



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**



Que para obtener el título de:
Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

**Análisis de la degradación térmica en el proceso de
pirólisis y la cinética asociada de madera de *Ceiba
aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker.**

Presenta:

Ing. Fernando Daniel Mendez Zetina.

Director: Dr. José Juan Alvarado Flores.

Co-Director: M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra.

Morelia, Michoacán, México, a 30 de Mayo de 2024.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al CONAHCYT por el apoyo financiero brindado durante los estudios profesionales, dentro del Programa de Ciencias en Tecnología de la Madera de la UMSNH. A las familias Gaspar-Arévalo, Vega-Izquierdo, por la donación de las muestras de madera *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker, colectadas en los predios ubicados en la Cuenca del Lago de Cuitzeo; a mis profesores, quienes me ayudaron a llegar hasta estas instancias donde me encuentro; agradezco a mi familia por todo el trabajo y esfuerzo que pusieron para ayudarme alcanzar mis sueños y metas; a mis colegas y amigos por todas las experiencias vividas; y, finalmente, a mis asesores J. J. Alvarado Flores y L. F. Pintor Ibarra, por todo el apoyo que me han brindado.

DEDICATORIA

A mis papas, por su apoyo constante hacia mi desde el comienzo de mi formación académica profesional; a esas personas que estuvieron a mi lado en los momentos buenos y malos. Gracias a sus regaños, consejos y palabras de ánimo, me han formado en una persona íntegra y, de alguna manera, siguen presentes en cada uno de mis sueños y objetivos.

A toda mi familia y hermanas (Itzel, Julissa) que fueron mi motor para nunca darme por vencido de mis sueños y metas.

A las familias Zalapa, Vega y Rangel, quienes durante este tiempo me abrieron las puertas de su hogar, haciéndome partícipe como uno más de su familia.

A mi primo y compañero, Jesús, con el cual comparto sueños y metas; a esa persona que estuvo conmigo desde que era niño, con quien prácticamente crecí como si fuéramos hermanos.

A el profesor Nicolas González Ortega, por cubrirnos en las mañanas frías con su exquisito café y galletas.

A mi maestra de preparatoria, Analuz Porras López. Más que una maestra, la vi como una segunda madre, y fue parte fundamental de mi formación académica.

Por último, pero no menos importante, a mi novia Irma, a esa persona que estuvo para mí en las buenas y en las malas, a quien admiro y quiero mucho.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. HIPÓTESIS	5
5. OBJETIVOS	6
5.1. Objetivo general	6
5.2. Objetivos específicos	6
6. METODOLOGÍA	6
6.1. Colecta y preparación del material de estudio	6
6.2. Obtención de la densidad básica	8
6.3. Análisis químico	8
6.4. Análisis proximal	9
6.4.1. Contenido de agua	9
6.4.2. Porcentaje de cenizas	10
6.4.3. Fracción volátil	11
6.4.4. Porcentaje de carbono fijo	12
6.5. Microanálisis de cenizas	12
6.6. Análisis elemental	12
6.7. Potencial energético	13
6.8. Índice de valor del combustible	13
6.9. Análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial (DTG)	13
6.10. Análisis cinético para el material lignocelulósico	14
6.10.1. Aplicación del enfoque iso-conversional de Flynn, Wall y Ozawa (FWO)	16
6.10.2. Aplicación del método iso-conversional de Kissinger, Akahira y Sunose (KAS)	16
6.10.3. Método iso-conversional de Friedman	17
6.10.4. Método no iso-conversional de Kissinger	17
6.11. Análisis termodinámico	1
6.12. Análisis (FT-IR)	19
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
7.1. Obtención de la densidad básica	20
7.2. Análisis químico	20
7.2.1. Holocelulosa, celulosa y hemicelulosas	20
7.2.2. Lignina	21
7.2.3. Extraíbles	21
7.3. Análisis proximal y poder calorífico	22
7.3.1. Porcentaje de agua	22
7.3.2. Fracción volátil	23
7.3.3. Carbono fijo	23

7.3.4. Cenizas	23
7.3.5. Potencial energético	24
7.4. Índice de valor del combustible	25
7.5. Microanálisis de cenizas	26
7.6. Análisis elemental	27
7.7. Análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial (DTG)	29
7.8. Análisis cinético para el material lignocelulósico	31
7.9. Análisis termodinámico	39
7.10. Análisis (FT-IR)	44
8. CONCLUSIONES	46
9. REFERENCIAS	4

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los árboles recolectados de <i>C. aesculifolia</i> .	7
Tabla 2. Procedimiento experimental para evaluar el orden de reacción de la biomasa de <i>Ceiba aesculifolia</i> con el método de Avrami.	18
Tabla 3. Fórmulas generales para el análisis termodinámico.	19
Tabla 4. Microanálisis de cenizas de la madera de <i>C. aesculifolia</i>	27
Tabla 5. Resumen de los rangos de temperatura para cada velocidad de calentamiento evaluada en la especie <i>Ceiba aesculifolia</i> .	31
Tabla 6. Parámetros de reacción para la descomposición térmica de la biomasa de <i>C. aesculifolia</i> .	37
Tabla 7. Orden de reacción (<i>n</i>) estimado a partir de la teoría de Avrami para la biomasa de <i>C. aesculifolia</i> .	39
Tabla 8. Propiedades termodinámicas de la especie <i>C. aesculifolia</i> .	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth) Britt. & Baker. a) madera, b) fruto, c) árbol .	1
Figura 2. Diagrama simplificado del proceso de pirólisis (elaboración propia).	2
Figura 3. Localización geográfica de la recolección de los tres árboles de <i>C. aesculifolia</i> .	7
Figura 4. Procedimiento para llevar a cabo un análisis proximal. a) apeo de árbol, b) astillado, c) secado bajo la sombra, d) molienda en un equipo convencional, e) tamizado, f) cenizas, g) material volátil, h) microanálisis de ceniza .	9
Figura 5. Esquema general del análisis térmico (TGA-DTG) de la madera de <i>C. aesculifolia</i> . (a) biomasa, (b) equipo para realizar el análisis, (c) la rampa de calentamiento, (d) termograma.	14
Figura 6. Datos sobre los componentes químicos esenciales de la madera de <i>C. aesculifolia</i> .	21
Figura 7. Datos del análisis proximal (%) y potencial energético (MJ/Kg) de la madera de <i>C. aesculifolia</i> .	25
Figura 8. Análisis último de la madera de <i>C. aesculifolia</i> .	29

Figura 9. Curva termogravimétrica (TGA) y termogravimetría diferencial (DTG) en una atmósfera en ausencia de oxígeno a diferentes tasas calentamiento ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min) de <i>C. aesculifolia</i> .	30
Figura 10. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de Friedman para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de <i>C. aesculifolia</i> .	35
Figura 11. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de FWO para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de <i>C. aesculifolia</i> .	35
Figura 12. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de KAS para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de <i>C. aesculifolia</i> .	36
Figura 13. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de Kissinger para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de <i>C. aesculifolia</i> .	36
Figura 14. Líneas de regresión correspondientes al orden de reacción (n) propuesto según la teoría de Avrami.	39
Figura 15. Espectro FT-IR de la madera de <i>C. aesculifolia</i> .	45

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Derivado del uso indiscriminado que se le ha dado durante los últimos años a las energías fósiles, resulta de vital importancia descubrir **nuevas alternativas** sostenibles; de ahí la importancia de estudiar los procesos de desintegración por calor en la biomasa, dándole un enfoque energético. De modo que se plantea la utilización de la especie ***Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker**, esto con el objetivo de aportar al estudio científico y tecnológico de la especie, y así de alguna manera aprovechar las distintas materias primas lignocelulósicas disponibles a lo largo de nuestra geografía.

DELIMITACIÓN DEL TEMA

Objeto en el espacio-geográfico

- La *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker, se colectó en el cuerpo de agua de Cuitzeo, ubicado en Michoacán, México.

Espacio temporal

- Año de estudio: 2022
- Duración de la investigación: 1.5 años

TÍTULO DEL TRABAJO

“Análisis de la degradación térmica en el proceso de pirólisis y la cinética asociada de madera de *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker”.

ABSTRACT

The global energy landscape is currently undergoing a transition aimed at reducing dependence on fossil fuels, which, despite their dominance, are significant contributors to climate change. This shift underscores the importance of thermal degradation of *Ceiba aesculifolia* for the production of higher-value chemical products such as coke, oil, and gas. In this study, the thermogravimetric process (TGA-DTG) of *C. aesculifolia* was kinetically analyzed through thermal degradation in an inert nitrogen atmosphere, with temperatures ranging from 25 to 900 °C and varying heating rates ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min). Activation energy and frequency factor were determined using different mathematical models, yielding the following results: Friedman (132.03 kJ/mol, $8.11 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$), FWO (121.65 kJ/mol, $4.30 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$), KAS (118.14 kJ/mol, $2.41 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$), and Kissinger (155.85 kJ/mol, $3.47 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$). The reaction order, n (0.3937–0.6141), was calculated using the Avrami model. Thermodynamic parameters (ΔH , ΔG , ΔS) for each kinetic model were also evaluated. The results for E_a , A , ΔH , ΔG , and ΔS indicate that *C. aesculifolia* has considerable potential for use in pyrolysis processes. The chemical composition of *C. aesculifolia* consists of 77.7% holocellulose, 66.2% cellulose, 11.49% hemicellulose, 10.82% lignin, and 11.37% extractives. Proximate analysis revealed 9.37% moisture, 83.83% volatile matter, 14.33% fixed carbon, 1.84% low-molecular-weight inorganic components, and an energy content of 19.12 MJ/kg. Despite the ash content exceeding the limits established by international standards, this species can still be utilized as a local solid biofuel due to its high calorific value. Finally, Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) identified several key functional groups involved in the pyrolysis process, including aliphatic hydrocarbons.

Keywords: pyrolysis, physicochemical properties, kinetic analysis, broad-leaved species, biomass, thermodynamic analysis, bioenergy potential.

RESUMEN

Actualmente, el panorama energético global está dando un enfoque hacia la disminución del empleo de fuentes fósiles de energía, que predominan actualmente y son las principales responsables de las alteraciones climáticas en la actualidad, destacando así la relevancia de la degradación térmica de *Ceiba aesculifolia* con fines de conversión de productos químicos con un valor añadido mayor, como coque, aceite y gas. Este estudio presenta un análisis cinético del proceso termogravimétrico (TGA-DTG) de *C. aesculifolia* a través del proceso de degradación térmica, realizado en un rango de 25 a 900 °C en un espacio inerte (N₂) con diferentes tasas de calentamiento ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min). Se calcularon la cinética de de arranque y el factor de colisiones utilizando diversos enfoques matemáticos, obteniendo los siguientes valores específicos: Friedman (132.03 kJ/mol, $8.11 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$), FWO (121.65 kJ/mol, $4.30 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$), KAS (118.14 kJ/mol, $2.41 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$) y Kissinger (155.85 kJ/mol, $3.47 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$). La variación en el orden de reacción, n (0,3937–0,6141), se obtuvo mediante la teoría de Avrami. También se evaluaron los parámetros termodinámicos (ΔH , ΔG , ΔS) asociados a cada modelo cinético. Los resultados de Ea , A , ΔH , ΔG y ΔS sugieren que esta biomasa tiene un gran potencial para su utilización en procesos de pirólisis. La composición química de *C. aesculifolia* incluye 77.7% de holocelulosa, 66.2% de celulosa, 11.49% de hemicelulosa, 10.82% de lignina y 11.37% de extractivos. El análisis proximal mostró 9.37% de humedad, 83.83% de material volátil, 14.33% de carbono residual, 1.84% de componentes inorgánicos de bajo peso molecular y un potencial energético de 19.12 MJ/kg. Aunque el porcentaje de cenizas excede los límites permitidos por las normas internacionales, esta especie puede ser utilizada como biocombustible sólido a nivel local, dado el alto poder calorífico que presentó. Finalmente, el análisis mediante espectroscopía infrarroja (FT-IR) identificó varios grupos funcionales clave en el proceso de pirólisis, incluyendo la presencia de hidrocarburos alifáticos.

Palabras clave: pirólisis, propiedades fisicoquímicas, análisis cinético, latifoliadas, biomasa, análisis termodinámicos, potencial bioenergético.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la exigencia de ejecutar una visión energética integral se ha vuelto cada vez más urgente debido a la minimización de los recursos no renovables y al creciente enfoque en la restauración del entorno (Muto *et al.*, 2016). En este sentido, los estudios recientes se han centrado en identificar suministros de energías regenerativas y sostenibles, como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica (DOE, 2024). Además, se ha investigado el aprovechamiento del material vegetal como medio para la generación de productos químicos de mayor valor de conversión, con el objetivo de satisfacer las demandas energéticas actuales. De esta manera, las fuentes de energía basadas en material vegetal juegan un papel clave en el abasto energético global y en la mitigación de los efectos adversos sobre el entorno (Al-Shetwi *et al.*, 2020).

La materia vegetal se reconoce como una reserva esencial de energía dentro de las energías renovables, y su principal materia prima abarca madera, cultivos, así como residuos provenientes de actividades agrícolas y forestales (Colín y Carrillo, 2023; Malik *et al.*, 2024). Esta fuente de energía está conformada principalmente por tres polímeros orgánicos esenciales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, en menores cantidades, contiene almidones, azúcares, cenizas, lípidos, proteínas, hidrocarburos, agua y otros compuestos (Colín y Carrillo, 2023). Como resultado, ha crecido el interés en descubrir la disponibilidad energética de los materiales vegetales, con un enfoque en particular pensando principalmente en su uso para la producción de combustibles sostenibles que puedan reemplazar a las fuentes fósiles (Quintero y Quintero, 2015). La biomasa de *C. aesculifolia* es particularmente destacada por su capacidad de regeneración continua y natural, en contraste a las energías de origen no sostenibles que son finitos y están vinculadas con el cambio climático (Mandley *et al.*, 2020).



Figura 1. *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker. a) madera, b) fruto, c) árbol (elaboración propia).

Esta especie perteneciente a la familia Bombacaceae y comúnmente conocida como "pochote", es un árbol de gran envergadura que se distribuye ampliamente desde Sinaloa y Jalisco hasta Chiapas y Yucatán, incluyendo también regiones como Morelos, México, Puebla y Veracruz. Este árbol de hoja caduca puede llegar a tener un nivel de altura de hasta 30 metros y una circunferencia de 75 centímetros a la altura del pecho, presentando espinas cónicas de color grisáceo en su tronco (Morales y Gómez, 1989). La *C. aesculifolia* es una especie de árbol tropical que se localiza comúnmente en tierras bajas y cálidas, su distribución altitudinal abarca desde los 600 hasta los 2200 metros de altura geográfica, y puede encontrarse en diferentes tipos de bosques, incluyendo tropicales caducifolios, subcaducifolios, de *Quercus* y de galería (Valle *et al.*, 2009). La madera de *C. aesculifolia* ha sido tradicionalmente utilizada como fuente de combustible para cocinar. Así mismo, el pochote ha sido apreciado con fines ornamentales, y sus flores son empleadas como alimento para el ganado. Las fibras de su fruto exhiben notables similitudes con las del algodón, siendo utilizadas para rellenar almohadas, cojines y colchones (Figura 1) (Avenidaño *et al.*, 2006; Ecojardín-UNAM, 2014). Por otro lado, la degradación térmica es un proceso de transformación química e irreversible que se desarrolla en altas temperaturas en condiciones reductoras, donde el extracto orgánico sufre una descomposición. La palabra "pirólisis" se origina en el vocabulario griego. "Pyro" significa "fuego" y "lysis" significa "separación". Este proceso se divide principalmente en tres etapas: dosificación, alimentación, transformación y el procedimiento de extracción y división de los productos como carbón residual, sustancia oleosa pirolítica y productos gaseosos (Figura 2) (Klug, 2012; Fahmy *et al.*, 2020). La degradación térmica siempre constituye la fase inicial en los procedimientos de ignición y transformación en gas, seguida por una oxidación parcial o total de los productos obtenidos.

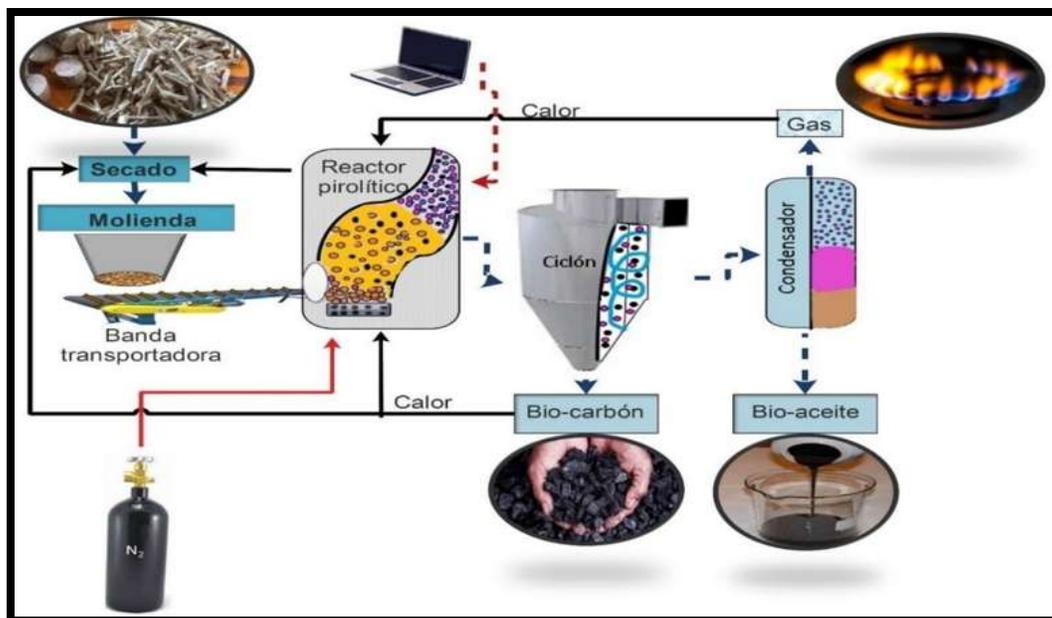


Figura 2. Diagrama simplificado del proceso de pirólisis (elaboración propia).

Por consiguiente, es necesario optimizar las operaciones industriales orientadas a la producción de energía proveniente de fuentes ecológicas, como los residuos forestales, con el objetivo de sustituir las energías fósiles, es crucial entender a fondo los aspectos clave del proceso. Un aspecto crucial a entender es la cinética del proceso térmico, dado que esta información constituirá el pilar esencial para desarrollar la zona en la que se constituye la reacción de operación (Arbeláez *et al.*, 2013; Malik *et al.*, 2024). Hoy en día, el análisis termogravimétrico (TGA) y su derivada (DTG), representa una técnica importante para la caracterización térmica de materiales lignocelulósicos y se ha implementado ampliamente en diversas biomásas, tanto terrestres como marinas, en procesos pirolíticos (Alvarado *et al.*, 2022; Dávila *et al.*, 2023). El TGA-DTG es un método ampliamente utilizado para evaluar las propiedades relacionadas con la pérdida de masa y la cinética de reacción asociada. Recientemente, se realizó un estudio que proporciona una evaluación fisicoquímica de las fibras obtenidas de semillas de *C. aesculifolia*. En este trabajo, se realizó un análisis termogravimétrico mediante el cual se calcularon la energía de arranque empleando los métodos de Broido y Saravanakumar (Carranza *et al.*, 2021). Cabe resaltar que, este tipo de procedimientos resultan de suma importancia en la manufactura, dado que los modelos de reacción determinan los criterios operativos, incluyendo temperaturas, niveles y proporciones de los reactivos. Con un estudio más profundo, es posible escalar instalaciones de conversión térmica para el aprovechamiento en grandes cantidades de combustibles renovables, como el bioaceite, lo cual interviene a la minimización de las emanaciones de gases antropogénicos y la disminución del apego hacia los productos a base de petróleo (Alvarado *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2021).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y en vista de la gran importancia que tiene el tema de las energías alternativas derivadas de biomasa en el desarrollo y sostenibilidad de nuestra sociedad, se pretende en este trabajo la aplicación de los métodos cinéticos en los procesos de pirólisis para lograr una buena optimización energética de la biomasa de *C. aesculifolia* como materia prima. Por lo tanto, es esencial poseer un conocimiento sólido de los modelos más pertinentes que permitan la optimización energética de esta biomasa (Dhyani y Bhaskar, 2018). Mediante los modelos iso-conversionales de Friedman, FWO y KAS, junto con el modelo no iso-conversional de Kissinger, es posible precisar los parámetros de reacción puntuales, como la energía inicial de arranque, así como otros parámetros termodinámicos derivados de E_a , entre estos parámetros se incluyen el factor de colisiones, potencial termodinámico de Gibbs y la variación de entropía (Alvarado *et al.*, 2022). Estos enfoques no solo ayudan a comprender de una mejor manera los procesos de pirólisis, sino que también ofrecen unas herramientas clave para mejorar y optimizar la eficiencia energética de la biomasa de *C. aesculifolia* (Huang *et al.*, 2018; Alvarado *et al.*, 2023).

No obstante, es relevante señalar que hay una escasa cantidad de estudios publicados sobre esta temática relacionados con la especie *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker.

2. ANTECEDENTES

Vedharaj *et al.* (2013), publicaron un estudio experimental sobre el biodiésel derivado del aceite de *Ceiba pentandra* como una alternativa viable de combustible para motores diésel.

Draman *et al.* (2014), reportan una caracterización y cinética de descomposición térmica de *C. pentandra* a base de celulosa.

Oluoti *et al.* (2018), reportan una investigación de la cinética y las propiedades del biocombustible de *Alstonia congenesis* y *C. pentandra* vía torrefacción.

Peña (2019), publicó una evaluación en cuanto a la generación de productos gaseosos y combustibles líquidos mediante la degradación molecular térmica de los materiales lignocelulósicos, con enfoque en su aplicación en Colombia. En este estudio, se caracterizó la especie *C. pentandra*, incluyendo tanto la biomasa como los procesos de pirólisis involucrados.

Carranza *et al.* (2021), publicaron la caracterización de las fibras extraídas de las vainas de semillas de *C. aesculifolia*. Este estudio incluye un análisis térmico (TGA-DTG) y cinético del fruto. Es relevante señalar que, en cuanto al análisis cinético, la investigación solo reporta la energía de activación, omitiendo detalles importantes como la gráfica del modelo cinético, el factor de frecuencia y los parámetros termodinámicos de la biomasa, como el tipo del mecanismo de reacción, potencial de Gibbs y el desorden termodinámico.

La literatura carece de manera importante de reportes sobre las cinéticas de reacción de la madera de *C. aesculifolia*.

3. JUSTIFICACIÓN

El comportamiento de los materiales lignocelulósicos, como la madera de la *Ceiba aesculifolia*, frente a la degradación térmica es un tema de gran interés dentro del campo de investigación de la biomasa y por tanto la investigación en bioenergía, en función a distintas razones:

- No existen estudios cinéticos sobre esta especie que permitan maximizar su capacidad como fuente de combustible.
- El proceso cinético de la degradación calorífica de *C. aesculifolia* puede ser estudiada y evaluada mediante diferentes métodos. Se pueden aplicar métodos dinámicos, donde la temperatura es variable, debido a que es posible modificarla con rampas de calentamiento predeterminadas, generalmente con una velocidad lineal y donde se realiza el seguimiento de la muestra. Actualmente, el análisis termogravimétrico (TGA) y su derivada (DTG), representa una técnica relevante en la caracterización térmica de materiales lignocelulósicos y se ha implementado ampliamente en diversas biomásas tanto terrestres como marinas (Alvarado *et al.*, 2020).
- Ante la creciente necesidad de explorar opciones más sostenibles para la generación de energía, se destaca la preocupación por los efectos negativos del uso excesivo de combustibles no renovables en los últimos años, lo cual se refleja en el calentamiento global, se destaca la importancia de la bioenergía como una de las soluciones. En este contexto, se centra específicamente en los productos de la madera de *C. aesculifolia*, que son biodegradables y ya están presentes en el mercado. Se resalta la relevancia del tratamiento térmico de esta madera como un objetivo de estudio, dado que proporciona una solución a problemas de contaminación y ofrece aplicaciones energéticas significativas (Martínez y Lora, 2014).

4. HIPÓTESIS

A través de los resultados arrojados en el análisis termogravimétrico de la *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker., es posible establecer los factores cinéticos involucrados para estimar la energía de inicio y la frecuencia de colisiones mediante los modelos matemáticos iso conversionales de Friedman, Flynn-Wall-Ozawa y Kissinger-Akahira-Sunose, así como del modelo no iso-conversional de Kissinger, los cuales presentan un error medio menor a 10%.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Analizar la degradación térmica del proceso de pirólisis y la cinética asociada de la madera de *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt. & Baker.

5.2. Objetivos específicos

- Determinar la densidad básica.
- Determinar la composición química básica: holocelulosa, celulosa, hemicelulosas, lignina y extraíbles.
- Obtener el análisis proximal y determinar la cantidad: humedad, fracción inorgánica, fracción volátil y carbono residual.
- Realizar un análisis último y determinar la cantidad: CHONS.
- Determinar el potencial energético.
- Determinar el índice de valor del combustible.
- Realizar el análisis térmico e identificar las etapas de descomposición de la madera a través de TGA-DTG.
- Derivado de los resultados obtenidos por TGA-DTG y mediante el modelado matemático por cuatro modelos diferentes, obtener E_a , A y la intensidad de la reacción del proceso de fragmentación térmica efectuado en una atmósfera en ausencia de oxígeno. De esta manera se determinará el método de cálculo más preciso para este proceso.
- A través del análisis termodinámico, calcular las variaciones de (ΔH) , (ΔG) y (ΔS) .
- Llevar a cabo un análisis utilizando la técnica no destructiva (FT-IR).

6. METODOLOGÍA

6.1. Colecta y preparación del material de estudio

La *C. aesculifolia*, se recolectó en Cuitzeo, en el estado de Michoacán, México (Figura 3). De tres individuos seleccionados, se tomaron rodajas de 10 cm de grosor a una altura de 1.30 m (DAP). Posteriormente, de cada rodaja se separó la madera de la corteza; la madera se astilló de forma manual y se dejó secar bajo sombra hasta alcanzar una humedad en equilibrio (aproximadamente 12 %). Ya finalizado el secado, las astillas de madera, se molieron, para finalmente proceder a tamizar utilizando tamices de mallas número 20, 40 y 60; la harina malla 40 (425 μm) se utilizó para la caracterización termodinámica (Tabla 1).

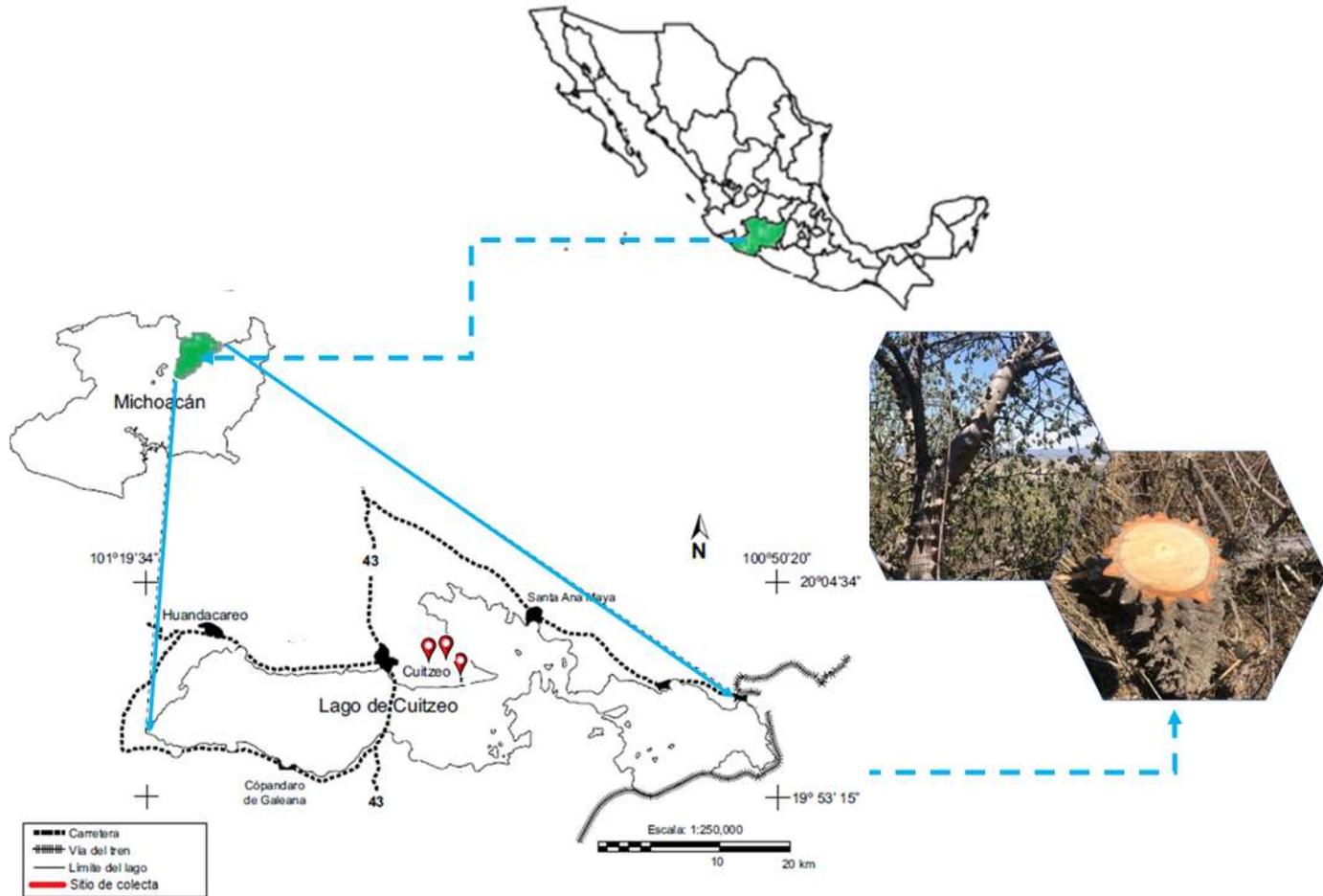


Figura 3. Localización geográfica de la recolección de los tres árboles de *C. aesculifolia* (elaboración propia).

Tabla 1. Descripción de los árboles recolectados de *C. aesculifolia*.

Árboles	Ubicación geográfica	DAP (cm)	Altura de árbol (m)	asnm(m)
1	19 ° 58' 37'' N 101 ° 5' 42'' O	16	5.30	1850
2	19 ° 58' 13'' N 101 ° 5' 38'' O	23	8.50	1940
3	19 ° 58' 18'' N 101 ° 6' 3'' O	17	5.40	1920

DAP: diámetro a nivel del pecho; asnm: elevación sobre la altura a nivel del mar.

6.2. Obtención de la densidad básica

Para cada una de las rodajas de madera, se seccionaron cubos de 2 cm por cada lado utilizando una sierra de banda (Silverline, modelo DC-SC10-B). Para determinar el volumen fresco de estos cubos, se aplicó el método de inmersión, midiendo la cantidad de agua desplazada al sumergirlos, lo que permitió calcular el volumen en centímetros cúbicos, dado que la masa de agua desplazada, en gramos, corresponde directamente al volumen (Método de prueba B - Volumen por Inmersión en Agua (ASTM, 2007a)). Posteriormente, los cubos fueron secados completamente hasta alcanzar un estado anhidro, momento en el cual se calculó la densidad básica de la *C. aesculifolia* (BWD), dividiendo el peso libre de humedad por el volumen fresco inicial (Ecuación 1) (ASTM, 2007a).

$$BWD = \frac{m_{\text{anhidro}}}{v_{\text{verde}}} \quad (1)$$

donde:

BWD= densidad, en g/cm³ o g. cm⁻³.

m_{anhidro}= masa sin agua (anhidro), en g.

v_{verde} = Volumen no deshidratado (fresco), en cm³.

6.3. Análisis químico

La caracterización química se realizó siguiendo la metodología reportada por Goering y Van Soest (1970). Los principales constituyentes situados en la madera son la holocelulosa, la lignina y componentes extraños, estos se determinaron por medio de un análisis del tejido fibrilar basado en el procedimiento gravimétrico de Van Soest utilizando α -amilasa. De cada unidad de muestra, se tomaron 0.5 g de madera seca tamizada a un tamaño de partícula de malla 40 (425 μ m), que se introdujeron en filtros de bolsas y fueron sometidos a digestiones secuenciales según el método que utiliza un analizador de fibra ANKOM-200. Los parámetros evaluados incluyeron la fibra neutra (NDF), fibra ácida (ADF) y lignina insoluble en ácido sulfúrico al 72%.

La proporción de hemicelulosa se calculó restando el ADF del NDF (NDF-ADF), mientras que la proporción de celulosa se determinó restando la lignina insoluble (IL) del ADF (ADF-IL). Para la holocelulosa, se calculó como el total de la proporción de celulosa y hemicelulosa. Las sustancias extraíbles se calcularon utilizando la siguiente fórmula: % extraíbles = 100 – % celulosa – % hemicelulosas – % lignina – % cenizas. Además, se aplicó una corrección de cenizas, conforme a los métodos reportados por diversos investigadores (Musule *et al.*, 2016).

6.4. Análisis proximal

El análisis proximal es un procedimiento bien definido para la caracterización de biocombustibles, dado que esta nos permite principalmente obtener parámetros como el contenido de agua, la fracción gaseosa, cantidad de fracción inorgánica y el remanente residual presentes en la biomasa (García *et al.*, 2012). Se realizaron los exámenes proximales en tres repeticiones. El enfoque empleado para llevar a cabo el análisis proximal se percibe de acuerdo con la figura 4.

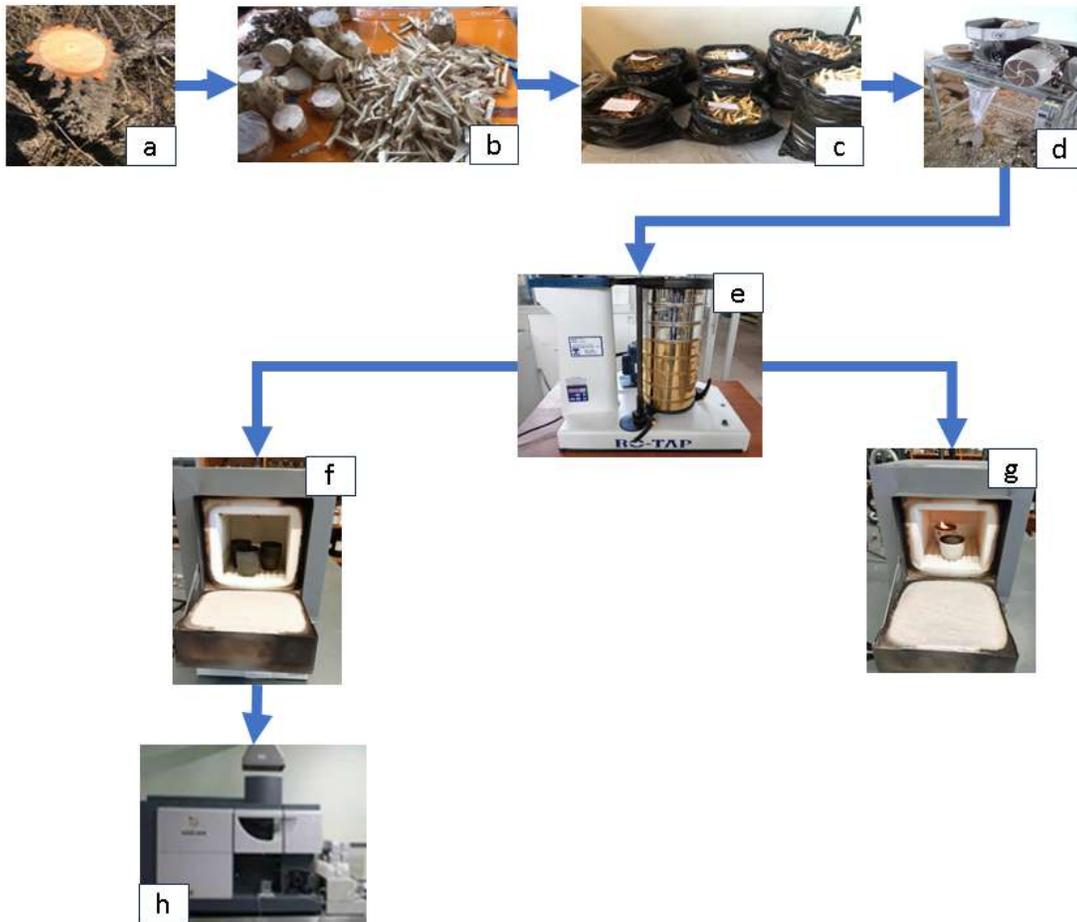


Figura 4. Procedimiento para llevar a cabo un análisis proximal. a) apeo de árbol, b) astillado, c) secado bajo la sombra, d) molienda en un equipo convencional, e) tamizado, f) cenizas, g) material volátil, h) microanálisis de ceniza (elaboración propia).

6.4.1. Contenido de agua

El total de agua en la madera, necesario para los análisis proximales, se determinó utilizando una termobalanza (Adam Equipment, modelo PMB53, Adam Equipment Inc., Oxford, Connecticut, USA) capaz de mantener una temperatura de $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$, en la cual se realiza un intercambio de la atmósfera de aire de 3 a 5 veces por hora. Se añadió aproximadamente 1 g de aserrín, el cual se dispersó de forma uniforme sobre el recipiente del equipo, que es de un material de acero inoxidable y termorresistente. La termobalanza

tiene una precisión de medición de 0.1 g. Al finalizar el proceso de deshidratación, se registró el valor de la humedad en porcentaje (UNE-EN ISO 18134-1, 2016).

El total de agua, N_{ar} de la porción de prueba, en su forma inicial, indicado como un porcentaje de peso, se determinó utilizando la ecuación 2

$$N_{ar} = \frac{(U2-U3)-(U4-U5)}{(U2-U1)} \times 100 \quad (2)$$

donde:

[U1]: equivale a la masa de la bandeja vacía empleada para la muestra de ensayo, en g.

[U2]: se refiere a la masa de la muestra de ensayo y la bandeja antes del proceso de secado (peso a temperatura ambiente), en g.

[U3]: corresponde a la masa de la bandeja junto con la muestra de ensayo tras el secado (peso aún caliente), en g.

[U4]: es el peso de la bandeja tomada como indicador previo al proceso de deshidratación (temperatura ambiente), en g.

[U5]: es el peso de la bandeja registrada como indicador después del secado (peso aún caliente), en g.

6.4.2. Porcentaje de cenizas

Durante el proceso para la obtención de componentes inorgánicos, un crisol de níquel se calentó en un horno a (550 ± 10) °C durante un mínimo de 60 min. Después, se permitió reposar el crisol sobre una superficie termorresistente durante al menos 5 y 10 min, en un deshumidificador con sílico gel y se dejó reposar hasta una temperatura del entorno. Una vez que el crisol se enfrió completamente, se valoró y se documentó la reducción del peso.

Para el acondicionamiento del extracto destinado para el análisis general, se mezcló cuidadosamente antes de pesar la porción de ensayo. Se colocó al menos 1 g de porción de ensayo en el crisol, asegurándose de distribuirlo de manera homogénea en la base del recipiente.

Se documentó el peso del crisol más el extracto, el cual se pesó con una precisión de 0.1 mg. Si el extracto se ha deshidratado previamente en un horno, tanto como el crisol como la muestra deben ser deshidratados a 105°C antes de su pesaje, con el fin de evitar la absorción de agua. Luego, se procede con la calcinación de la muestra en una mufla a 550 °C \pm 10 hasta obtener un peso estable de los componentes inorgánicos, siguiendo lo establecido en (UNE-EN 14775, 2010).

La cantidad de componentes inorgánicos en base anhidra m_d , el porcentaje del peso de la muestra, calculado sobre una base anhidra, se obtuvo mediante la ecuación 3.

$$m_d = \frac{(n_3 - n_1)}{(n_2 - n_1)} \times 100 \frac{100}{100 - X_{ad}} \quad (3)$$

donde:

$[n_1]$: es el peso, en g, del crisol sin contenido.

$[n_2]$: toma el valor del peso, en g, del crisol con el extracto incluido.

$[n_3]$: adquiere el valor, en g, del crisol incluyendo los componentes inorgánicos.

$[X_{ad}]$: toma el valor del total de agua contenida en el extracto utilizado para su medición.

El resultado obtenido se calculó con dos decimales y el valor promedio se redondeó a un 0.1% para asegurar una repetibilidad y reproducibilidad absoluta (UNE-EN 14775, 2010).

6.4.3. Fracción volátil

Para calcular la fracción volátil, se colocó un crisol vacío con su tapa, o la cantidad correspondiente de crisoles con sus tapas, colocados en una plataforma múltiple, y se introdujeron en el horno. Se mantuvieron a una temperatura de $900 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante 7 minutos ± 5 segundos. Luego, se sacaron los crisoles del horno junto con el soporte y se permitieron reposar a temperatura del entorno sobre una bandeja termorresistente. Finalmente, los crisoles se almacenaron en un desecador, conforme a lo establecido en la norma ASTM E 872 (2013).

Para la carga de los crisoles, se registró la masa de los crisoles vacíos con sus tapas a la temperatura del entorno

Se adiciona a los crisoles $1 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ del material del extracto para el análisis general, con una precisión de 0.1 mg. Posteriormente, se colocaron nuevamente las tapas sobre los crisoles, garantizando que el material forme una capa homogénea en el fondo del crisol, sobre una superficie limpia y firme.

Para la volatilización de la muestra, el crisol con la porción de ensayo se colocó sobre un respaldo frío y luego se ingresó en interior de una estufa a una temperatura de $900 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$. Se cerró el horno y se mantuvo durante al menos 7 minutos ± 5 segundos.

El crisol se secó en el horno y, posteriormente, se colocó sobre una superficie que soporta altas temperaturas. Se permitió que se enfriara durante un lapso de al menos unos 5 a 10 minutos, después de lo cual se transfirió al desecador para enfriarse a una temperatura natural. Una vez obtenida la temperatura del entorno, se registró el peso del crisol con una precisión de 0.1 mg.

6.4.4. Porcentaje de carbono fijo

De acuerdo con lo reportado por García *et al.* (2012), el procedimiento para obtener el porcentaje remanente de la muestra, se aprecia en la ecuación 4:

$$\% \text{Carbono fijo} = 100 - (\% \text{fracción volátil} + \% \text{cenizas}) \quad (4)$$

6.5. Microanálisis de cenizas

Este proceso metodológico se realizó con base en los parámetros publicados por Arcibar *et al.* (2014), usando la técnica de espectrofotometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (VARÍAN 730-ES (Agilent) Mulgrave).

6.6. Análisis elemental

La cantidad de C, H, N y S se midió empleando un analizador último marca COSTECH, en apego a la norma (UNE-CEN/TS 15104 EX 2008). Por su parte, la concentración de oxígeno se estimó mediante la diferencia (Ghetti *et al.*, 1996).

En la presentación de los resultados, la composición total de C, H y N en el extracto del biocombustible sólido, según el análisis realizado, se expresó como un porcentaje de masa.

Los hallazgos presentados se registraron en base seca, como la media de dos réplicas. Estos se calcularon utilizando las ecuaciones 5, 6 y 7, respectivamente:

1. Contenido de carbono:

$$Cu = Cp * \frac{100}{100-J} \quad (5)$$

2. Contenido de nitrógeno:

$$Nu = Np * \frac{100}{100-J} \quad (6)$$

3. Contenido de hidrógeno

$$Hu = \left(Hp - \frac{J}{8,937} \right) * \frac{100}{100-J} \quad (7)$$

donde:

[u] = Masa anhidra

[p] = Cómo se ha establecido.

[J] = Total de agua en la muestra utilizada para el análisis general durante su evaluación.

El factor constante utilizado para calcular el porcentaje de H en H₂O presente en el extracto es 8.937. Este valor se deriva de la ecuación del agua (H₂O), considerando el número atómico del H (1.007) y del O (15.999).

El contenido de oxígeno se realizó por diferencia según Ghetti *et al.* (1996).

6.7. Potencial energético

El poder calorífico de la harina de madera se determinó de acuerdo con los lineamientos que se estipulan en la norma UNE-EN 14918 (2011), utilizando un calorímetro semiautomático (LECO AC600), en el cual se utilizó ácido benzoico para calibrar la bomba calorimétrica.

6.8. Índice de valor del combustible

En este análisis, también se realizó una comparación empleando el Índice de Valor Calorífico (FVI) propuesto por Bhatt y Todaria (1992), donde se consideran el valor calorífico y la densidad como características o atribuciones positivas, y el contenido de cenizas como un parámetro negativo (Ecuación 8), cabe resaltar que, aunque las variables en el cálculo del (FVI) tiene distintas unidades, el resultado final se presenta como un valor adimensional, donde un número más alto indica una mejor fuente de combustible.

$$FVI = \frac{(HHV)(BWD)}{A} \quad (8)$$

donde HHV representa el potencial energético superior (MJ·kg⁻¹), BWD representa la densidad básica de los materiales lignocelulósicos (g·cm⁻³), y A simboliza el contenido de minerales (%).

6.9. Análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial (DTG)

Las muestras del aserrín de la especie *C. aesculifolia* seleccionadas se almacenaron en contenedores en un área seca a temperatura ambiente (25°C) durante un lapso de 2 días, esto con la finalidad de remover el agua superficial presente en la muestra al momento de su llegada. Luego, se realizó una molienda fina y, una vez secos, se continuó con el proceso de cribado para lograr una granulometría de aproximadamente 425 μm. Posteriormente, la biomasa se ingresó en un horno, donde se eliminó la humedad a 115°C, controlando el proceso hasta alcanzar un peso estable. El análisis térmico (TGA-DTG) de la madera de *C. aesculifolia* se realizó con un equipo STA 6000 (Perkin Elmer Inc., Wellesley, MA, EE. UU.). Las condiciones de pirólisis se mantuvieron utilizando gas nitrógeno grado reactivo (pureza del 99,99%), adquirido en INFRA, México, a una tasa constante de 30 ml/min. Para cada prueba de ensayo, se ubicaron alrededor de 30 ± 5 mg del espécimen de forma uniforme en un crisol de alúmina.

Para precisar los parámetros de reacción y energía, los extractos fueron calentados desde una temperatura del entorno hasta lograr obtener una temperatura de 900°C, manteniéndose a esta temperatura durante 10 minutos antes de proceder al enfriamiento. Es pertinente destacar que el procedimiento de la descomposición térmica de *Ceiba aesculifolia* se realizó utilizando hasta cinco tasas de calentamiento térmico ($\beta = 10, 15, 20, 25$ y $30^\circ\text{C}/\text{min}$) (ver figura 5c).

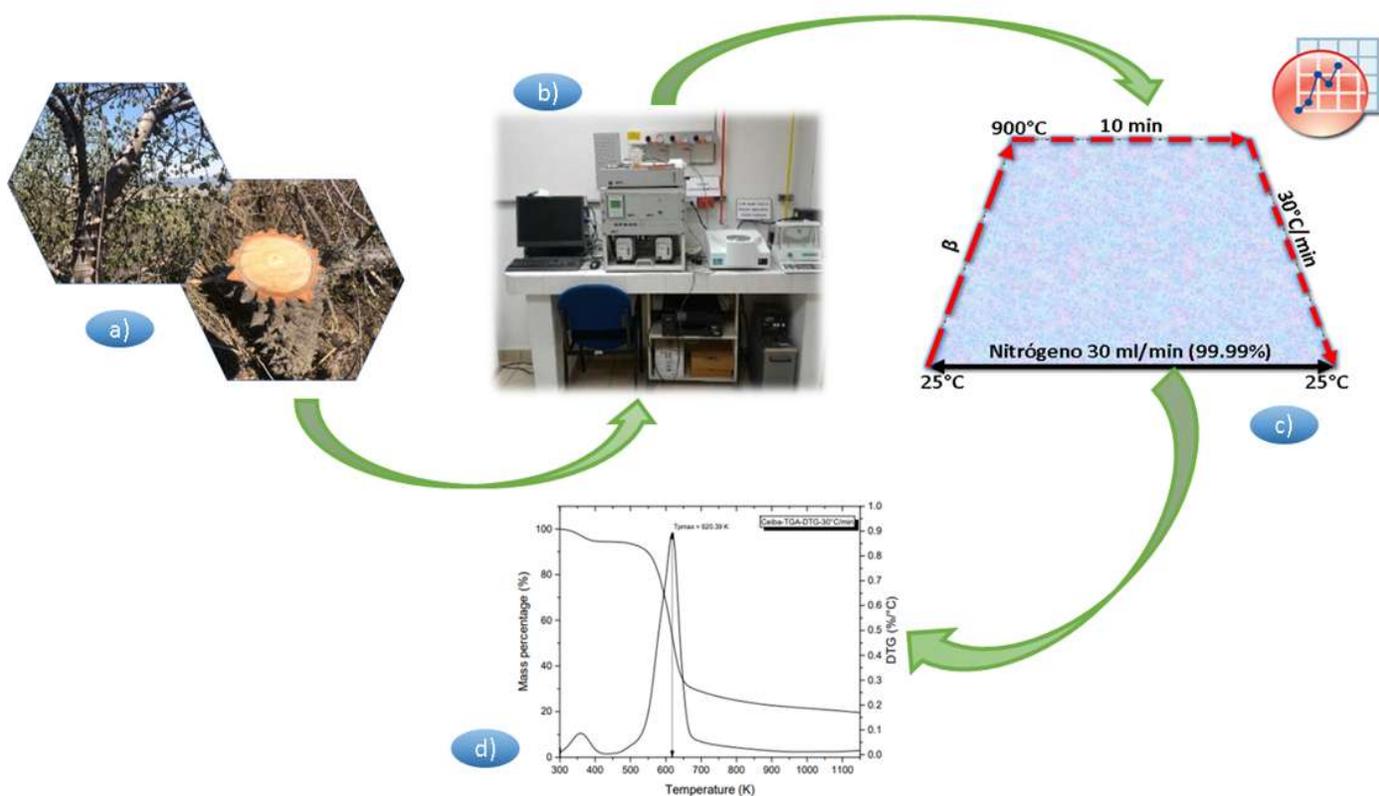


Figura 5. Esquema general del análisis térmico (TGA-DTG) de la madera de *C. aesculifolia*. (a) biomasa, (b) equipo para realizar el análisis, (c) la rampa de calentamiento, (d) termograma (elaboración propia).

Para reducir el error y garantizar altos niveles de precisión y exactitud, cada prueba se repitió por triplicado. También se realizaron rampas de calentamiento en tres repeticiones, sólo cuando la diferencia de conversión excede el 5% o cuando los datos mostraban un ruido de fondo excesivo. El software utilizado para graficar los datos obtenidos del análisis térmico fue OriginPro-Graphing & Analysis.

6.10. Análisis cinético para el material lignocelulósico

Basado en los principios iso-conversionales, estos modelos para el análisis cinético se basan principalmente en un valor constante de conversión, así, la temperatura es uno de los principales actores que condicionan la velocidad en la reacción (Kan *et al.*, 2016; Fong *et al.*, 2019).

Con respecto al procedimiento de la pirólisis de la biomasa de *C. aesculifolia*, esta se puede describir como un proceso global de un solo paso y de primer orden de reacción, que se describe como se muestra a continuación (Ecuación 9).



Donde los volátiles en el mecanismo de la ecuación indica el gas generado y k se refiere a constante de velocidad de pirólisis. El grado de fracción de conversión, α , en un análisis termogravimétrico no isotérmico se define como la pérdida de peso o el nivel del avance de la interacción durante la degradación térmica de la materia vegetal. Este parámetro indica principalmente cómo progresa la degradación a la que es sometida la muestra en cuanto a la temperatura aplicada (Ecuación 10).

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_f} \quad (10)$$

donde M_i adquiere el valor de la masa en un inicio del extracto de biomasa antes de comenzar el proceso de pirolisis, M_t es el peso que adquirió la muestra en el momento determinado, t , y M_f representan la masa final de la muestra que no se logró descomponer durante el mecanismo de interacción.

De manera general, el vínculo entre la energía térmica y la constante de reacción química, $k(T)$, se expresa comúnmente a través del modelo matemático de Arrhenius (Ecuación 11).

$$k(T) = Ae^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \quad (11)$$

donde A expone la tasa de choques (s^{-1}), E_A describe la energía umbral para lograr que la reacción ocurra (kJ/mol), R es el valor universal para los gases ideales (8.3145 J/K·mol) y T se refiere a la temperatura obtenida en Kelvin. La variación de α en función del tiempo, $\frac{d\alpha}{dt}$ depende de una constante de velocidad que está relacionada con la temperatura, $k(T)$, y esta puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T) \cdot f(\alpha) \quad (12)$$

En la ecuación 9, los términos α , t , $k(T)$ y $f(\alpha)$ estos factores están relacionados con el nivel de avance del procedimiento de de la fragmentación térmica, el duración de la reacción, tasa de reacción y el modelo cinético, respectivamente. Al variar la ecuación (11) en la ecuación (12), se genera una fórmula clave del método analítico, que permite analizar los parámetros cinéticos utilizando los datos obtenidos del TGA y la velocidad de reacción durante la fragmentación térmica.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \cdot f(\alpha) \quad (13)$$

En la cinética para un estado sólido, generalmente se emplea el método no isotérmico, donde la ecuación para la velocidad de calentamiento lineal constante, β , se establece tal como se percibe en la ecuación (14).

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (14)$$

La dependencia temporal de la conversión se sustituye por la relación temperatura-tiempo sustituyendo la Ec. (13) y la Ec. (14), lo que da la Ec. (15):

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \cdot f(\alpha) \quad (15)$$

Introduciendo la función integral de $g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)}$, se obtiene la ecuación (16)

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} dT \quad (16)$$

6.10.1. Aplicación del enfoque iso-conversional de Flynn, Wall y Ozawa (FWO)

Este modelo numérico aplica el método de aproximado de Doyle para la integral de temperatura:

$$l(\beta) = \ln\left(\frac{0.0048AE_A}{Rg(\alpha)}\right) - 1.502 \frac{-E_A}{RT} \quad (17)$$

Así, la energía de activación aparente puede obtenerse graficando $\ln(\beta)$ contra $\frac{1}{T}$ a una conversión dada para construir una línea recta pendiente de $-1.502 \frac{E_A}{R}$ mientras que el valor pre-exponencial (A) se obtiene a partir de la interceptación. El método FWO es uno de los más empleados en los modelos iso-conversionales, puesto que no requiere asumir un orden de reacción, lo que facilita su aplicación a una amplia variedad de grados de conversión en términos de masa (Fong *et al.*, 2019).

6.10.2. Aplicación del método isoconversional de Kissinger, Akahira y Sunose (KAS)

El prototipo numérico KAS se fundamenta en la estimación de Coats-Redfern para la función $p(x)$, según lo propuesto por Murray y White. La ecuación KAS, considerando la temperatura integral, puede formularse como se indica en la ecuación (18).

$$\ln \ln \left(\frac{\beta}{T^2} \right) = \ln \left(\frac{AR}{E_A g(\alpha)} \right) - \left(\frac{E_A}{RT} \right) \quad (18)$$

Donde en cada valor de la conversión, α , $\ln \frac{\beta}{T^2}$ es lineal con $\frac{1}{T}$ y la energía de arranque para realizar el cambio molecular se determina evaluando la pendiente de $-\frac{E_A}{R}$. Además, los factores pre-exponenciales (A) pueden determinarse a partir de la intersección. El método numérico de KAS se reconoce por ofrecer una mayor precisión en comparación con el método FWO previamente descrito (Fong *et al.*, 2019).

6.10.3. Método iso-conversional de Friedman

El modelo matemático de Friedman es una variación del método iso-conversional diferencial, que se obtiene al implementar el logaritmo natural en los dos lados de la operación (19). Este método es ampliamente aplicable, dado que no se limita sólo a programas de calentamiento lineal, sino que puede utilizarse con cualquier programa de temperatura. La fórmula del método de Friedman es la siguiente.

$$\ln \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{\alpha_i} = \ln \ln \left[A_{\alpha} * f(\alpha) \right] - \frac{E_{\alpha}}{RT_{\alpha_i}} \quad (19)$$

Donde $(d\alpha/dt)_{\alpha_i}$, A_{α} , E_{α} y T_{α_i} estos parámetros incluyen la velocidad de conversión, la frecuencia de colisiones, la energía de umbral requerida para que la reacción ocurra, y la temperatura correspondiente a un grado específico de conversión (α_i), respectivamente. Para la fracción de conversión respectiva, se trazaron cuatro pares de puntos de datos $\ln(d\alpha/dt)$ y $1/T$ de las cuatro tasas de calentamiento y se ajustaron a un gráfico lineal. La energía mínima para realizar la reacción se determina de acuerdo con la pendiente, $-E_{\alpha}/R$ (Chong *et al.*, 2019).

6.10.4. Método no iso-conversional de Kissinger

El modelo matemático de Kissinger supone que la E_{α} es una constante para una conversión determinada y no se requiere calcular para cada valor de conversión (Mabuda *et al.*, 2016; Chandrasekaran *et al.*, 2017).

En este método a través del gráfico de $\ln(\beta/T_p^2)$ vs $(1/T_p)$ donde T_p es la temperatura donde se produce el pico de degradación durante la descomposición térmica. La T_p puede obtenerse a partir del gráfico DTG. La energía mínima para realizar la reacción se

determina a partir del gradiente del gráfico de la línea recta que es igual a $-E\alpha/R$ (Chong *et al.*, 2019).

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E\alpha}\right) - \frac{E\alpha}{RT_p} \quad (20)$$

El orden de reacción se determina empleando la ecuación del modelo matemático de Avrami (Gai *et al.*, 2013). El procedimiento necesario para obtener este parámetro se detalla a continuación (Tabla 2):

Tabla 2. Procedimiento experimental para evaluar el orden de reacción de la biomasa de <i>Ceiba aesculifolia</i> con el método de Avrami.	
El método de Avrami:	$\alpha = 1 - e^{\left(\frac{-K(T)}{\beta^n}\right)}$
Transposición y aplicación de logaritmos:	$-\ln(1 - \alpha) = -\left[\frac{-K(T)}{\beta^n}\right]$
	$-\ln(1 - \alpha) = -\left[\frac{-K(T)}{\beta^n}\right]$
	$-\ln(1 - \alpha) = \left[\frac{K(T)}{\beta^n}\right]$
Aplicando nuevamente los logaritmos:	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln\left(\frac{K(T)}{\beta^n}\right)$
Aplicando propiedades logarítmicas:	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln K(T) - \ln \beta^n$
Sustituyendo $k(T)$ según la ecuación (11):	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln\left[Ae^{\left(\frac{Ea}{RT}\right)}\right] - \ln \beta^n$
Aplicando propiedades logarítmicas:	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln A + \left(-\frac{Ea}{RT}\right) - \ln \beta^n$
	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln A - \frac{Ea}{RT} - \ln \beta^n$
Ecuación que calcula el orden de reacción:	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln A - \frac{Ea}{RT} - n \ln \beta$
	$y = \ln[-\ln(1 - \alpha)]$
La gráfica se obtiene por analogía con la ecuación $y=mx+b$ donde:	$m = -n$
	$x = \ln \beta$
	$b = \ln A - \frac{Ea}{RT}$
Por lo tanto, el valor del orden de reacción (n) viene dado por la pendiente (m) calculada en el gráfico y vs x.	

6.11. Análisis termodinámico

Es fundamental analizar cómo varían las condiciones termodinámicas, como el tipo de reacción, potencial termodinámico de Gibbs y el desorden termodinámico, bajo las condiciones del proceso de pirólisis en distintos niveles de conversión. Los indicadores termodinámicos son esenciales para un reactor bien diseñado a gran escala para el proceso de pirólisis. El cambio en la entropía, es crucial para evaluar el grado de desorden

de un sistema, dado que permite determinar que tan cerca se encuentra de su equilibrio termodinámico. Por su parte, el potencial termodinámico de Gibbs muestra el aumento en la energía global del sistema de reacción y pueden utilizarse para evaluar los cambios en el flujo de calor y el desorden, así como la espontaneidad del proceso, mientras que la entalpía, exhibe la variación de energía entre la alimentación y el complejo activado, esto nos permite identificar la naturaleza de la reacción que tiene lugar o que ocurrirá durante un proceso de degradación térmica (Naqvi *et al.*, 2018; Chong *et al.*, 2019; Fong *et al.*, 2019; kirti *et al.*, 2022).

Una vez determinada la energía de activación para cada modelo matemático aplicado, se determinaron los tres parámetros termodinámicos, como el tipo de reacción, la espontaneidad del proceso y el desorden termodinámico, se determinan empleando una tasa de incremento térmico baja de 15 °C/min. En esta etapa también se calculó el factor pre-exponencial (A), considerando únicamente esa velocidad de calentamiento. Las ecuaciones empleadas para calcular cada uno de estos parámetros termodinámicos se visualizan a través de la (Tabla 3).

Tabla 3. Fórmulas generales para el análisis termodinámico.	
Magnitud termodinámica	Expresión matemática
Factor Pre-exponencial (A)	$A = \beta E_a \exp\left(\frac{E_a}{RT_p}\right) / (RT_p^2)$
Entalpía (ΔH)	$\Delta H = E_a - RT$
Entropía (ΔS)	$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_p}$
Energía libre de Gibbs (ΔG)	$\Delta G = E_a + RT_p \ln\left(\frac{K_B T_p}{hA}\right)$
Donde: β: Velocidad de calentamiento en K/min E_a: Es la energía mínima para llevar a cabo la reacción (kJ/mol). R: Corresponde a la constante universal de los gases (8.314 J/K-mol). T: Temperatura absoluta en Kelvin (K) K_B: Correspondiente a la constante de Boltzmann (13819×10^{-23} J/K).	h: Corresponde a la constante de Planck (6.626×10^{-34} J s). T_p: Es la temperatura pico del DTG (kelvin) A: Factor pre-exponencial o Factor de Arrhenius (s^{-1}) ΔS: Variación de Entropía (J/mol) ΔH: Variación de entalpía (kJ/mol) ΔG: Cambio de energía libre de Gibbs (kJ/mol).

6.12. Análisis (FT-IR)

El análisis FTIR se realizó principalmente para identificar las principales unidades funcionales presentes en la especie *C. aesculifolia*. Los espectros FT-IR de la especie *C. aesculifolia* fueron obtenidos usando el modelo PerkinElmer ATR 400 con una resolución

de 4 cm^{-1} . La biomasa se preparó siguiendo métodos bien establecidos en la literatura para análisis infrarrojos. Todos los espectros se recogieron (16 escaneos por muestra) en una extensión de 500 a 4000 cm^{-1} con una precisión espectral de 4 cm^{-1} (Alvarado *et al.*, 2020). Las muestras elegidas se combinaron con (KBr) y posteriormente se deshidrataron en un horno durante al menos 24 horas.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Obtención de la densidad básica

La densidad de un material lignocelulósico es una propiedad física esencial que influye de manera significativa en los procedimientos de oxidación de los materiales lignocelulósicos, dado que, a mayor densidad, se incrementa la energía contenida por unidad de volumen (Demirbaş y Demirbaş, 2009; Kumar *et al.*, 2010). Según la clasificación de Lincoln (1986), la madera de *C. aesculifolia* se considera pesada con una densidad absoluta de $0.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. A través de una investigación realizada por Ruiz-Aquino *et al.* (2022) sobre maderas latifoliadas, reportó que la densidad absoluta fluctúa de $0.475\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $0.814\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, destacándose valores cercanos a $0.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

7.2. Análisis químico

7.2.1. Holocelulosa, celulosa y hemicelulosas

La holocelulosa incluye todos los polisacáridos presentes en la madera, abarcando tanto la celulosa como las hemicelulosas (Hossain *et al.*, 2023). En esta investigación se encontró que la madera de *C. aesculifolia* contiene 77.7% de holocelulosa, lo que la sitúa por encima de los valores reportados para las maderas latifoliadas en México, que varían entre 63.8% y 73.58% (Ruiz-Aquino *et al.*, 2020; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021). La proporción de celulosa en la madera de *C. aesculifolia* (Figura 6) es superior al 41.29 % reportado para la madera de *Ceiba pentandra* por Honorato *et al.* (2015), y también supera el rango de 41.32% a 58.83% registrado para las maderas latifoliadas mexicanas (Salazar *et al.*, 2023). Por otro lado, la madera de *C. aesculifolia* presentó un alto porcentaje de celulosa, lo que sugiere su potencial uso para la obtención de bioetanol. Según Zoghalmi y Paës *et al.*, (2019), la celulosa se encuentra principalmente de forma cristalina, lo que presenta un desafío, dado que dificulta la accesibilidad y aumenta la necesidad de reactivos químicos para poder ser despolimerizada para su fermentación. Además, el alto porcentaje de celulosa presente en la madera de *C. aesculifolia* podría ser favorable desde otro punto de vista, dado que se esperaría un alto rendimiento en la obtención de celulosa para papel y sus derivados (Pintor-Ibarra *et al.*, 2018). En cuanto a las hemicelulosas presentes en la madera de *C. aesculifolia*, el valor encontrado es inferior al 37.77 % reportado para *C. pentandra* (Honorato *et al.*, 2015). Sin embargo, se encuentra dentro del rango de 11.75 a 24.38 % de hemicelulosas observado en cinco maderas duras nativas de México (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019). De acuerdo con Wu *et al.* (2023), las hemicelulosas poseen regiones amorfas que se hidrolizan más fácilmente que las regiones cristalinas cuando se utilizan enzimas, lo cual puede ser tomado como un aspecto positivo para los procesos de fermentación.

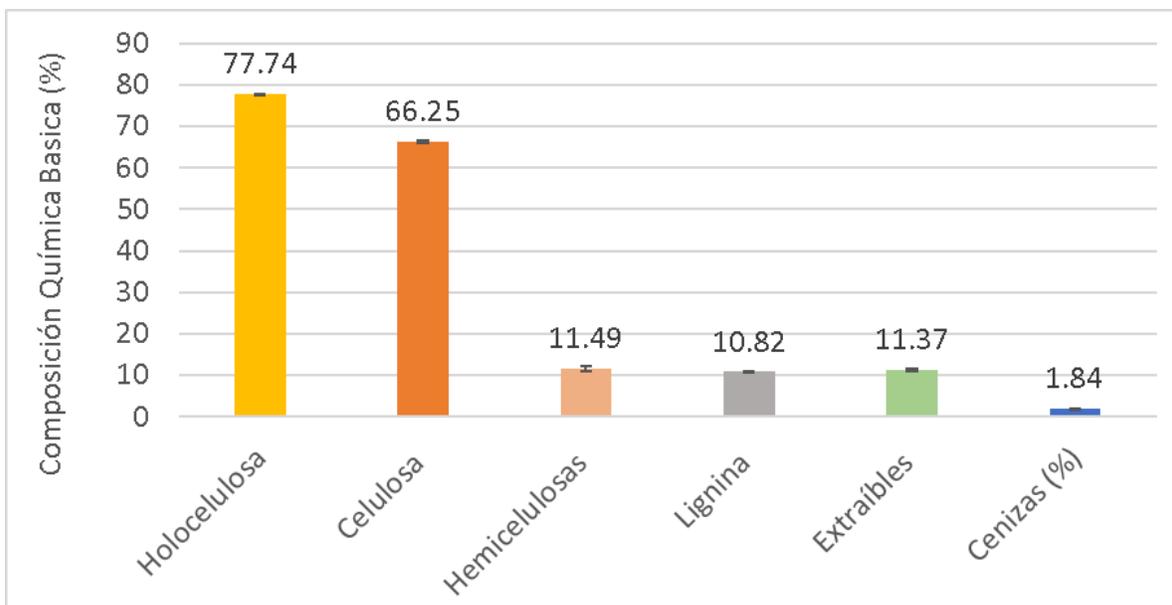


Figura 6. Datos sobre los componentes químicos esenciales de la madera de *C. aesculifolia*.

7.2.2. Lignina

La lignina es, posteriormente de la celulosa, el segundo biopolímero amorfo de mayor abundancia en la madera y en la naturaleza. Sus principales derivados incluyen el alcohol coniferílico, cumarílico y sinapílico, en la madera representa entre el 15 y el 30 % (Acosta *et al.*, 2017). En el caso de *C. aesculifolia*, este estudio encontró que contiene 10,82% de lignina (Figura 6). Sin embargo, otros autores han reportado que las maderas duras en México tienen porcentajes de lignina que varían entre 14.86% y 36.57% (Honorato *et al.*, 2015; Ruiz-Aquino *et al.*, 2019; Ruiz-Aquino *et al.*, 2020; Gutiérrez- Acosta *et al.*, 2021), lo que indica que el valor obtenido en esta investigación se encuentra por debajo de ese rango mencionado.

Este hecho podría resultar beneficioso pensando en la posible producción de bioetanol, puesto que, según estudios de Kruyeniski (2017), los materiales lignocelulósicos con altos porcentajes de lignina presentan dificultades en los tratamientos de fermentación. Por otro lado, una mayor cantidad de lignina en los materiales lignocelulósicos mejora su calidad como biocombustible sólido, dado que se ha demostrado de acuerdo con la literatura que esta sustancia incrementa su potencial energético (Ngangyo *et al.*, 2016; Pintor *et al.*, 2017).

7.2.3. Extraíbles

Los componentes extraños son definidos como sustancias químicas que se localizan en la madera y pueden ser removidos mediante medios polares y apolares. Estos elementos, conocidos también como materiales removibles, se sitúan en los espacios internos en las unidades celulares, entre las paredes celulares o en las cavidades entre las células. En la madera, constituyen entre el 4 y el 10% del peso seco en especies de climas templados, mientras que en las especies tropicales superan el 20% (Ávila y Herrera, 2012). Aunque la

presencia de extractivos no afecta ni cambia la estructura de la madera y su contribución a la masa es relativamente baja, sí influye de manera significativa en las características y aprovechamiento durante las etapas de aprovechamiento de los materiales lignocelulósicos (Ávila y Herrera, 2012). Varios estudios han indicado que el contenido de componentes extraños presentes en la madera de algunos géneros de latifoliadas mexicanas varía de 8.2% y 30.7% (Ruiz-Aquino *et al.*, 2020; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021). En este sentido, el porcentaje de extraíbles encontrado en este estudio se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente (Figura 6). De igual manera, estudios previos han mostrado que los compuestos extraíbles pueden tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales en la utilización de la biomasa como recurso energético. Por ejemplo, estos compuestos pueden formar complejos con metales como el hierro, lo que puede provocar desgaste de los equipos de combustión debido a la corrosión (Fengel y Wegener, 1984). Además, los compuestos extraíbles también pueden llegar a generar problemas en los tratamientos químicos, especialmente incrementando el consumo de reactivos en los procesos de fermentación (Krueyanski, 2017). Sin embargo, otros estudios han señalado que un alto porcentaje de extraíbles favorece el poder calorífico de los biocombustibles sólidos (White, 1987; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016).

7.3. Análisis proximal y poder calorífico

El análisis proximal es un procedimiento convencional utilizado para el análisis de las características de los biocombustibles, dado que nos proporciona inicialmente la calidad potencial del biocombustible. Este método se centra en la determinación del total de agua, componentes inorgánicos, porcentaje remanente y fracción gaseosa en las muestras de biomasa (García *et al.*, 2012).

7.3.1. Porcentaje de agua

El total de humedad obtenido para la especie *C. aesculifolia* fue de 9.37%, ubicándose dentro del margen reportado por Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020), el cual indica que el contenido inicial de agua en las muestras de los materiales lignocelulósicos oscila entre 6.0% y 75.2%. Esta diferencia se debe a la recolección del material, dado que en ocasiones se trataba únicamente de madera verde procesada y en otras ocasiones se trataba de material ya almacenado a la intemperie.

Para la fabricación de Pellets se demandan valores de humedad inferiores al 10% (Oberberger y Thek, 2010), mientras que para la elaboración de Briquetas se requieren valores menores o igual al 18% (ÖNORM 7135, 2000). Además, para la elaboración de carbón vegetal se requieren valores inferiores al 7% de humedad (NBN-M11-001,1984).

Un contenido elevado de humedad en la biomasa induce a un incremento en el peso, lo que a su vez conlleva un aumento en los gastos de transporte y origina un consumo adicional de energía durante el proceso de astillado de madera, afectando en la calidad de las astillas (Pintor-Ibarra *et al.*, 2018). Las biomásas con altos niveles de agua requieren de procesos de secado, lo que conlleva un incremento considerable en los gastos y el tiempo

requerido para su adecuación como recurso energético (Lehtikangas *et al.*, 2001; Morales-Máximo *et al.*, 2022).

7.3.2. Fracción volátil

El porcentaje de la fracción volátil en la madera puede oscilar entre 76 y 86% en peso (Oberberger y Thek, 2004). En el caso de *C. aesculifolia* se encuentra dentro de este rango, con un contenido de material volátil del 83,83% (Figura 7). Además, su valor se sitúa en el rango de 82.6 a 84.9% encontrado en la biomasa recolectada en diversas regiones de México (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). Esta fracción volátil se transforma en gas durante el proceso de combustión (Oberberger y Thek, 2004; Velázquez-Martí, 2018).

Un porcentaje elevado de la fracción gaseosa (MV) en los biocombustibles sólidos facilita su encendido o punto de ignición, incluso a temperaturas relativamente bajas (Vamvuka *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012; Mitchual *et al.*, 2014; García-Maraver *et al.*, 2015). De cualquier manera, niveles elevados de MV puede favorecer a una combustión rápida, lo que representa una desventaja para los biocombustibles sólidos (Holt *et al.*, 2006). Aunque los porcentajes elevados de materia volátil podrían parecer desfavorables, representan una ventaja significativa cuando se pretende aprovechar los materiales lignocelulósicos como recursos para la producción de combustibles gaseosos (Ríos-Saucedo, 2021).

7.3.3. Carbono fijo

El porcentaje remanente se genera durante la ignición en la biomasa mediante la oxidación de los compuestos sólidos, este es un proceso que toma considerablemente más tiempo que la oxidación de los gases presentes en los combustibles (Oberberger y Thek, 2004). Con respecto a la especie *C. aesculifolia*, el valor del porcentaje remanente fue de 14,33% (Figura 7), ubicándose dentro del rango de 14,1 a 14,3% reportado para diversas especies de maderas duras (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). Los biocombustibles sólidos que tienen como característica principal un elevado porcentaje remanente (CF) son conocidos por su poder calorífico beneficioso (Tenorio *et al.*, 2015; Forero-Nuñez *et al.*, 2015). En cambio, los materiales lignocelulósicos con bajo contenido de porcentaje remanente son apropiados para la fabricación de otros diversos tipos de combustibles orgánicos, como lo es el biogás y el diésel de origen vegetal (Bandara y Kowshayini, 2018).

7.3.4. Cenizas

Las cenizas son elementos de bajo peso molecular que se forman a partir de sales unidas químicamente entre sí. Estos materiales, que las biomásas adquieren en su lugar de desarrollo, varían en cuanto a componentes y concentraciones en menor o mayor proporción. Una parte de los compuestos presentes en estas cenizas se volatiliza y se incorpora a la fase gaseosa. El contenido de cenizas representa un desafío en el proceso de combustión, dado que cuando se quema la biomasa con un alto contenido de componentes inorgánicos pueden causar corrosión en las calderas o incluso convertirse en material abrasivo (Melissari, 2012). Según Oberberger y Thek (2004), el porcentaje de

cenizas en materiales lignocelulósicos, varía entre 0.17 a 1.88 %. En el caso de nuestra especie estudiada arrojó un porcentaje de ceniza de 1.84 % (Figura 7), lo que coincide con los datos reportados por estos autores. Por otro lado, la investigación sobre el contenido de cenizas en diversas maderas duras de México, realizada por Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020) y Gutiérrez-Acosta *et al.* (2021), indican un rango de cenizas entre 1,0% y 3,4%. El porcentaje de componentes inorgánicos en la madera de *C. aesculifolia* en este estudio (Figura 7) está dentro de este rango mencionado anteriormente.

No obstante, estudios previos han evidenciado que, al quemar biomasa en calderas, se producen ciertos efectos específicos, por ejemplo, la acumulación de las cenizas puede convertirse en un desafío. Esta acumulación no solo bloquea el tránsito adecuado de las emisiones de combustión, sino que además aumenta los periodos de limpieza y mantenimiento de los equipos (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019). En cuanto a los estándares internacionales para los contenidos de cenizas en biocombustibles sólidos, la madera de *C. aesculifolia* contiene 1.84 % de cenizas. Esto implica que no cumple con los estándares que se demandan en el aprovechamiento y producción de pellets, puesto que se requieren valores no mayores a 0.70 % (Oberberger y Thek, 2010), ni con el valor límite para briquetas, que es del 0.5 % (ÖNORM M 7135, 2000). No obstante, la madera *C. aesculifolia* sigue siendo una opción viable para ser utilizada de forma local como fuente de combustible.

7.3.5. Potencial energético

El potencial energético de un material lignocelulósico es una característica fundamental para su uso como recurso energético, y está estrechamente vinculado a la composición química del material. Un alto potencial energético indica buenos combustibles, en contraste un bajo potencial energético señala un combustible de menor calidad (Villarreal *et al.*, 2021). De acuerdo con Oberberger y Thek, (2004) indican que el poder calorífico bruto para las diferentes materias primas oscila entre 19.8 a 20.7 MJ/kg. En este contexto, el potencial energético encontrado en la madera *C. aesculifolia* (19.12 MJ/kg) se encuentra dentro de este rango (Figura 7). Además, en estudios sobre el potencial energético de maderas duras, se ha detectado que presentan valores de poder calorífico que oscilan entre 17.56 a 21.7 MJ/Kg (Ngangyo *et al.*, 2016; Ruiz *et al.*, 2019; Rutiaga *et al.*, 2020; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021). Por lo tanto, el valor obtenido en la madera de *C. aesculifolia* (19.12 MJ/Kg) es consistente con los estudios anteriormente mencionados.

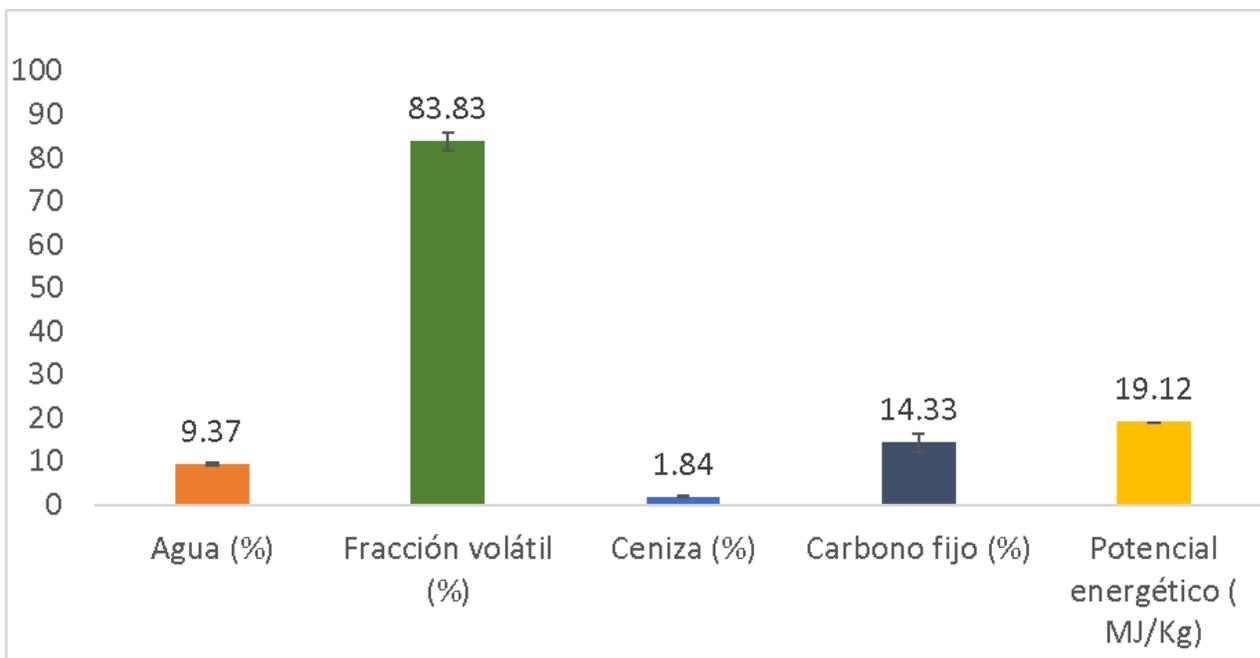


Figura 7. Datos del análisis proximal (%) y potencial energético (MJ/Kg) de la madera de *C. aesculifolia*.

7.4. Índice de valor del combustible

Cuando una biomasa está destinada a utilizarse como fuente de combustible, es necesario realizar un diagnóstico para determinar su idoneidad en la producción de bioenergía. El índice de valor de combustible se toma como una medida para categorizar las biomásas de acuerdo con el poder calorífico y densidad como parámetros positivos. Por otro lado, como parámetros negativos las cenizas, tal como se muestra en la ecuación 8.

En un estudio realizado por Ruiz-Aquino *et al.* (2022), se apreció que, en el grupo de las maderas duras, el índice del valor del combustible varía de 4.64 a 14.07. La especie de *C. aesculifolia* se encuentra dentro de este rango mencionado, con un valor de índice de combustible de 7.77. En cuanto más alto sea este valor del índice de combustible, mayor será la calidad de los combustibles de la biomasa de *C. aesculifolia*. Sin embargo, en el estudio anteriormente mencionado, se dice que este índice no es tan acertado. Puesto que, algunas especies tienen un índice de valor de combustible elevado y, en teoría, no son las más idóneas para ser consideradas como una fuente de combustible. Esto derivado de que no se toma en cuenta el carbono fijo, un parámetro clave para el potencial de un biocombustible.

7.5. Microanálisis de cenizas

Los hallazgos del microanálisis de los compuestos inorgánicos se visualizaron en la Tabla 4, en los que se identificaron 18 elementos, destacando la presencia de K en su mayoría, seguido de Ca, P, Na y Mg. Según Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020), los elementos más comunes para los materiales lignocelulósicos son Ca, K, Mg, P y Na, lo cual concuerda con los datos que se han obtenido del microanálisis de cenizas de la madera *C. aesculifolia*. La presencia predominante de K, Ca, P, Na y Mg es relevante para este estudio, dado que estos elementos pueden influir de forma negativa causando problemas en el punto del cambio de fase de los componentes inorgánicos y provocar problemas como la formación de escorias, corrosión, emisión de partículas finas y formación de incrustaciones que pueden dañar hornos, calderas y sistemas de ignición (Oberberger y Thek, 2004; 2010; Telmo *et al.*, 2010).

No obstante, investigadores como Van Lith *et al.* (2006) y De la Cruz *et al.* (2020) indican que la existencia de Ca y Mg podría resultar beneficiosa en el transcurso del proceso de ignición, dado que da lugar al aumento en la temperatura de fusión de los minerales, disminuye la acumulación de residuos al interior de los sistemas de quema y mejora la seguridad ambiental al dispersar los residuos. Por otro lado, elementos inorgánicos como Na, Fe y Si pueden llegar a presentar complicaciones relacionadas con el punto de fusión del cambio de fase de los componentes inorgánicos y provocar incrustaciones y corrosión (Oberberger y Thek, 2004; Oberberger y Thek, 2010). En este estudio no se tuvo la presencia de cloro, pero sí se identificó azufre, lo cual es importante dado que altos niveles de azufre (S) y cloro (Cl) pueden provocar problemas de emisiones (como HCl y SO_x), generación de escorias o depósitos y corrosión (Oberberger y Thek, 2004). En el estudio actual se observó que la madera de *C. aesculifolia* presenta reducidos niveles de Cu, Ni y Zn. No obstante, estos metales pesados pueden repercutir de manera adversa y directamente al medio ambiente durante las emisiones derivadas de la combustión (Oberberger y Thek, 2004).

Tabla 4. Microanálisis de cenizas de la madera de *C. aesculifolia* (Alvarado *et al.*, 2024).

Elemento	ppm
K	257523.69
Ca	35917.89
P	15824.95
Na	2373.19
Mg	1329.53
S	1198.21
Sr	292.95
Si	164.05
Ba	153.00
Fe	112.42
Li	91.78
B	69.67
Cu	41.73
Al	38.88
Mn	35.36
Zn	26.46
Ni	0.90
Cr	< 0.05

Nota: ppm= partes por millón. Los elementos son representados por varios símbolos.

7.6. Análisis elemental

De acuerdo con Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020), es fundamental conocer la composición elemental de la biomasa para su aprovechamiento energético, esto permitirá comprender las reacciones que tienen lugar durante el proceso de combustión, además, determinar los reactivos; así como los productos y el calor que desprenden. En la ilustración 8 se visualizan los datos resultantes del estudio elemental en la muestra, teniendo como resultado un mayor porcentaje de concentración de carbono (45.6%), hidrógeno (6.9%), oxígeno (47.2%) y nitrógeno (0.3) y una proporción muy baja de azufre (0.08 %).

Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020) reportan para especies de maderas duras las siguientes proporciones (C: 48 a 52%, H: 5.9 a 6.5%, O: 41 a 45%, y N: 0.12 a 0.14%). Los valores resultantes son muy semejantes a los mencionados en este informe, a diferencia que en este caso se detectó la presencia del azufre (Figura 8). El contenido de azufre en la madera *C. aesculifolia* se encuentra dentro del valor límite, y el porcentaje de nitrógeno cumple

con los estándares internacionales, que establece que el azufre para briquetas debe ser inferior al 0.08 %, y el nitrógeno menor al 0.3% (ÖNORM M 7135, 2000).

El C y el H se oxidan durante la combustión mediante reacciones exotérmicas (formación de CO₂ y agua) y, por tanto, influyen en el combustible (Obernberger y Thek, 2004). El contenido de oxígeno es fundamental para determinar el nivel de oxidación en diversos procesos, destacando su importancia en la producción de NO_x que se desprende durante los gases de combustión. Es importante resaltar que un aumento en la concentración de oxígeno puede tener como resultado una disminución en el potencial energético del combustible (Calventus *et al.*, 2009).

El elevado contenido de carbono e hidrógeno (C, H) en los biocombustibles sólidos disminuye el potencial para producir energía térmica y reduce la eficiencia en los procesos de quema, influyendo en el equilibrio energético y en la vaporización durante la transformación térmica (Miranda *et al.*, 2009; Obernberger y Thek 2010; García *et al.*, 2012; Correa *et al.* 2014; Sukarni *et al.*, 2019). Las especies de biomasa herbácea presentan menor contenido de carbono que las de biomasa leñosa, lo cual repercute directamente en su poder calorífico bruto, dando como resultado un mayor poder calorífico bruto en la biomasa leñosa (Obernberger y Thek, 2004).

Según Obernberger y Thek (2004), si las muestras contienen un alto nivel de nitrógeno, su uso estará directamente relacionado con sustancias peligrosas durante el proceso de densificado de la biomasa, puesto que da lugar a un aumento en las emisiones generadas de NO_x. En el ambiente, los NO_x tienden a reaccionar y transformarse en nitratos y ácido nítrico. Estas sustancias desempeñan un papel en la generación de la lluvia ácida, la cual puede tener un impacto adverso tanto en los ecosistemas, con su riqueza de flora y fauna, como en las estructuras humanas, dado que los ácidos pueden causar la corrosión de diversos objetos y materiales (Pérez, 2020).

Por otro lado, es de suma importancia establecer límites en los contaminantes químicos presentes en la materia prima o los aditivos, como el cloro (Cl) y el azufre (S), debido a su influencia negativa en el proceso de combustión. Concentraciones elevadas de estos elementos pueden producir emisiones problemáticas, como el cloruro de hidrógeno y los óxidos de azufre, además de propiciar la formación de escorias o depósitos y la corrosión en los sistemas de quemado (Obernberger y Thek, 2004).

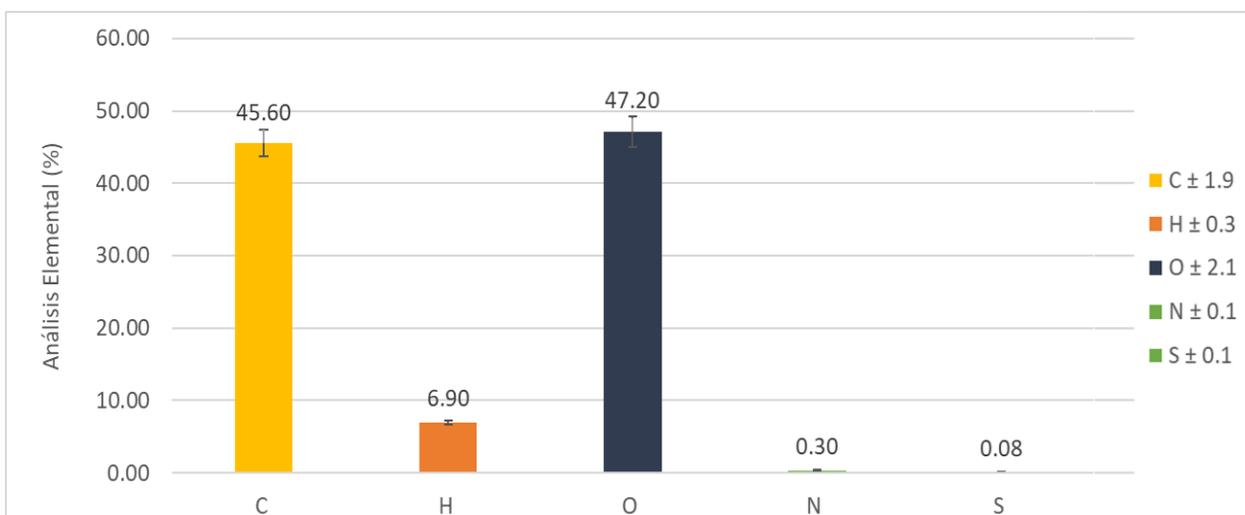


Figura 8. Análisis último de la madera de *C. aesculifolia*.

7.7. Análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial (DTG)

La termogravimetría cuenta con dos variantes: el (TGA) y el (DTG). En la evaluación del TGA, se mide el remanente de la muestra mientras se calienta bajo condiciones controladas. En el DTG, se monitorea la velocidad de disminución de peso (Ríos *et al.*, 2013).

En la ilustración 9 se aprecian las curvas del análisis termogravimétrico, en las que se identifican tres eventos térmicos principales. El primer evento térmico evidencia un descenso de masa inicial dentro de una escala de temperaturas de 300 a 415 K, que se adjudica principalmente en la eliminación del contenido de agua en la muestra. En esta etapa, se registró una pérdida de masa del 5.6 a 5.8% con una velocidad de pérdida de 0.86 a 0.9%/K. El segundo evento térmico corresponde a la eliminación de la fracción volátil, también conocidos como compuestos intermedios en la biomasa (hemicelulosa, celulosa, lignina). Este evento se observa en las distintas tasas de calentamiento entre 415 y 680 K, con una pérdida de masa del 63 al 65% y una velocidad de pérdida de 0.26 a 0.25%/K. Esta etapa, conocida como pirólisis activa, se caracteriza por tener una elevada tasa de pérdida de masa debido a las reacciones químicas que descomponen estos compuestos y a la mayor generación de gases (metano, hidrógeno, nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono) (La Puerta *et al.*, 2004).

El tercer evento térmico corresponde a la etapa de volatilización, principalmente de la lignina, lo que da lugar a la formación de carbono fijo. Este proceso se desarrolla en un rango de 680 a 1100 K, resultando en una pérdida de masa del 31.14% y una velocidad de pérdida de 0.01%/K (Açikalın, 2011). Para las curvas de degradación DTG de la especie *C. aesculifolia* a diferentes tasas de calentamiento, se observó la principal degradación térmica de la holocelulosa y la lignina en un intervalo de 450 a 700 K. La tasa máxima de

pérdida de peso se dio a una velocidad de 0.85 a 0.9 %/K y se produjo de 599 a 620 K debido a la combustión de la celulosa en la madera (Açikalın, 2011).

Las especies de latifoliadas generalmente presentan una termólisis de la holocelulosa y lignina aproximadamente a un rango de 453.15 a 663.15 K, mientras que la celulosa presenta una degradación en un rango de 599 a 620 K en las maderas duras. La especie *C. aesculifolia* se encuentra dentro de los rangos de degradación térmica reportados para maderas duras (Toscano *et al.*, 2015).

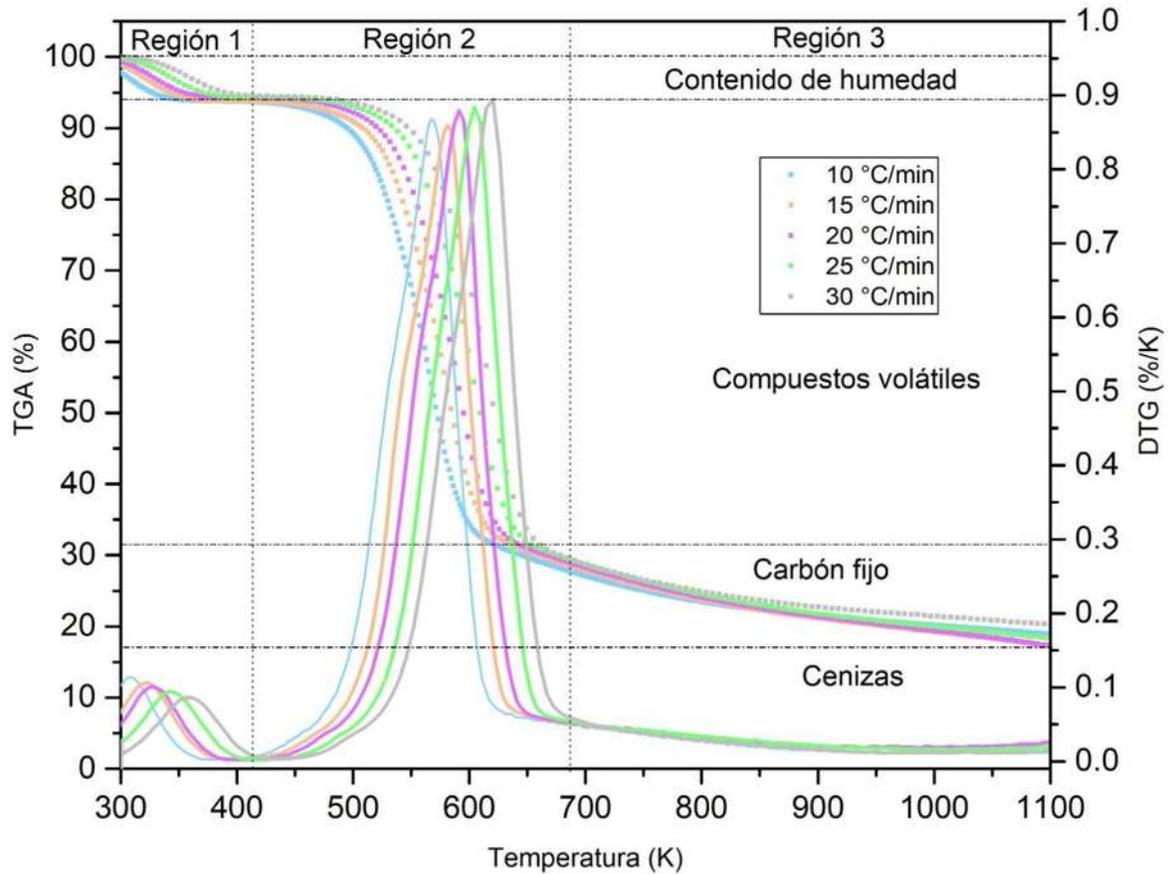


Figura 9. Curva termogravimétrica (TGA) y termogravimetría diferencial (DTG) en una atmósfera en ausencia de oxígeno a diferentes tasas calentamiento ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min) de *C. aesculifolia*.

La Tabla 5 muestra un resumen de las temperaturas iniciales, máxima velocidad de la descomposición y finalización para cada muestra analizada bajo distintas tasas de calentamiento.

Tabla 5. Resumen de los rangos de temperatura para cada velocidad de calentamiento evaluada en la especie <i>Ceiba aesculifolia</i>.			
V. Calentamiento (°C/min)	T_o (K)	T_{max} (K)	T_{final} (K)
10	420	599.23	655
15	430	606.01	660
20	440	609.08	680
25	446	613.14	690
30	450	620.39	700

T_o : inicio de la descomposición; T_{max} : temperatura de la mayor velocidad de reducción de peso; y T_{final} : término de la descomposición.

En el termograma (Figura 9), se observa que tanto los picos máximos como mínimos del TGA y DTG se trasladan hacia temperaturas más altas conforme se incrementa el índice de calentamiento (Tabla 5). Este suceso se debe al impacto que tiene la velocidad de calentamiento en la transferencia de calor. A velocidades más bajas, la acumulación gradual de energía térmica retarda el equilibrio con la atmósfera inerte. En contraste, velocidades de calentamiento más altas provocan que la muestra se descompona a temperaturas superiores, lo que provoca un desplazamiento de las curvas hacia la zona de mayor temperatura en el termograma (Quan y Gao, 2009; Mishra y Mohanty, 2021). Sin embargo, conforme a estos resultados, se observa que la degradación de *C. aesculifolia* (Figura 9) persiste incluso a temperaturas superiores a 700 °K. Este resultado es consistente con la literatura sobre la descomposición de madera, que indica que la lignina, algunos polisacáridos y cenizas pueden seguir descomponiéndose (Mészáros *et al.*, 2007; Shebani *et al.*, 2008).

7.8. Análisis cinético para el material lignocelulósico

La obtención de los coeficientes cinéticos, como la energía de arranque (E_a), la frecuencia de las colisiones y el nivel de respuesta, es crucial para anticipar el comportamiento de las muestras bajo diversas condiciones térmicas. La energía de activación nos informa el nivel de calor requerido para comenzar o realizarse la reacción química, mientras que el factor de colisiones y el grado de reacción son de gran relevancia para determinar la velocidad de dicha reacción (Parthasarathy y Narayanan, 2014; Zhang, 2020). El análisis cinético a través del proceso termoquímico de la biomasa de *C. aesculifolia* cobra gran relevancia, dado que es crucial para comprender el progreso de la reacción y cómo varía su velocidad en función de los parámetros del proceso. De ahí que, resulte de vital importancia tener un

conocimiento detallado de las condiciones cinéticas y del nivel de reacción que detalla la termólisis de esta biomasa. Este conocimiento es esencial a la hora de diseñar, optimizar y escalar reactores utilizados en el proceso de pirólisis (Dhyani y Bhaskar, 2018).

El análisis cinético de la especie *C. aesculifolia* se fundamentó en los resultados logrados en base al análisis termogravimétricos (TGA) y diferenciales (DTG) en un entorno en ausencia de oxígeno a distintas tasas de calentamiento ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min), centrándose en un valor específico de conversión fraccional (α), se utilizaron tres modelos cinéticos iso-conversionales distintos F-W-O, K-A-S y Friedman para calcular los valores de las constantes cinéticas más importantes, como la energía de arranque requiere el sistema para llevar a cabo la reacción (E_a) y el factor pre-exponencial, además del modelo matemático no iso-conversional de Kissinger. Para determinar la E_a con el modelo de Friedman, se grafica $\ln(d\alpha/dt)$ vs $1/T$. El modelo matemático F-W-O, por su parte, se basa en la representación en la gráfica de $\text{Log}(\beta)$ contra $1/T$. En cambio, el modelo matemático de KAS utiliza una gráfica de $\ln(\alpha/T^2)$ versus $1/T$. Por otro lado, en el modelo no iso-conversional de Kissinger, para determinar la cinética mínima para realizarse la reacción, se grafica $\ln(\beta/T_p^2)$ vs $(1/T_p)$, donde T_p representa la temperatura de máxima fragmentación térmica del extracto durante su proceso de descomposición.

A través de estos modelos matemáticos, es posible determinar la E_a con ayuda de la correlación con la inclinación de la recta de regresión de los datos para cada porcentaje másico. Por otro lado, el modelo de Kissinger no utiliza el grado de conversión como base para su análisis, si no que toma como referencia la temperatura pico del análisis termogravimétrico donde se efectuó la etapa de la termólisis activa del extracto. Tanto en los modelos matemáticos de Friedman, F-W-O como en KAS, se muestra el nivel de conversión (α), con un valor de conversión que varía de 0.1 a 0.7 en intervalos de 0.05. En este estudio, el gráfico de *C. aesculifolia* presentó valores bajos de R^2 ($<0,80$) cuando el grado de conversión (α) fue $>0,7$. Estos valores no se incluyeron en el análisis. Es importante mencionar que algunas investigaciones relacionadas con estudios cinéticos (Friedman, FWO y KAS) de biomasa han reportado un comportamiento similar, de hecho, con un menor grado de avance ($\alpha = 0,65$). Esta situación puede atribuirse al grado de complejidad en la formación de carbono en el proceso de descomposición térmica (Khiari y Jeguirim, 2018). Investigaciones recientes han tenido que modificar sus resultados para que el grado de avance se ajuste a 0,70 debido a un mal ajuste de los datos, como ocurrió en el caso de la biomasa de la cáscara de *Trapa natans* (Nawaz *et al.*, 2023). Sin embargo, esto no implica que los resultados carezcan de validez para el estudio en cuestión.

Los gráficos indican que las líneas de conversión son paralelas y ligeramente inclinadas, lo que sugiere que estos modelos (Figuras 10, 11, 12 y 13) son apropiados para modelar la cinética de la reacción dentro del rango de temperaturas analizado. En consecuencia, el paralelismo de las líneas validó la aplicación de estos métodos matemáticos para el análisis de la ruptura calórica de la especie *Ceiba aesculifolia* (Alvarado *et al.*, 2020, 2022). Es

importante señalar que el valor promedio de R^2 para los cuatro modelos superó 0.95, un valor muy cercano al de los modelos FWO (0.9938) y KAS (0.9865). Cabe mencionar que, aunque el modelo de Kissinger no se basa en el grado de conversión para su análisis, también debe cumplir con la condición de que R^2 sea mayor a 0.90 para obtener valores más precisos (Roslee y Munajat, 2018).

En las figuras 10, 11 y 12 se muestran diferentes líneas generadas por los modelos matemáticos de FWO, Friedman y KAS, que corresponden a los distintos niveles de avance o conversión (α) alcanzados durante la pirólisis a diversas tasas de calentamiento ($\beta = 10, 15, 20, 25, 30$ °C/min). En estos gráficos, se aprecia que las líneas están ligeramente inclinadas entre sí, lo que indica que la E_a se modifica en función de la conversión fraccional. Esta variación es debido principalmente a la descomposición de la biomasa, que presenta una composición química compleja y heterogénea, compuesta por múltiples componentes como hemicelulosa, celulosa y lignina, que se descomponen a diferentes temperaturas y con energías de activación variables (Mishra y Mohanty, 2021).

Es importante destacar que, a diferencia de los modelos anteriores, el método de Kissinger (Figura 13) solamente proporciona un único valor para E_a , lo que limita la evaluación del grado de avance del proceso pirolítico y dificulta la comprensión completa de su complejidad. Esto refuerza el hecho de que la pirólisis de biomasa lignocelulósica, incluyendo la biomasa de *C. aesculifolia*, no sigue un mecanismo global de un solo paso, sino que obedece a un proceso multietapa debido a su compleja y heterogénea composición (Alvarado *et al.*, 2020; Emiola *et al.*, 2021). Los resultados promedio de E_a de los modelos de Friedman, FWO y KAS fue de 132.03, 121.65 y 118.14 KJ mol⁻¹, respectivamente, mientras que el valor para el modelo de Kissinger fue de 155.85 KJ mol⁻¹. Los tres primeros resultados son bastante similares, siendo el de KAS el más bajo y el del modelo de Kissinger el más alto (Tabla 6).

Las variaciones presentadas en estos valores pueden atribuirse a las desigualdades inherentes entre los modelos empleados, a lo que se refiere que utilizan o están basados en constantes distintas y no se fundamentan en los mismos parámetros (Mishra y Mohanty, 2020). El modelo de Friedman es un enfoque diferencial que se basa en la tasa de cambio del grado de avance respecto al tiempo ($d\alpha/dt$). En contraste, los modelos matemáticos de FWO y KAS se basan en la velocidad de calentamiento (β) y se consideran métodos integrales. Por ello, es esencial entender que estos modelos cinéticos son complementarios y no deben verse como alternativas en competencia (Brown *et al.*, 2000). Sin embargo, es relevante mencionar que el modelo matemático de Kissinger solo proporciona un único valor para E_a , lo que impide observar el grado de avance del proceso pirolítico y, por ende, no permite apreciar claramente la complejidad de dicho proceso.

Desde una perspectiva fenomenológica, la temperatura es decisiva en los métodos de análisis cinético, como Friedman, FWO, KAS y Kissinger. Mientras que la temperatura y el grado de reacción se incrementa, la movilidad molecular de la biomasa disminuye, lo que provoca un incremento inicial en la E_a . No obstante, conforme el proceso avanza, esta energía tiende a reducirse. Por lo tanto, el enfoque limitado de Kissinger no permite captar completamente las dinámicas del proceso pirolítico (Hernowo *et al.*, 2022). La tabla 6 también nos muestra los resultados máximos de E_a (Friedman, KAS, FWO) se sitúan dentro del rango del grado de avance (α) entre 0.40 y 0.55.

Esto implica que, a partir de un valor de 0.55, la cantidad de masa disponible para participar en el proceso térmico será menor. Además, estos valores máximos pueden interpretarse como un reflejo de la mayor descomposición de la biomasa, la cual, según la gráfica TGA-DTG (Figura 9), se corresponde con la eliminación de la hemicelulosa y la celulosa que son componentes presentes en la madera de *C. aesculifolia*. Generalmente, en este campo de investigación se ha reportado la energía de activación promedio como un parámetro válido para el análisis cinético de la biomasa, la cual se encuentra entre 60 y 170 KJ mol⁻¹ (Di Blasi, 2002; White *et al.*, 2011). Otros estudios han encontrado valores similares de energía de activación para diferentes tipos de biomasa (Huang *et al.*, 2018; Mishra y Mohanty, 2021; Ashwini *et al.*, 2024).

En un estudio que fue implementado por Carranza *et al.* (2021), durante una descripción fisicoquímica de las fibras naturales extraídas de semillas de *C. aesculifolia*, se obtuvo una E_a de 96.8 kJ/mol, valor que resulta estar por debajo del nivel encontrado en este análisis. La razón de esta diferencia puede atribuirse al hecho de que en este estudio se utilizó madera de *C. aesculifolia*, a diferencia de las semillas empleadas en el estudio mencionado.

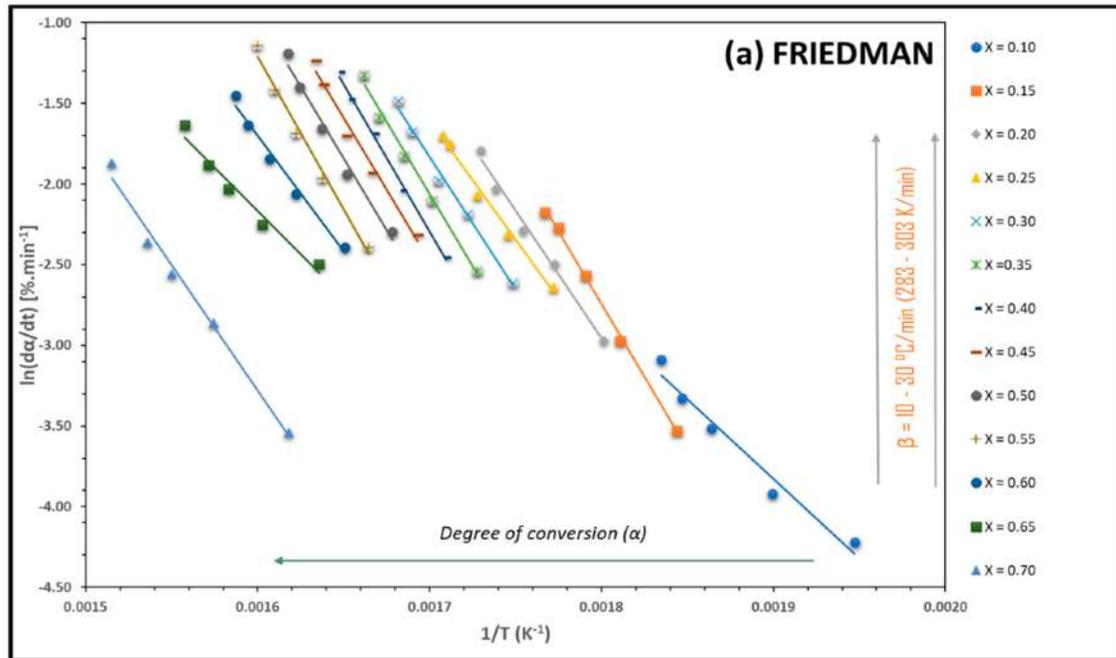


Figura 10. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de Friedman para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de *C. aesculifolia*.

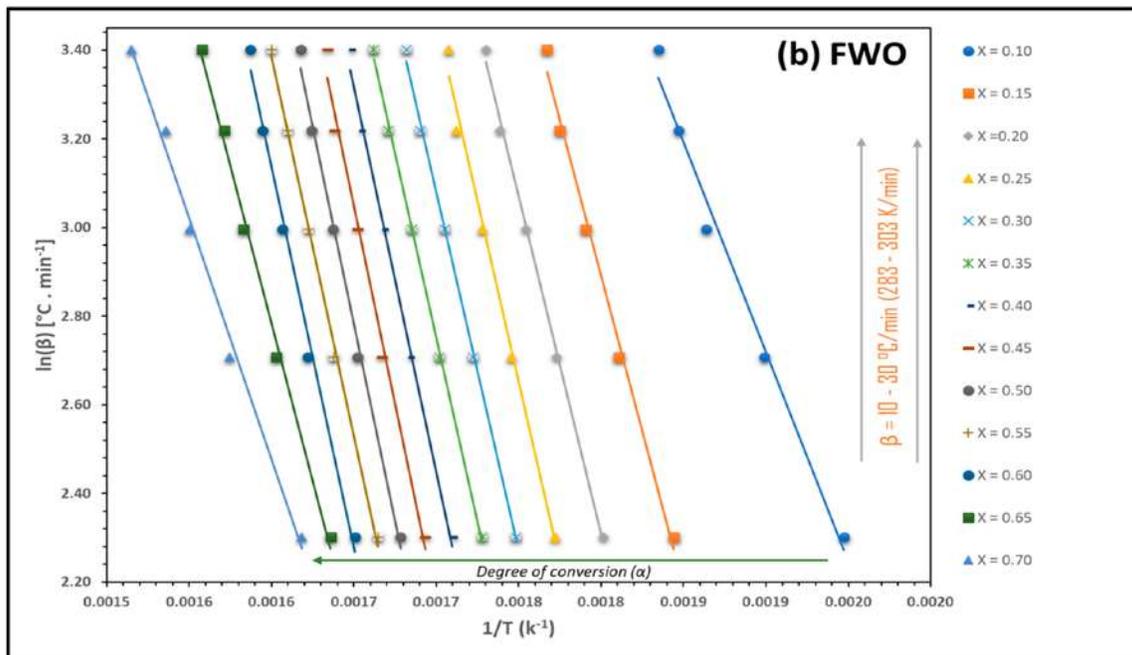


Figura 11. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de FWO para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de *C. aesculifolia*.

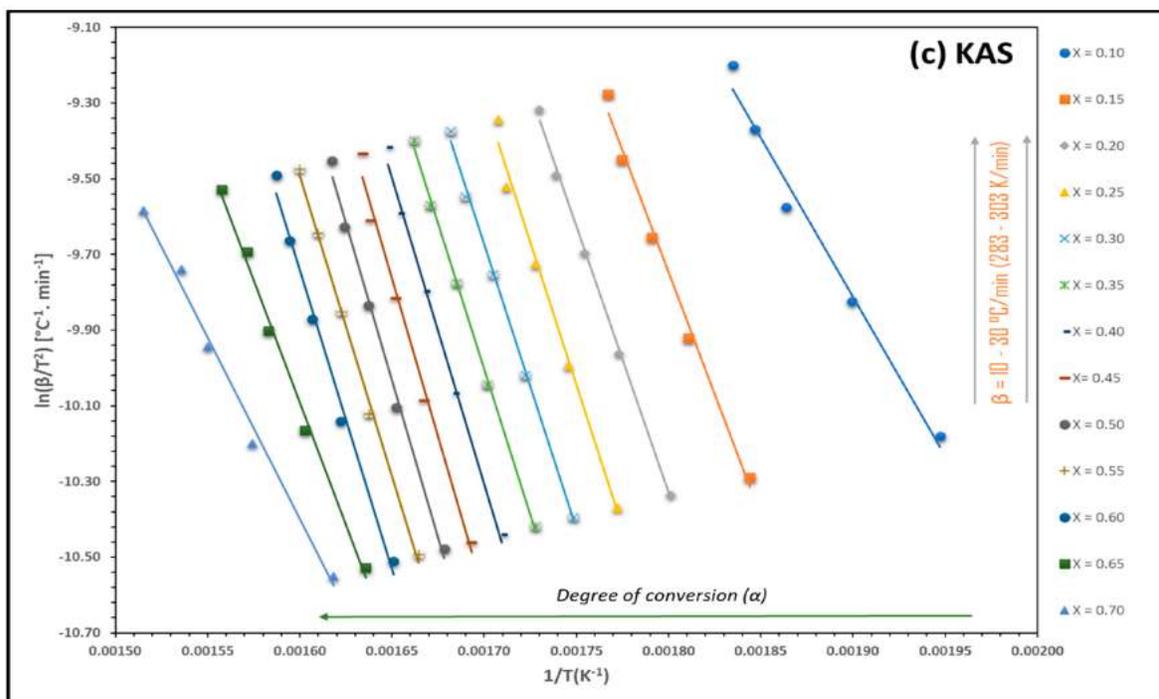


Figura 12. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de KAS para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de *C. aesculifolia*.

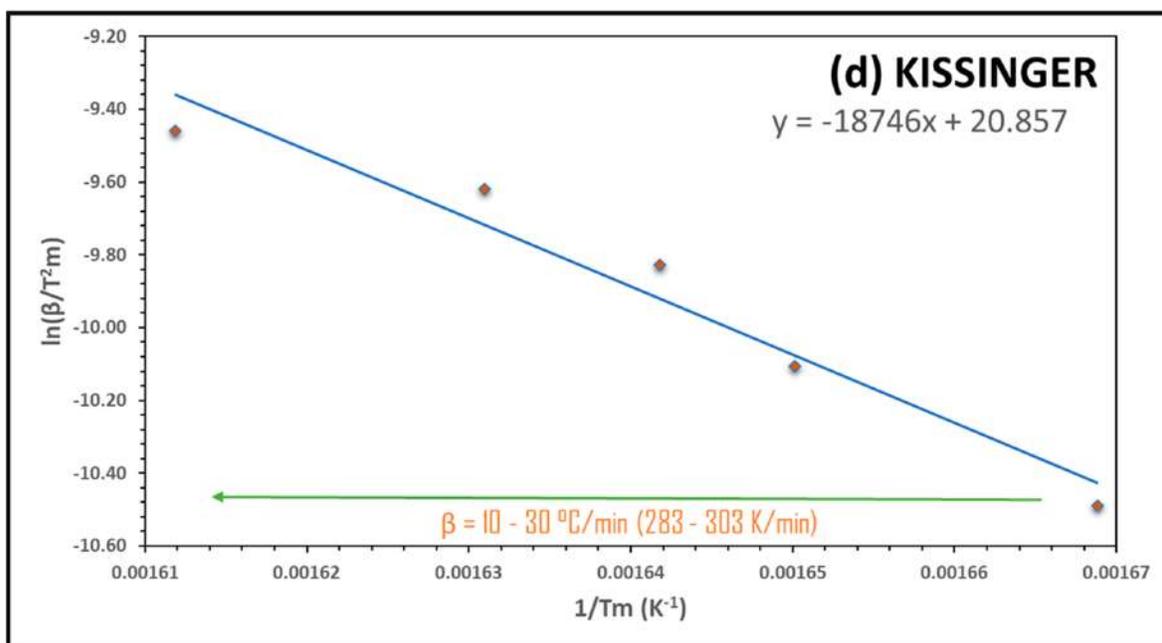


Figura 13. Ajustes lineales obtenidos mediante el enfoque iso-conversional de Kissinger para determinar el requerimiento energético de la transformación del material orgánico de *C. aesculifolia*.

Tabla 6. Parámetros de reacción para la descomposición térmica de la biomasa *aesculifolia* (Alvarado *et al.*, 2024).

Grado de avance (α)	Ecuación ($y=mx+b$)	R ²	Ea (kJ.mol ⁻¹)	A (s ⁻¹), ($\beta= 15^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
Método de Friedman				
0.10	$y = -9849.9x + 14.886$	0.9675	81.89	7.68E + 04
0.15	$y = -18044x + 29.732$	0.9981	150.02	1.05E + 11
0.20	$y = -15786x + 25.46$	0.9892	131.24	2.21E + 09
0.25	$y = -14761x + 23.488$	0.9894	122.72	3.81E + 08
0.30	$y = -16454x + 26.142$	0.9919	136.80	6.93E + 09
0.35	$y = -17888x + 28.348$	0.9921	148.72	8.03E + 10
0.40	$y = -18415x + 29.008$	0.9946	153.10	1.97E + 11
0.45	$y = -17748x + 27.696$	0.9821	147.56	6.33E + 10
0.50	$y = -17833x + 27.585$	0.9812	148.26	7.31E + 10
0.55	$y = -18989x + 29.174$	0.9887	157.87	5.25E + 11
0.60	$y = -14395x + 21.333$	0.9813	119.68	2.03E + 08
0.65	$y = -10742x + 15.022$	0.9657	89.31	3.65E + 05
0.70	$y = -15536x + 21.579$	0.9878	129.17	1.44E + 09
Promedio		0.9854	132.03	8.11E + 10

Método de Flynn–Wall–Ozawa				
0.10	$y = -9463.7x + 20.702$	0.9869	74.79	1.71E + 04
0.15	$y = -13993x + 28.077$	0.9926	110.59	3.08E + 07
0.20	$y = -15222x + 29.708$	0.9979	120.30	2.31E + 08
0.25	$y = -16296x + 31.168$	0.9910	128.79	1.33E + 09
0.30	$y = -16226x + 30.666$	0.9981	128.23	1.19E + 09
0.35	$y = -16540x + 30.871$	0.9985	130.72	1.98E + 09
0.40	$y = -17355x + 31.951$	0.9941	137.16	7.46E + 09
0.45	$y = -17915x + 32.609$	0.9897	141.58	1.85E + 10
0.50	$y = -17793x + 32.141$	0.9942	140.62	1.52E + 10
0.55	$y = -17108x + 30.759$	0.9975	135.21	4.99E + 09
0.60	$y = -17094x + 30.485$	0.9915	135.09	4.88E + 09
0.65	$y = -14206x + 25.514$	0.9944	112.27	4.37E + 07
0.70	$y = -10898x + 19.913$	0.9929	86.13	1.87E + 05
Promedio		0.9938	121.65	4.30E + 09

Método de Kissinger–Akahira–Sunose				
0.10	$y = -8406.1x + 6.1598$	0.9836	69.89	6.05E + 03
0.15	$y = -12885x + 13.443$	0.9914	107.13	1.50E + 07
0.20	$y = -14089x + 15.029$	0.9975	117.14	1.20E + 08
0.25	$y = -15146x + 16.459$	0.9897	125.92	7.37E + 08
0.30	$y = -15060x + 15.929$	0.9978	125.21	6.36E + 08
0.35	$y = -15360x + 16.110$	0.9983	127.70	1.06E + 09
0.40	$y = -16163x + 17.171$	0.9933	134.38	4.21E + 09
0.45	$y = -16713x + 17.811$	0.9883	138.95	1.08E + 10
0.50	$y = -16579x + 17.324$	0.9934	137.84	8.60E + 09
0.55	$y = -15883x + 15.923$	0.9972	132.05	2.61E + 09
0.60	$y = -15859x + 15.633$	0.9902	131.85	2.50E + 09
0.65	$y = -12954x + 10.635$	0.9934	107.70	1.69E + 07
0.70	$y = -9622.7x + 4.996$	0.9911	80.00	5.16E + 04
Promedio		0.9865	118.14	2.41E + 09
Método de Kissinger				
(α) no está involucrado	$y = -18746x + 20.857$	0.9506	155.85	3.47E + 11

Un parámetro fundamental en los análisis cinéticos de procesos termogravimétricos es el orden de reacción (n). La variación de este valor para *C. aesculifolia* se aprecia en la ilustración 14 y en la Tabla 7, calculada utilizando la ecuación de Avrami, tal como se describe en la metodología, con el objetivo de determinar el mecanismo de reacción. Para determinar el mecanismos de reacción mediante el modelo de Avrami se consideró la velocidad de calentamiento ($\beta = 10\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$; $283\text{--}303 \text{ K}/\text{min}$) y una escala de temperaturas de 500 a 650 K, que corresponde al evento más significativo de la pirólisis (Región 2) según el análisis TGA-DTG (Figura 9). Como se puede observar en las líneas de la figura 14, el coeficiente de correlación lineal (R^2) varió entre 0.95 y 0.99, con un promedio de 0.9903, lo cual es adecuado para calcular con precisión el nivel de reacción.

Como se aprecia en la tabla 7, el orden de reacción inicialmente se incrementó de 0.3937 a 0.6141, antes de descender a 0.3895, con un valor promedio de 0.4887. Este comportamiento es comparable a lo reportado por otros investigadores que han estudiado la pirólisis de residuos agrícolas aplicando la ecuación de Avrami, como en los casos de la paja de maíz y la cascarilla de arroz, donde se informaron órdenes de reacción promedio de 0.365 y 0.539, respectivamente. Es importante señalar que este valor puede variar según el tipo de biomasa. Estas diferencias pueden estar vinculadas a la composición de las cenizas, que influye significativamente en la existencia de metales alcalinos como el Na

y k, elementos minerales presentes en mayor proporción en la especie *C. aesculifolia* (Tabla 4) y, en consecuencia, afectan el proceso térmico (Cao *et al.*, 2014).

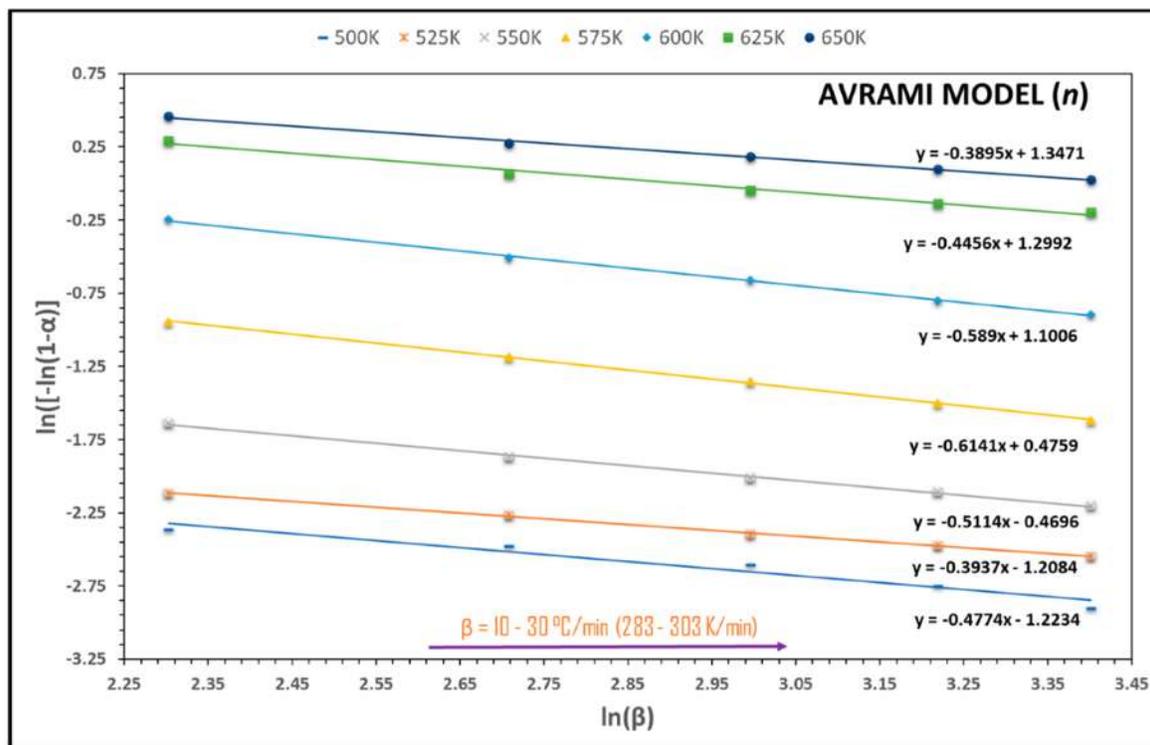


Figura 14. Líneas de regresión correspondientes al orden de reacción (n) propuesto según la teoría de Avrami.

Tabla 7. Orden de reacción (n) estimado a partir de la teoría de Avrami para la biomasa de *C. aesculifolia*.

T (K)	Pendiente (m) de la ecuación	Orden de reacción ($n = -m$)	Coefficiente de correlación (R^2)
500	-0.4774	0.4774	0.9531
525	-0.3937	0.3937	0.9986
550	-0.5114	0.5114	0.9976
575	-0.6141	0.6141	0.9992
600	-0.5890	0.5890	0.9986
625	-0.4456	0.4456	0.9889
650	-0.3895	0.3895	0.9963
Promedio		0.4887	0.9903

7.9. Análisis termodinámico

Entender y evaluar las variables termodinámicas es crucial para garantizar que la vía de la descomposición térmica se lleve a cabo de manera eficiente y que los modelos cinéticos sean precisos. Estos factores juegan un papel clave en determinar cómo se comporta la energía, cuánta energía se necesita, y cómo se mantiene el equilibrio durante las

reacciones (Kumar *et al.*, 2024). A través del tratamiento de los resultados obtenidos del análisis (TGA) y (DTG), partir de los resultados de E_a y la temperatura pico la muestra (etapa de maor descomposición) (TP), se puede determinar la energía necesaria de arranque (E_a) para cada modelo matemático utilizado. En este proceso, se calcularon las tres magnitudes termodinámicas fundamentales: el tipo de reacción (ΔH), espontaneidad del proceso (ΔG) y el desorden termodinámico (ΔS), todo esto realizado a una baja velocidad de la reacción de 15 °C/min. Al mismo tiempo, en esta fase, se estimó el factor de frecuencia (A), considerando exclusivamente esa velocidad de calentamiento. Según Chong *et al.* (2019), el parámetro A es un indicador fundamental que refleja tanto la estructura superficial de la muestra como la complejidad de la reacción de combustión. Este parámetro adquiere gran relevancia en los análisis termodinámicos, puesto que se obtiene calculando los valores de la energía de inicio (E_a) a través del rango del grado de avance de la reacción molecular ($\alpha = 0.10-0.70$) y la temperatura donde se sitúa la máxima descomposición del extracto en la curva DTG (Figura 9). La tabla 6 muestra los valores resultantes del factor de colisiones (A) determinados en una aceleración de calentamiento disminuida ($\beta = 15^\circ\text{C}/\text{min}$).

Este comportamiento sugiere que, al incrementar la aceleración de calentamiento, la frecuencia de las colisiones moleculares también se incrementará, lo que puede influir significativamente en la eficiencia y la rapidez de las reacciones químicas (Cao *et al.*, 2014). Kumar *et al.*, (2024), mencionan que, al analizar una muestra a tasas de conversión bajas, los resultados bajos del factor de frecuencia están asociados con una menor necesidad de energía para la descomposición. En este contexto, utilizar un valor bajo de β reduce la interacción de la biomasa durante el proceso de descomposición térmica, facilitando una descomposición más eficiente con menores requerimientos energéticos.

En el presente estudio, el factor pre-exponencial (A) osciló entre 10^4 y 10^{11} s^{-1} , lo que sugiere la ocurrencia de reacciones complejas de múltiples etapas y la formación de estructuras intrincadas durante la conversión térmica de la biomasa. En este estudio, el factor pre-exponencial (A), que varió entre 10^4 y 10^{11} s^{-1} , sugiere la presencia de reacciones complejas y de múltiples etapas durante la conversión térmica de la biomasa. El notable cambio en A con el aumento de la conversión refleja la complejidad y heterogeneidad inherente de la biomasa, indicando la formación de estructuras intrincadas en el proceso (Kaur *et al.*, 2018; Katnić *et al.*, 2022). La variabilidad en los valores de A podría estar influenciada por circunstancias adicionales como la proporción de partícula, la presencia de ciertos catalizadores y las diferentes velocidades de calentamiento aplicadas. Este parámetro es indicativo de la recurrencia en las que suceden las colisiones entre partículas a lo largo del proceso térmico, donde un aumento en el valor de A se correlaciona con un incremento en el número de colisiones. Los valores promedio del factor pre-exponencial obtenidos en la tabla 6 para las ecuaciones matemáticas de K-A-S, Flynn, Friedman y Kissinger son $2.41\text{E} + 09$, $4.30\text{E} + 09$, $8.11\text{E} + 10$ y $3.47\text{E} + 11 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Se han informado resultados semejantes en análisis previos, donde el factor pre-exponencial (A)

varió entre 10^7 y 10^{12} s^{-1} , como en el caso de la pirólisis de distintas biomásas (Ye *et al.*, 2021).

Diversos estudios indican que cuando el valor de A es inferior a 10^9 s^{-1} , predominan las reacciones superficiales, que favorecen la formación de compuestos simples. En cambio, un valor de A igual o superior a 10^9 s^{-1} sugiere la formación de complejos más reactivos y simples. Además, si el valor de A se sitúa entre 10^{10} y 10^{12} s^{-1} , es posible que se activen rotaciones en compuestos que inicialmente eran inactivos (Ahmad *et al.*, 2017; Yuan *et al.*, 2017). En esta manera, independientemente del modelo utilizado, los valores constantes del factor pre-exponencial (10^{10} - 10^{11} s^{-1}) indican el entorno de estudio de la principal reducción de peso, es decir, la degradación de hemicelulosa y celulosa cuando el grado de avance (α) está entre 0.40 y 0.55 durante el proceso de termólisis. El valor máximo para A , determinado mediante el método de Kissinger ($3.47\text{E} + 11 \text{ s}^{-1}$), podría reflejar que la rotación del par de compuestos activos-reactivos permaneció constante a lo largo del proceso térmico (Vlaev *et al.*, 2003).

No obstante, en vista de la discrepancia con los valores resultantes de los modelos matemáticos de Friedman, Flynn y KAS, es probable que el valor más alto obtenido con el método de Kissinger se deba a la base matemática particular de este modelo, como se discutió anteriormente. Además del factor pre-exponencial, también, el estudio termodinámico de *C. aesculifolia* examina tres parámetros clave que ayudan a comprender el comportamiento energético del material en términos de espontaneidad, conservación, equilibrio y calidad. Los parámetros considerados son la entalpía (ΔH , en kJ/mol), potencial termodinámico de Gibbs (ΔG , en kJ/mol) y el desorden termodinámico (ΔS , en J/mol·K), como se muestra en la Tabla 8 (Vasudev *et al.*, 2020). En la tabla se visualizan los datos medios obtenidos para cada uno de los correspondientes parámetros, de acuerdo con los modelos cinéticos evaluados: Friedman (127.12, 174.89, -78.83), Flynn (116.75, 175.30, -96.61), KAS (113.23, 175.46, -102.68) y Kissinger (150.95, 173.97, -37.98).

Tabla 8. Propiedades termodinámicas de la especie *C. aesculifolia* (Alvarado *et al.*, 2024).

Friedman			Flynn–Wall–Ozawa			Kissinger–Akahira–Sunose			
α	ΔH	ΔG	ΔS	ΔH	ΔG	ΔS	ΔH	ΔG	ΔS
0.10	77.51	177.21	-164.51	70.41	177.67	-176.98	65.51	178.01	-185.63
0.15	145.43	174.16	-47.41	106.00	175.69	-115.01	102.53	175.85	-120.99
0.20	126.56	174.83	-79.66	115.61	175.27	-98.45	112.45	175.40	-103.89
0.25	117.96	175.17	-94.40	124.03	174.93	-84.00	121.16	175.04	-88.91
0.30	131.97	174.62	-70.38	123.41	174.95	-85.05	120.38	175.07	-90.24
0.35	143.84	174.20	-50.11	125.83	174.85	-80.89	122.82	174.97	-86.06
0.40	148.16	174.06	-42.73	132.22	174.61	-69.95	129.44	174.71	-74.71
0.45	142.57	174.24	-52.26	136.60	174.45	-62.46	133.96	174.54	-66.96
0.50	143.23	174.22	-51.13	135.59	174.48	-64.19	132.81	174.58	-68.93
0.55	152.80	173.90	-34.82	130.13	174.68	-73.52	126.97	174.80	-78.92
0.60	114.55	175.30	-100.23	129.97	174.69	-73.79	126.73	174.81	-79.34
0.65	84.12	176.77	-152.89	107.08	175.62	-113.09	102.51	175.83	-120.98
0.70	123.89	174.91	-84.20	80.85	176.95	-158.59	74.72	177.33	-169.31
Promedio	127.12	174.89	-78.83	116.75	175.30	-96.61	113.23	175.46	-102.68
Kissinger	ΔH			ΔG			ΔS		
	150.95			173.97			-37.98		

Donde: ΔH y ΔG se expresan en kJ/mol y ΔS en J/mol·K.

La entalpía, como parámetro termodinámico, representa el almacenamiento de energía dentro del sistema. El cambio en la entalpía determina el tipo de reacción que ocurrirá en el sistema, ya sea exotérmica o endotérmica. En el caso del material orgánico, la entalpía refleja la cantidad total de energía en forma de calor indispensable para incrementar la temperatura de un sistema y permitir las transformaciones químicas y físicas que ocurren a través de la termólisis. Esta magnitud abarca no solo la energía indispensable para incrementar la temperatura de un material orgánico, sino también la energía asociada a las transformaciones químicas y cambios de fase que ocurren a lo largo de este proceso (Tahir *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2024).

La tabla 8 muestra que, independientemente del modelo matemático utilizado, la entalpía (que representa la cantidad de energía absorbida por la biomasa) comienza con valores bajos, aumenta proporcionalmente al orden de la reacción hasta alcanzar niveles altos, y luego disminuye. Este comportamiento sugiere que la biomasa contiene compuestos que necesitan de mayor energía para completar su transformación. Además, el valor positivo de la entalpía indica que el proceso de termólisis de *C. aesculifolia* es endotérmico, lo que refleja que la degradación térmica de la *C. aesculifolia* requiere un aporte externo de energía para que la reacción ocurra. Recientemente, se han reportado valores de entalpía comparables en la biomasa de semillas de *Manilkara zapota*, con un promedio de 137 kJ/mol (Mishra y Mohanty, 2021). Otros estudios de entalpía en biomasa, han reportado valores similares a los encontrados en nuestro trabajo, vale la pena mencionar que la diferencia entre la E_a (tabla 6) y la entalpía (Tabla 8) es menor a 5 kJ/mol, lo que permite concluir que los resultados para la degradación de *C. aesculifolia*, así como la formación de compuestos activados y su conversión a otros compuestos, serán favorables (Malika *et al.*, 2016; Tahir *et al.*, 2020).

El potencial termodinámico de Gibbs es un concepto fundamental en termodinámica que nos dice cuánto de la energía en la biomasa está disponible para procesos químicos y la creación de complejos activados. Esta energía libre cambia según las fluctuaciones en ΔH y ΔS , lo que nos ayuda a entender cómo se comporta la biomasa durante estos procesos (Rony *et al.*, 2019). Según los datos de la tabla 8, este parámetro independientemente del modelo utilizado es positivo en el rango del grado de avance ($\alpha = 0.10-0.70$), lo que sugiere que el proceso no ocurre de forma espontánea. En cambio, indica que el proceso tiene una naturaleza oxidativa y requiere un suministro de calor externo para realizar el proceso de termólisis (Galvan *et al.*, 2013). Además se aprecia que el valor de aproximadamente 175 kJ/mol se mantiene constante en los tres modelos iso-conversionales (Friedman, FWO, KAS) así como en el método no iso-conversional de Kissinger. Investigaciones recientes en distintas biomásas han reportado valores de ΔG cercanos a 173 a 180 kJ/mol (He *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2020). Estos valores son relativamente altos para biomasa lignocelulósica, lo que indica que la pirólisis de *C. aesculifolia* requiere de una considerable cantidad de energía. La (ΔS) es una identidad termodinámica que refleja el nivel de irregularidad en las moléculas de la biomasa y la energía del sistema.

Un valor negativo de ΔS sugiere que la reacción puede avanzar con menos energía y dificultad, y que el sistema experimentará sólo cambios fisicoquímicos relativamente pequeños. En estos casos, ΔS suele indicar un mecanismo asociativo, donde dos reactantes forman un único complejo activo. Según los resultados, durante el proceso térmico de *C. aesculifolia*, el nivel de desorden es relativamente bajo en comparación con algunos de los productos resultantes de su degradación (Abdullah *et al.*, 2013; Najafi *et al.*, 2024). El valor más alto de ΔS se observó para el modelo KAS (-102.68 J/mol·K), mientras que el valor más bajo correspondió al modelo de Kissinger (-37.98 J/mol·K). Investigaciones sobre la biomasa, han reportado valores negativos que van desde -100

J/mol. K a casi -250 J/mol. K en un amplio rango de conversión. Estos resultados son consistentes a los reportados en este trabajo (Maia y de Moraes, 2016; Kumar *et al.*, 2018; Nawaz *et al.*, 2023). Esta variabilidad en la entropía podría estar atribuida al modelo matemático utilizado y a los componentes específicos de la biomasa, que pueden afectar el proceso térmico. Factores como la presencia de ciertos compuestos inorgánicos y alcalinos, así como el método de producción de la biomasa, pueden influir en estos resultados (Tahir *et al.*, 2020).

7.10. Análisis (FT-IR)

El perfil espectral FT-IR del material orgánico crudo de *C. aesculifolia* se muestra en la (Figura 15), donde se han identificado señales características correspondientes a diversos grupos funcionales que componen la estructura de la madera, como polisacáridos, lignina y otros compuestos de baja densidad molecular. Se observa una señal a 3354 cm^{-1} , asociada a las vibraciones de alargamiento correspondientes al grupo hidroxilo (OH), que están enlazadas intermolecularmente. Estas vibraciones están relacionadas con los componentes principales de la madera, como holocelulosa, lignina y ciertas proteínas (Mishra y Mohanty, 2021). En otros estudios, este grupo funcional también ha sido reportado para la corteza de *C. pentandra* a 3418 cm^{-1} (Kumar *et al.*, 2018). De acuerdo con estudios previos, se ha informado que este grupo funcional está asociado con la humedad de constitución presente en la pared celular de los materiales lignocelulósicos (Pintor-Ibarra *et al.*, 2024).

También se identificó el grupo funcional CH, similar al encontrado en otras especies del mismo género como la corteza de *C. pentandra*, donde se aprecia una señal parecida a la de la especie *C. aesculifolia* a 2935 cm^{-1} (Kumar *et al.*, 2018). Según lo reportado por la literatura, la señal a 2911 cm^{-1} está relacionada con vibraciones simétricas y asimétricas, estas indican de la presencia de grupos de cadenas saturadas (CH_2 y CH_3), originados de la estructura básica del extracto como holocelulosa y lignina (Mishra *et al.*, 2019; Ahmed *et al.*, 2018). Este grupo funcional CH también ha sido encontrado en estudios de otras especies de maderas duras en la región de $2938\text{-}2933\text{ cm}^{-1}$ (Ghavidel *et al.*, 2021; Pintor *et al.*, 2024). De igual manera, se detectó el grupo funcional CH, similar a otras especies de este género, con una vibración en la región de 2918 cm^{-1} en la celulosa del fruto de *C. pentandra* (Syed *et al.*, 2014). En estudios anteriores utilizando espectroscopía FT-IR, las bandas localizadas a 2911 cm^{-1} han sido asociadas con sustancias extrañas presentes en la superficie de la pared celular primaria. En un estudio de semillas de *C. aesculifolia*, se identificaron estas sustancias en 2918 cm^{-1} , así como en el fruto de *C. speciosa*, también perteneciente al mismo género, donde las señales a 2900 cm^{-1} fueron atribuidas a ceras (Leal *et al.*, 2020; Carranza *et al.*, 2021).

La señal obtenida a 1734 cm^{-1} es atribuida a las vibraciones de alargamiento C=O y/o grupos carbonilos (como aldehídos, cetonas y ésteres), existentes en la holocelulosa y

lignina (Sathishkumar *et al.*, 2013; Pintor *et al.*, 2024). Este hallazgo es similar al estudio realizado en semillas de *C. aesculifolia*, donde se informó la banda a 1736 cm^{-1} (Carranza *et al.*, 2021), así como en las maderas duras donde se ha informado la presencia de este grupo funcional en el rango de $1740\text{ a }1730\text{ cm}^{-1}$ (Pucetaite, 2012; Moosavinejad *et al.*, 2019). En cuanto a la banda vibracional a 1593 cm^{-1} , se perciben las vibraciones de alargamiento características de las uniones (C=C) del esqueleto aromático de la lignina (De Rosa *et al.*, 2011; Syed *et al.*, 2014). En una investigación de semillas de *C. aesculifolia*, se informó de la presencia del grupo (C=C) a 1594 cm^{-1} , esto es coherente con los hallazgos reportados en este estudio para *C. aesculifolia* (Carranza *et al.*, 2021). Se identificó un pico a 1238 cm^{-1} , este es asignado al estiramiento de C-O en xileno y el anillo de siringilo, principalmente asociado con la lignina y la hemicelulosa (Müller *et al.*, 2009; Lehto *et al.*, 2017). En un estudio sobre la celulosa basada en el fruto de *C. pentandra*, se detectó el estiramiento C-O a 1249 cm^{-1} (Syed *et al.*, 2014).

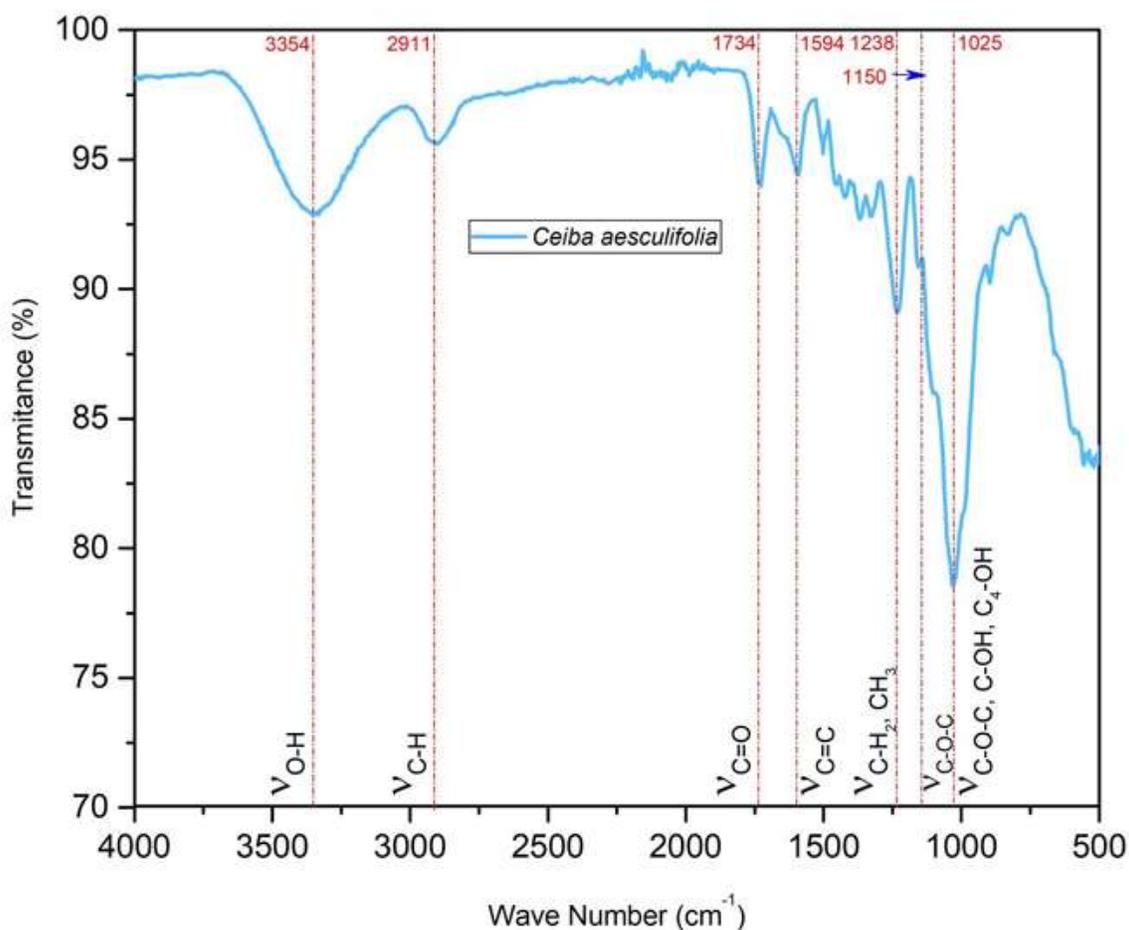


Figura 15. Espectro FT-IR de la madera de *C. aesculifolia*.

Se identificaron las unidades funcionales C-O-C, C-OH y C4-OH en la zona de absorción a 1025 cm^{-1} , donde predomina la β -glucopiranosas, característica de la celulosa (Moosavinejad *et al.*, 2019). Se han reportado valores semejantes en otras especies de latifoliadas, como la especie *Prosopis laevigata* (Pintor *et al.*, 2024). Los picos localizados a 1150 cm^{-1} se asocian con las vibraciones de alargamiento del puente C-O-C de los ésteres característicos de la celulosa y hemicelulosas (De Rosa *et al.*, 2011). En una investigación de las semillas de *C. aesculifolia*, se registró una señal a 1157 cm^{-1} (Carranza *et al.*, 2021).

La señal de vibración espectral centrada a 1025 cm^{-1} se correlaciona con el alargamiento simétrico del C-OH, presente tanto en la lignina como en la hemicelulosa y celulosa (Fiore y Di Bella, 2011; Alvarado *et al.*, 2020). En un estudio sobre la corteza de *C. pentandra*, de igual manera se identificó el grupo C-OH en la señal de vibración espectral a 1023 cm^{-1} (Kumar *et al.*, 2018). La intensidad a 930 cm^{-1} se adjudica a los enlaces glucosídicos presentes en la holocelulosa (Abidi *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2013). En una investigación realizada con celulosa obtenida del fruto de *C. pentandra* se observó esta señal a 900 cm^{-1} (Syed *et al.*, 2014). La vibración a 725 cm^{-1} se debe a la vibración de balanceo de CH_2 en la celulosa cristalina I (Åkerholm *et al.*, 2004). En un estudio de semillas de *C. aesculifolia* se ubicó esta vibración a 710 cm^{-1} (Carranza *et al.*, 2021). Estos picos son característicos del algodón nativo (Abidi *et al.*, 2014). Finalmente, el espectro situado en 600 cm^{-1} es atribuido a la inclinación fuera del plano del grupo funcional OH o la deformación de los grupos hidroxilo (Abdullah *et al.*, 2014). En el estudio de la celulosa del fruto de *C. pentandra* se identificó esta banda a 614 cm^{-1} (Syed *et al.*, 2014).

8. CONCLUSIONES

La madera de *C. aesculifolia* se identifica como una valiosa fuente de combustible. Este estudio tiene como objetivo primordial la caracterización termoquímica de este material renovable durante el procedimiento termoquímico sin la presencia de oxígeno. Los resultados muestran un total de agua del 9,37%, un porcentaje de minerales del 1,84%, un porcentaje considerable de fracción gaseosa del 83,83% y un porcentaje de carbono residual de 14,33%, además de un poder calorífico superior (HHV) de 19,12%. Estos hallazgos sugieren que la biomasa tiene un alto potencial energético. Sin embargo, es relevante mencionar que el porcentaje de cenizas supera el límite establecido por las normativas internacionales para la comercialización de biocombustibles sólidos en el extranjero. A pesar de este inconveniente, la biomasa exhibe características destacadas, como su alto potencial energético y considerable contenido de carbono residual, lo que la sitúa como una opción viable para el uso como fuente de combustible a nivel local. Además, se identifica la posibilidad de optimizar los tiempos, las temperaturas y los índices de calentamiento durante el proceso de termólisis de la madera de *C. aesculifolia*, lo que podría mejorar la eficiencia en la generación de bioenergía. El análisis termogravimétrico (TGA) reveló que la mayor degradación de la biomasa, cerca del 60%, ocurrió entre 415 y 680 K.

Este estudio es pionero en realizar un análisis cinético del proceso termogravimétrico de la madera de *C. aesculifolia*, utilizando tres métodos iso-conversionales y un enfoque no-isoconversional para determinar el triplete cinético. Las energías de inicio promedio obtenidas mediante la aplicación de modelos matemáticos de Friedman, FWO, KAS y Kissinger fueron 132,03, 121,65, 118,14 y 155,85 kJ/mol, respectivamente. Es importante señalar que, aunque los modelos matemáticos de Friedman, FWO y KAS mostraron variaciones a lo largo del proceso de termólisis, el modelo matemático de Kissinger proporcionó resultados más constantes.

Un aspecto relevante de nuestro análisis es que todos los gráficos de los modelos matemáticos aplicados presentaron un coeficiente de correlación alto ($R^2 \approx 1$), lo cual es muy deseable en estudios cinéticos. Esto respalda la hipótesis planteada en este trabajo, **dado que el error medio de los métodos utilizados se mantuvo por debajo del 10%**. Según la ecuación de Avrami, el orden de reacción mostró una variación que oscila entre 0.3937 y 0.6141 a lo largo del intervalo de temperatura comprendido entre (500 y 650 K). El valor para el factor de frecuencia varió de 10^3 a 10^{11} s^{-1} , esto sugiere que el procedimiento de termólisis de la *C. aesculifolia* ocurre a una velocidad de reacción elevada. El análisis termodinámico reveló que la técnica de termólisis de *C. aesculifolia* es un proceso endotérmico, puesto que la diferencia entre la energía de arranque aparente y la entalpía fue inferior a 5 kJ/mol. Esto implica que el proceso no es completamente espontáneo, dado que ΔG y ΔS presentaron valores positivos y negativos, respectivamente. En el análisis espectroscópico por FT-IR, se identificaron las principales vibraciones como OH, CH, C=O, C=C, CH₂, CH₃, C-O-C, C-OH y C₄-OH. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que es posible optimizar los tiempos, las temperaturas y las tasas de calentamiento de la madera de *C. aesculifolia* durante la pirólisis, lo que podría mejorar su potencial para la producción de bioenergía.

9. REFERENCIAS

- Abdullah, M. A., Afzaal, M., Ismail, Z., Ahmad, A., Nazir, M. S., y Bhat, A. H. (2014). Comparative study on structural modification of *Ceiba pentandra* for oil sorption and palm oil mill effluent treatment. *Desalination and Water Treatment*, 54(11), 3044–3053. doi:10.1080/19443994.2014.90632.
- Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., Mansur, M., y Mahlia, T. M. I. (2020). Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119831>
- Abidi, N., Cabrales, L., y Haigler, C. H. (2014). Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 100, 9–16. doi:10.1016/j.carbpol.2013.01.074
- Abidi, N., Hequet, E., Cabrales, L., Gannaway, J., Wilkins, T., y Wells, L. W. (2007). Evaluating cell wall structure and composition of developing cotton fibers using Fourier transform infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1), 476–486. doi:10.1002/app.27100
- Ahmad, M. S., Mehmood, M. A., Taqvi, S. T. H., Elkamel, A., Liu, C.-G., Xu, J., ... Gull, M. (2017). *Pyrolysis, kinetics analysis, thermodynamics parameters and reaction mechanism of Typha latifolia to evaluate its bioenergy potential*. *Bioresource Technology*, 245, 491–501. doi:10.1016/j.biortech.2017.08.
- Abdullah, N., Sulaiman, F., y Taib, R. M. (2013). Characterization of banana (*Musa spp.*) plantation wastes as a potential renewable energy source. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1528, No. 1, pp. 325-330). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4803618>.
- ASTM International. (2007a). *Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials (ASTM D2395-07)*. ASTM International.
- Açıklan, K. (2011). Pyrolytic characteristics and kinetics of pistachio shell by thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(1), 227–235. doi:10.1007/s10973-011-1714-3.
- Ashwini, K., Resmi, R., y Reghu, R. (2024). Pyrolysis characteristics and kinetic analysis of coconut shell and nutmeg shell for potential source of bioenergy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101615>.
- Acosta, R. A., Arango, J. A., y Prieto, A. (2017). *Una revisión de los tratamientos térmicos aplicados a la madera*. CIBEN (pp. 23-26). Lisboa, Portugal, 23-26.
- Ahmed, A., Hidayat, S., Abu Bakar, M. S., Azad, A. K., Sukri, R. S., y Phusunti, N. (2018). Thermochemical characterisation of *Acacia auriculiformis* tree parts via proximate,

ultimate, TGA, DTG, calorific value and FTIR spectroscopy analyses to evaluate their potential as a biofuel resource. *Biofuels*, 1–12. doi:10.1080/17597269.2018.1442663

Åkerholm, M., Hinterstoisser, B., y Salmén, L. (2004). Characterization of the crystalline structure of cellulose using static and dynamic FT-IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 339(3), 569–578. doi:10.1016/j.carres.2003.11.01

Alvarado Flores, J., Rutiaga Quiñones, J. G., Ávalos Rodríguez, M. L., Alcaraz Vera, J. V., Espino Valencia, J., Guevara Martínez, S. J., Márquez montesino, F, y Alfaro Rosas, A. (2020). Thermal degradation kinetics and FT-IR analysis on the pyrolysis of *Pinus pseudostrobus*, *Pinus leiophylla* and *Pinus montezumae* as forest waste in western Mexico. *Energies*, 13(4), 969. <https://doi.org/10.3390/en13040969>

Alvarado Flores, José y Vera, Jorge y Rodríguez, Liliana y Rutiaga-Quiñones, José y Valencia, Jaime y Guevara Martínez, Santiago y Tututi, Edgar y Zarraga, Roberto. Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp from Mexico: Potential for hydrogen generation. (2022). *International Journal of Hydrogen Energy*. 47. 10.1016/j.ijhydene.2022.05.051.

Alvarado Flores, J. J., Pintor Ibarra, L. F., Mendez Zetina, F. D., Rutiaga Quiñones, J. G., Alcaraz Vera, J. V., y Ávalos Rodríguez, M. L. (2024). Pyrolysis and Physicochemical, Thermokinetic and Thermodynamic Analyses of *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britt and Baker Waste to Evaluate Its Bioenergy Potential. *Molecules*, 29(18), 4388. <https://doi.org/10.3390/molecules29184388>.

Arbeláez, J. I. M., Janna, F. C., Gutiérrez, C. A. G., Rentería, C. F. V., Velasco, J. O., Blanco, L. A., y Safra, N. M. (2013). *Pirólisis rápida de biomasa*. Ecopetrol, Universidad Nacional de Colombia, 1-198.

Arcibar-Orozco, J. A., Josue, D.-B., Rios-Hurtado, J. C., y Rangel-Mendez, J. R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. *Chemical Engineering Journal* 249(1), 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.096>

ASTM E872–82 (2013). *Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Avendaño, A., Casas, A., Dávila, P., y Lira, R. (2006). Use forms, management and commercialization of “pochote” *Ceiba aesculifolia* (H.B. & K.) Britten & Baker f. subsp. *parvifolia* (Rose) P.E. Gibbs & Semir (Bombacaceae) in the Tehuacán Valley, Central Mexico. *The Journal of Arid Environments*, 67, 15-35. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.004>.

- Ávila, L. E., y Herrera, M. A. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 25–26. doi:10.4067/s0717-92002012000200013.
- Bandara, W., y Kowshayini, P. (2018). Evaluation of the Performances of Biomass Briquettes Produced with Invasive *Eichornia crassipes* (Water hyacinth), Wood Residues and Cow Dung for Small and Medium Scale Industries. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 08(01). doi:10.4172/2090-4541.1000247
- Bhatt, B. P., y Todaria, N. P. (1990). Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. *Biomass*, 21(3), 233-238. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(90\)90067-T](https://doi.org/10.1016/0144-4565(90)90067-T).
- Brown, M. E., Maciejewski, M., Vyazovkin, S., Nomen, R., Sempere, J., Burnham, A., ... Mitsuhashi, T. (2000). Computational aspects of kinetic analysis. *Thermochimica Acta*, 355(1-2), 125–143. doi:10.1016/s0040-6031(00)00443-3
- Calventus, Y. A., R. Carreras, M. Casals, P. Colomer, M. Costa, A. Jaén, S. Monserrat, A. Olivia, M. Quera y X. Roca. (2009). *Tecnología Energética y Medio Ambiente* - I. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 190 p.
- Carranza-Nuñez, U., Vásquez-García, S. R., Flores-Ramírez, N., Abdel-Gawwad, H. A., Rico, J. L., Arizbe Santiago, A., Vargas, J., Cruz-de-León, J. (2021). Physicochemical characterization of natural fibers obtained from seed pods of *Ceiba aesculifolia*. *Bioresources* 16(2), 4200-4211. DOI: 10.15376/biores.16.2.4200-4211.
- Cao, H., Xin, Y., Wang, D., y Yuan, Q. (2014). Pyrolysis characteristics of cattle manures using a discrete distributed activation energy model. *Bioresource Technology*, 172, 219–225. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.
- Chandrasekaran, A., Ramachandran, S., y Subbiah, S. (2017). Determination of kinetic parameters in the pyrolysis operation and thermal behavior of *Prosopis juliflora* using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 233, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.119>
- Chong, C. T., Mong, G. R., Ng, J.-H., Chong, W. W. F., Ani, F. N., Lam, S. S., y Ong, H. C. (2019). Pyrolysis characteristics and kinetic studies of horse manure using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*, 180, 1260–1267. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.071.
- Colín Urieta, S., y Carrillo Parra, A. (2023). *C. P. Capítulo 9: Caracterización energética: Poder calorífico, compuestos poliméricos*. Aplicaciones energéticas de la biomasa: Perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos (pp. 195-222). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Pátzcuaro, México. ISBN 978-607-9386-10-8.

- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(1), 77-88. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.04.012.
- Dávila-Caro, L. I., Pugliese-Barbosa, K., Castillo-Santiago, Y., Albis-Arrieta, A. R., Yepes-Maya, D. M., Ocampo-Batlle, E. A., ... Restrepo-Betancourt, J. B. Energy valorization of cassava residual biomass for high-energy value precursors: pyrolysis case. (2023). *Revista Tecnología En Marcha*. 36(10), Pág. 16–26. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7007>.
- De la Cruz Montelongo, C., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo J. C., Rosales Serna, R., y Carrillo-Parra, A. (2020). *Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México*. *Madera y Bosques* 26(2), e2621971. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>.
- De Rosa, I. M., Kenny, J. M., Maniruzzaman, M., Moniruzzaman, M., Monti, M., Puglia, D., Santulli, C., and Sarasini, F. (2011). "Effect of chemical treatments on the mechanical and thermal behaviour of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres," *Compos. Sci. Technol.* 71(2), 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.11.023>.
- Demirbas, T., y Demirbas, C. (2009). Fuel properties of wood species. *Energy Sources, Part A*, 31(16), 1464-1472. <https://doi.org/10.1080/15567030802093153>.
- Draman, S. F. S., Daik, R., Latif, F. A., y El-Sheikh, S. M. (2014). Characterization and thermal decomposition kinetics of kapok (*Ceiba pentandra* L.)–based cellulose. *BioResources*, 9(1), 8-23.
- Di Blasi, C. (2002). Modeling intra- and extra-particle processes of wood fast pyrolysis. *AIChE Journal*, 48(10), 2386–2397. doi:10.1002/aic.690481028.
- DOE (U.S. Department of Energy). (2024). *Renewable energy*. Recuperado el 6 de abril de 2024, de <https://www.energy.gov/eere/renewable-energy>.
- Dhyani, V., y Bhaskar, T. (2018). Kinetic analysis of biomass pyrolysis. In *Waste Biorefinery* (pp. 39-83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00002-1>.
- Emiola-Sadiq, T., Zhang, L., y Dalai, A. K. (2021). Thermal and kinetic studies on biomass degradation via thermogravimetric analysis: a combination of model-fitting and model-free approach. *ACS omega*, 6(34), 22233-22247. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02937>.
- Eco jardín-UNAM. (2014). Conoce a la pochota (*Ceiba aesculifolia*). Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://ecojardinunam.wordpress.com/2014/09/01/conoce-a-la-pochota-ceiba-aesculifolia/>.

- Fahmy, T. Y., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., & Abou-Zeid, R. E. Biomass pyrolysis: past, present, and future. (2020). *Environment, Development and Sustainability*, 22, 17-32. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>.
- Fengel, D., y Wegener, G. (1984). *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Berlín, 613 pp.
- Fiore, V., Valenza, A., y Di Bella, G. (2011). Artichoke (*Cynara cardunculus* L.) fibres as potential reinforcement of composite structures. *Composites Science and Technology*, 71(8), 1138–1144. doi:10.1016/j.compscitech.2011.
- Fong, M. J. B., Loy, A. C. M., Chin, B. L. F., Lam, M. K., Yusup, S., y Jawad, Z. A. (2019). Catalytic pyrolysis of *Chlorella vulgaris*: kinetic and thermodynamic analysis. *Bioresource technology*, 289, 121689. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121689>.
- Forero-Nuñez, C. A., Jochum, J., y Sierra, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación*, 35(1), 17-23. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., y Bueno, J. L. (2012). *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. *Bioresource Technology* 103(1), 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>.
- Galvan, D., Orives, J. R., Coppo, R. L., Silva, E. T., Angilelli, K. G., & Borsato, D. (2013). Determination of the kinetics and thermodynamics parameters of biodiesel oxidation reaction obtained from an optimized mixture of vegetable oil and animal fat. *Energy & fuels*, 27(11), 6866-6871. <https://doi.org/10.1021/ef401927x>.
- Garcia-Maraver, A., Rodriguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Díaz, L. F., y Zamorano, M. (2015). *Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees*. *Fuel processing technology*, 129, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.018>.
- Gai, C., Dong, Y., & Zhang, T. (2013). The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions. *Bioresource technology*, 127, 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.089>.
- Ghavidel, A., Bak, M., Hofmann, T., Vasilache, V., y Sandu, I. (2021). Evaluation of some wood-water relations and chemometric characteristics of recent oak and archaeological oak wood (*Quercus robur*) with archaeometric value. *Journal of Cultural Heritage*, 51, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.06.011>.
- Ghetti, P., Ricca, L., y Angelini, L. (1996). Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel*, 75(5), 565-573. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00296-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00296-0).

- Goering HK, Van Soest PJ (1970). *Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures and some applications)*. USDA-ARS agricultural handbook 379, US Government Printing Office, Washington, DC, p 20.
- Gutiérrez-Acosta, J. M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J. J., Ruiz-Aquino, F., Navarrete-García, M. A., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). On the Basic Chemical Composition of Selected Biomass Types from Four Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 16(3), 5694-5705.
- He, Q., Ding, L., Gong, Y., Li, W., Wei, J., y Yu, G. (2019). Effect of torrefaction on pinewood pyrolysis kinetics and thermal behavior using thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*, 280, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.138>.
- Hernowo, P., Steven, S., Restiawaty, E., y Bindar, Y. (2022). Nature of mathematical model in lignocellulosic biomass pyrolysis process kinetic using volatile state approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 139, 104520. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104520>.
- Holt, G. A., Blodgett, T. L., y Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products*, 24(3), 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.005>.
- Honorato salazar, J. A., Colotl Hernandez, G., Apolinar Hidalgo, F., y Jorge, A. (2015). Principales componentes químicos de la madera de Ceiba pentandra, Hevea brasiliensis y Ochroma pyramidale. *Madera y Bosques*, 21(2), 131-146. ISSN 2448-7597.
- Hossain, M. J., Ghosh, R. K., Das, A. K., Nath, S. C., Islam, M. R., Akhter, S., y Rahman, M. S. (2023). Investigation of the chemical profiles of seven wood species for their potential applications. *Wood Material Science & Engineering*. 18(2), 650-655. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2058413>.
- Huang, J., Liu, J., Chen, J., Xie, W., Kuo, J., Lu, X., ... y Evrendilek, F. (2018). Combustion behaviors of spent mushroom substrate using TG-MS and TG-FTIR: thermal conversion, kinetic, thermodynamic and emission analyses. *Bioresource technology*, 266, 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.106>.
- Kan, T., Strezov, V., y Evans, T. (2016). Effect of the heating rate on the thermochemical behavior and biofuel properties of sewage sludge pyrolysis. *Energy & Fuels*, 30(3), 1564-1570. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02232>.
- Katnić, Đ., Marinović-Cincović, M., Porobić, S. J., Vujčić, I., Šaponjić, A., Sikirić, B., y Živojinović, D. (2022). Characterization and kinetics of thermal decomposition behavior of plum and fig pomace biomass. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131637. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131637>.

- Kaur, R., Gera, P., Jha, M. K., y Bhaskar, T. (2018). Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 250, 422–428. doi:10.1016/j.biortech.2017.11.077
- Kirti, N., Tekade, S. P., Tagade, A., y Sawarkar, A. N. (2022). Pyrolysis of pigeon pea (*Cajanus cajan*) stalk: Kinetics and thermodynamic analysis of degradation stages via isoconversional and master plot methods. *Bioresource Technology*, 347, 126440. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126440>.
- Khiari, B., y Jeguirim, M. (2018). Pyrolysis of grape marc from Tunisian wine industry: Feedstock characterization, thermal degradation and kinetic analysis. *Energies*, 11(4), 730. <https://doi.org/10.3390/en11040730>.
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista De Química*, 26(1-2), 37-40. Recuperado de: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547>.
- Kruyeniski, J. (2017). *Influencia del pretratamiento de residuos foresto industriales sobre la producción de bioetanol* (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones.
- Kumar, M., Shukla, S. K., Upadhyay, S. N., y Mishra, P. K. (2020). Analysis of thermal degradation of banana (*Musa balbisiana*) trunk biomass waste using iso-conversional models. *Bioresource Technology*, 310, 123393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123393>.
- Kumar, R., Hynes, N. R. J., Senthamaraiannan, P., Saravanakumar, S., & Sanjay, M. R. (2018). Physicochemical and thermal properties of ceiba pentandra bark fiber. *Journal of Natural Fibers*, 15(6), 822-829. <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2017.1369208>.
- Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., y Mohan, S. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. *Journal of Forestry Research*, 21, 514-516. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>.
- Kumar, V. K., Hallad, S. C., y Panwar, N. L. (2024). Thermogravimetric pyrolysis investigation of pistachio shell for its potential of thermal properties, kinetics and thermodynamics. *Discover Energy*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00030-y>.
- Lapuerta, M., Hernández, J. J., y Rodríguez, J. (2004). Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 385–391. doi: 10.1016/j.biombioe.2003.11.010.
- Leal, M. R., Flores-Sahagun, T. H. S., Franco, T. S., y Muniz, G. I. B. (2020). Ceiba speciosa St. Hill fruit fiber as a potential source for nanocellulose production and reinforcement of polyvinyl acetate composites. *Polymer Composites*, 42(1), 397–411. doi:10.1002/pc.25833.

- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and bioenergy*, 20(5), 351-360. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1).
- Lehto, J., Louhelainen, J., Huttunen, M., y Alén, R. (2017). Spectroscopic analysis of hot-water-and dilute-acid-extracted hardwood and softwood chips. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 184, 184-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2017.05.010>
- Lincoln, W. A. (1986). *World woods in colour*, 13-14.
- Mabuda, A. I., Mamphweli, N. S., y Meyer, E. L. (2016). Model free kinetic analysis of biomass/sorbent blends for gasification purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1656-1664. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.038>.
- Malik, K., Capareda, S. C., Kamboj, B. R., Malik, S., Singh, K., Arya, S., y Bishnoi, D. K. (2024). Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Fuels*. 5(2), 157-175. <https://doi.org/10.3390/fuels5020010>.
- Malika, A., Jacques, N., Jaafar, E. F., Fatima, B., y Mohammed, A. (2016). Pyrolysis investigation of food wastes by TG-MS-DSC technique. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 6, 161-172. <https://doi.org/10.1007/s13399-015-0171-9>.
- Mandley, S. J., Daioglou, V., Junginger, H. M., van Vuuren, D. P., y Wicke, B. (2020). EU bioenergy development to 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109858. doi:10.1016/j.rser.2020.109858.
- Martínez, J. M., y Lora, E. E. (2014). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad (I ed.)*. Bogotá_Colombia: CYTED.
- Maia, A. A. D., y de Morais, L. C. (2016). Kinetic parameters of red pepper waste as biomass to solid biofuel. *Bioresource technology*, 204, 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.055>.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*(10), 1688-9584.
- Mészáros, E., Jakab, E., y Várhegyi, G. (2007). TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of Robinia pseudoacacia. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1-2), 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.007>.
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Rojas, S., y Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, 88(11), 2106-2112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.015>.

- Mishra, R. K., y Mohanty, K. (2021). Kinetic analysis and pyrolysis behavior of low-value waste lignocellulosic biomass for its bioenergy potential using thermogravimetric analyzer. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.03.003>.
- Mishra, R. K., Sahoo, A., y Mohanty, K. (2019). Pyrolysis kinetics and synergistic effect in co-pyrolysis of Samanea saman seeds and polyethylene terephthalate using thermogravimetric analyser. *Bioresource technology*, 289, 121608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121608>.
- Mishra, R. K., y Mohanty, K. (2020). Kinetic analysis and pyrolysis behaviour of waste biomass towards its bioenergy potential. *Bioresource Technology*, 311, 123480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123480>
- Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., y Darkwa, N. A. (2014). Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2014. DOI:10.4236/jsbs.2014.41001.
- Moosavinejad, S. M., Madhoushi, M., Vakili, M., y Rasouli, D. (2019). Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using FT-IR and FT-Raman vibrational spectroscopy. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(3), 381-392. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000310>.
- Morales-Máximo, C. N., López-Sosa, L. B., Rutiaga-Quiñones, J. G., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Pintor-Ibarra, L. F., López-Miranda, A., Delgado-Domínguez, S. N., Rodríguez-Magallón, M. C., y Morales-Máximo, M. (2022). Characterization of Agricultural Residues of Zea Mays for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies*, 15(19), 6870. <https://doi.org/10.3390/en15196870>.
- Morales, J. B., y Gómez, C. L. (1989). *Anatomía de maderas de México: Especies de una selva baja caducifolia* (pp. 36-37). Instituto de Biología. México.
- Müller, G., Schöpfer, C., Vos, H., Kharazipour, A., y Polle, A. (2009). FTIR-ATR spectroscopic analyses of changes in wood properties during particle-and fibreboard production of hard-and softwood trees.
- Musule, R., Alarcón-Gutiérrez, E., Houbron, E. P., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. d., Domínguez, Z., y Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of *Abies religiosa* across an altitudinal gradient. *Journal of Wood Science* 62, 537-547. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1585-0>.

- Muto-Lubota, D., González-Suárez, E., Hernández Pérez, G., Concepción-Toledo, D. N., & González-Herrera, I. Y. (2016). Estrategia colaborativa para asimilar tecnologías energéticas alternativas y co-productos de biomasa forestal. *Ingeniería industrial*, 37(2), 218-228. ISSN: 0258-5960.
- Naqvi, S. R., Tariq, R., Hameed, Z., Ali, I., Taqvi, S. A., Naqvi, M., y Farooq, W. (2018). Pyrolysis of high-ash sewage sludge: Thermo-kinetic study using TGA and artificial neural networks. *Fuel*, 233, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.089>.
- Najafi, H., Golrokh Sani, A., y Sobati, M. A. (2024). Thermogravimetric and thermo-kinetic analysis of sugarcane bagasse pith: a comparative evaluation with other sugarcane residues. *Scientific Reports*, 14(1), 2076. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52500-x>.
- Nawaz, A., Singh, B., Mishra, R. K., y Kumar, P. (2023). Pyrolysis of low-value waste *Trapa natans* peels: an exploration of thermal decomposition characteristics, kinetic behaviour, and pyrolytic liquid product. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103128>.
- NBN M11-001, (1984) *Charcoal and charcoal briquettes for domestic use: designationspecification-tests*.
- Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchk-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J., Zelinski, V., y Pintor-Ibarra, L. (2016). *Calorific Value and Chemical Composition of Five Semi-Arid Mexican Tree Species*. *Forests*, 7(12), 58. <http://dx.doi.org/10.3390/f7030058>.
- Obernberger, I., y Thek, G. (2004). *Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour*. *Biomass and Bioenergy*(27), 653–669.
- Obernberger, I., y Thek, G. (2010). *The pellet handbook (1st ed.)*. London-Washington DC: Earthscan.
- Oluoti, K., Doddapaneni, T. R. K., y Richards, T. (2018). Investigating the kinetics and biofuel properties of *Alstonia congensis* and *Ceiba pentandra* via torrefaction. *Energy*, 150, 134-141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.086>.
- ÖNORM M 7135 (2000). *Compressed wood or compressed bark in natural state-pellets and briquettes, requirements and test specifications*. Vienna, Austria: Österreichisches Normungsinstitut.
- Parthasarathy, P., y Narayanan, S. K. (2014). Determination of kinetic parameters of biomass samples using thermogravimetric analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(1), 256-266. <https://doi.org/10.1002/ep.11763>.

- Peña Castillo, L. C. (2019). *Evaluación de la producción de gas y líquido combustible mediante el proceso de pirólisis de madera para aplicación en la zona del resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América). <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7399>.
- Pérez Valencia, A. F. (2020). Efecto en las emisiones de NOx en el proceso de la combustión con mezclas de carbón y bagazo de caña por medio del metodo de co-firing. *Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Mecánica*, Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/49165>.
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood research* 62(6) 849-862.
- Pintor-Ibarra, L. F., Rivera-Prado, J.J., Ngangyo-Heya, M., y Rutiaga-Quiñones, J.G. (2018). *Evaluation of the chemical components of Eichhornia crassipes as an alternative raw material for pulp and paper*. *Bioresources* 13 (2), 2800-2813. DOI: 10.15376/biores.13.2.2800-2813.
- Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Rutiaga-Quiñones, J. G., Alcaraz-Vera, J. V., Ávalos-Rodríguez, M. L., y Moreno-Anguiano, O. (2024). Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods. *Molecules*, 29(11), 2587. <https://doi.org/10.3390/molecules29112587>.
- Pucetaite, M. (2012). *Archaeological wood from the Swedish warship Vasa studied by infrared microscopy*. Lund University Press: Lund, Sweden.
- Quan, C., Li, A., y Gao, N. (2009). Thermogravimetric analysis and kinetic study on large particles of printed circuit board wastes. *Waste management*, 29(8), 2353-2360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.020>.
- Quintero González, Laura Estefanía, y Quintero González, Julián Rodrigo (2015). *Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano*. *Gestión y Ambiente*, 18 (1),179-188. [fecha de Consulta 18 de mayo de 2022]. ISSN: 0124-177X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169439782011>.
- Ríos, L. M., Muñoz, P. V., Giraldo, J. M., Gaviria, G. H., González, A. F., y Mantilla, J. I. (2013). Modelos cinéticos de degradación térmica de polímeros: una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, XII(23), 113-130. ISSN 1692-3324.
- Ríos-Saucedo, J.C., Rosales-Serna, R., Jiménez-Ocampo, R., Domínguez-Martínez, P. A., Carrillo-Parra, A., Valenzuela-Nuñez, L. M. (2021). Calidad de pélets a partir de biomasa de ocho especies dendroenergéticas de crecimiento rápido. *Agrociencia*, 55(6), 557-568. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2559>.

- Roslee, A. N., y Munajat, N. F. (2018). Comparative study on pyrolysis behavior and kinetics of two macroalgae biomass (*Ulva cf. flexuosa* and *Hy. edulis*) using thermogravimetric analysis. *Jurnal Teknologi*, 80(2). doi:10.11113/jt.v80.11454.
- Ruiz-Aquino, F., Jiménez-Mendoza, M. E., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Aquino-Vásquez, C., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2022). Energy Properties of 22 Timber Species from Oaxaca, Mexico. *South-east European forestry: SEEFOR*, 13(2), 107-113. <https://doi.org/10.15177/seeфор.22-13>.
- Ruiz-Aquino, F., Luna Bautista, L., Luna Bautista, A. E., Santiago-García, W., Pintor-Ibarra, L. F., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020). *Anatomical Characterization, Physical, and Chemical Properties of Wood of Quercus macdougalii Martínez, Endemic Species of the Sierra Juárez of Oaxaca, Mexico*. *BioResources* 15(3), 5975-5998. DOI: 10.15376/biores.15.3.5975-5998.
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2019). *Wood Chemical Composition of Five Tree Species from Oaxaca, Mexico*. *BioResources* 14(4), 9826-9839. DOI: 10.15376/biores.14.4.9826-9839.
- Rony, A. H., Kong, L., Lu, W., Dejam, M., Adidharma, H., Gasem, K. A., ... y Fan, M. (2019). Kinetics, thermodynamics, and physical characterization of corn stover (*Zea mays*) for solar biomass pyrolysis potential analysis. *Bioresource technology*, 284, 466-473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.049>
- Rutiaga-Quiñones, J. G. Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruiz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J., y Lujan-Álvarez C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *Bioresources* 15(4), 8529-8553. DOI: 10.15376/biores.15.4.8529-8553.
- Salazar-Herrera, F., Pintor-Ibarra, L. F., Musule, R., Nava-Berumen, C. A., Alvarado-Flores, J. J., González-Ortega, N., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2023). Chemical and Energetic Properties of Seven Species of the Fabaceae Family. *South-east European forestry: SEEFOR*. 14(2), 215-224. <https://doi.org/10.15177/seeфор.23-19>.
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., Shankar, S., y Rajasekar, R. (2013). Characterization of new cellulose sansevieria ehrenbergii fibers for polymer composites. *Composite Interfaces*, 20(8), 575–593. doi:10.1080/15685543.2013.816652.
- Shebani, A. N., Van Reenen, A. J., y Meincken, M. (2008). The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*, 471(1-2), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.02.020>.
- Singh, R. K., Patil, T., Pandey, D., y Sawarkar, A. N. (2021). Pyrolysis of mustard oil residue: a kinetic and thermodynamic study. *Bioresource Technology*, 339, 125631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125631>.

- Sukarni, S., Zakaria, Y., Sumarli, S., Wulandari, R., Ayu Permanasari, A., y Suhermanto, M. (2019). Physical and chemical properties of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a sustainable biofuel feedstock. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 515, p. 012070). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012070>.
- Syed Draman, S. F., Daik, R., Abdul Latif, F., and El-Sheikh, S. M. (2014). "Characterization and thermal decomposition kinetics of kapok (*Ceiba pentandra* L.)-based cellulose," *BioRes.* 9(1), 8-23.
- Tahir, M. H., Mahmood, M. A., Çakman, G., y Ceylan, S. (2020). Pyrolysis of oil extracted safflower seeds: product evaluation, kinetic and thermodynamic studies. *Bioresource Technology*, 314, 123699. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123699>.
- Telmo, C., Luosada, K., y Moreira, N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross caloric value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology* 101 (11), 3808-3815. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.021>.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., y Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1), 482-498.
- Tian, X., Dai, L., Wang, Y., Zeng, Z., Zhang, S., Jiang, L., ... y Ruan, R. (2020). Influence of torrefaction pretreatment on corncobs: A study on fundamental characteristics, thermal behavior, and kinetic. *Bioresource Technology*, 297, 122490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122490>.
- Toscano, G., Duca, D., Rossini, G., Mengarelli, C., y Pizzi, A. (2015). Identification of different woody biomass for energy purpose by means of Soft Independent Modeling of Class Analogy applied to thermogravimetric analysis. *Energy*, 83, 351–357. doi: 10.1016/j.energy.2015.02.032
- UNE-CEN/TS 15104 EX. (2008). Determinación del contenido de carbono, hidrogeno y nitrogeno. AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN 14775. (septiembre de 2010). *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas*. (AENOR, Ed.) AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA, 10p.
- UNE-EN 14918. 2011. *Determinación del poder calorífico*” Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR), Madrid, España.
- UNE-EN ISO18134-1. (marzo de 2016). *Biocombustibles sólidos, determinación del contenido de humedad, método de secado en estufa, humedad total, método de referencia*. AENOR, 11.

- Vamvuka, D., El Chatib, N., y Sfakiotakis, S. (2011). Measurements of ignition point and combustion characteristics of biomass fuels and their blends with lignite. *Combustion*, 2015, 95.
- Van Lith, S. C., Alonso, V., Jensen, P. A., Frandsen, F. J., y Glarborg, P. (2006). Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. Part 1: Development and evaluation of quantification methods. *Energy & Fuels*, 20(3), 964–978. <https://doi.org/10.1021/ef050131r>.
- Vasudev, V., Ku, X., y Lin, J. (2020). Pyrolysis of algal biomass: Determination of the kinetic triplet and thermodynamic analysis. *Bioresource Technology*, 317, 124007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124007>.
- Valle-Díaz, O., Blanco-García, A., Bonfil, C., Paz, H., y Lindig-Cisneros, R. (2009). Altitudinal range shift detected through seedling survival of *Ceiba aesculifolia* in an area under the influence of an urban heat island. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1511–1515. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.001>
- Vlaev, L. T., Markovska, I. G., y Lyubchev, L. A. (2003). Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk. *Thermochimica acta*, 406(1-2), 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00222-3).
- Vedharaj, S., Vallinayagam, R., Yang, W. M., Chou, S. K., Chua, K. J. E., y Lee, P. S. (2013). Experimental investigation of kapok (*Ceiba pentandra*) oil biodiesel as an alternate fuel for diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 75, 773-779. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.042>.
- Velázquez-Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la Biomasa para uso Energético (2nd Ed.)*, Editorial Reverté, Barcelona, España.
- Villarroel Bastidas, J., y Macías Vera, J. (2021). Biocombustible Sólido A Partir De Residuos Que Generan Los Procesos Agroindustriales Del Sector El Empalme. *Ingeniería E Innovación*, 8(22). <https://doi.org/10.21897/23460466.2333>.
- White, R. H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood Fiber Science* 19(4), 446-452.
- White, J. E., Catallo, W. J., y Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: a comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 91(1), 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.004>
- Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., y Jin, Y. (2023). The role of lignin structure on cellulase adsorption and enzymatic hydrolysis. *Biomass.*, 3(1), 96-107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>.

- Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F., y Wang, D. (2013). Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review. *Applied energy*, 104, 801-809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.019>
- Ye, G., Luo, H., Ren, Z., Ahmad, M. S., Liu, C. G., Tawab, A., ... y Mehmood, M. A. (2018). Evaluating the bioenergy potential of Chinese Liquor-industry waste through pyrolysis, thermogravimetric, kinetics and evolved gas analyses. *Energy Conversion and Management*, 163, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.049>.
- Yuan, X., He, T., Cao, H., y Yuan, Q. (2017). Cattle manure pyrolysis process: kinetic and thermodynamic analysis with isoconversional methods. *Renewable Energy*, 107, 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.026>.
- Zhang, X. (2020). Applications of kinetic methods in thermal analysis: a review. *Engineered Science*, 14(2), 1-13. <https://dx.doi.org/10.30919/es8d1132>.
- Zoghلامي, A., y Paës, G. (2019). Lignocellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. *Frontiers in chemistry*, 7, 874. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00874>.

Fernando Daniel Méndez Zetina

Análisis de la degradación térmica en el proceso de pirólisis y la cinética asociada de madera de Ce

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:410528332

Fecha de entrega

29 nov 2024, 1:21 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

29 nov 2024, 1:23 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Análisis de la degradación térmica en el proceso de pirólisis y la cinética asociada de madera depdf

Tamaño de archivo

5.1 MB

70 Páginas

22,500 Palabras

120,171 Caracteres

25% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 25%  Fuentes de Internet
- 23%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
18 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
313 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera	
Título del trabajo	Análisis de la degradación térmica en el proceso de pirólisis y la cinética asociada de madera de Ceiba aesculifolia (Kunth) Britt. & Baker.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Fernando Daniel Mendez Zetina	1614346b@umich.mx
Director	José Juan Alvarado Flores	jjalvarado@umich.mx
Codirector	Luis Fernando Pintor Ibarra	luis.pintor@umich.mx
Coordinador del programa	Abril Munro Rojas	abril.munro@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

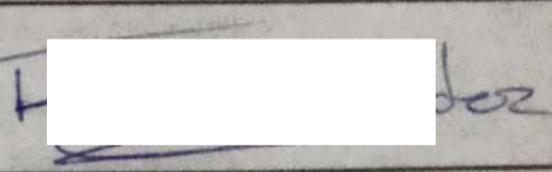
**Formato de Declaración de Originalidad
y Uso de Inteligencia Artificial**
 Coordinación General de Estudios de Posgrado
 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Sí	Traductor de DeepL
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante

Nombre y firma	Fernando Daniel Mendez Zetina 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, a 2 de diciembre de 2024