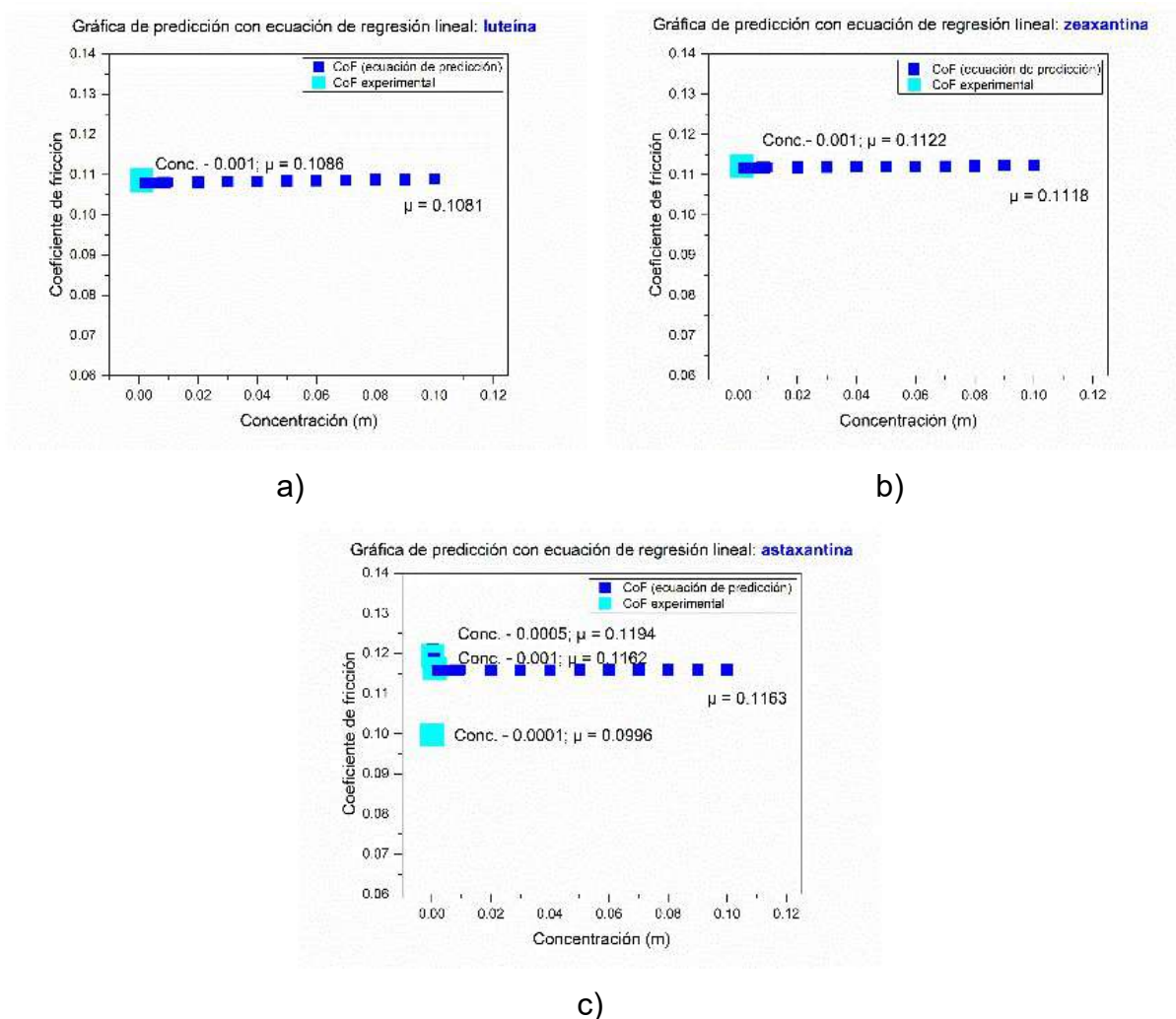


Figura 4.5 Gráficas de predicción de coeficiente de fricción con diferentes concentraciones de aditivos: a) luteína, b) zeaxantina, c) astaxantina

Tabla 4.5 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (luteína)

Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	CoF μ_k
Luteína (1)	Predicción	1×10^{-4}	0.1079
	Predicción	2×10^{-4}	0.1079
	Predicción	3×10^{-4}	0.1079
	Predicción	4×10^{-4}	0.1079
	Predicción	5×10^{-4}	0.1079
	Predicción	6×10^{-4}	0.1079
	Predicción	7×10^{-4}	0.1079
	Predicción	8×10^{-4}	0.1079
	Predicción	9×10^{-4}	0.1079
	Experimental	1×10^{-3}	0.1086
	Predicción	2×10^{-3}	0.1079
	Predicción	3×10^{-3}	0.1079
	Predicción	4×10^{-3}	0.1079
	Predicción	5×10^{-3}	0.1079
	Predicción	6×10^{-3}	0.1080
	Predicción	7×10^{-3}	0.1080
	Predicción	8×10^{-3}	0.1080
	Predicción	9×10^{-3}	0.1080
	Predicción	1×10^{-2}	0.1080
	Predicción	2×10^{-2}	0.1081
	Predicción	3×10^{-2}	0.1082
	Predicción	4×10^{-2}	0.1083
	Predicción	5×10^{-2}	0.1084
	Predicción	6×10^{-2}	0.1085
	Predicción	7×10^{-2}	0.1086
	Predicción	8×10^{-2}	0.1087
	Predicción	9×10^{-2}	0.1088
	Predicción	1×10^{-1}	0.1089

Tabla 4.6 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (zeaxantina)

Zeaxantina (2)	Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	CoF μ_k
		Predicción	1×10^{-4}	0.1117
		Predicción	2×10^{-4}	0.1117
		Predicción	3×10^{-4}	0.1117
		Predicción	4×10^{-4}	0.1117
		Predicción	5×10^{-4}	0.1117
		Predicción	6×10^{-4}	0.1117
		Predicción	7×10^{-4}	0.1117
		Predicción	8×10^{-4}	0.1117
		Predicción	9×10^{-4}	0.1117
		Experimental	1×10^{-3}	0.1122
		Predicción	2×10^{-3}	0.1117
		Predicción	3×10^{-3}	0.1117
		Predicción	4×10^{-3}	0.1117
		Predicción	5×10^{-3}	0.1117
		Predicción	6×10^{-3}	0.1117
		Predicción	7×10^{-3}	0.1117
		Predicción	8×10^{-3}	0.1117
		Predicción	9×10^{-3}	0.1117
		Predicción	1×10^{-2}	0.1117
		Predicción	2×10^{-2}	0.1118
		Predicción	3×10^{-2}	0.1119
		Predicción	4×10^{-2}	0.1119
		Predicción	5×10^{-2}	0.1120
		Predicción	6×10^{-2}	0.1120
		Predicción	7×10^{-2}	0.1121
		Predicción	8×10^{-2}	0.1121
		Predicción	9×10^{-2}	0.1122
		Predicción	1×10^{-1}	0.1122

Tabla 4.7 Datos para ecuación de predicción de coeficiente de fricción (astaxantina)

Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	CoF μ_k
Astaxantina (3)	Experimental	1×10^{-4}	0.0996
	Predicción	2×10^{-4}	0.1210
	Predicción	3×10^{-4}	0.1210
	Predicción	4×10^{-4}	0.1210
	Experimental	5×10^{-4}	0.1194
	Predicción	6×10^{-4}	0.1186
	Predicción	7×10^{-4}	0.1186
	Predicción	8×10^{-4}	0.1186
	Predicción	9×10^{-4}	0.1186
	Experimental	1×10^{-3}	0.1162
	Predicción	2×10^{-3}	0.1158
	Predicción	3×10^{-3}	0.1158
	Predicción	4×10^{-3}	0.1158
	Predicción	5×10^{-3}	0.1158
	Predicción	6×10^{-3}	0.1158
	Predicción	7×10^{-3}	0.1158
	Predicción	8×10^{-3}	0.1158
	Predicción	9×10^{-3}	0.1158
	Predicción	1×10^{-2}	0.1158
	Predicción	2×10^{-2}	0.1158
	Predicción	3×10^{-2}	0.1158
	Predicción	4×10^{-2}	0.1158
	Predicción	5×10^{-2}	0.1159
	Predicción	6×10^{-2}	0.1159
	Predicción	7×10^{-2}	0.1159
	Predicción	8×10^{-2}	0.1159
	Predicción	9×10^{-2}	0.1159
	Predicción	1×10^{-1}	0.1159

4.2 Análisis estadístico de desgaste (ancho de huella y tasa de desgaste)

4.2.1 Análisis de varianza (ANOVA)

En la figura 4.6 se observa una gráfica de barras que muestra el valor promedio del ancho de huella de las diferentes formulaciones. Las dos mezclas que presentan el menor ancho de huella son formulaciones con el aditivo de astaxantina: el promedio

más bajo corresponde a la concentración de 5×10^{-4} m, seguida por la formulación con el 1×10^{-3} m de concentración.

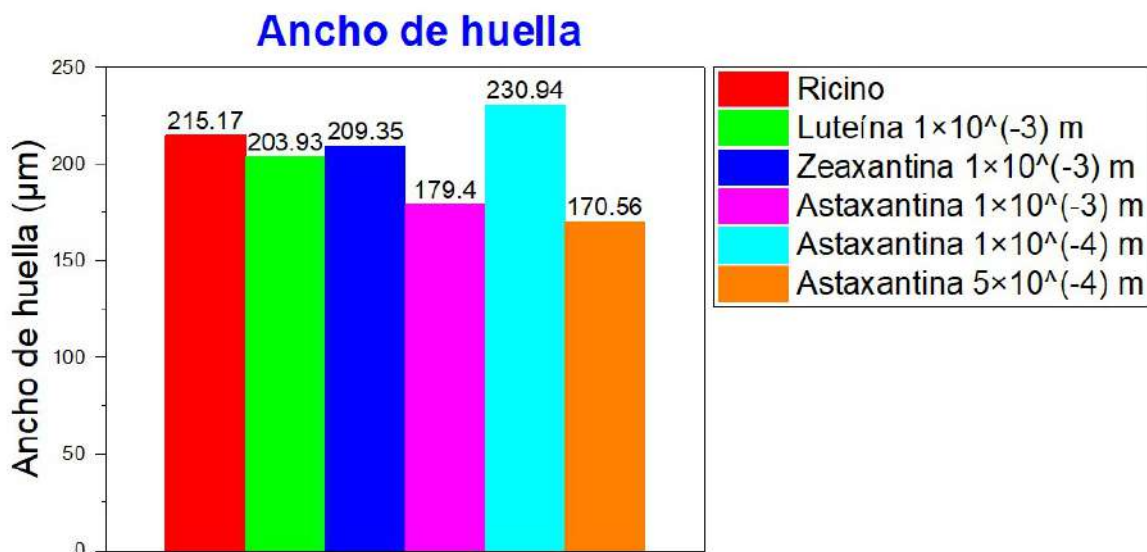


Figura 4.6 Gráfica comparativa del ancho de huella de formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales

La identificación de los aditivos y concentraciones corresponde a como se muestra en las tablas 4.2 y 4.3. El análisis de varianza (ANOVA) para el ancho de huella consideró como primera interacción el ancho de huella vs la concentración; las premisas para las hipótesis se muestran en la figura 4.7 inciso a, recordando que se propuso igualdad de varianzas para comenzar y un nivel de significancia del 95% ($\alpha = 0.05$). En la tabla del inciso b, se muestra el valor $p = 0.000$ de la concentración, que confirma que es significativo para el estudio (con un porcentaje de contribución de 68.61%, calculado con el valor SC ajustado y el total). En el inciso c se muestra la tabla con el valor S, que puede considerarse bajo (comparado con los valores promedio de los datos estudiados del ancho de huella) y demuestra que el modelo describe de manera adecuada la respuesta; también se tienen los valores de R^2 , R^2 ajustado y R^2 predeterminado, de 68.62%, 68.46% y 68.30% respectivamente y que, en complemento con S, confirman que la respuesta efectivamente está descrita de manera correcta por el modelo de análisis. En el inciso d se encuentra una tabla donde se observan el valor medio de los datos experimentales (ancho de huella) de cada

concentración y su desviación estándar, así como los intervalos de confianza de cada formulación; la concentración que tuvo el ancho de huella más bajo fue la 3, con 170.55 μm ; la concentración que mostró la desviación estándar más baja fue la 3, mientras que el resto de las formulaciones tienen desviaciones que oscilan entre 6 – 16 μm . Por último, en el inciso e, se muestra la gráfica de intervalos donde se puede apreciar el valor del ancho de huella de cada formulación y su nivel respecto a las demás concentraciones.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	3	205791	68597.2	434.37	0.000
Error	596	94123	157.9		
Total	599	299914			

a)

b)

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
12.5668	68.62%	68.46%	68.30%

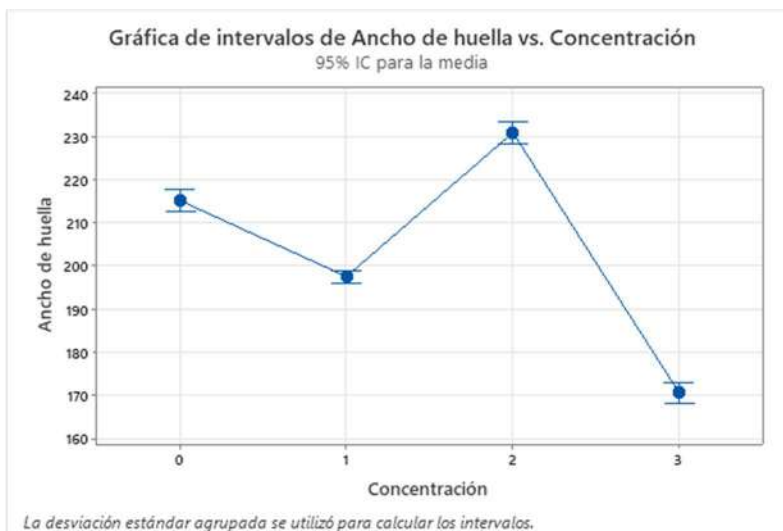
c)

Medias

Concentración	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	100	215.170	9.620	(212.702, 217.638)
1	300	197.558	15.314	(196.133, 198.983)
2	100	230.94	10.47	(228.48, 233.41)
3	100	170.556	6.354	(168.088, 173.024)

Desv.Est. agrupada = 12.5668

d)



e)

Figura 4.7 Análisis de varianza de un solo factor (ancho de huella vs concentración), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales: a) consideraciones del método utilizado para el análisis; b) valor p; c) resumen del modelo de análisis; d) tabla de medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza de las muestras; e) gráfica de intervalos de ancho de huella vs concentración.

Se realizó un segundo análisis de varianza considerando la interacción entre el ancho de huella y el aditivo. En la figura 4.8 inciso a se muestran las hipótesis para la evaluación. En la tabla correspondiente al inciso b, se muestra el valor $p = 0.000$ del aditivo, que confirma que es significativo para el estudio (con un porcentaje de contribución de 14.67%, calculado con el valor SC ajustado y el total). En la tabla del inciso c se muestra el valor S, que es bajo considerando los valores promedio del ancho de huella de las formulaciones estudiadas, y demuestra que el modelo describe de manera correcta la respuesta; sin embargo, los valores de R^2 , R^2 ajustado y R^2 predeterminado, de 14.67%, 14.24% y 14.00% respectivamente, se consideran bajos para el modelo, y se atribuye a la baja contribución del aditivo por sí solo en el ancho de huella. En el inciso d se encuentra una tabla donde se observan el valor medio de los datos experimentales (ancho de huella) de cada aditivo y su desviación estándar, así como los intervalos de confianza de cada formulación; el aditivo que tuvo el ancho de huella más pequeño fue el 3, con 193.63 μm ; los aditivos 0 - 2 mostraron desviaciones estándar muy bajas, y el aditivo 3 fue el que tuvo la desviación mayor (se

atribuye esta diferencia a que este aditivo es evaluado con tres concentraciones diferentes al mismo tiempo). Por último, en el inciso e, se muestra la gráfica de intervalos donde se puede apreciar el valor del ancho de huella de cada formulación y su nivel respecto a los demás aditivos, mostrando que el que posee el valor más bajo es el 3, seguido en orden ascendente por el aditivo 1 y 2.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC Ajust.	Valor F	Valor p
Aditivo	3	43992	14664.1	34.15	0.000
Error	596	255922	429.4		
Total	599	299914			

a)

b)

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
20.7220	14.67%	14.24%	14.00%

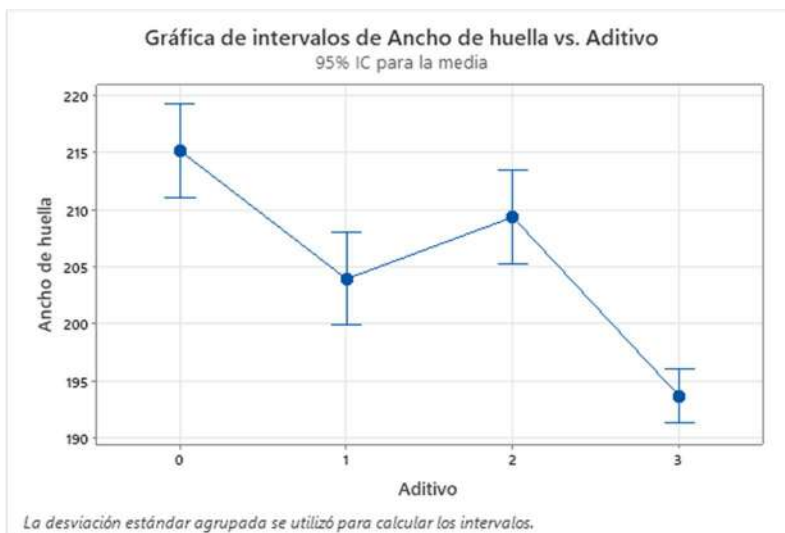
c)

Medias

Aditivo	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
0	100	215.170	9.620	(211.100, 219.240)
1	100	203.928	8.716	(199.858, 207.997)
2	100	209.346	5.980	(205.276, 213.415)
3	300	193.63	28.08	(191.28, 195.98)

Desv.Est. agrupada = 20.7220

d)



e)

Figura 4.8 Análisis de varianza de un solo factor (ancho de huella vs aditivo), para formulaciones con aceite de ricino (CO) como base y diferentes aditivos vegetales: a) consideraciones del método utilizado para el análisis; b) valor p; c) resumen del modelo de análisis; d) tabla de medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza de las muestras; e) gráfica de intervalos de ancho de huella vs aditivo

4.2.2 Regresión y ecuación de predicción

En este análisis referente al ancho de huella se mantienen las dos variables que tienen mayor influencia en el comportamiento del lubricante: aditivo y concentración. En el inciso a de la figura 4.9 se encuentra la ecuación de predicción obtenida a través del análisis de regresión (la ecuación 4.2 es la forma simplificada de la ecuación de regresión, donde AH corresponde a ancho de huella, A a aditivo y C a concentración), la cual muestra la relación entre predictores; para este caso en particular, no se consideraron predictores de segundo orden ya que en un análisis previo la interacción “aditivo – concentración” no tiene nivel de significancia, por lo que se eliminó de la ecuación. En el inciso b se tiene el resumen del modelo, el cual muestra un valor S pequeño (20.74, comparado con el promedio de valores estudiados) lo cual indica que ajusta al comportamiento de la variable de salida; por otro lado, se encuentran también los valores R^2 , R^2 -ajustado y R^2 -predeterminado, que al determinar el porcentaje de variación en la respuesta que puede ser explicado por el modelo lineal, tienen valores de 14.37%, 14.09% y 13.58% respectivamente; se eligió este modelo para poder

predecir la tendencia del ancho de huella ya que era el que más se acercaba a los valores experimentales (otro modelo que se estudió tenía una variación mayor al 30% entre los datos experimentales y el comportamiento obtenido a través de la ecuación). En el inciso c de la figura 4.9 se muestra la tabla con la información del análisis de varianza de la regresión, donde se puede observar en la primera columna los dos términos considerados como significativos (aditivo y concentración) y confirmados por su valor $p = 0.000$ (si bien el aditivo tiene un valor de $p = 0.008$, al ser menor que el nivel de significancia “valor $p = 0.05$ ”, se mantiene como término significativo. Por último, pero no menos importante, en el inciso d está el diagrama de Pareto de efectos estandarizados: al observar la gráfica se concluye que los dos términos considerados son significativos ya que su nivel rebasa el límite establecido por la línea roja punteada en el lado izquierdo de la gráfica.

$$AH = 215.38 - 3.03 A - 5.83 C \quad (4.2)$$

Ecuación de regresión

Ancho de huella = 215.38 - 3.03 Aditivo - 5.83 Concentración

a)

Resumen del modelo

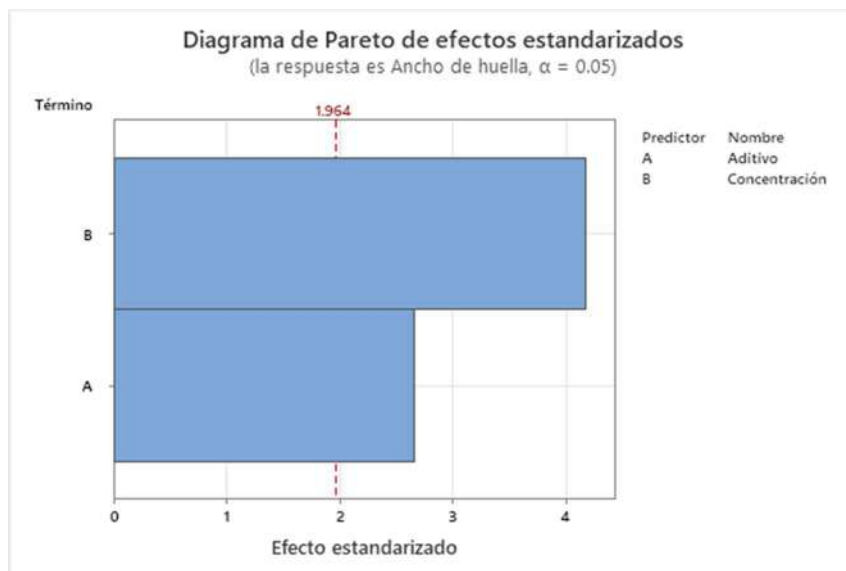
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
20.7404	14.37%	14.09%	13.58%

b)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Regresión	2	43106	21552.9	50.10	0.000
Aditivo	1	3035	3034.7	7.05	0.008
Concentración	1	7507	7506.7	17.45	0.000
Error	597	256809	430.2		
Falta de ajuste	3	213602	71200.8	978.87	0.000
Error puro	594	43206	72.7		
Total	599	299914			

c)



d)

Figura 4.9 Análisis de regresión para ancho de huella en formulaciones con aceite de ricino como base y diferentes aditivos vegetales: a) ecuación de regresión (considerando las interacciones entre las variables); b) resumen del modelo; c) análisis de varianza; d) diagrama de Pareto de los efectos estandarizados.

Para comprobar la eficacia de la ecuación de regresión, se procedió a introducir los datos de las variables para comparar el resultado contra el ancho de huella promedio calculado con los datos experimentales, y obtener el porcentaje de error entre el valor experimental (real) y el de la ecuación (teórico). Los resultados de este ejercicio se pueden observar en la tabla 4.8, donde se muestra el ID correspondiente al aditivo, su concentración, el valor del ancho de huella experimental y el valor calculado utilizando la ecuación de regresión.

Para el cálculo del ancho de huella utilizando la ecuación de regresión, se utilizaron los números de identificación mostrados en la tercera columna de la tabla 4.8, ya que se consideró la sustancia sola y no la mezcla “aditivo + concentración”, como en el análisis de varianza. Las concentraciones utilizadas en la ecuación son las mostradas en la segunda columna de dicha tabla (concentración molar).

Tabla 4.8 Validación de la ecuación de regresión

Aditivo	Concentración (m)	ID Aditivo	AH experimental (real)	AH ecuación (teórico)	% Error
Ninguno	0	0	215.1699	215.3800	0.10
Luteína	1×10^{-3}	1	203.9276	212.3442	4.13
Zeaxantina	1×10^{-3}	2	209.3456	209.3142	0.02
Astaxantina	1×10^{-3}	3	179.4018	206.2842	14.98
Astaxantina	1×10^{-4}	3	230.9437	206.2894	10.68
Astaxantina	5×10^{-4}	3	170.5560	206.2871	20.95

La última columna de la tabla 4.8 muestra el porcentaje de error que tiene el cálculo del ancho de huella experimental comparado con el obtenido a través de la ecuación de regresión. Las formulaciones que presentan mayor variación entre ambos datos es el aditivo “astaxantina” con concentraciones de “ 1×10^{-3} m” y “ 5×10^{-4} m”, con un 14.98% y 20.95% de error respecto al valor experimental, respectivamente.

4.2.3 Uso de la ecuación de regresión para predicción

En la figura 4.10 se pueden observar las gráficas obtenidas para corroborar la validez de la ecuación de predicción. Se tomaron 28 concentraciones diferentes de los aditivos y el valor experimental del ancho de huella de cada uno, en la gráfica el valor experimental tiene un color azul claro y los datos obtenidos con la ecuación se representan en color azul oscuro. En cada gráfica se muestra el valor promedio del ancho de huella experimental y el obtenido con las diferentes concentraciones. En estas gráficas se ve una diferencia considerable entre los valores experimentales y los obtenidos con la ecuación de predicción. Se atribuye la diferencia a que el ancho no es constante a lo largo de la huella. Los datos con los cuales se realizó el cálculo de las predicciones se pueden consultar en las tablas 4.9, 4.10 y 4.11.

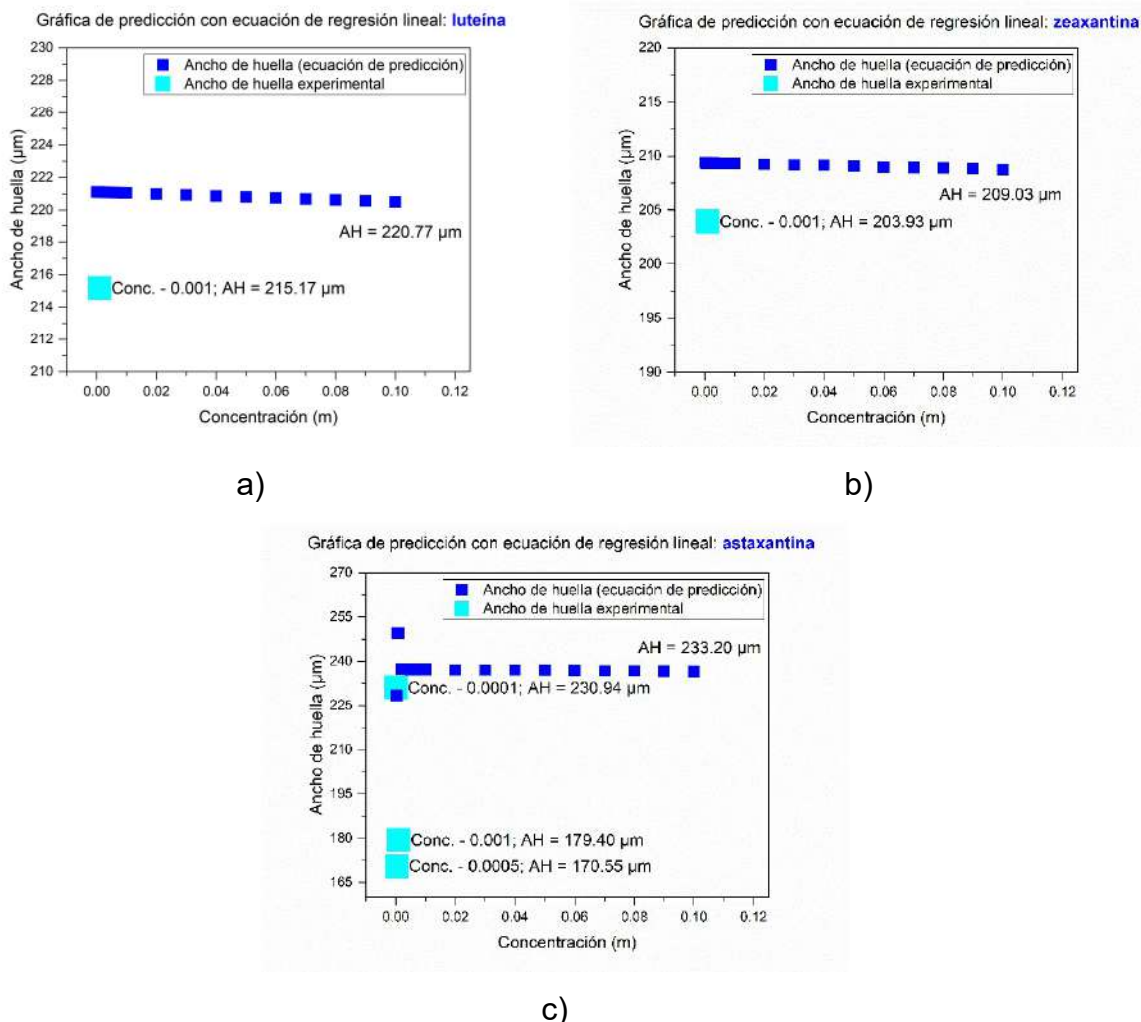


Figura 4.10 Gráficas de predicción de ancho de huella con diferentes concentraciones de aditivos: a) luteína, b) zeaxantina, c) astaxantina

Tabla 4.9 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (luteína)

Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	Ancho de huella (µm)
Luteína (1)	Predicción	1×10^{-4}	221.11
	Predicción	2×10^{-4}	221.11
	Predicción	3×10^{-4}	221.11
	Predicción	4×10^{-4}	221.11
	Predicción	5×10^{-4}	221.11
	Predicción	6×10^{-4}	221.11
	Predicción	7×10^{-4}	221.11
	Predicción	8×10^{-4}	221.11
	Predicción	9×10^{-4}	221.11
	Experimental	1×10^{-3}	215.17

Predicción	2×10^{-3}	221.10
Predicción	3×10^{-3}	221.10
Predicción	4×10^{-3}	221.09
Predicción	5×10^{-3}	221.08
Predicción	6×10^{-3}	221.08
Predicción	7×10^{-3}	221.07
Predicción	8×10^{-3}	221.07
Predicción	9×10^{-3}	221.06
Predicción	1×10^{-2}	221.05
Predicción	2×10^{-2}	220.99
Predicción	3×10^{-2}	220.93
Predicción	4×10^{-2}	220.87
Predicción	5×10^{-2}	220.81
Predicción	6×10^{-2}	220.75
Predicción	7×10^{-2}	220.69
Predicción	8×10^{-2}	220.63
Predicción	9×10^{-2}	220.57
Predicción	1×10^{-1}	220.51

Tabla 4.10 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (zeaxantina)

Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	Ancho de huella (μm)
Zeaxantina (2)	Predicción	1×10^{-4}	209.35
	Predicción	2×10^{-4}	209.35
	Predicción	3×10^{-4}	209.35
	Predicción	4×10^{-4}	209.35
	Predicción	5×10^{-4}	209.35
	Predicción	6×10^{-4}	209.35
	Predicción	7×10^{-4}	209.35
	Predicción	8×10^{-4}	209.35
	Predicción	9×10^{-4}	209.35
	Experimental	1×10^{-3}	203.93
	Predicción	2×10^{-3}	209.34
	Predicción	3×10^{-3}	209.33
	Predicción	4×10^{-3}	209.33
	Predicción	5×10^{-3}	209.32
	Predicción	6×10^{-3}	209.32
	Predicción	7×10^{-3}	209.31
	Predicción	8×10^{-3}	209.30
	Predicción	9×10^{-3}	209.30

Predicción	1×10^{-2}	209.29
Predicción	2×10^{-2}	209.23
Predicción	3×10^{-2}	209.18
Predicción	4×10^{-2}	209.12
Predicción	5×10^{-2}	209.06
Predicción	6×10^{-2}	209.00
Predicción	7×10^{-2}	208.94
Predicción	8×10^{-2}	208.88
Predicción	9×10^{-2}	208.83
Predicción	1×10^{-1}	208.77

Tabla 4.11 Datos para ecuación de predicción de ancho de huella (astaxantina)

Aditivo	Tipo de dato	Concentración (m)	Ancho de huella (μm)
Astaxantina (3)	Experimental	1×10^{-4}	230.9437
	Predicción	2×10^{-4}	228.3111
	Predicción	3×10^{-4}	228.3104
	Predicción	4×10^{-4}	228.3098
	Experimental	5×10^{-4}	170.5560
	Predicción	6×10^{-4}	249.5030
	Predicción	7×10^{-4}	249.5023
	Predicción	8×10^{-4}	249.5016
	Predicción	9×10^{-4}	249.5009
	Experimental	1×10^{-3}	179.4018
	Predicción	2×10^{-3}	237.1880
	Predicción	3×10^{-3}	237.1813
	Predicción	4×10^{-3}	237.1746
	Predicción	5×10^{-3}	237.1679
	Predicción	6×10^{-3}	237.1612
	Predicción	7×10^{-3}	237.1545
	Predicción	8×10^{-3}	237.1478
	Predicción	9×10^{-3}	237.1411
	Predicción	1×10^{-2}	237.1344
	Predicción	2×10^{-2}	237.0674
	Predicción	3×10^{-2}	237.0003
	Predicción	4×10^{-2}	236.9333
	Predicción	5×10^{-2}	236.8663
	Predicción	6×10^{-2}	236.7992
	Predicción	7×10^{-2}	236.7322
	Predicción	8×10^{-2}	236.6652

Predicción	9×10^{-2}	236.5981
Predicción	1×10^{-1}	236.5311

4.2.4 Tasa de desgaste

Para cada una de las formulaciones, en la tabla 4.12 se muestra la relación de la tasa de desgaste calculada con base en la pérdida de volumen, la distancia de deslizamiento y la carga normal aplicada durante los ensayos de tribología, que se encuentran descritas en la referencia [6].

Tabla 4.12 Tasa de desgaste de formulaciones a base de aceite de ricino y xantofilas como aditivos naturales

Formulación			Tasa de desgaste (mm^3/Nm)	
Aceite	Aditivo	Concentración (m)	Valor	Desviación estándar
CO	-	-	1.8558×10^{-5}	2.5307×10^{-6}
	Luteína	1×10^{-3}	1.5790×10^{-5}	2.0236×10^{-6}
	Zeaxantina		1.7031×10^{-5}	1.4374×10^{-6}
			1.0773×10^{-5}	1.5991×10^{-6}
	Astaxantina	5×10^{-4}	9.2255×10^{-6}	1.0201×10^{-6}
		1×10^{-4}	2.2949×10^{-5}	3.0739×10^{-6}

4.2.5 Resumen de resultados

Para completar el análisis, se tienen las tablas siguientes con escala de colores: al valor más bajo de resultados obtenidos se le asignó el color verde y un valor de 100, al color amarillo se le asignó el valor de 75, al color anaranjado se le asignó el número 50 y al rojo se le asignó el 25, siendo este último el que tiene el valor obtenido más alto. Estos valores se asignaron de forma arbitraria con la intención de hacer un resumen de los resultados más visual y fácil de entender. Para ponderar, se sumó el valor correspondiente en las columnas tres, cuatro y cinco. La mejor configuración será aquella que tenga la ponderación más alta (300). Se decidió considerar el desgaste como característica para elegir una concentración y un aditivo.

Tabla 4.13 Ponderaciones

a)

 (100)	 (75)	 (50)	 (25)
Ponderación ideal:		300	

b)

ID	Concentración	Coeficiente de fricción	Ancho de huella	Desgaste	Ponderación
Concentración	(m)	μ_k			
0	Sin aditivo				225
1	1×10^{-3}				175
2	1×10^{-4}				125
3	5×10^{-4}				225

c)

ID Aditivo	Aditivo	Coeficiente de fricción	Ancho de huella	Desgaste	Ponderación
		μ_k			
0	Sin aditivo				150
1	Luteína				225
2	Zeaxantina				125
3	Astaxantina				250

Con base en las ponderaciones de la tabla 4.13 b) y c), se tienen dos concentraciones que pueden utilizarse: 0 y $5 \times 10^{-4}m$; con respecto al aditivo, el que tiene la mayor ponderación es la astaxantina.

CONCLUSIONES

Con base en los datos mostrados, se puede concluir que:

- En el análisis de varianza enfocado a la concentración, el coeficiente de fricción más bajo corresponde a la concentración 0, es decir, la formulación que no contiene aditivos.
- En el análisis de varianza enfocado en el aditivo, el coeficiente de fricción más bajo corresponde al aditivo 0, es decir, la formulación que no contiene aditivos.
- El análisis de regresión lineal para el coeficiente de fricción considera tres términos significativos: aditivo, concentración y la interacción “aditivo-concentración”.
- En el análisis de regresión lineal para el coeficiente de fricción, el error que se tiene entre los datos obtenidos experimentalmente y los calculados con la ecuación de predicción no es mayor al 10%. Esto quiere decir que la ecuación predice adecuadamente el comportamiento de las formulaciones para diferentes concentraciones.
- En el análisis de varianza enfocado a la concentración, el ancho de huella más bajo corresponde a la concentración 3, es decir, la formulación con 0.0005 m (recordar que la “m” representa el concepto “molal”).
- En el análisis de varianza enfocado en el aditivo, el ancho de huella más bajo corresponde al aditivo 3, es decir, la formulación con astaxantina.
- El análisis de regresión lineal para el ancho de huella sólo considera dos términos significativos: aditivo y concentración. No hay ningún término de segundo orden.
- En el análisis de regresión lineal para el ancho de huella, el error que se tiene entre los datos obtenidos experimentalmente y los calculados con la ecuación de predicción es menor al 25%. Esto quiere decir que la ecuación ayuda a predecir el comportamiento de las formulaciones para diferentes concentraciones, siempre y cuando se considere el margen de error en las predicciones.

- Entre más baja sea la concentración de aditivo, el error entre los datos experimentales y los obtenidos con la ecuación es mayor.

Con estos resultados, se pueden empezar a considerar otros aspectos de interés al momento de elegir un aditivo para una formulación de origen vegetal, que ayuden a discernir entre la gran variedad que se tiene con un buen comportamiento tribológico. Características como el precio, la solubilidad, la disponibilidad de materia prima para obtener el compuesto, la facilidad de producción en masa y las capacidades de almacenamiento, pueden ayudar a tomar una decisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Holmberg y A. Erdemir, «The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars,» *Tribology International*, vol. 135, nº 36, pp. 389-396, 2019.
- [2] O. M. d. I. N. U. (ONU), «Naciones Unidas,» ONU, 13 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 22 Noviembre 2023].
- [3] M. T. Hernández-Sierra, J. E. Báez, L. D. Aguilera-Camacho, J. S. García-Miranda y K. J. Moreno, «Friction and wear improvement by using curcumin as natural additive in green lubricants,» *Journal of Engineering Tribology*, pp. 1-11, 2022.
- [4] M. T. Hernández-Sierra, L. D. Aguilera-Camacho, J. E. Báez-García, J. S. García-Miranda y K. J. Moreno, «Thermal stability and lubrication properties for biodegradable castor oil on AISI 4140 steel,» *MDPI*, vol. 8, nº 6, pp. 1-15, 2018.
- [5] M. T. Hernández-Sierra, M. G. Bravo-Sánchez, J. E. Báez, L. D. Aguilera-Camacho, J. S. García-Miranda y K. J. Moreno, «Improvement effect of green lubricants on the tribological and mechanical performance of 4140 steel,» *MDPI*, vol. 9, nº 22, pp. 1-13, 2019.
- [6] K. J. Moreno, M. T. Hernández-Sierra, J. E. Báez, E. Rodríguez-deLeón, L. D. Aguilera-Camacho y J. S. García-Miranda, «On the tribological and oxidation study of xanthophylls as natural additives in castor oil for green lubrication,» *MDPI*, vol. 14, nº 8, pp. 1-17, 2021.
- [7] «Tungco blog,» Tungco, 21 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://www.tungco.com/es/blog/why-is-tungsten-carbide-the-most-chosen-metal/>. [Último acceso: 18 Enero 2023].
- [8] I. O. Sánchez, «Introducción al diseño de experimentos,» Academia, 2023.
- [9] Minitab, «Soporte Minitab 20,» Minitab, 2021. [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. [Último acceso: 18 Enero 2023].
- [10] N. Sakib, A. Hossen y S. Mia, «Tribological investigation of biolubricants derived from vegetal oil sources,» de *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Khulna, Bangladesh, 2020.

- [11] R. A. Kazeem, D. A. Fadare, O. M. Ikumapayi, S. A. Akinlabi, S. A. Afolalu y E. T. Akinlabi, «Analysis of the Physicochemical Properties of Some Selected Non-Edible Vegetable Oil-Based Cutting Fluids Using the Design of Experiment (DOE) Approach,» *Lubricants*, vol. 10, nº 2, pp. 1-18, 2022.
- [12] R. Demirsöz, «Wear Behavior of Bronze vs. 100Cr6 Friction Pairs under Different Lubrication Conditions for Bearing Applications,» *Lubricants*, vol. 10, nº 9, pp. 1-17, 2022.
- [13] P. Strobl, E. Schermer, D. Groetsch, L. Pointner-Gabriel, K. Voelkel, H. Pflaum y K. Stahl, «Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression,» *Lubricants*, vol. 10, nº 11, pp. 1-16, 2022.
- [14] C. P. Natesh, Y. M. Shashidhara, H. J. Amarendra, R. Shetty, S. R. Harisha, P. V. Shenoy, M. Nayak, A. Hegde, D. Shetty y U. Umesh, «Tribological and Morphological Study of AISI 316L Stainless Steel during Turning under Different Lubrication Conditions,» *Lubricants*, vol. 11, nº 2, pp. 1-14, 2023.
- [15] «Master SI,» 22 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.mastersi.com.pe/blog/166-seis-grandes-perdidas-en-la-productividad>. [Último acceso: 12 Septiembre 2022].
- [16] Forbes, «Forbes10years,» Forbes, 16 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://forbes.es/empresas/167359/que-es-la-industria-5-0-y-como-cambiara-las-empresas/>. [Último acceso: 22 Noviembre 2023].
- [17] G. Miró, «La influencia de la lubricación en los elementos de desgaste de maquinaria industrial,» 21 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://blog.atten2.com/elementos-de-desgaste-de-maquinaria-industrial>. [Último acceso: 12 Septiembre 2022].
- [18] M. A. Jurado, «Hoy en LaSalle,» LaSalle, 31 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://hoy.lasalle.mx/contaminacion-y-manejo-de-aceites-lubricantes-usados/>. [Último acceso: 3 Octubre 2022].
- [19] I. (. Tippecanoe County, «Tippecanoe County, IN (.gov),» [En línea]. Available: <https://www.tippecanoe.in.gov/DocumentCenter/View/25549/Used-Motor-Oil-Brochure-Espa%C3%B1ol#:~:text=El%20aceite%20de%20motor%20usado,se%20desgasta%2C%20s%C3%B3lo%20se%20ensucia..> [Último acceso: 22 Noviembre 2023].
- [20] C. Borràs, «Ecología Verde,» 23 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-del-aceite-usado-de-los-coches-101.html>. [Último acceso: 22 Noviembre 2023].

- [21] Adalmo, «Adalmo,» Adalmo, [En línea]. Available: <https://www.adalmo.es/noticia/aceite-peligroso-y-contaminante/>. [Último acceso: 22 Noviembre 2023].
- [22] «Gob.mx,» A.C. Corporation, 25 Julio 2018. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/395704/2._Lubricantes.pdf. [Último acceso: 19 Enero 2023].
- [23] «Characteristicass.de,» [En línea]. Available: <https://www.characteristicass.de/lubricantes/>. [Último acceso: 03 Febrero 2023].
- [24] S. Durán Agüero, J. Torres García y J. Sanhueza Catalán, «Aceites vegetales de uso frecuente en Sudamérica: características y propiedades,» *Nutrición Hospitalaria*, vol. 32, nº 1, pp. 11-19, 2015.
- [25] R. Legaz Berbel, *Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech, 2010.
- [26] M. Moral Zamorano, *Tesis: ESTUDIO DEL DIALQUILDITIOFOSFATO DE ZINC COMO ADITIVO EN LUBRICANTES PARA AUTOMOCIÓN*, España: UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA, 2017.
- [27] S. E. Thomas y E. J. Johnson, «Xanthophylls,» *Advances in Nutrition*, vol. 9, nº 2, pp. 160 - 162, 2018.
- [28] L. d. C. Agroindustrial, «Laboratorio de Constatación Agroindustrial S.A. de C.V.,» Laboratorio de Constatación Agroindustrial S.A. de C.V., [En línea]. Available: <https://www.lcagro.com/an%C3%A1lisis-de-pigmentos>. [Último acceso: 28 Marzo 2023].
- [29] M. Plus, «Medline Plus,» Medline Plus, 2023. [En línea]. Available: <https://medlineplus.gov/spanish/druginfo/natural/754.html>. [Último acceso: 28 Marzo 2023].
- [30] K. Industries, «Kemin,» Kemin, 2023. [En línea]. Available: <https://www.kemin.com/sa/es/markets/human-nutrition/products/zeaone-zeaxanthin>. [Último acceso: 28 Marzo 2023].
- [31] C. Pía, «Casa Pía,» Herbolario Casa Pía, 2023. [En línea]. Available: <https://www.casapia.com/blog/salud-natural/la-astaxantina-informacion.html>. [Último acceso: 28 Marzo 2023].

- [32] «Postgrado UCSP,» U. C. d. S. Pablo, 2022. [En línea]. Available: <https://postgrado.ucsp.edu.pe/articulos/que-es-six-sigma/>. [Último acceso: 19 Enero 2023].
- [33] «Izertis,» 30 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.izertis.com/es/-/blog/lean-six-sigma-una-metodologia-aplicada-a-procesos-reales>. [Último acceso: 03 Febrero 2023].
- [34] N. M. Sagaró del Campo y C. L. Zamora Matamoros, «Evolución histórica de las técnicas estadísticas y las metodologías para el estudio de la causalidad en ciencias médicas,» *MEDISAN*, vol. 23, nº 3, pp. 1-23, 2019.
- [35] J. Dagnino S., «Análisis de varianza,» *Revista Chilena de Anestesia*, vol. 43, pp. 306-310, 2014.
- [36] Minitab, «Soporte de Minitab 21,» Minitab, 2023. [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#:~:text=El%20valor%20p%20es%20una,o%20el%20modelo%20es%20significativo>. [Último acceso: 22 02 2023].
- [37] Minitab, «Soporte de Minitab 21,» Minitab, 2023. [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/>. [Último acceso: 22 Febrero 2023].
- [38] Minitab, «Minitab 21,» Minitab, 2023. [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/supporting-topics/basics/types-of-regression-analyses/>. [Último acceso: 19 Enero 2023].
- [39] L. Atarés Huerta, «Universitat Politècnica de València,» [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12654/13.%20Art%EDculo%20docente.%20Molaridad%20y%20molalidad.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 31 Octubre 2023].