

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Pirólisis aplicada a olote de maíz para la producción de bioaceite
líquido a escala laboratorio.**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

Maria Jose Alonzo Hernández

para optar al grado de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Trabajo de graduación en modalidad de Tesis
Pirólisis aplicada a olote de maíz para la producción de bioaceite
líquido a escala laboratorio.

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por


Maria Jose Alonzo Hernández

para optar al grado de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,

2025

Vo. Bo.:

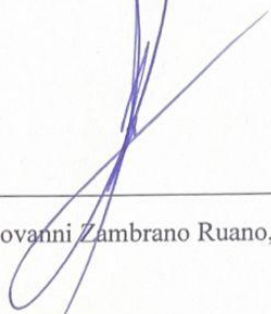
(f) 

Ing. José Andrés Lam Ceballos

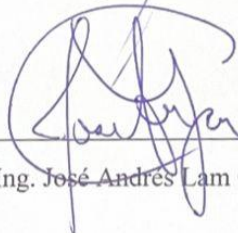
Tribunal Examinador

(f) 

Ing. Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

(f) 

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

(f) 

Ing. José Andrés Lam Ceballos

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de diciembre de 2025

PREFACIO

Este trabajo de graduación surgió del interés por ofrecer una alternativa técnica al manejo de residuos agrícolas en Guatemala, buscando explorar en particular el olote de maíz como materia prima para su conversión a un producto de valor. En términos concretos, el trabajo aporta una base informativa sobre el proceso de pirólisis a escala de laboratorio, acompañado de datos de caracterización que permiten evaluar al olote como materia prima para la producción de bioaceite, brindando además una comparación entre la materia prima cruda y sometida a procesos de cocción, habituales en la región.

Quiero agradecerle, a Dios, por guiarme, fortalecerme y acompañarme a lo largo de este período de mi vida, ya que, sin él, nada habría sido posible. A mi papá, por apoyarme en cada etapa de este proceso, por siempre recordarme que tengo que dar lo mejor de mí en todo lo que haga y por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional. A mi mamá, por sus ánimos constantes y su apoyo incondicional que me transmitió resiliencia y aliento sin importar la situación. A mi familia, por su cariño, ánimos y acompañamiento durante toda esta trayectoria. A mis amigos por el apoyo durante este proceso y por celebrar conmigo cada avance.

A CETEC de CEMENTOS PROGRESO, gracias por el apoyo con los análisis termogravimétricos (TGA) que fortalecieron la base experimental de este trabajo de graduación.

Al Ing. José Lam Ceballos, mi asesor, por aceptarme y brindarme acompañamiento a lo largo de la elaboración de este trabajo; al Ing. Luis Núñez, por su orientación, enfoque, tiempo y apoyo constante a lo largo de todo este proceso. Finalmente, a la Universidad del Valle de Guatemala, por permitirme desarrollarme como profesional y por las cualidades, competencias y destrezas que me acompañarán tanto en mi vida personal como profesional.

ÍNDICE

LISTADO DE CUADROS	iv
LISTADO DE FIGURAS	vii
LISTADO DE ECUACIONES	ix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	5
A. General	5
B. Específicos	5
IV. MARCO TEÓRICO	6
A. Olote de maíz	6
B. Proceso de cocción	10
C. Propiedades físicas y químicas de los residuos	10
D. Pirólisis	11
E. Balance de masa y energía	14
F. Diagrama de proceso	16
G. Tratamiento y análisis estadístico de datos	17
H. Cromatografía de gases GC masas	19
I. Análisis termogravimétricos	21
J. Poder calorífico	22
K. Bioaceite	23
L. Char	27
M. Combustibles en el mercado	28
N. Aplicaciones del bioaceite	30

V. ANTECEDENTES.....	33
VI. METODOLOGÍA.....	35
VII. RESULTADOS.....	42
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
IX. CONCLUSIONES.....	67
X. RECOMENDACIONES.....	68
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
XII. ANEXOS.....	73
A. CÁLCULO DE MUESTRA.....	73
Cálculo 1. Tamaño de muestra.....	73
Cálculo 2. Rendimientos de conversión.....	73
Cálculo 3: Solubilidad.....	73
Cálculo 4. Viscosidad.....	74
B. DATOS ORIGINALES.....	75
C. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA.....	87
D. IMÁGENES DE EXPERIMENTACIÓN.....	88
E. DATOS CÁLCULADOS.....	91
F. ANÁLISIS DE ERROR.....	109
G. GLOSARIO.....	110

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del maíz	8
Cuadro 2. Poder calorífico inferior de combustibles convencionales	23
Cuadro 3. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis.....	43
Cuadro 4. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis	43
Cuadro 5. Propiedades físicas del olote crudo utilizado como materia prima.....	44
Cuadro 6. Propiedades físicas del olote cocido utilizado como materia prima	44
Cuadro 7. Análisis FTIR de olote crudo	45
Cuadro 8. Análisis FTIR de olote cocido	46
Cuadro 9. Rendimientos de proceso de pirólisis de olote crudo a escala laboratorio	47
Cuadro 10. Rendimientos de proceso de pirólisis de olote cocido a escala laboratorio ..	47
Cuadro 11. Resultados de Prueba T	48
Cuadro 12. Propiedades físicas del bioaceite a partir de olote crudo	48
Cuadro 13. Propiedades físicas del bioaceite a partir de olote cocido.....	49
Cuadro 14. Inferencia de compuestos representativos entre las 4 muestras de bioaceite producido a partir de pirólisis de olote crudo	49
Cuadro 15. Inferencia de compuestos representativos entre las 4 muestras de bioaceite producido a partir de la pirólisis de olote cocido	50
Cuadro 16. Comparación bioaceite de olote crudo con propuestas de uso	53
Cuadro 17. Comparación bioaceite cocido con propuestas de uso.....	53
Cuadro 18. Solubilidad de bioaceites	75
Cuadro 19. Estabilidad térmica bioaceite de olote cocido.....	75
Cuadro 20. Estabilidad térmica bioaceite de olote crudo	75
Cuadro 21. Datos para determinar Densidad aparente de bioaceite Olote crudo	76
Cuadro 22. Datos para determinar Densidad real de bioaceite Olote crudo.....	76
Cuadro 23. Datos para cálculo Densidad aparente Olote cocido.....	76
Cuadro 24. Datos para cálculo de Densidad real Olote crudo	77
Cuadro 25. Datos cálculo de % de humedad en Olote crudo	77
Cuadro 26. Datos cálculo de % de Humedad en olote cocido.....	77
Cuadro 27. Tamaño de partícula olote crudo y cocido	78
Cuadro 28. Datos cálculo de poder calorífico de bioaceite producido por pirólisis de Olote crudo.....	78

Cuadro 29. Datos cálculo de poder calorífico de bioaceite producido por pirólisis de Olote cocido	78
Cuadro 30. Pesos productos de pirólisis de olote crudo	79
Cuadro 31. Pesos productos de pirólisis de olote cocido.....	79
Cuadro 32. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis	82
Cuadro 33. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis	82
Cuadro 34. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis.....	85
Cuadro 35. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis.....	85
Cuadro 36. Grupos funcionales identificados en análisis FTIR de olote crudo	86
Cuadro 37. Grupos funcionales identificados en análisis FTIR de olote cocido.....	86
Cuadro 38. Rendimiento de productos de pirólisis a partir de olote crudo	91
Cuadro 39. Rendimiento de productos de pirólisis a partir de olote cocido.....	91
Cuadro 40. Densidad aparente de Olote crudo	91
Cuadro 41. Densidad real de Olote crudo.....	92
Cuadro 42. Densidad aparente de muestras de Olote cocido.....	92
Cuadro 43. Densidad real de muestras de Olote cocido	93
Cuadro 44. Porcentaje de humedad de muestras de Olote crudo	93
Cuadro 45. Porcentaje de humedad de muestras de Olote cocido	93
Cuadro 46. Tamaño de partícula de muestra Olote crudo.....	94
Cuadro 47. Tamaño de partícula de muestras de Olote cocido.....	94
Cuadro 48. Densidad bioaceite producido por pirólisis de Olote crudo.....	103
Cuadro 49. Densidad muestras de bioaceite producido por pirólisis de Olote cocido ..	103
Cuadro 50. Viscosidad muestras de bioaceite de pirólisis de olote crudo	103
Cuadro 51. Viscosidad muestras de bioaceite de pirólisis de olote cocido.....	104
Cuadro 52. Poder calorífico Olote crudo	104
Cuadro 53. Poder calorífico muestras de Olote cocido	105
Cuadro 54. Poder calorífico de muestras de bioaceite de pirólisis de olote crudo	105
Cuadro 55. Poder calorífico de muestras de bioaceite de pirólisis de olote cocido.....	105
Cuadro 56. Poder calorífico char de pirólisis olote crudo	106
Cuadro 57. Poder calorífico de char de pirólisis olote cocido	106

Cuadro 58. Estabilidad térmica bioaceite de olote crudo	106
Cuadro 59. Estabilidad térmica bioaceite olote cocido	107
Cuadro 60. Porcentaje de solubilidad de bioaceite de olote crudo y de olote cocido.....	107
Cuadro 61. Densidad de bulto del olote crudo	107
Cuadro 62. Densidad de bulto del olote cocido.....	108

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de biomasa.....	6
Figura 2. Partes del maíz.....	7
Figura 3. Esquema de reacción de pirólisis	13
Figura 4. Esquema del sistema de pirólisis	14
Figura 5. Esquema de pirólisis, con conexión a la red.....	17
Figura 6. Cromatograma	20
Figura 7. Columna cromatográfica WAX	21
Figura 8. Productos de proceso de pirólisis de olote de maíz.....	25
Figura 9. Esquema vía de productos durante una reacción de pirólisis.	26
Figura 10. Análisis termogravimétrico de Olote crudo	42
Figura 11. Análisis termogravimétrico de Olote cocido	42
Figura 12. Espectro IR de Olote crudo.	45
Figura 13. Espectro FTIR de olote cocido.....	46
Figura 14. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote crudo	47
Figura 15. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote cocido	48
Figura 16. Distribución de compuestos carbonados del bioaceite a partir de olote crudo	52
Figura 17. Distribución de compuestos carbonados del bioaceite a partir de olote cocido	52
Figura 18. Análisis termogravimétrico Olote cocido muestra 1	80
Figura 19. Análisis termogravimétrico Olote cocido muestra 2	81
Figura 20. Análisis termogravimétrico Olote crudo Muestra 1	83
Figura 21. Análisis termogravimétrico Olote crudo Muestra 2	84
Figura 22. Espectro IR de muestra de olote crudo.....	85
Figura 23. Espectro IR demuestra de olote cocido	86
Figura 24. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote crudo	87
Figura 25. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote cocido	87
Figura 26. Bioaceite de olote crudo	88
Figura 27. Muestra de olote seco	88

Figura 28. Pruebas de densidad real con etanol.....	89
Figura 29. Sistema para llevar a cabo el proceso de pirólisis de olote crudo y olote cocido.....	89
Figura 30. Biochar resultante del proceso de pirólisis de olote crudo.....	90
Figura 31. Cromatograma Muestra 1 bioaceite de Olote crudo.....	95
Figura 32. Cromatograma Muestra 2 bioaceite de Olote crudo.....	96
Figura 33. Cromatograma Muestra 3 bioaceite de Olote crudo.....	97
Figura 34. Cromatograma Muestra 4 bioaceite de olote crudo.....	98
Figura 35. Cromatograma Muestra 1 bioaceite de Olote cocido.....	99
Figura 36. Cromatograma Muestra 2 bioaceite de Olote cocido.....	100
Figura 37. Cromatograma Muestra 3 bioaceite de Olote cocido.....	101
Figura 38. Cromatograma muestra 4 bioaceite de olote cocido.....	102

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de tamaño de muestra.	35
Ecuación 2 Determinación de la media.....	109
Ecuación 3 Determinación de Desviación Estándar	109
Ecuación 4 Determinación de coeficiente de variación	109

RESUMEN

El presente trabajo de graduación evalúa la viabilidad del olote de maíz, en estado crudo y cocido, como materia prima para la obtención de bioaceite mediante pirólisis a escala de laboratorio. Para ello se realizó la caracterización fisicoquímica de la biomasa (humedad, densidad y tamaño de partícula), análisis termogravimétrico, balances de masa y energía, y la caracterización de los productos obtenidos, con énfasis en el bioaceite, mediante pruebas fisicoquímicas y cromatografía de gases.

Los resultados evidenciaron que el olote cocido presentó un mayor rendimiento de productos volátiles, con 17.86 % m/m de bioaceite y 32.22 % m/m de gas de síntesis, frente a 13.25 % m/m y 20.39 % m/m obtenidos con olote crudo, respectivamente. La prueba t confirmó diferencias estadísticamente significativas en la distribución de productos. El bioaceite obtenido tanto de olote crudo como de olote cocido presentó una densidad aproximada de 1030 kg/m³, una viscosidad de 1.9 cSt, una solubilidad del 80 % y un poder calorífico de 17–18 MJ/kg, valores que se encuentran dentro del rango reportado para bioaceites de origen lignocelulósico.

La cromatografía reveló una composición dominada por compuestos oxigenados volátiles de bajo peso molecular, de C1-C9 para el bioaceite de olote crudo y C1-C7 para el bioaceite de olote cocido, lo que confirma su naturaleza polar y su potencial como co-solvente bio-based en aplicaciones industriales como recubrimientos, adhesivos y limpieza. Este uso se sustenta con las propiedades fisicoquímicas obtenidas: en el crudo se midieron 1.876 cSt, 78.35 % m/m de solubilidad y 1031.250 kg/m³; en el cocido, 1.956 cSt, 81.9 % m/m y 1029.167 kg/m³, respectivamente, valores que favorecen compatibilidad con matrices polares y estabilidad de mezclas. En energía, se recomienda su posible uso energético en esquemas de co-combustión con fuel-oil por su PCI intermedio (crudo de 17.0 MJ/kg y cocido de 17.9 MJ/kg).

I. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la población mundial y el incremento en la generación de residuos agrícolas han intensificado la búsqueda de tecnologías limpias que permitan valorizar subproductos orgánicos de manera eficiente y sostenible. Entre estas tecnologías, la pirólisis se destaca como un proceso de conversión térmica capaz de transformar biomasa lignocelulósica en productos de valor agregado, como bioaceite, biocarbón y gases combustibles (Fonseca Prieto, 2013; Klug, 2012).

Este proceso, que se realiza en ausencia de oxígeno, posibilita la fragmentación molecular del material, permite gestionar de manera sanitaria y ecológica diversos tipos de residuos, incluyendo plásticos, neumáticos, residuos urbanos orgánicos y agrícolas, como el olote de maíz (Gallego Villa et al., 2019). El proceso de pirólisis permite la recuperación de compuesto líquidos con potencial energético e industrial (Zubiolo et al., 2023). En Guatemala, el maíz constituye uno de los principales cultivos del sector agrícola, con una superficie de siembra que supera las 800 mil hectáreas anuales y una producción que representa un pilar fundamental tanto para la seguridad alimentaria como para la economía rural (MAGA, 2021). En este contexto, el olote, residuo lignocelulósico que queda tras el desgrane de la mazorca, resulta un residuo abundante y frecuentemente desaprovechado en Guatemala, que posee una composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que lo convierte en una materia prima con potencial para la obtención de compuestos de valor a través de este proceso.

Evaluar el comportamiento del olote de maíz, frente a un proceso de pirólisis permite explorar su viabilidad como materia prima para la obtención de bioaceite. Derivado de la importancia de este campo de investigación, el presente trabajo establece una correlación en la comparación entre el olote crudo y cocido sometidos a pirólisis, analizando cómo sus características fisicoquímicas influyen en el rendimiento y en la calidad del bioaceite obtenido. En las secciones posteriores se desarrollan la metodología experimental, los resultados de las pruebas de caracterización y el análisis comparativo, con el fin de fundamentar la viabilidad del olote de maíz como una materia prima prometedora dentro de esquemas de conversión energética sostenibles.

Realizar pruebas fisicoquímicas y análisis por cromatografía de gases del bioaceite obtenido permite estimar su composición química, lo que resulta clave para definir sus posibles aplicaciones como combustible alternativo o como insumo en la industria química. A esto se suma el análisis termogravimétrico del olote, que brinda información sobre su descomposición térmica, permitiendo establecer el rango operativo del proceso y la proporción de masa transformada. En conjunto, estos resultados proporcionan una base técnica para valorar la viabilidad del olote como materia prima y definir sus posibles aplicaciones como combustible alternativo o como insumo en la industria química.

Aportando información para su aprovechamiento dentro de esquemas de gestión de productos químicos y conversión energética a partir de residuos agrícolas.

Derivado de la importancia de este campo de investigación, el presente trabajo de graduación establece una correlación en la comparación entre el olote crudo y cocido sometidos a pirólisis, analizando cómo sus características fisicoquímicas influyen en el rendimiento y en la calidad del bioaceite obtenido. De esta manera, el trabajo aporta evidencia científica y técnica sobre la valorización de un residuo agrícola abundante en Guatemala, generando conocimiento aplicable para el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles y la optimización de procesos de conversión de biomasa en productos de valor agregado.

II. JUSTIFICACIÓN

El maíz (*Zea mays*) es el grano más producido a nivel mundial, con una proyección de 1,264 millones de toneladas para la campaña 2025 (USDA, 2025). Su uso abarca desde la alimentación humana hasta la industria y la ganadería, lo que genera una alta demanda global y, en consecuencia, una gran cantidad de residuos. El olote, que representa entre el 20 % y el 30 % de la masa total de la mazorca (Micolucci, 2019), constituye una fracción significativa de estos desechos agrícolas. Pese a su abundancia, suele ser descartado sin aprovechamiento, lo que representa una pérdida de biomasa con potencial de aprovechamiento. Esta situación plantea la necesidad de buscar alternativas tecnológicas para su valorización.

En países como Guatemala, donde la agricultura juega un rol fundamental en la economía, y subproductos como el olote de maíz, que son generados en grandes cantidades, pueden ser aprovechados de manera más eficiente. En Guatemala, con una producción anual que supera los 2 millones de toneladas de maíz, se estima que entre el 50% y el 60% de esta cantidad corresponde a residuos agrícolas como tallos, hojas y olotes. Estos residuos, que a menudo son descartados o quemados de manera ineficiente, representan una valiosa oportunidad para la generación de biocombustibles y otros productos de interés, como el bioaceite, biocarbón y gases de síntesis, resultantes de un proceso de pirólisis, contribuyendo al desarrollo de alternativas en el manejo de residuos (USDA, 2019).

A pesar de los aportes que puede dar la pirólisis en el tratamiento de residuos de maíz, en las condiciones de Guatemala, no se encontró información sobre el impacto que el proceso de la mazorca tiene en la generación de bioaceite con esta técnica. Dado que el consumo del maíz cocido es predominante en la dieta guatemalteca, resulta relevante analizar cómo el tratamiento térmico previo (cocción) modifica las propiedades fisicoquímicas del residuo y su posterior comportamiento térmico (Aladin et al., 2018).

Es por esto que este trabajo de investigación determinó el efecto del proceso de cocción sobre el comportamiento del olote durante la pirólisis, por medio de la determinación de sus características fisicoquímicas, poderes caloríficos y análisis cromatográficos de los bioaceites generados. Esto permitirá establecer una relación clara entre las condiciones del tratamiento previo y la calidad del producto obtenido, contribuyendo así al desarrollo de procesos más eficientes de valorización de residuos agrícolas. Además, se identificó cuál de las diferentes materias primas de olote, sometidas a distintos tratamientos, ofrece el mayor rendimiento másico, proporcionando una base comparativa para evaluar la potencial aplicación del bioaceite obtenido.

Con esta base, futuros estudios podrán orientarse hacia la optimización de las condiciones de pirólisis, la mejora en la calidad del bioaceite y la evaluación de su aplicación a mayor escala, lo que permitiría generar un impacto social y ambiental más

significativo. La valorización del olote de maíz no solo representa una alternativa para el aprovechamiento de residuos agrícolas en Guatemala, sino que también abre la posibilidad de sustituir parcialmente combustibles fósiles, disminuir la presión sobre vertederos y contribuir a esquemas de economía circular y sostenibilidad energética en la región.

III. OBJETIVOS

A. General

- Pirolizar olote de maíz cocido y crudo para la evaluación de dicho residuo como materia prima de bioaceite, por medio de análisis fisicoquímicos del producto obtenido en fase líquida.

B. Específicos

- Realizar análisis termogravimétrico y fisicoquímicos del olote de maíz con y sin cocción, como el contenido de humedad, capacidad calorífica, y densidad aparente, para caracterizar la materia prima.
- Llevar a cabo un proceso de pirólisis a partir de olote crudo y cocido a mismas condiciones para determinar el rendimiento de los productos, y así identificar la materia prima que resulte en un mayor rendimiento másico para identificar si el proceso de cocción afecta de manera positiva o negativa.
- Caracterizar los bioaceites obtenidos por medio de una cromatografía de gases y análisis fisicoquímicos con la finalidad de estimar su composición química y proponer sus usos.

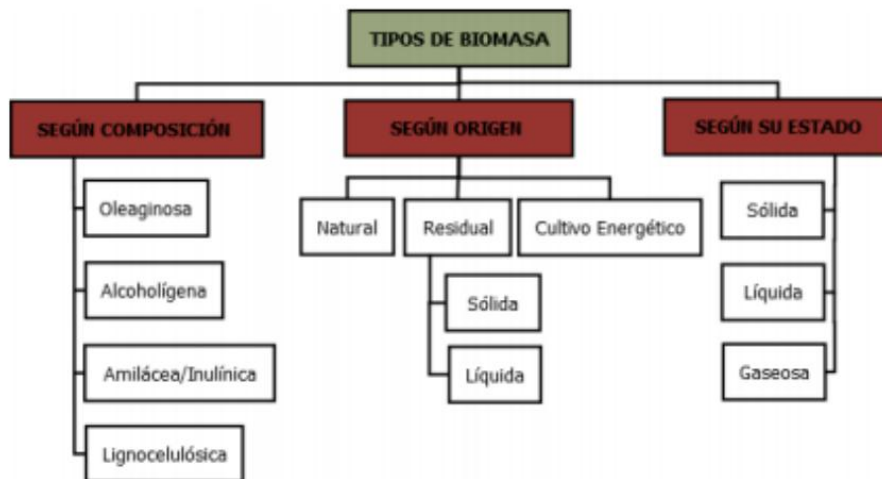
IV. MARCO TEÓRICO

A. Olote de maíz

Se le llama biomasa a todo tipo de materia orgánica, tanto de origen animal como vegetal, que pueda servir como combustible, y esté formada a través de la fotosíntesis directamente (vegetales) o indirectamente (digestión de vegetales).

De acuerdo con esta definición, todos los productos que componen la biomasa vienen de la energía solar, ya que todos provienen de la fotosíntesis, y este proceso, sin el Sol, no sería posible. En energía, la biomasa se considera estrictamente como tal cuando la materia está con disponibilidad y con las propiedades adecuadas para su uso energético. La biomasa se puede clasificar de distintas maneras, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Clasificación de biomasa



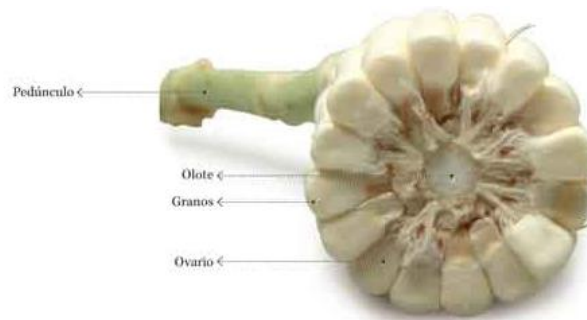
- Según su origen, se distinguen tres tipos:
 1. Biomasa natural, aquella que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas no intervenidos por el ser humano.
 2. Biomasa residual, conformada por los residuos generados por actividades humanas y vertidos biodegradables, tanto sólidos como líquidos. Dentro de este grupo se incluyen residuos forestales, agrícolas, ganaderos, sólidos urbanos, aguas residuales y aceites alimentarios usados.
 3. Cultivos energéticos, que corresponden a cultivos no destinados al consumo alimentario, sino específicamente a la producción de energía.
- Según su estado físico, la biomasa puede clasificarse en:
 1. Sólida, que engloba a la madera y sus derivados (residuos de carpintería, papelera, podas, etc.).

2. Líquida, que incluye residuos ganaderos, aguas residuales urbanas, residuos industriales biodegradables y, en algunos casos, aceites y biocarburos.
 3. Gaseosa, constituida principalmente por biogás y metano producido a partir de residuos animales, agroalimentarios, vertederos y escombreras.
- Según su composición, la biomasa se clasifica en cuatro grandes grupos:
 1. Oleaginosa, proveniente de semillas ricas en aceites.
 2. Alcohólica, derivada de materias con alto contenido de azúcares fermentables, como pulpas de fruta, caña de azúcar o remolacha.
 3. Amilácea o inulínica, que incluye cultivos ricos en almidón o inulina, como patatas, cereales o achicoria.
 4. Lignocelulósica, conformada principalmente por celulosa (~50 %), hemicelulosa (~30 %) y lignina (~20 %), que constituyen la pared celular de la biomasa vegetal. Esta fracción es particularmente relevante para procesos termoquímicos como la pirólisis, ya que su carácter seco y alto contenido en carbono (~49 %) la hace más adecuada para la producción de biocombustibles. Además, presenta oxígeno (~44 %), hidrógeno (~6 %), nitrógeno (~0.3 %) y trazas de azufre.

El olote de maíz, subproducto del proceso de separación del grano, contiene celulosa (39%), hemicelulosa (31.2%) y lignina (22%) como componentes principales. Estos materiales lignocelulósicos son valiosos para aplicaciones energéticas y químicas debido a su alta resistencia natural y versatilidad en procesos como la hidrólisis y la fermentación (ResearchGate, 2024).

En Guatemala, el maíz es un cultivo básico que genera grandes cantidades de olote y otros residuos, subutilizados en su mayoría. La valorización de estos subproductos es clave para la sostenibilidad de la industria agrícola y la generación de productos con valor agregado (ResearchGate, 2024).

Figura 2. Partes del maíz



Nota. Según USDA, 2009 y Doebley, 2003.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del maíz

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Panicoideae
Tribu	Andropogoneae
Género	<i>Zea</i>
Especie	<i>Zea mays</i> L.
Subespecie	<i>Zea mays</i> l. ssp. <i>mays</i>

- Industria del maíz en Guatemala

La producción de maíz en Guatemala no solo sostiene la seguridad alimentaria del país, sino que también genera subproductos potencialmente aprovechables para biocombustibles y materiales. El olote es uno de los principales residuos agrícolas, cuyo tratamiento adecuado podría contribuir significativamente al desarrollo de energías renovables (ResearchGate, 2024).

- Olote como residuo

La investigación sobre residuos del maíz, específicamente tallos crudos y cocidos, revela una compleja interacción de atributos físicos y químicos con implicaciones significativas para la gestión de residuos, aplicaciones agrícolas y posibles usos industriales. El maíz, conocido científicamente como *Zea mays*, es una fuente nutricional vital para los humanos y una importante fuente de forraje para el ganado a nivel mundial, generando grandes cantidades de biomasa residual como tallos y olotes (Nawaz et al., 2018). Comprender las propiedades físicas de los residuos del maíz, como la densidad, porosidad y capacidad de absorción de agua, es crucial para determinar su adecuación en diversas aplicaciones (Zou et al., 2021). Los tallos crudos de maíz exhiben una estructura fibrosa, proporcionando resistencia mecánica que puede ser aprovechada en materiales compuestos (Zou et al., 2021). Las propiedades térmicas, incluyendo la capacidad calorífica específica y la conductividad térmica, son esenciales para evaluar su potencial como fuente de biocombustible o en aplicaciones de aislamiento térmico (Guo et al., 2014; Hussein et al., 2009). El proceso de cocción altera fundamentalmente la arquitectura física de los residuos del maíz mediante mecanismos como la gelatinización del almidón, ruptura de paredes celulares y redistribución de humedad, contribuyendo a cambios observables en textura, densidad y capacidad de retención de agua.

Químicamente, los residuos del maíz están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, y en menores cantidades por proteínas, lípidos y cenizas (Iswanto et al., 2021; Panthapulakkal & Sain, 2007). Las proporciones relativas de estos componentes varían según la variedad del maíz, la etapa de crecimiento y el método de procesamiento (Ibrahim et al., 2019).

El olote de maíz, frecuentemente considerado como un subproducto agrícola, presenta una composición heterogénea caracterizada principalmente por componentes lignocelulósicos, por lo que es necesario un análisis exhaustivo de sus diversas propiedades fisicoquímicas. Entender estas características es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de valorización, incluyendo su conversión en biocombustibles, materiales de base biológica y diversos productos de alto valor añadido (Shuppar & Kadhem, 2021). Se ha explorado especialmente su microestructura junto con su composición química, densidad, absorción de agua, resistencia al fuego y capacidad de aislamiento térmico, demostrando su naturaleza compleja y potencial para múltiples aplicaciones (Zou et al., 2021).

Las propiedades mecánicas del olote de maíz están significativamente influenciadas por su estructura en capas y composición fibrosa, determinadas mediante técnicas avanzadas de microscopía y espectrometría (Zou et al., 2021). La parte interna presenta una consistencia similar al plástico espumado, y su composición lignocelulósica incluye celulosa, hemicelulosa y lignina (Onuoha et al., 2017).

- *Zea mays saccharata sturt*

El maíz dulce (*Zea mays saccharata Sturt*) es una subespecie hortícola del maíz común, cultivada principalmente para consumo en fresco y como materia prima para la industria de conservas (Çetinkol, 1989; Turgut, 2000). Su particularidad radica en que presenta mutaciones en genes como sugary (su1), shrunken-2 (sh2) y sugary enhancer (se1), que reducen la síntesis de almidón y provocan la acumulación de azúcares solubles en el endospermo, otorgándole el sabor dulce característico (Sidahmed, Vad & Nagy, 2025).

- Características morfológicas y fisiológicas

Cada tallo de maíz dulce debe producir al menos una mazorca grande. Los granos, de color amarillo, blanco o bicolor, se cosechan en estado lechoso, lo que permite su consumo como hortaliza más que como cereal (Çetinkol, 1989). En su estado maduro, el grano está formado por pericarpio, testa, endospermo y embrión, igual que otras variedades de maíz, pero con proporciones distintas de almidón y azúcares (Turgut, 2000).

- Composición nutricional

El maíz dulce contiene en promedio: 3.35 g/kg de proteína, 10 g/kg de aceite, 221 g/kg de carbohidratos, 0.03 g/kg de calcio, 1.11 g/kg de fósforo y 2.8 g/kg de potasio (Çetinkol, 1989). Además, se considera fuente de fibra, carotenoides y compuestos antioxidantes que aportan beneficios nutricionales y funcionales (Sidahmed et al., 2025)

B. Proceso de cocción

La cocción del olote de maíz, como parte de su procesamiento térmico, altera significativamente sus propiedades físico-químicas, mejorando su potencial para diversas aplicaciones industriales y energéticas.

- Transformaciones físicas:
 - Reducción de tamaño de partículas: La cocción a altas temperaturas facilita la fragmentación del material, incrementando la superficie específica disponible para reacciones químicas o aplicaciones como adsorción.
 - Cambios en densidad aparente: El tratamiento térmico puede aumentar la porosidad del olote, disminuyendo su densidad aparente y haciéndolo más ligero y manejable para procesos de transporte y almacenamiento (Córdoba et al., 2013).

- Cambios químicos:
 - Eliminación de compuestos volátiles: Durante la cocción, se eliminan componentes como agua y compuestos orgánicos ligeros, concentrando el contenido de carbono.
 - Descomposición parcial de la hemicelulosa y celulosa: Estos polímeros se degradan parcialmente, facilitando su posterior conversión a azúcares fermentables o bioaceites en procesos como la pirólisis (Córdoba et al., 2013).
 - Mejoramiento del poder calorífico: Al reducirse el contenido de humedad y aumentarse la concentración de carbono, el poder calorífico del olote cocido es mayor, haciéndolo más eficiente como biocombustible (Córdoba et al., 2013).

- Propiedades adsorbentes (tamaño):

La cocción promueve el desarrollo de microporos en la estructura del olote, mejorando su capacidad para adsorber contaminantes en aplicaciones como tratamientos de agua o suelos.

Estos cambios posicionan al olote cocido como una materia prima más adecuada para procesos industriales como la producción de biocombustibles y adsorbentes para la remediación ambiental (Córdoba et al., 2013).

C. Propiedades físicas y químicas de los residuos

La densidad aparente del olote determina su manejabilidad en el transporte y almacenamiento. Valores bajos implican mayor volumen requerido y afectan la eficiencia en procesos industriales (Fonseca Prieto, 2013).

El contenido de humedad del olote suele encontrarse entre 8 y 12 % en base seca, aunque puede variar según el manejo poscosecha. Este parámetro es fundamental, ya que altos

contenidos reducen el poder calorífico y favorecen la formación de agua en los productos líquidos de la pirólisis (Ogunjobi & Lajide, 2013; John & Brian, 2020).

Aunque la viscosidad no es una propiedad de la biomasa cruda, la viscosidad del bioaceite obtenido a partir del olote es relevante, ya que determina su capacidad de bombeo y uso directo como combustible. Se ha reportado que bioaceites de maíz presentan viscosidades en el rango de 2–13 cSt a 40 °C, dependiendo de las condiciones de pirólisis (Zubiolo et al., 2023).

El poder calorífico superior (PCS) del olote se encuentra alrededor de 16–18 MJ/kg, lo cual lo convierte en una fuente viable de energía en procesos termoquímicos (Klug, 2012; Fonseca Prieto, 2013).

El olote presenta un contenido de cenizas entre 1 y 2 %, valor bajo en comparación con otros residuos agrícolas. Esto favorece su uso en procesos de pirólisis y combustión, ya que reduce la formación de inorgánicos volátiles y escorias (Aladin et al., 2018).

Estudios reportan que el olote contiene aproximadamente 45–48 % de C, 5–6 % de H, 0.5–1 % de N, <0.1 % de S y 45–48 % de O, lo que evidencia su carácter lignocelulósico y su potencial para generar bioaceite con alto contenido de oxigenados (Zubiolo et al., 2023; Ogunjobi & Lajide, 2013).

D. Pirólisis

La pirólisis, un proceso termoquímico de descomposición realizado en ausencia de oxígeno, posee un gran potencial para convertir una amplia gama de materiales orgánicos, incluyendo biomasa y plásticos residuales, en productos energéticos valiosos y materias primas químicas. Este proceso implica calentar el material a altas temperaturas, lo que provoca su descomposición en una mezcla de productos sólidos (carbón), líquidos (bioaceite) y gaseosos (Guizani et al., 2017; Ibrahim, 2020). Las proporciones relativas de estos productos pueden ser ajustadas mediante la variación de parámetros del proceso como temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y la presencia de catalizadores (Marmiroli et al., 2018). Particularmente, la pirólisis rápida ha surgido como una tecnología comercialmente viable para producir una alta cantidad de líquido rico en compuestos orgánicos, ofreciendo una vía para transformar biomasa lignocelulósica en químicos de base biológica (Carrier et al., 2017). La pirólisis se destaca como un método versátil, aplicable a diversas escalas, permitiendo adaptar los rendimientos y características del producto mediante un control cuidadoso de los parámetros del proceso (Maschio et al., 1992). Dependiendo de las condiciones específicas empleadas, la pirólisis puede

optimizarse para producir bioaceite, biochar o gas de síntesis, cada uno con aplicaciones particulares.

La fracción líquida obtenida de la pirólisis rápida, comúnmente conocida como bioaceite, representa un intermediario versátil con múltiples aplicaciones (Bridgwater, 2007). Puede ser directamente combustido para generación de calor y energía o transformado en combustibles de transporte mediante diversos procesos de refinamiento (Meier, 2017).

- Tipos de pirólisis

Existen diferentes tipos de pirólisis. Cada una de ellas tiene diferentes condiciones en el proceso, lo cual favorece la generación de diferentes productos. Entre estos tipos de pirólisis se encuentran las siguientes:

- Pirólisis flash

La pirólisis flash, también conocida como pirólisis rápida, se distingue por su elevada velocidad de calentamiento y tiempos de residencia muy breves. Este proceso no depende únicamente de la cinética química, sino también de mecanismos de transferencia de calor y masa, así como de fenómenos asociados al cambio de fase. En esta modalidad, la biomasa se descompone principalmente en vapores, aerosoles y cierta cantidad de coque. Una vez que estos productos se enfrían y condensan, se obtiene un bioaceite de color marrón oscuro. Para asegurar un rendimiento elevado del líquido, es fundamental un control preciso de las condiciones operativas (Bridgwater, 2001).

Previo al proceso, la materia prima debe secarse hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 10 %, y debe someterse a una molienda fina para garantizar partículas pequeñas que favorezcan una conversión rápida y eficiente. Una ventaja destacable de esta técnica es su versatilidad, ya que prácticamente cualquier tipo de biomasa puede ser utilizada como materia prima (Klug, 2012).

- Pirólisis lenta

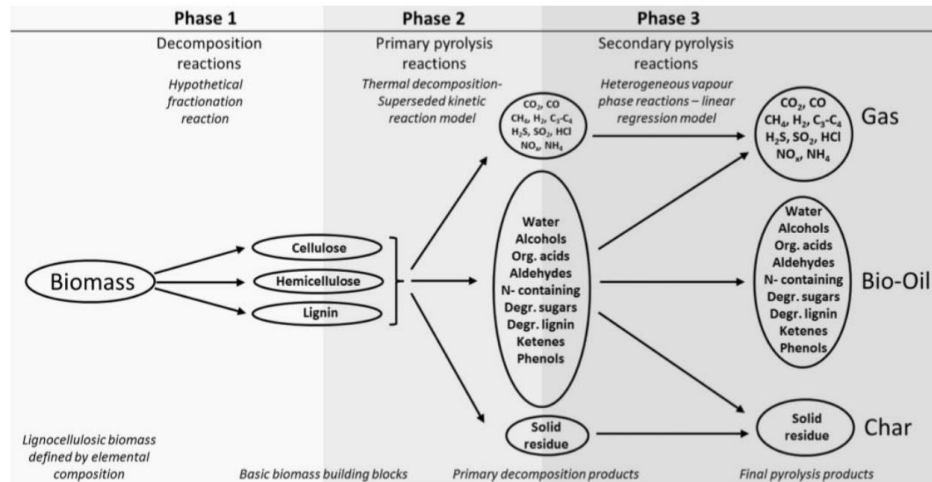
La pirólisis lenta se caracteriza por desarrollarse a temperaturas moderadas, generalmente entre 300 y 500 °C, con velocidades de calentamiento bajas y tiempos de residencia prolongados, que pueden durar desde varios minutos hasta horas. Este tipo de proceso favorece la producción de residuos sólidos, como el biochar o carbón vegetal, por lo que es ampliamente utilizado en aplicaciones agrícolas y en la generación de combustibles sólidos. Dado que la conversión térmica ocurre de forma gradual, se maximiza la formación de carbón, aunque se limita la generación de líquidos y gases en comparación con otros tipos de pirólisis más rápidos (Klug, 2012).

○ Pirólisis instantánea

La pirólisis instantánea es una forma extremadamente rápida de descomposición térmica que se lleva a cabo con tasas de calentamiento muy elevadas. Sus principales productos son gases ligeros y bioaceite. Este proceso es comúnmente empleado en estudios cinéticos o en sistemas donde se requiere una conversión casi inmediata de la biomasa. Aunque el rendimiento en líquidos suele ser menor que en la pirólisis rápida convencional, esta técnica ofrece una alta eficiencia en la degradación térmica de la materia orgánica en escalas de tiempo muy reducidas (Klug, 2012).

El esquema muestra las rutas de reacción que tienen lugar durante la pirólisis de biomasa, diferenciando los productos en fase sólida, líquida y gaseosa. La biomasa, al someterse a calentamiento, se descompone en vapores primarios oxigenados y en un residuo carbonizado. Los vapores evolucionan hacia hidrocarburos livianos, olefinas, compuestos aromáticos y oxigenados, los cuales pueden condensarse para formar líquidos primarios y aceites ricos en fenoles y aromáticos. Simultáneamente, se liberan gases no condensables como CO, CO₂, H₂ y CH₄, mientras que bajo condiciones más severas se produce coque y hollín. De esta manera, el diagrama ilustra cómo la severidad de la pirólisis y la presión del sistema determinan el predominio relativo de bioaceite, gases y residuos carbonosos.

Figura 3. Esquema de reacción de pirólisis

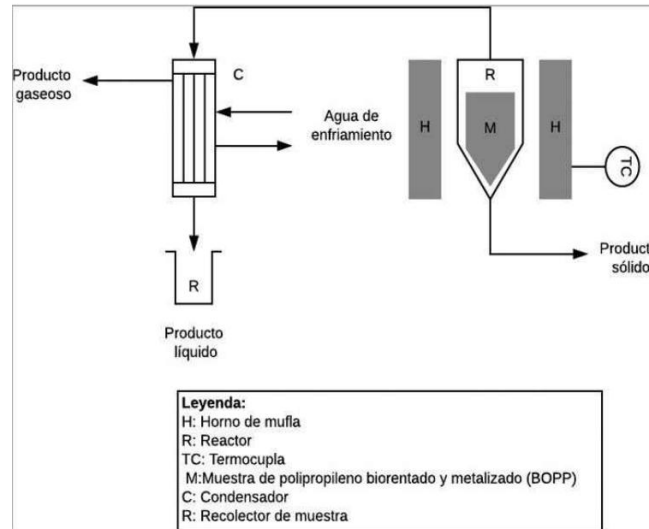


Nota. Fernández, 2020.

En la Figura 4 se presenta un esquema de un sistema de pirólisis en laboratorio. En este caso, la muestra se coloca en un reactor ubicado dentro de un horno de mufla, el cual se calienta hasta alcanzar la temperatura de reacción. Los vapores generados pasan a un condensador enfriado con agua, donde se obtiene la fracción líquida (bioaceite). El gas no

condensado se recolecta como producto gaseoso, mientras que el residuo sólido (biochar y cenizas) permanece en el reactor.

Figura 4. Esquema del sistema de pirólisis



Nota. Paniagua & Núñez González, 2022.

E. Balance de masa y energía

Los balances de masa y energía constituyen la base del análisis de procesos en ingeniería química, ya que permiten describir cuantitativamente lo que ocurre en un sistema determinado, evaluando tanto el flujo de materia como de energía. Son esenciales para el diseño, operación, optimización y control de plantas industriales, incluyendo aquellas dedicadas a procesos termoquímicos como la pirólisis de biomasa (UNADM, 2020).

- Balance de masa

El balance de masa se basa en la ley de conservación de la masa, la cual establece que la materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma. En un sistema cerrado o abierto, esto se traduce en que la diferencia entre la entrada y salida de masa, más cualquier generación o consumo interno, debe igualar la acumulación dentro del sistema. La ecuación general se puede expresar como: $\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$

En muchos procesos físicos sin reacción química, como el secado o la separación, los términos de generación y consumo son cero, por lo que el balance se simplifica a:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Acumulación}$$

Cuando el proceso ocurre en estado estacionario, es decir, sin variaciones con el tiempo, el término de acumulación también desaparece, resultando en: $\text{Entrada} = \text{Salida}$.

La correcta formulación de un balance de masa exige una definición clara del sistema y sus fronteras. Estas fronteras pueden ser físicas o imaginarias, y deben definir con precisión qué corrientes entran y salen. La selección adecuada de la frontera del sistema facilita los cálculos, permite reducir el número de incógnitas y delimita el análisis a lo esencial (UNADM, 2020).

- Balance de energía

El balance de energía también se apoya en una ley de conservación: la energía total de un sistema permanece constante, aunque puede cambiar de forma. En los balances energéticos se consideran diferentes tipos de energía, como:

- Interna (U)
- Cinética (E_c)
- Potencial (E_p)
- Trabajo (W)
- Calor (Q)

La ecuación general del balance de energía para un sistema cerrado se expresa como:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q - W$$

En sistemas abiertos, donde hay entrada y salida de masa, se debe considerar además la entalpía (H) transportada por los flujos, así como el trabajo de flujo. La ecuación se ajusta a: $\sum \text{Salidas} - \sum \text{Entradas} = \dot{Q} - \dot{W}$

Estas ecuaciones permiten calcular requerimientos energéticos, pérdidas por calor, eficiencias, y estimar el dimensionamiento térmico de equipos.

En procesos reales, especialmente en plantas químicas o bioenergéticas, es habitual la necesidad de realizar balances simultáneos de masa y energía, ya que los flujos de materia están ligados a las transformaciones térmicas. Estos balances pueden formularse en estado estacionario o transitorio (cuando las variables cambian con el tiempo), y suelen requerir resolver sistemas de ecuaciones algebraicas o diferenciales (UNADM, 2020).

- Un ejemplo concreto es la pirólisis del olote de maíz, donde se aplica un balance de masa para cuantificar la fracción sólida (char), líquida (bioaceite) y gaseosa, mientras que el balance de energía permite calcular el calor requerido para alcanzar las temperaturas deseadas del proceso (350–500 °C) bajo atmósfera inerte. En este contexto, la selección de la frontera puede abarcar únicamente el reactor, o incluir también el sistema de recolección de productos, dependiendo del objetivo del análisis (UNADM, 2020). Tipos de sistemas:

En función de sus intercambios con el entorno, un sistema puede clasificarse como:

- Abierto: intercambia masa y energía con el entorno (como un reactor continuo).
- Cerrado: solo intercambia energía, no masa (por ejemplo, un recipiente sellado con calentamiento).
- Aislado: no intercambia ni masa ni energía.

La clasificación del sistema influye en las condiciones de contorno del balance y en los términos que deben incluirse en las ecuaciones.

F. Diagrama de proceso

En ingeniería química, los diagramas de flujo son herramientas esenciales para representar y comunicar de manera clara la estructura de un proceso. Estos diagramas ayudan a visualizar las operaciones, las corrientes de materia y energía, y la interacción entre los equipos, facilitando tanto el diseño como la operación de plantas industriales.

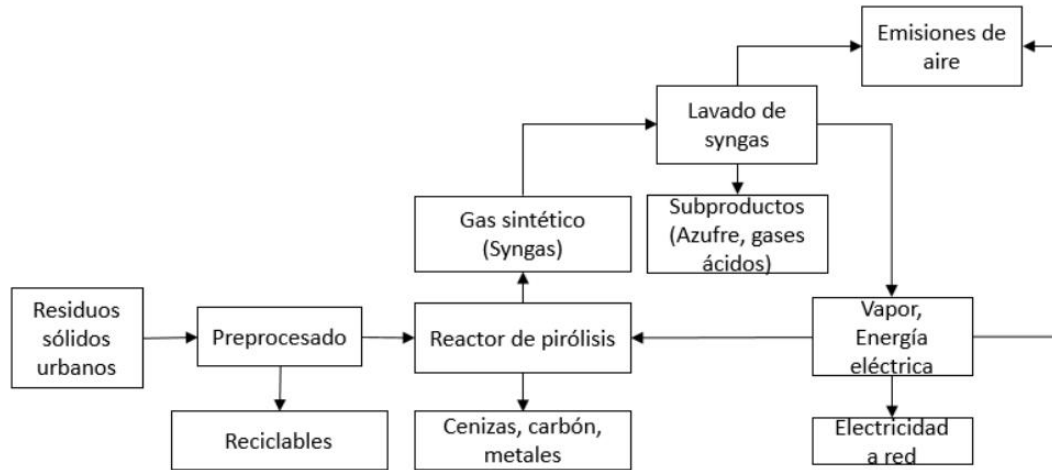
- Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es una representación esquemática simplificada que muestra únicamente las etapas principales de un proceso, cada una como un bloque o caja, conectadas por flechas que indican el flujo de materiales o energía. Este tipo de diagrama omite detalles técnicos, pero es útil para proporcionar una visión general del proceso, especialmente en etapas preliminares de diseño o en presentaciones para audiencias no técnicas.

Según *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, los diagramas de flujo de bloques muestran “las unidades de proceso principales conectadas mediante líneas de flujo que indican la secuencia general del proceso, sin incluir detalles sobre equipos específicos ni condiciones operativas” (Green & Southard, 2008).

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de diagrama de bloques aplicado al aprovechamiento de residuos sólidos urbanos mediante pirólisis. El esquema muestra cómo los residuos, tras un preprocesado para la recuperación de materiales reciclables, son alimentados a un reactor de pirólisis donde se generan gas sintético, cenizas, carbón y metales. El gas obtenido se somete a un sistema de lavado para eliminar compuestos no deseados, dando lugar a subproductos como azufre y gases ácidos, mientras que el syngas limpio se emplea en la producción de vapor y energía eléctrica, con la posibilidad de inyectar electricidad a la red.

Figura 5. Esquema de pirólisis, con conexión a la red



G. Tratamiento y análisis estadístico de datos

En el análisis estadístico de datos experimentales, especialmente en estudios de ingeniería y procesos productivos como la pirólisis, es fundamental aplicar medidas de tendencia central y dispersión que permitan describir y comparar conjuntos de datos. Entre las más relevantes se encuentran el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, herramientas estadísticas que permiten evaluar la consistencia, precisión y homogeneidad de los resultados.

- Promedio (Media aritmética)

El promedio es una medida de tendencia central que representa el valor típico o esperado de un conjunto de datos. Se calcula como la suma de todos los valores dividida entre la cantidad total de observaciones:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde \bar{x} es la media, x_i son los valores individuales y n es el número de observaciones. Esta medida es útil para resumir resultados como el rendimiento másico promedio de un producto, el contenido de humedad, o el poder calorífico promedio en procesos experimentales (Anderson et al., 2021).

- Desviación estándar

La desviación estándar cuantifica la variabilidad o dispersión de los datos con respecto al promedio. Una desviación estándar baja indica que los datos están concentrados cerca

del valor medio, mientras que una alta refleja una mayor dispersión o inestabilidad en el sistema. Se calcula con la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Este indicador es clave para evaluar la precisión de los datos obtenidos en experimentos repetitivos y establecer la confiabilidad del proceso analizado (Anderson et al., 2021).

- Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) es una medida relativa de dispersión, que expresa la desviación estándar como un porcentaje de la media:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

Este parámetro permite comparar la variabilidad entre diferentes conjuntos de datos que poseen unidades o escalas distintas. Por ejemplo, al analizar el rendimiento de bioaceite de distintas muestras de olote (crudo vs. cocido), el CV ayuda a identificar cuál de los dos presenta un proceso más estable o reproducible, independientemente de su valor medio (Anderson et al., 2021).

La prueba t de Student es una herramienta estadística que se utiliza para contrastar hipótesis sobre la media poblacional cuando la varianza de la población es desconocida y el tamaño de muestra es relativamente pequeño. Esta prueba se fundamenta en la distribución t de Student, la cual es similar a la distribución normal, pero con colas más largas, lo que permite incorporar la incertidumbre adicional derivada de estimar la desviación estándar a partir de la muestra (Anderson, Sweeney & Williams, 2011).

Existen diferentes aplicaciones de la prueba t según el diseño experimental: la prueba t para una muestra, que evalúa si la media de una población difiere de un valor hipotético; la prueba t para dos muestras independientes, que compara las medias de dos poblaciones distintas bajo la suposición de varianzas iguales o desiguales; y la prueba t para muestras relacionadas (o pareadas), que se emplea cuando las observaciones de ambas muestras se encuentran emparejadas o correlacionadas (Anderson, Sweeney & Williams, 2011).

La estadística de prueba se obtiene a partir de la diferencia entre la media muestral y el valor hipotético (o la diferencia entre medias), dividida por el error estándar de la media. El resultado se contrasta con los valores críticos de la distribución t para un nivel de significancia y grados de libertad determinados. El uso de esta prueba es fundamental en la investigación aplicada, ya que permite validar hipótesis con datos muestrales y controlar la probabilidad de cometer errores tipo I en la inferencia estadística (Anderson, Sweeney & Williams, 2011).

El cálculo del tamaño de muestra en pruebas de hipótesis no solo depende del nivel de confianza deseado, sino también de la potencia estadística requerida. Para el caso de comparar dos medias, se emplea la siguiente expresión:

$$n = \frac{2 \cdot (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 \cdot s^2}{(d)^2}$$

donde $Z_{\alpha/2}$ corresponde al valor crítico asociado al nivel de significancia, Z_{β} al error tipo II (potencia), s^2 es la varianza muestral y d la diferencia mínima que se desea detectar entre las medias. Esta formulación permite garantizar que el tamaño de la muestra sea suficiente para alcanzar una probabilidad adecuada de rechazar la hipótesis nula cuando realmente existe una diferencia significativa (Montgomery & Runger, 2014).

H. Cromatografía de gases GC masas

La cromatografía de gases (GC) es una técnica analítica ampliamente utilizada para separar e identificar los diferentes componentes de una mezcla volátil (Science with purpose, 2022). En esencia, un gas portador inerte (fase móvil) transporta la muestra a través de una columna que contiene un material sólido o líquido como fase estacionaria (Gas Chromatography Explained, 2023). Los compuestos presentes en la muestra se separan según su afinidad por la fase estacionaria (Gas Chromatography, 2020). A la salida de la columna, los componentes son detectados y cuantificados, generando un cromatograma que representa la cantidad de cada sustancia en función del tiempo (Gas Chromatography, 2020).

Esta técnica se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como el análisis de alimentos, productos farmacéuticos, compuestos químicos y muestras ambientales (Jwaili, 2019; Masucci & Caldwell, 2004). En particular, la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) se considera una herramienta poderosa, ya que combina la capacidad de separación de la cromatografía con el poder de identificación de la espectrometría de masas.

Los compuestos orgánicos volátiles presentes en los residuos crudos de maíz pueden ser eficazmente separados e identificados mediante GC/MS, lo que permite caracterizar con precisión su composición química.

La GC/MS es especialmente valiosa para el análisis de bioaceites derivados de la pirólisis de biomasa lignocelulósica, los cuales son mezclas químicamente complejas (Amrullah et al., 2021; Sfetsas et al., 2010). Esta técnica permite la identificación y cuantificación de una amplia gama de compuestos presentes en el bioaceite, como se detalla a continuación:

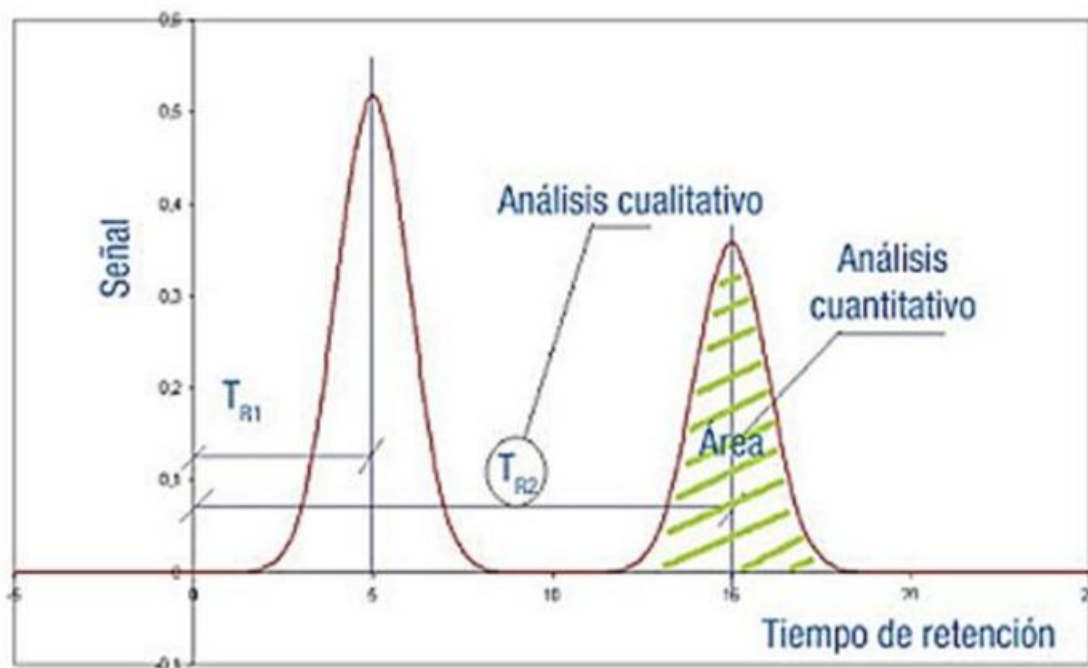
Identificación de componentes: GC/MS permite identificar compuestos como ácidos carboxílicos, fenoles, cetonas, hidrocarburos y otros compuestos oxigenados (Lu et al., 2011; Sfetsas et al., 2010).

Cuantificación de componentes: la cromatografía de gases puede utilizarse para determinar la concentración de cada compuesto, a través de métodos de calibración externa (Sfetsas et al., 2010; Grams, 2020).

Análisis cualitativo y cuantitativo: la combinación de GC y espectrometría de masas permite un análisis complementario tanto cualitativo como cuantitativo de la muestra (Undri et al., 2015).

Cabe destacar que la composición del bioaceite depende significativamente del tipo de biomasa utilizada y de las condiciones específicas del proceso de pirólisis (Sfetsas et al., 2010). Por lo tanto, el análisis mediante GC resulta fundamental para comprender su potencial y definir sus aplicaciones (Undri et al., 2015).

Figura 6. Cromatograma



Nota. Corzo, 2019.

La imagen corresponde a un cromatograma, que es la representación gráfica obtenida en un análisis cromatográfico. En el eje X se observa el tiempo de retención, mientras que en el eje Y se representa la señal detectada. Cada pico corresponde a un componente de la mezcla: su posición (tiempo de retención, t_{Rt_RtR}) permite la identificación cualitativa del

compuesto al compararlo con patrones de referencia, mientras que el área bajo el pico es proporcional a la concentración de dicho compuesto, lo que posibilita el análisis cuantitativo. De esta forma, la cromatografía cumple un doble propósito: identificar sustancias presentes y determinar sus concentraciones relativas en la muestra analizada (Corzo, 2019).

Figura 7. Columna cromatográfica WAX



Nota. Scharlab, 2025.

La columna mostrada corresponde a una columna capilar tipo WAX de la línea Agilent HP-Innowax, diseñada para cromatografía de gases. Se caracteriza por poseer una fase estacionaria de polietilenglicol (PEG) altamente polar, lo que la hace especialmente adecuada para la separación de compuestos oxigenados como alcoholes, aldehídos, ésteres y ácidos grasos volátiles. Estas columnas, disponibles en longitudes de 15 a 60 metros y diámetros internos de 0.25 a 0.53 mm, ofrecen alta resolución y reproducibilidad en la separación de mezclas complejas. Su uso es común en la industria alimentaria, farmacéutica, ambiental y petroquímica, donde permiten obtener cromatogramas con picos bien definidos que facilitan tanto la identificación cualitativa como la cuantificación precisa de los analitos (Agilent Technologies, 2025).

I. Análisis termogravimétricos

El análisis termogravimétrico es una técnica fundamental para determinar las características de descomposición térmica de las hojas de maíz crudas y cocidas, proporcionando un conocimiento exhaustivo sobre su composición y posible utilidad en diversos sectores industriales. Esta técnica analítica registra meticulosamente los cambios de masa que experimenta una sustancia al ser sometida a calentamiento controlado, ofreciendo información clave sobre estabilidad térmica, cinética de descomposición y

composición. El procedimiento implica someter una muestra de hoja de maíz a un gradiente térmico cuidadosamente regulado dentro de un analizador termogravimétrico, registrando simultáneamente las variaciones de peso.

La curva termogravimétrica resultante describe la reducción de peso en función de la temperatura, mientras que la curva derivada indica la velocidad de pérdida de masa, revelando así las temperaturas donde ocurre la descomposición más significativa. Al analizar estas curvas se pueden distinguir las diferentes etapas de descomposición, las temperaturas asociadas y las correspondientes pérdidas de peso, facilitando la identificación de los componentes de la muestra y su abundancia relativa (Ghalibaf et al., 2018). Entender el comportamiento de combustión de la biomasa es crucial para su aprovechamiento como fuente energética, bajo condiciones experimentales específicas (Khiari et al., 2019).

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica ampliamente utilizada para estudiar la descomposición térmica de biomasa lignocelulósicas, ya que permite observar la pérdida de masa en función de la temperatura y distinguir las etapas en las que se degradan sus principales componentes estructurales. De forma general, en la curva termogravimétrica se identifican tres zonas características. La primera corresponde a temperaturas inferiores a 200 °C, donde ocurre la evaporación de la humedad presente en el material y la liberación de compuestos volátiles de bajo peso molecular, como CO, CO₂ y sustancias extractables. Posteriormente, entre 200 y 400 °C se desarrolla la etapa más significativa de pérdida de masa, asociada a la descomposición térmica de la hemicelulosa y la celulosa, polímeros que se degradan liberando la mayor cantidad de productos volátiles. Finalmente, a temperaturas superiores a 580 °C tiene lugar una tercera etapa de degradación, caracterizada por una pérdida de masa más lenta y prolongada, atribuida principalmente a la lignina, cuya estructura aromática le confiere mayor estabilidad térmica y un rango de descomposición más amplio, que puede extenderse aproximadamente entre 200 y 600 °C. En este sentido, las curvas derivadas (DTG) permiten identificar con mayor claridad estas transiciones, en materiales lignocelulósicos: el pico principal suele corresponder a la descomposición de la celulosa, el hombro a menor temperatura se asocia a la hemicelulosa y la lignina se manifiesta en un intervalo amplio con degradación gradual (Mészáros et al., 2004; Müller-Hagedorn et al., 2003; Manals-Cutiño, Penedo-Medina & Giralt-Ortega, 2011).

J. Poder calorífico

El poder calorífico, también conocido como valor energético o capacidad calorífica, representa una propiedad termoquímica fundamental de los combustibles, ya que define la cantidad de calor liberado durante la combustión completa de una cantidad determinada de material. Esta métrica es particularmente relevante en el contexto de los bioaceites, los cuales son mezclas complejas de compuestos orgánicos derivados de la pirólisis de biomasa (Wood et al., 2013).

Comprender el poder calorífico de los bioaceites es esencial para evaluar su potencial como alternativa sostenible a los combustibles fósiles (Larptansuphaphol & Jitjumroonchokchai, 2019). Existen diversas técnicas analíticas utilizadas para determinar este parámetro, siendo la más común la calorimetría en bomba, la cual mide de manera directa el calor liberado durante la combustión en condiciones controladas (Tanquilut et al., 2020). La bomba calorimétrica es un instrumento diseñado específicamente para este propósito y, en el contexto del bioaceite, permite conocer la cantidad exacta de energía que se libera al quemar una muestra determinada en un entorno cerrado y estandarizado.

El poder calorífico del bioaceite está influenciado por diversos factores, entre ellos: la composición de la biomasa utilizada como materia prima, los parámetros del proceso de pirólisis y los tratamientos posteriores de refinamiento o mejora del producto. Se ha observado que temperaturas de proceso elevadas tienden a producir bioaceites con mayor poder calorífico (Chin et al., 2015). Sin embargo, aquellos bioaceites obtenidos a partir de biomasa con alto contenido de lignina suelen tener un poder calorífico inferior, debido a la mayor presencia de compuestos oxigenados que disminuyen la densidad energética del producto final (Meier, 2017).

El siguiente cuadro presenta el poder calorífico inferior (PCI) de distintos combustibles convencionales y del bioaceite obtenido de olote de maíz, expresado en J/g. Se observa que los combustibles fósiles como gasolina y diésel presentan los valores más altos, mientras que los alcoholes como etanol y metanol poseen valores intermedios.

Cuadro 2. Poder calorífico inferior de combustibles convencionales

Aceite/fluido	PCI	Unidades
Gasolina	42700	J/g
Diésel	42500	J/g
Etanol	27000	J/g
Metanol	20000	J/g

Nota. Perry et al., 2019.

K. Bioaceite

El bioaceite es la fracción líquida obtenida mayoritariamente a partir de la pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica. Este líquido de color oscuro y alta viscosidad es un producto intermedio de gran interés debido a su potencial como fuente de energía renovable y como materia prima para la industria química (Bridgwater, 2007).

Desde el punto de vista composicional, el bioaceite está formado por una mezcla compleja de compuestos orgánicos oxigenados, como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, furanos, fenoles y anhídros de azúcares (Meier, 2017). Su alta concentración de oxígeno (entre 35–50%), así como su contenido de agua (15–30%), son factores que afectan negativamente su estabilidad química, poder calorífico (usualmente entre 15–21 MJ/kg) y

compatibilidad con motores convencionales, por lo que en muchos casos requiere procesos de mejora como la hidrogenación o el craqueo catalítico (Zhang et al., 2013).

Entre sus principales aplicaciones se encuentra la generación directa de calor mediante combustión, la producción de energía eléctrica en turbinas adaptadas, y su uso como precursor de biocombustibles líquidos o productos químicos (Demirbaş, 2007). Sin embargo, su composición depende en gran medida del tipo de biomasa utilizada y de las condiciones del proceso de pirólisis, como la temperatura, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento (Mohan et al., 2006).

- Ventajas y desventajas del uso del bioaceite como combustible

El bioaceite, producto líquido de la pirólisis de biomasa como el olote de maíz, presenta ventajas significativas como fuente energética renovable, pero también enfrenta desafíos técnicos que limitan su uso directo como sustituto de combustibles fósiles.

Entre las ventajas principales se encuentra que es una fuente renovable y sostenible. El bioaceite se obtiene a partir de residuos agrícolas como el olote de maíz, lo que permite valorizar un subproducto abundante, reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye la huella de carbono del sector energético (Fonseca Prieto, 2013).

Otro factor ventajoso del bioaceite es usualmente su conversión de biomasa. En procesos optimizados de pirólisis lenta o rápida, se pueden alcanzar rendimientos del bioaceite de entre 40–70% en peso, dependiendo de las condiciones del reactor y del tamaño de partícula del olote (John & Brian, 2020; Aladin et al., 2018).

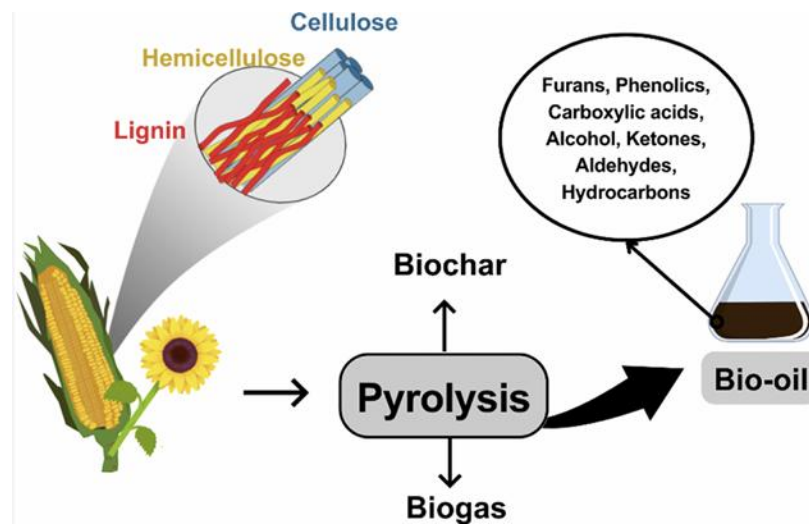
El poder calorífico del bioaceite se encuentra entre 16–20 MJ/kg, valor inferior al diésel pero útil en sistemas térmicos rurales o mixtos (Ogunjobi & Lajide, 2013)10889732. También puede utilizarse directamente en calderas adaptadas o mezclarse con fuel oil, evitando el uso de procesos de refinación costosos a corto plazo (Fonseca Prieto, 2013; Zubiolo et al., 2023).

Entre las principales desventajas del bioaceite, se tiene que el bioaceite presenta pH bajos (2.9–5.3), lo cual lo hace corrosivo para componentes metálicos en motores y calderas, requiriendo materiales resistentes o pretratamientos (Ogunjobi & Lajide, 2013)10889732.

Asimismo, contiene compuestos reactivos como aldehídos y ácidos orgánicos que pueden inducir polimerización o separación de fases con el tiempo, reduciendo su vida útil sin estabilización (Zubiolo et al., 2023). Aunque aceptable para usos térmicos, su poder calorífico (~17 MJ/kg) es significativamente menor al del diésel (~45 MJ/kg), lo cual implica mayor consumo por unidad de energía útil (Fonseca Prieto, 2013).

El bioaceite puede contener entre 15–30% de agua, lo cual afecta la combustión y disminuye el rendimiento térmico. Además, su alto contenido de oxígeno (~35–45%) reduce su eficiencia como combustible líquido (Zubiolo et al., 2023).

Figura 8. Productos de proceso de pirólisis de olote de maíz



Nota. Zubiolo et al., 2024

Finalmente, la necesidad de un tratamiento mezclado previo es una notoria desventaja del producto. Para su uso efectivo como combustible líquido, se requiere upgrading, como destilación, neutralización o hidrodeoxigenación, procesos que pueden ser costosos a pequeña escala (Ogunjobi & Lajide, 2013; Zubiolo et al., 2023).

- Aplicaciones del bioaceite

El bioaceite es uno de los productos principales obtenidos en el proceso de pirólisis de biomasa lignocelulósica, como el olote de maíz. Su interés industrial y energético se basa en su potencial como combustible renovable, así como en la posibilidad de extraer de él compuestos químicos de valor comercial.

Uno de los usos más directos del bioaceite es como combustible líquido para calderas o motores, aunque para ello puede requerir mejoras en estabilidad, reducción de acidez y disminución de contenido de agua y cenizas. En este sentido, Ogunjobi & Lajide (2013) señalan que el bioaceite obtenido de olote de maíz en Nigeria presentó una acidez moderada (pH ~5) y una viscosidad que permaneció estable incluso tras 10 meses de almacenamiento, lo cual es favorable para su uso energético. No obstante, también advierten que aunque el contenido de cenizas es bajo (0.10–0.12%), se requiere una depuración adicional si se pretende utilizar en motores de combustión interna.

Desde el punto de vista químico, el bioaceite contiene una gran variedad de compuestos derivados de la lignina y celulosa, como fenoles, guayacol, metoxifenoles y aldehídos, que pueden ser utilizados como precursores en la fabricación de resinas, adhesivos, colorantes, y antioxidantes (Ogunjobi & Lajide, 2013). Estos subproductos han despertado interés en la industria química como sustitutos de compuestos fósiles.

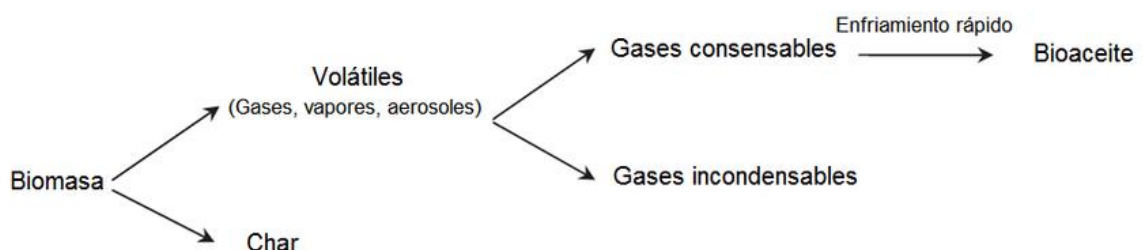
Además, el bioaceite puede ser separado en una fracción acuosa y una fracción viscosa. La fracción acuosa, según estos mismos autores, podría ser empleada para la producción de aromas o sabores naturales, así como en aplicaciones para el tratamiento de madera o mobiliario debido a sus propiedades químicas específicas.

Por otro lado, Zubiolo et al. (2023) destacan que el bioaceite derivado del olote de maíz y otros residuos agrícolas tiene un potencial considerable como materia prima en la industria petroquímica, ya que su composición incluye una fracción significativa de oxigenados como ácido acético, furfural, y compuestos fenólicos, útiles como intermediarios químicos.

Asimismo, según Fonseca Prieto (2013), el bioaceite representa una alternativa energética viable para zonas rurales, ya que su producción descentralizada a partir de residuos locales como el olote, puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados y fomentar un desarrollo energético más autónomo y sostenible.

El diagrama simplificado representa la división fundamental de productos durante la pirólisis de biomasa. Inicialmente, la biomasa genera dos corrientes principales: char o fracción sólida carbonosa, y volátiles en forma de gases, vapores y aerosoles. Los volátiles se clasifican en gases condensables, que mediante enfriamiento rápido se transforman en bioaceite, y gases incondensables, que permanecen en fase gaseosa como fracción combustible. Este esquema resalta la importancia del bioaceite como producto líquido de interés energético, así como la coexistencia inevitable de char y gases en el proceso.

Figura 9. Esquema vía de productos durante una reacción de pirólisis.



Nota. Osorio, 2020.

L. Char

El char, también conocido como carbón sólido, es un residuo carbonoso que se forma durante la degradación térmica de materiales orgánicos. Su formación ocurre a expensas de otras reacciones, como la producción de gases o compuestos volátiles, lo que implica que una mayor generación de char tiende a reducir el contenido energético utilizable en forma de bioaceite o gases combustibles. Sin embargo, este subproducto tiene aplicaciones relevantes en áreas como la remediación ambiental, la mejora del suelo agrícola y la producción de materiales con propiedades térmicas y eléctricas particulares (Wilkie & Morgan, 2024).

En el contexto de la pirólisis del olote de maíz, el char producido depende directamente de la composición lignocelulósica del residuo agrícola, especialmente de su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. Durante la degradación térmica de la celulosa, por ejemplo, pueden generarse productos volátiles o char, dependiendo de la vía de deshidratación que predomine (Wilkie & Morgan, 2024), dependiendo del proceso de pirólisis utilizado (Wilkie & Morgan, 2024).

- Propiedades del char

El char es un material complejo tanto en su estructura química como en su morfología. Está compuesto por una mezcla de compuestos aromáticos y alifáticos, a menudo con heteroátomos como oxígeno, nitrógeno, fósforo o azufre. Su estructura presenta regiones cristalinas y amorfas, y sus propiedades físicas (conductividad térmica, capacidad de absorción) y mecánicas (dureza, integridad) dependen tanto de su composición como de las condiciones bajo las que fue preparado (Wilkie & Morgan, 2024).

El proceso de pirólisis puede dar lugar a diferentes tipos de char según las condiciones del reactor (temperatura, atmósfera, tiempo de residencia) y la naturaleza del precursor. En muchos casos, el char puede adoptar una estructura turbostrática, es decir, una forma de carbono amorfo con algunas características de grafito, pero sin su orden tridimensional completo (Wilkie & Morgan, 2024).

- Factores que influyen en la formación de char

La formación de char está influenciada por múltiples factores. Uno de ellos es la estructura química del material de partida. Polímeros o biomasas con cadenas largas, anillos aromáticos y alta densidad de enlaces cruzados tienden a generar más char. En el caso del olote de maíz, su contenido en lignina favorece la formación de una fracción carbonosa más resistente a la degradación térmica, lo cual se refleja en un mayor rendimiento de char respecto a materiales con predominancia de celulosa o hemicelulosa.

Además, ciertos aditivos metálicos como compuestos de hierro, sodio o potasio pueden catalizar la formación de char, promoviendo reacciones de deshidratación y aromatización que estabilizan la estructura carbonosa. Por ejemplo, pequeñas concentraciones de K^+ o Na^+

aumentan significativamente el rendimiento de char a partir de celulosa, lo que indica un efecto catalítico sobre la formación de estructuras aromáticas estables (Wilkie & Morgan, 2024).

- Char vs. Biochar

Aunque los términos "char" y "biochar" a menudo se utilizan indistintamente, en el contexto de la pirólisis de biomasa es importante hacer una distinción. El biochar se refiere al char producido intencionalmente a partir de biomasa con fines agrícolas o medioambientales, como la mejora de la fertilidad del suelo o la captura de carbono. Su producción implica condiciones controladas para maximizar la estabilidad del carbono y minimizar los contaminantes. En cambio, el término "char" puede referirse de forma más general al residuo sólido de cualquier pirólisis, incluyendo la de plásticos u otras fuentes no renovables (Wilkie & Morgan, 2024).

En el caso de la pirólisis de olote de maíz, el char generado puede calificarse como biochar si cumple con criterios de estabilidad química y bajo contenido de impurezas. Su caracterización, por tanto, se vuelve esencial para evaluar su aplicabilidad posterior.

Durante la pirólisis lenta de olote de maíz, una fracción del material se transforma en char por mecanismos de deshidratación, aromatización y condensación de estructuras lignocelulósicas. Las condiciones de operación (temperatura entre 300 °C y 500 °C, atmósfera inerte, tiempo de residencia) determinan el equilibrio entre la producción de bioaceite, gases y char. A temperaturas más elevadas o con tiempos prolongados, se favorece la formación de estructuras más aromáticas y térmicamente estables, lo que incrementa el rendimiento de char pero puede disminuir el de fracciones líquidas.

En resumen, el char es un componente clave en la pirólisis del olote de maíz, tanto como indicador del grado de conversión térmica como por su potencial uso como biochar. Su formación, propiedades y estabilidad están intrínsecamente ligadas a la composición del sustrato y a las condiciones del proceso (Wilkie & Morgan, 2024).

M. Combustibles en el mercado

El mercado de los biocombustibles ha mostrado un crecimiento constante en las últimas décadas, impulsado por la necesidad global de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental asociado a su uso. Este cambio de paradigma responde a factores como la búsqueda de sostenibilidad energética, el cumplimiento de políticas ambientales internacionales y el aprovechamiento eficiente de recursos renovables. En este contexto, los productos derivados de residuos agroindustriales, como el olote de maíz, se perfilan como una alternativa competitiva frente a los combustibles convencionales debido a su bajo costo, disponibilidad abundante y carácter renovable. Además, su aprovechamiento no solo disminuye el volumen de desechos agrícolas, sino que también promueve el desarrollo de una economía circular, donde los residuos se

convierten en insumos valiosos para la generación de energía y otros productos de valor agregado (Biodisol, 2020).

Asimismo, el avance tecnológico en los procesos de pirólisis, gasificación y fermentación ha permitido mejorar la eficiencia y el rendimiento de biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos, incrementando su viabilidad técnica y económica en el mercado. En países con alta producción de maíz, como Guatemala, el uso de residuos como el olote no solo tiene un impacto positivo a nivel energético, sino que también puede impulsar el desarrollo rural, generar empleos y fortalecer la competitividad del sector agrícola e industrial, al integrar procesos innovadores en las cadenas productivas.

A nivel latinoamericano, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) destaca que los biocombustibles de bajo carbono son clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en sectores de difícil electrificación. En 2023, América Latina y el Caribe representó el 27 % de la producción mundial de biocombustibles líquidos, con un notable crecimiento interdecenal del 163 % en biodiésel y del 36 % en bioetanol (2023).

El olote de maíz es un residuo agroindustrial abundante, actualmente subutilizado, que contiene componentes como celulosa, hemicelulosa y lignina. Estudios guatemaltecos indican que el olote posee un alto contenido de humedad y un poder calorífico significativo, lo que lo convierte en un candidato viable para la producción de biocombustibles sólidos (como pellets o biochar) o líquidos tras procesos como la pirólisis o gasificación (Arroyo-López, 2019).

Este tipo de materia prima es de segunda generación, pues no compete con cultivos alimentarios y aprovecha residuos, promoviendo una economía circular que añade valor al sector agroindustrial mediante la valorización de residuos. El empleo de residuos como el olote favorece la reducción de emisiones al sustituir combustibles fósiles, colaborar con la gestión de residuos y fortalecer la sostenibilidad de sistemas agroindustriales. La integración de biocombustibles en la matriz energética nacional también responde a compromisos internacionales como las NDCs (Contribuciones Nacionalmente Determinadas) y los objetivos de desarrollo bajo en carbono.

Los combustibles derivados del petróleo como el fuel oil y el diésel constituyen la referencia más utilizada para evaluar biocombustibles líquidos obtenidos por pirólisis, debido a su amplia disponibilidad y a las propiedades físico-químicas que los hacen aptos para aplicaciones energéticas e industriales.

El Fuel Oil N° 2 corresponde a una fracción destilada media, empleada principalmente como combustible para calderas industriales y sistemas de calefacción. Según la norma ASTM D396, este combustible presenta una densidad de 860–930 kg/m³, una viscosidad cinemática entre 1.9 y 3.4 cSt a 40 °C, y un poder calorífico en torno a 42 MJ/kg, lo que lo

hace relativamente fácil de bombear y atomizar en quemadores industriales (Marine Public, 2023; Anton Paar, 2023).

El Fuel Oil N° 4 es un producto más pesado, resultado de la mezcla de destilados medios con residuos de vacío. Presenta mayor densidad y viscosidad que el N° 2, requiriendo sistemas de precalentamiento para asegurar un adecuado manejo y atomización en calderas de gran escala. Es utilizado en instalaciones industriales y de generación térmica donde se dispone de equipos adaptados a combustibles de mayor viscosidad (Raízen, 2019).

El diésel (especificación europea EN 590) es un combustible fósil ampliamente utilizado en transporte y maquinaria pesada. Presenta una densidad de 820–845 kg/m³ a 15 °C, una viscosidad de 2.0–4.5 cSt a 40 °C, y un poder calorífico inferior aproximado de 37–43 MJ/kg (European Committee for Standardization, 2022). Además, su número de cetano (≥ 51) garantiza una buena calidad de ignición en motores de combustión interna.

N. Aplicaciones del bioaceite

Un solvente es una sustancia, generalmente líquida, que tiene la capacidad de disolver un soluto para formar una solución estable. Este principio, fundamental en química, es ampliamente aplicado en procesos industriales que van desde la producción de pinturas y adhesivos hasta la limpieza de maquinaria y la síntesis de productos farmacéuticos (Brunet, 2019). La importancia de los solventes radica en que permiten diluir, extraer o disolver compuestos sin alterar su estructura química, lo que facilita reacciones, controla la viscosidad de mezclas y determina propiedades finales de numerosos productos (Clark et al., 2016).

- Clasificación de solventes

Los solventes pueden clasificarse en varias familias químicas según su estructura y propiedades. La guía de disolventes de ISTAS (2007) identifica como grupos principales a los hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, xilenos), alcoholes (etanol, isopropanol, butanol), cetonas (acetona, metil etil cetona), ácidos orgánicos (ácido acético), ésteres y éteres, y los solventes de origen bio-based como los terpenos. Cada familia presenta ventajas y limitaciones en función de la aplicación: por ejemplo, los hidrocarburos son eficaces en la disolución de resinas no polares, mientras que alcoholes y cetonas se utilizan preferentemente en formulaciones polares como recubrimientos base agua.

- Usos industriales de los solventes

El consumo de disolventes se concentra en sectores industriales específicos. En Europa, alrededor del 46 % se destina a la industria de pinturas, lacas y barnices, el 6 % a colas y adhesivos, el 9 % a la industria farmacéutica y otro porcentaje relevante a la industria de limpieza y desengrase de piezas metálicas. En la industria de recubrimientos, la elección

del solvente se relaciona con características críticas como toxicidad, poder disolvente, propiedades de flujo, inflamabilidad y velocidad de evaporación, parámetros que inciden directamente en la calidad del acabado final (González et al., 2020). Los alcoholes, cetonas y aromáticos son los solventes más utilizados en la formulación de barnices, acabados automotrices y recubrimientos para muebles.

- Riesgos de los solventes convencionales y necesidad de sustitución

A pesar de su relevancia, los solventes derivados del petróleo presentan riesgos significativos. Muchos compuestos, como el benceno o el percloroetileno, son reconocidos por su toxicidad y carácter carcinogénico. Además, su alta volatilidad contribuye a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), que afectan la salud de los trabajadores y el medio ambiente (Righi et al., 2017). Por ello, en Europa y Latinoamérica se han desarrollado normativas como REACH y el RD 117/2003, que priorizan la sustitución progresiva de solventes peligrosos por alternativas menos dañinas.

- Relación con bioaceites como solventes alternativos

En este contexto, los bioaceites obtenidos por pirólisis de biomasa emergen como posibles sustitutos parciales de solventes convencionales. El bioaceite de olote caracterizado en este trabajo, con un predominio de compuestos oxigenados ligeros (alcoholes, ácidos y cetonas C2–C6), presenta propiedades similares a solventes tradicionalmente usados en la industria de recubrimientos y limpieza. Su alta solubilidad en agua (78–82 %) y su baja viscosidad (≈ 1.9 cSt) lo hacen particularmente atractivo como co-solvente en recubrimientos base agua, adhesivos PVA y formulaciones de limpieza industriales, siempre en aplicaciones industriales y no farmacéuticas o alimentarias, donde los requisitos de pureza son más estrictos. Así, los bioaceites representan una alternativa renovable y bio-based que responde tanto a la necesidad de solventes funcionales como a las exigencias regulatorias de sustitución de disolventes fósiles.

- Solventes bio-based

En los últimos años, los solventes bio-based han surgido como alternativas sostenibles a los solventes derivados del petróleo, en respuesta tanto a las regulaciones ambientales (ej. REACH en Europa) como a la necesidad de reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos solventes se obtienen a partir de recursos renovables como biomasa lignocelulósica, aceites vegetales, almidones o azúcares, y se caracterizan por contener grupos oxigenados que les confieren propiedades polares y miscibilidad en agua (Clark et al., 2016).

Entre los solventes bio-based más comunes se encuentran el etanol bioetanol, el ácido acético bio-based, la acetona de fermentación y el lactato de etilo, empleados en la industria de recubrimientos, adhesivos, limpieza y cosmética. Sus ventajas principales incluyen una

menor toxicidad, biodegradabilidad, y la posibilidad de integrarse en procesos industriales donde se requieren solventes polares.

El bioaceite de olote, por su composición rica en alcoholes, ácidos y cetonas de bajo peso molecular y su alta solubilidad en agua (78–82 %), comparte características con los solventes bio-based, lo que lo posiciona como un candidato viable para aplicaciones industriales en recubrimientos y formulaciones de limpieza. Su diferencia principal con los solventes comerciales es la heterogeneidad de su composición, lo que sugiere su aplicación más adecuada como co-solvente en sistemas base agua.

- Mezcla de bioaceites con Combustibles Convencionales

El uso energético de los bioaceites obtenidos por pirólisis se ve limitado por su alto contenido de oxígeno, su acidez y su poder calorífico moderado en comparación con combustibles fósiles como el diésel (≈ 43 MJ/kg). Sin embargo, una estrategia viable para su aprovechamiento es la mezcla con combustibles convencionales, práctica conocida como co-combustión líquida.

Estudios han demostrado que la mezcla de bioaceite con fuel oil N° 2, fuel oil N° 4 o biodiésel mejora la eficiencia de combustión y permite reducir parcialmente el consumo de combustibles fósiles (Demirbas, 2017). La similitud de viscosidad que usualmente tienen los bioaceites con estos combustibles facilita esta integración sin necesidad de modificaciones mayores en equipos de calderas o quemadores industriales. Además, el mayor poder calorífico del combustible fósil compensa la menor energía del bioaceite, mientras que la fracción renovable contribuye a la reducción de emisiones netas de CO₂. El uso de bioaceite en mezclas con combustibles fósiles constituye una alternativa realista para aplicaciones en calderas, hornos y procesos industriales térmicos, especialmente en sectores como la cementera, ladrillera y alimentaria.

V. ANTECEDENTES

En un estudio realizado por Zubiolo et al. (2023), se investigó la producción y caracterización de bioaceite a partir de la pirólisis de residuos agroindustriales, específicamente olote de maíz y tallo de girasol. El objetivo principal de la investigación fue analizar la influencia de la composición química de la biomasa en el rendimiento y propiedades del bioaceite obtenido. Para ello, se llevaron a cabo experimentos de pirólisis a 500 °C y se caracterizaron los productos obtenidos mediante diversas técnicas analíticas.

"Después de la pirólisis, se pesó y almacenó el biochar retenido, mientras que la fracción líquida se recuperó en tubos de condensación y se cuantificó el rendimiento del bioaceite y la fracción acuosa. Los gases no condensables producidos en la reacción se calcularon por diferencia con respecto a las fracciones anteriores, sumando un total del 100 % en peso de los tres productos: sólido (% en peso) + líquido (% en peso) + gases (% en peso). Los experimentos se realizaron por triplicado. Las fracciones acuosas y el bioaceite se separaron mediante extracción con solventes."

"El proceso de pirólisis comprende una serie de reacciones complejas que ocurren en etapas análogas a la despolimerización de los componentes individuales de la biomasa. Los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) se utilizaron para determinar la temperatura óptima del proceso."

En un estudio realizado por Ogunjobi y Lajide (2013), se investigó la caracterización del bioaceite y biocarbón obtenidos a partir de la pirólisis lenta de olotes de maíz blanco y amarillo. La investigación se centró en analizar la distribución de productos y la composición química del bioaceite, así como en evaluar la viabilidad de su uso como fuente de energía renovable. Se utilizaron temperaturas de 450 °C en un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio para optimizar la obtención de bioaceite y biocarbón.

"El condensado recolectado en la botella de polietileno se separó en dos fases distintas: un líquido oscuro, viscoso e hidrofóbico en la parte superior denominado bioaceite viscoso y un líquido polar en la parte inferior llamado bioaceite acuoso. Las fases se separaron utilizando un embudo de separación. El biocarbón se obtuvo como un producto sólido dentro del reactor y se recolectó después de permitir que el reactor se enfriara y fuera desmontado."

En un estudio realizado por Córdoba et al. (2013), se investigó la caracterización estructural y química del olote de maíz con el objetivo de evaluar su potencial para procesos de degradación térmica. A través de métodos como análisis elemental, espectroscopía FTIR, RMN y SEM, se determinó la proporción de sus principales componentes lignocelulósicos: celulosa (37.1 %), hemicelulosa (35.4 %) y lignina (14.9 %). Los autores

destacan que esta composición hace del olote un material con buen potencial energético debido a su riqueza en polímeros termolábiles.

"El elevado contenido de carbohidratos estructurales en el olote lo convierte en una biomasa con alta reactividad térmica, lo cual es favorable para su transformación en procesos termoquímicos como la degradación hidrotérmica o la pirólisis."

Además, en el estudio se analizó la estructura morfológica del olote mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), observándose una matriz fibrosa compacta y heterogénea, característica de materiales lignocelulósicos. Esta estructura física influye directamente en la transferencia de calor durante la pirólisis, aspecto clave para comprender su descomposición térmica y eficiencia en la generación de bioaceite.

Según un trabajo por Rodrigo Dighero Valenzuela (2023), se investigó la valorización de biomasa mediante pirólisis de residuos de aguacate, con el objetivo de caracterizar la materia prima y los productos del proceso. Para ello, se efectuaron secado y reducción de tamaño previos, y la pirólisis se ejecutó en dos escalas de reactor (laboratorio y piloto), cuantificando por cierre másico las fracciones de sólido (biochar), líquido (bioaceite y fase acuosa) y gases no condensables, con análisis fisicoquímicos posteriores de cada producto. El trabajo enfatiza el rol de la humedad, la composición lignocelulósica y la transferencia de calor como variables determinantes en los rendimientos y en la calidad de las fracciones obtenidas.

"Tras la pirólisis, se recuperó y pesó el biochar retenido directamente desde el reactor, verificando la estabilidad térmica tras el enfriamiento. La fracción líquida se condensó en el tren de enfriamiento y se separó en bioaceite y fase acuosa; ambas se cuantificaron por gravimetría usando recipientes previamente calibrados y hojas de pesaje. Los gases no condensables se estimaron por diferencia hasta completar el 100 % en peso de los tres productos. Para asegurar la reproducibilidad, los ensayos se realizaron con replicación, y se documentaron tiempos de residencia y temperaturas de operación junto con las pérdidas de manipulación, de modo que el balance de masa cerrara dentro de márgenes aceptables."

"El proceso de pirólisis se llevó a cabo en ausencia de oxígeno, siguiendo las etapas térmicas asociadas a la despolimerización de hemicelulosa, celulosa y lignina. Los resultados de análisis termogravimétrico (TGA) sirvieron para delimitar la ventana de operación y afinar la temperatura objetivo, mientras que las propiedades de los productos se evaluaron para vincular la composición de la biomasa con el desempeño del proceso". Esta aproximación metodológica—con cierre másico, separación líquido/acuoso, replicación y apoyo de TGA, resulta directamente trasladable a la comparación entre olote crudo y olote cocido que se plantea en este estudio.

VI. METODOLOGÍA

A. CÁLCULO DE TAMAÑO DE MUESTRA

Ecuación 1. Cálculo de tamaño de muestra

$$n = \frac{2 \cdot (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 \cdot s^2}{(d)^2}$$

n= Tamaño de muestra

$Z_{\alpha/2}$ =1.96 (para 95% de confianza)

Z_{β} = (para 80% de poder estadístico)

s=1.75% (desviación estándar estimada)

d=3.5% (diferencia mínima que quieres detectar entre los promedios)

B. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

- El análisis termogravimétrico del olote se realizó con el apoyo de Cementos Progreso, para poder:
- Identificar las etapas de descomposición térmica.
- Establecer la ventana óptima de operación del reactor de pirólisis a escala laboratorio.

C. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (OLOTE DE MAÍZ)

• Medición de humedad

- Limpiar la bandeja con una brocha especial
- Encender la balanza de humedad Ohaus
- Elaborar un plato de aluminio
- Colocar el plato de aluminio dentro de la balanza y se taró
- Colocar 1gr de residuos de olote y cerrar el equipo
- Iniciar la medición
- Anotar el valor de humedad
- Apagar el equipo y limpiar la bandeja

Materiales	Capacidad
Balanza de humedad Ohaus	220 g
Aluminio	NA

- **Secado en horno**

- Colocar los trozos de olote en una bandeja para horno
- Encender el horno eléctrico Oviedo y precalentar a 80°C
- Colocar la bandeja con olote a 100°C por 1 hora
- Retirar la bandeja con olote y apagar el horno eléctrico
- Dejar enfriar la bandeja con olote seco
- Encender la balanza analítica
- Pesar la muestra y anotar el dato m³

Materiales	Capacidad
Bandeja de aluminio	NA
Horno eléctrico Oviedo	0.07 m ³
Balanza analítica Pioneer	220 g
Beaker	150 mL

- **Medición de densidad aparente**

- Encender la balanza analítica.
- Pesar una probeta de 10 mL.
- Anotar el peso.
- Colocar la muestra de olote y llenar hasta 5mL de agua destilada
- Golpear levemente la probeta varias veces y llenar nuevamente hasta 5mL.
- Pesar la probeta con centro de olote.
- Anotar el dato y calcular la densidad aparente

Materiales/Equipo	Capacidad
Balanza analítica Pioneer	220 g
Probeta	10 mL
Agua destilada	NA

- **Medición de densidad real**

- Encender la balanza analítica.
- Pesar una probeta de 10 mL.
- Anotar el peso.
- Pesar una muestra de 1 g de olote
- Llenar la probeta hasta 5m con etanol
- Agregar la muestra de olote en la probeta
- Golpear levemente la probeta varias veces

- Pesar la probeta con centro de olote.
- Anotar el dato y calcular la densidad aparente

Materiales	Capacidad
Balanza analítica Pioneer	220 g
Probeta	10 mL
Etanol	NA

• **Medición de Humedad 2**

- Limpiar la bandeja con una brocha especial
- Encender la balanza de humedad Ohaus
- Colocar el método para olote seco a 110°C
- Elaborar un plato de aluminio y se colocó la muestra
- Colocar el plato de aluminio dentro de la balanza y se taró
- Colocar 1gr de residuos de olote seco y cerrar el equipo
- Iniciar la medición
- Anotar el valor de humedad
- Apagar el equipo y limpiar la bandeja

Materiales	Capacidad
Balanza de humedad Ohaus	110 g
Aluminio	NA

• **Medición de poder calorífico del centro del olote**

- Pesar 1 g de muestra de olote
- Encender y armar el sistema de la cámara de combustión
- Introducir la muestra en el equipo
- Agregar el oxígeno en exceso a la muestra
- Medir el cambio de temperatura del agua
- Calcular la capacidad calorífica con la siguiente formula:

$$Q=m \cdot C \cdot \Delta T$$

Materiales/Equipo	Capacidad
Bomba calorimétrica IKA	220 V
Tanque de oxígeno	680 L
Mecha de algodón	NA
Crisol de combustión	0.5 mL

D. DETERMINACIÓN DE RAMPAS DE TEMPERATURA

Con base en los resultados del TGA, se definió una rampa de calentamiento de 10 °C cada 30 minutos hasta completar 6 horas de operación. Esta condición se aplicó tanto al olote crudo como al olote cocido, para comparar el efecto del pretratamiento en el rendimiento de los productos.

E. PIRÓLISIS DEL OLOTE DE MAÍZ

• Preparación de la muestra

- Pesar 35 g de olote seco/cocido.
- Cargar en el reactor con ayuda de espátula metálica.
- Cerrar herméticamente con la unión de grafito para evitar fugas.

Materiales	Capacidad
Balanza analítica Pioneer	220 g
Reactor de pirólisis	100 g
Sello de grafito	NA

• Sistema de pirólisis

- Limpiar el reactor de pirólisis
- Abrir parte superior del reactor para introducir la muestra de material con una espátula de metal.
- Comprobar que el reactor no este sobrecargado, para que, en la degradación térmica, la masa no se salga del reactor.
- Cerrar el reactor confirmando que se coloque la unión.
- Ingresar el reactor lleno dentro del horno mufla.
- Situar el sistema de chimenea sobre el agujero que posee el reactor en la parte superior y asegurar que quede enroscado.
- En la parte superior de la chimenea colocar los aislantes, para evitar que se tape el sistema.
- Enlazar el sistema de condensación a la chimenea de gases, unido al soporte colocar el condensador de vidrio.
- Colocar el motor de pecera en una cubeta de agua previamente llena de agua y conectarlo al sistema de condensación mediante mangueras de plástico.
- Encender la mufla y calentar hasta 210 °C
- Aumentar la temperatura una tasa de calentamiento de 10 °C cada 30 minutos.
- Llegar hasta 350 °C y dejar a esa temperatura hasta que no se obtenga más condensado.

- Apagar la mufla y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Recolectar las fracciones líquidas en frascos de vidrio etiquetados durante la corrida del sistema de pirólisis
- Para recuperar el producto sólido, esperar a que la temperatura del sistema disminuya para facilitar su manejo. Luego, retirar la chimenea y el sistema de condensación.
- Abrir el reactor y, con ayuda de una espátula, recolectar el sólido y colocarlo en un recipiente de vidrio.
- Esperar un día para abrir el reactor y desmontar el equipo, para evitar dañar el reactor debido a los cambios drásticos de temperatura.

Materiales/ Equipo	Capacidad
Mufla Thermo Scientific	2.2 L
Reactor de pirólisis	100 g
Espátula	NA
Chimenea de acero inoxidable	NA
Cubeta	2 L
Bomba de pecera	800 L/h
Mangueras	NA

F. CUANTIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

- Medición de la masa obtenida
 - Colocar el beaker en la balanza analítica para medir su masa y, mediante la diferencia de peso con los beakers vacíos, determinar la masa del producto líquido.

Materiales/ Equipo	Capacidad
Balanza analítica Pioneer	220 g
Beaker	100 mL

G. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE PRODUCTOS

- **Cromatografía de gases/Espectrometría de masas (GC/MS)**
 - Luego de recolectar el producto líquido del proceso de pirólisis, trasvasar a un tubo de ensayo y rotularlo.
 - Utilizando un filtro, filtrar la muestra líquida y desechar el material sólido retenido en el filtro.

- Mandar las muestras a un análisis de identificación cualitativa de los componentes por medio del equipo de cromatografía de gases. Identificar por medio del reporte de cromatografía los compuestos

Materiales/ Equipo	Capacidad
Tubo de ensayo	23 mL
Reactor de pirólisis	100 g

- **Medición de Poder calorífico de productos**

- Pesar 1 g de muestra de producto obtenido
- Encender y armar el sistema de la cámara de combustión
- Introducir la muestra en el equipo
- Agregar el oxígeno en exceso a la muestra
- Medir el cambio de temperatura del agua
- Calcular la capacidad calorífica con la siguiente formula:
 - $Q=m \cdot C \cdot \Delta T$

Materiales/Equipo	Capacidad
Bomba calorimétrica IKA	220 V
Tanque de oxígeno	680 L
Mecha de algodón	NA
Crisol de combustión	0.5 mL

- **Determinación de solubilidad**

- Pesar una cantidad conocida de bioaceite en beaker de 50 mL
- Agregar una cantidad conocida de solvente
- Agitar vigorosamente
- Dejar reposar
- Filtrar o separar la fase soluble
- Evaporar el solvente de la fase soluble
- Pesar el residuo seco

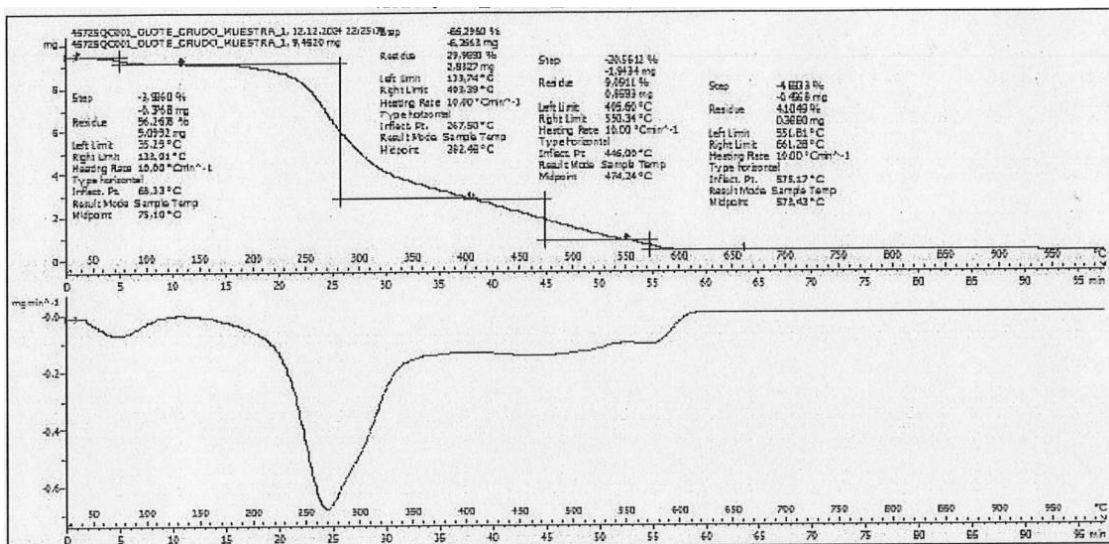
Materiales/Equipo	Capacidad
Filtro	NA
Beaker	50 mL
Capsula de agitación	NA
Estufa agitadora	NA
Balanza analítica Pioneer	220 g

- Determinación de estabilidad térmica
 - Pesar cápsula/beaker vacío → Tara
 - Agregar 1.0000 g de bioaceite
 - Calentar durante 1 hora a temperatura establecida
 - Enfriar, pesar y calcular pérdida

Materiales/Equipo	Capacidad
Beaker	50 mL
Estufa agitadora	NA
Balanza analítica Pioneer	220 g

VII. RESULTADOS

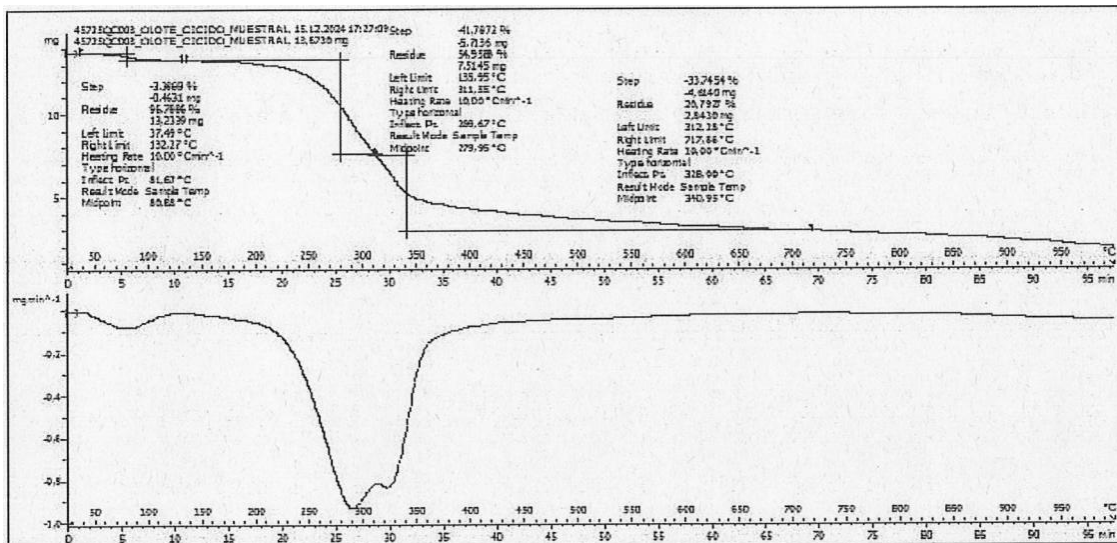
Figura 10. Análisis termogravimétrico de Olote crudo



Nota. CETEC, 2024.

La figura anterior muestra el análisis termogravimétrico del olote crudo, realizada por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 11. Análisis termogravimétrico de Olote cocido



Nota. CETEC, 2024.

La figura anterior muestra el análisis termogravimétrico del olote cocido a 200°C por 1 hora, realizada por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 3. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
75.1	3.99
282.48	66.3
474.24	20.56
573.43	4.83

El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote crudo en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso. En la sección de Anexos se incluye una tabla complementaria correspondiente a otro análisis realizado sobre la misma materia prima

Cuadro 4. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
80.88	3.39
279.95	41.79
340.95	33.75

El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote cocido en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 5. Propiedades físicas del olote crudo utilizado como materia prima

Propiedad	Valor	Desviación Estándar
Humedad	81.31 %	0.85 %
Densidad aparente	424.390 (kg/m ³)	15.118 (kg/m ³)
Densidad real	483.333 (kg/m ³)	57.735 (kg/m ³)
Densidad de bulo	409.240 (kg/m ³)	28.940(kg/m ³)
Tamaño de partícula	1.875 cm	0.177cm

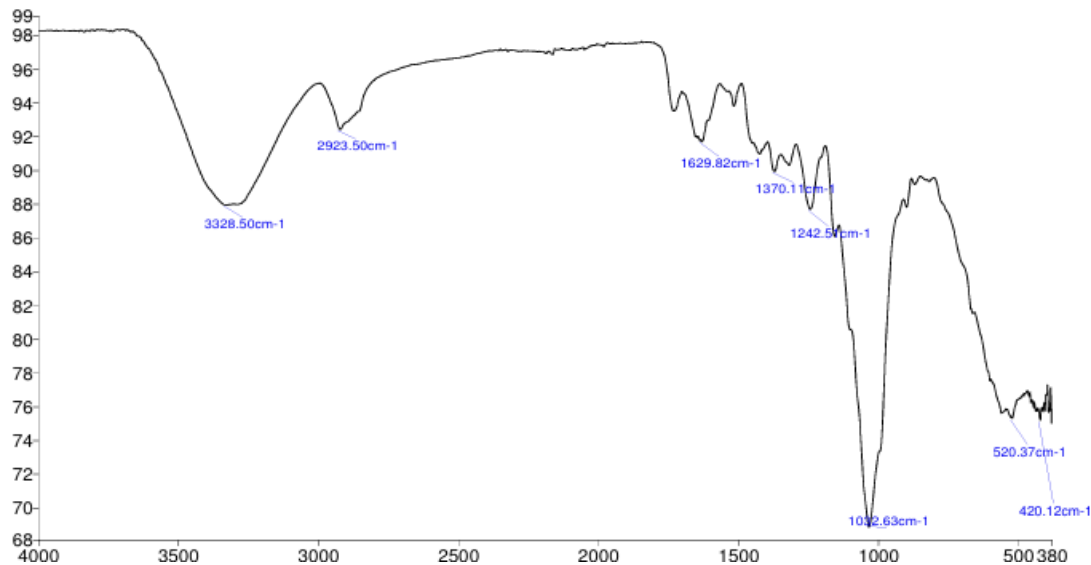
El cuadro anterior muestra las propiedades físicas del olote crudo utilizado como materia prima para el proceso de pirólisis. Se presenta el porcentaje de humedad, la densidad aparente y real, así como el tamaño de partícula, con sus respectivas desviaciones estándar.

Cuadro 6. Propiedades físicas del olote cocido utilizado como materia prima

Propiedad	Valor	Desviación Estándar
Humedad	85.035 %	0.854 %
Densidad aparente	436.780 (kg/m ³)	24.159 (kg/m ³)
Densidad real	495.690 (kg/m ³)	8.621 (kg/m ³)
Densidad de Bulo	419.345 (kg/m ³)	32.850 (kg/m ³)
Tamaño de partícula	1.85 cm	0.187 cm

El cuadro anterior muestra las propiedades físicas del olote cocido utilizado como materia prima en el proceso de pirólisis. Se incluyen los valores de humedad, densidad aparente y real, y tamaño de partícula, con sus respectivas desviaciones estándar.

Figura 12. Espectro IR de Olote crudo.



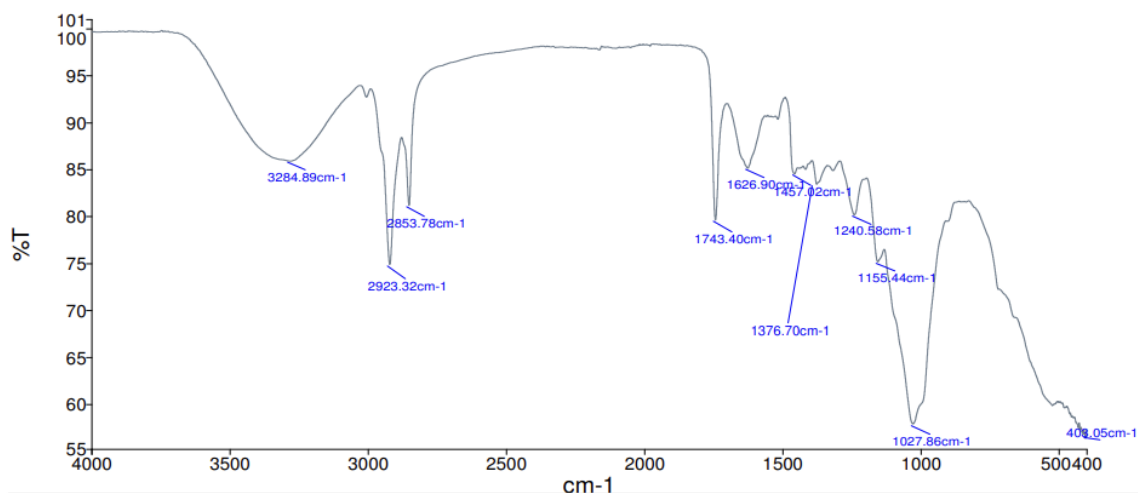
La figura anterior muestra el espectro IR de Olote crudo, obtenido utilizando el Espectrofotómetro de Infrarrojo por Transformada de Fourier, con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 7. Análisis FTIR de olote crudo

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación principal	Grupo funcional asociado
3328.5	Estiramiento O–H	Alcoholes, fenoles
2923.5	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
1629.8	Estiramiento C=O / C=C	Grupos carbonilo
1370.1	Flexión C–H	Metilos
1242.5	Estiramiento C–O	Ésteres, éteres o enlaces C–O–C
1052.6	Estiramiento C–O–C	Polisacáridos

El cuadro anterior muestra las principales bandas de absorción identificadas en el espectro FTIR del olote de maíz crudo, asociadas a la presencia de grupos funcionales característicos.

Figura 13. Espectro FTIR de olote cocido



La figura anterior muestra el espectro IR de Olote cocido, obtenido utilizando el Espectrofotómetro de Infrarrojo por Transformada de Fourier, con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 8. Análisis FTIR de olote cocido

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación principal	Grupo funcional asociado
3284.8	Estiramiento O–H	Alcoholes, fenoles
2923.3	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
2853.8	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
1743.4	Estiramiento C=O	Grupos carbonilo (ésteres, cetonas o aldehídos)
1626.9	Estiramiento C=C o C=O	Grupos carbonilo conjugados, dobles enlaces
1376.7	Flexión C–H	Metilos
1240.6	Estiramiento C–O	Éteres, ésteres
1155.4	Estiramiento C–O	Éteres, alcoholes
1027.8	Estiramiento C–O	Alcoholes, carbohidratos
408.1	Vibración fuera del plano	Esqueletos de enlaces C–H en aromáticos o impurezas minerales

El cuadro anterior muestra las principales bandas de absorción identificadas en el espectro FTIR del olote de maíz cocido, asociadas a la presencia de grupos funcionales característicos.

Cuadro 9. Rendimientos de proceso de pirólisis de olote crudo a escala laboratorio

Producto	Rendimiento (%m/m)	Desviación Estándar (%m/m)
Biochar	66.357	0.881
Bioaceite	13.250	0.547
Gas de síntesis	20.393	0.553

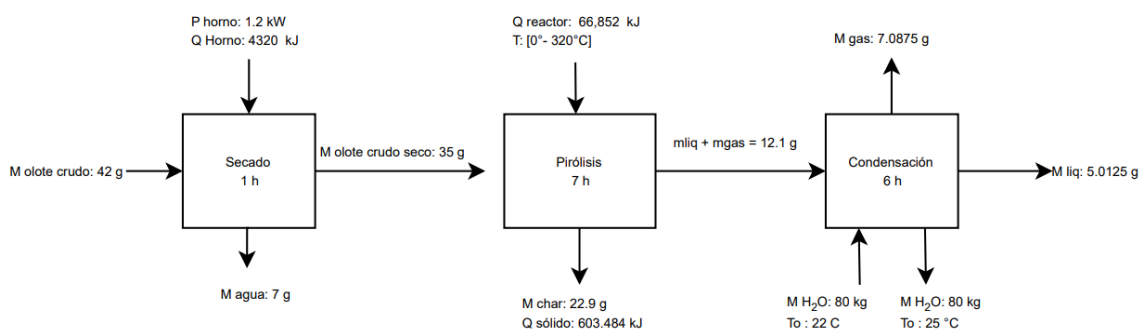
El cuadro anterior muestra los rendimientos obtenidos en el proceso de pirólisis de olote crudo a escala de laboratorio. Los productos evaluados incluyen biochar, bioaceite y gas de síntesis, con los rendimientos expresados como porcentaje en peso (m/m). Los valores de desviación estándar reflejan la variabilidad en los rendimientos de los productos.

Cuadro 10. Rendimientos de proceso de pirólisis de olote cocido a escala laboratorio

Producto	Rendimiento (%m/m)	Desviación Estándar (%m/m)
Biochar	49.929	0.660
Bioaceite	17.857	0.387
Gas de síntesis	32.215	0.491

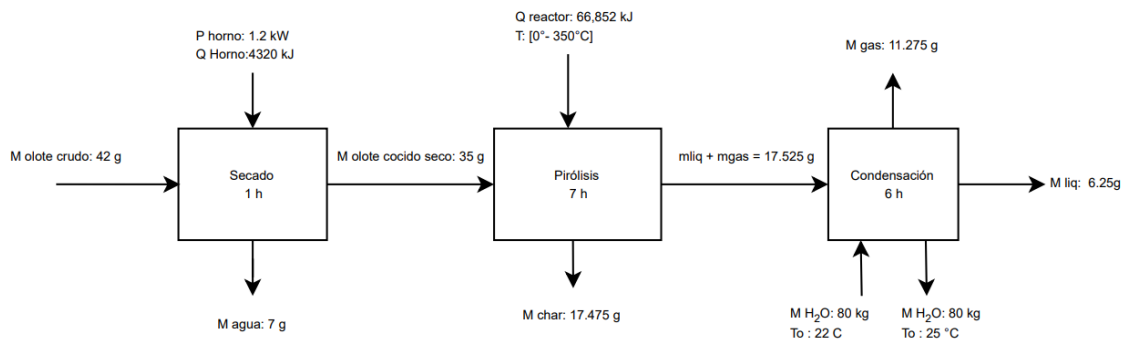
El cuadro anterior muestra los rendimientos obtenidos en el proceso de pirólisis de olote cocido a escala de laboratorio. Los productos evaluados incluyen biochar, bioaceite y gas de síntesis, con los rendimientos expresados como porcentaje en peso (m/m). Los valores de desviación estándar reflejan la variabilidad en los rendimientos de los productos.

Figura 14. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote crudo



Se muestra el balance de masa y consumo energético del proceso de obtención de bioaceite a partir de olote crudo. Los datos utilizados fueron recopilados de los cuadros 34, 56, 58 y 60 de la sección de Anexos.

Figura 15. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote cocido



Se muestra el balance de masa y consumo energético del proceso de obtención de bioaceite a partir de olote de maíz cocido. Los datos utilizados fueron recopilados de los cuadros 34, 55, 57 y 59 de la sección de Anexos.

Cuadro 11. Resultados de Prueba T

Producto	t	df	P	Decisión sobre H ₀
Bioaceite	-4.813	6	0.00296	Se rechaza la H ₀
Gas de síntesis	-11.177	6	0.000031	Se rechaza la H ₀
Biochar	10.447	6	0.000045	Se rechaza la H ₀

El cuadro anterior presenta los resultados de la prueba t para los productos de pirólisis, bioaceite, gas de síntesis y biochar. Los valores de t, grados de libertad (df) y p-valor se incluyen para evaluar la hipótesis nula (H₀). Con un p-valor menor que 0.05 en todos los productos, se rechaza la hipótesis nula (H₀).

Cuadro 12. Propiedades físicas del bioaceite a partir de olote crudo

Propiedad	Valor	Desviación Estándar
Densidad	1031.250 (kg/m ³)	14.232 (kg/m ³)
Viscosidad	1.876 cSt	0.106 cSt
Poder calorífico inferior	17011.500 (J/g)	17011.500 (J/g)
Solubilidad	78.35 %	3.250 (% m/m)
Estabilidad térmica	10.55 (% m/m a 100 °C)	0.810 (% m/m)
	18.66 (% m/m a 120 °C)	1.010 (% m/m)
	26.13 (% m/m a 135 °C)	0.830 (% m/m)

El cuadro anterior muestra las propiedades físicas del bioaceite obtenido a partir de olote crudo. Se incluyen la densidad, viscosidad, solubilidad y estabilidad térmica del bioaceite. Los valores presentados junto con sus respectivas desviaciones estándar proporcionan información sobre la consistencia de las mediciones.

Cuadro 13. Propiedades físicas del bioaceite a partir de olote cocido

Propiedad	Valor	Desviación Estándar
Densidad	1029.167 (kg/m ³)	14.434 (kg/m ³)
Viscosidad	1.956 (cSt)	0.111 (cSt)
Poder calorífico inferior	17880.500 (J/g)	1011.091 (J/g)
Solubilidad	81.880 (% m/m)	4.320 (% m/m)
Estabilidad térmica	8.200 (% m/m a 100 °C)	1.090 (% m/m)
	14.700 (% m/m a 120 °C)	1.060 (% m/m)
	21.190 (% m/m a 135 °C)	1.090 (% m/m)

El cuadro anterior muestra las propiedades físicas del bioaceite obtenido a partir de olote cocido. Se incluyen el poder calorífico, densidad, viscosidad, solubilidad y estabilidad térmica del bioaceite. Los valores presentados junto con sus respectivas desviaciones estándar proporcionan información sobre la consistencia de las mediciones.

Cuadro 14. Inferencia de compuestos representativos entre las 4 muestras de bioaceite producido a partir de pirólisis de olote crudo

Nº	Compuesto	RT (min)	Area%	Nº Carbonos
1	Acetic acid	20.252	37.900	2
2	6-Octadecenoic acid, methyl ester	56.800	5.490	19
3	Furfural	21.252	3.600	5
4	1,2-Ethanediol, diacetate	21.330	3.225	6
5	2-Propanone, 1-hydroxy-	14.925	2.387	3
6	2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)-	46.115	2.260	6
7	Phenol	41.053	2.025	6
8	10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	57.855	1.940	19
9	Butyrolactone	27.857	1.630	4
10	Propanoic acid	24.286	1.615	3
11	9-Octadecenoic acid (Z), methyl ester	55.140	1.500	19
12	Methyl Alcohol	5.050	1.425	1
13	2,3-Butanediol	24.527	1.230	4
14	3-Pyridinol	53.525	1.220	5
15	1-Hydroxy-2-butanone	17.932	1.140	4
16	Benzene, 1,1'-oxybis[4-phenoxy-	0.201	1.030	24
17	Phenol, 2-methoxy-	36.349	1.010	7
18	2-Propanone, 1-methoxy-	14.520	1.000	4
19	Propanamide, N-cyclohexyl-	50.627	0.970	9
20	Phenol, 4-methyl-	43.668	0.970	7
21	Phenol, 4-ethyl-	46.684	0.930	8
22	Butanoic acid, anhydride	23.722	0.770	8

N°	Compuesto	RT (min)	Area%	N° Carbonos
23	3-Furanmethanol	28.853	0.770	5
24	2-Furanmethanol	28.853	0.765	5
25	2-Cyclopenten-1-one	17.509	0.710	5
26	Acetic acid, 4-acetoxy-2-[1,3,5]trioxan-2-yl-cyclopentyl ester	41.112	0.600	10
27	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	23.135	0.585	6
28	Pyridine	11.414	0.570	5
29	Linoleic acid ethyl ester	59.338	0.555	20

El cuadro anterior muestra los compuestos representativos identificados en las 4 muestras de bioaceite crudo, el tiempo de retención reportado para cada compuesto, el % de área que representa cada uno y el número de carbonos que tiene cada compuesto. Los datos fueron obtenidos utilizando el Espectrofotómetro GC-Masas con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala. La información fue recopilada de los espectros cromatográficos en la sección de datos originales de las figuras 31 -34.

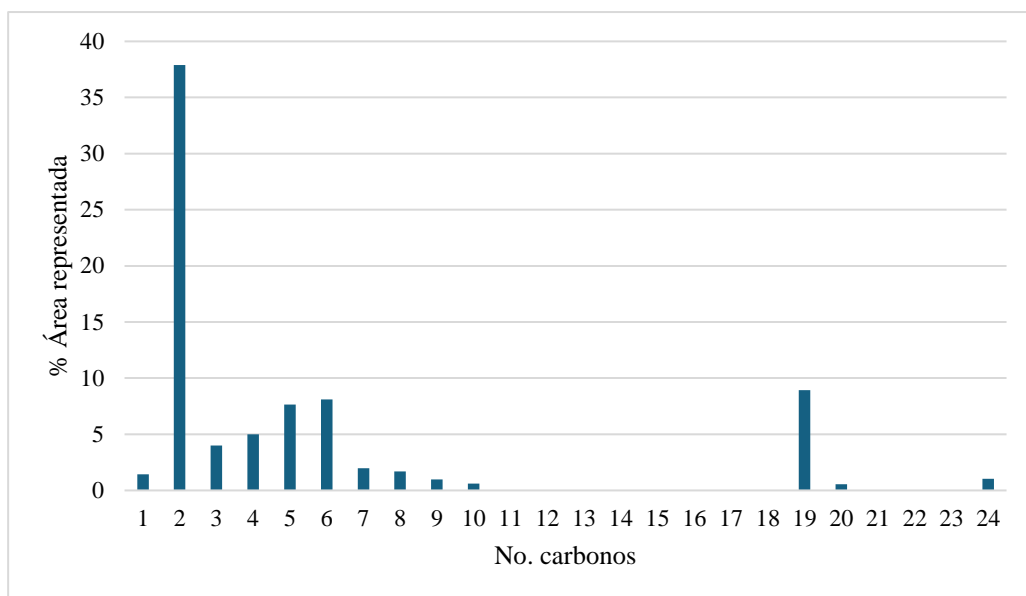
Cuadro 15. Inferencia de compuestos representativos entre las 4 muestras de bioaceite producido a partir de la pirólisis de olote cocido

N°	Compuesto	RT (min)	Area%	N° Carbonos
1	Acetic acid	20.229	40.447	2
2	Furfural	21.253	6.637	5
3	2-Propanone, 1-hydroxy-	14.924	2.990	3
4	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	21.339	2.590	5
5	Propanoic acid	24.280	1.930	3
6	2-Furanmethanol	28.844	1.920	5
7	Butyrolactone	27.849	1.793	4
8	1-Hydroxy-2-butanone	17.921	1.687	4
9	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	25.875	1.627	6
10	3-Furanmethanol	28.853	1.605	5
11	Phenol	41.053	1.457	6
12	3-Pyridinol	53.525	1.400	5
13	Phenol, 2-methoxy-	36.339	1.377	7
14	2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)-	55.665	1.225	6
15	Methyl 3-O-methyl-.beta.-D-xylopyranoside	50.623	1.110	7
N°	Compuesto	RT (min)	Area%	N° Carbonos

16	Maltol	39.984	0.943	6
17	2-Pyrrolidinone	42.472	0.860	4
18	5H-1,4-Dioxepin, 2,3-dihydro-	40.811	0.690	5
19	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	42.388	0.655	9
20	1,4-Dioxane-2,5-dione, 3,6-dimethyl-	50.477	0.640	6
21	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	35.321	0.640	6
22	Methyl Alcohol	5.014	0.630	1
23	1-Deoxy-d-arabitol	24.523	0.630	5
24	Acetic acid, butyl ester	44.259	0.620	6
25	2-Propanone, 1-methoxy-	14.540	0.600	4
26	Pyridine	11.379	0.570	5
27	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	23.140	0.517	6
28	N,N-Dimethylformamide diisopropyl acetal	24.477	0.430	9
29	Furan, tetrahydro-2-(methoxymethyl)-	23.721	0.413	6
30	2-Cyclopenten-1-one	17.491	0.390	5
31	Pyridine, 3-methoxy-	26.597	0.385	6
32	Acetaldehyde, hydroxy-	5.045	0.320	2

El cuadro anterior muestra los compuestos representativos identificados en las 4 muestras de bioaceite crudo, el tiempo de retención reportado para cada compuesto, el % de área que representa cada uno y el número de carbonos que tiene cada compuesto. Los datos fueron obtenidos utilizando el Espectrofotómetro GC-Masas con ayuda del Departamento de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala. La información fue recopilada de los espectros cromatográficos en la sección de datos originales de las figuras 35-38.

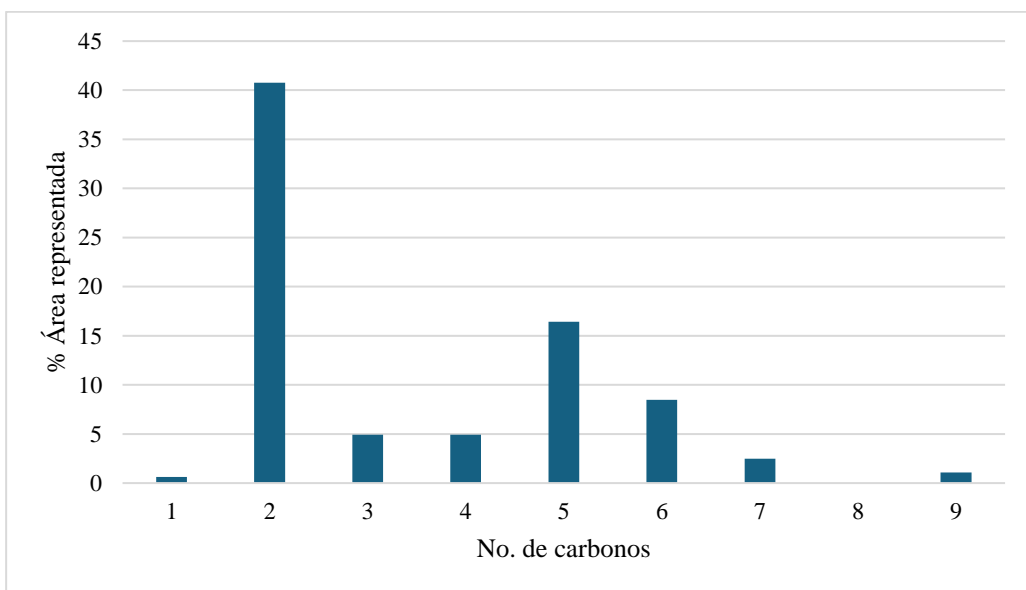
Figura 16. Distribución de compuestos carbonados del bioaceite a partir de olote crudo



Nota. Elaboración propia.

Se muestra la distribución promediada de compuestos carbonados identificados en las 4 muestras de bioaceite producido a partir de olote crudo, por medio del análisis cromatográfico realizado. En el eje X se muestra el No. De carbonos y en el eje Y el % de área que representa en la composición del bioaceite.

Figura 17. Distribución de compuestos carbonados del bioaceite a partir de olote cocido



Nota. Elaboración propia.

Se muestra la distribución promediada de compuestos carbonados identificados en las 4 muestras de bioaceite producido a partir de olote crudo, por medio del análisis cromatográfico realizado. En el eje X se muestra el No. De carbonos y en el eje Y el % de área que representa en la composición del bioaceite.

Cuadro 16. Comparación bioaceite de olote crudo con propuestas de uso

Propiedad	Bioaceite de olote crudo	Solvente (convencional)	Solvente (bio-based)	Combustible líquido
Densidad (kg/m³)	1031 ± 14	~791	1049	860–930
Viscosidad (cSt, 40 °C)	1.876 ± 0.106	0.39	1.22	2–6
Poder calorífico (MJ/kg)	17.0 ± 1.0	29.5	14.6	42–43
Solubilidad en agua (% m/m)	78.3 ± 3.3	Miscible	Miscible	No miscible
Composición predominante	C2 (38 %), C3–C6 (3–8 %)	C3 cetona	C2 ácido	Mezcla HC

El cuadro anterior muestra las propiedades del bioaceite obtenido de olote crudo y las de solventes convencionales, solventes bio-basados y combustibles líquidos. Se presentan propiedades como la densidad, viscosidad, poder calorífico, solubilidad en agua, composición predominante y pH.

Cuadro 17. Comparación bioaceite cocido con propuestas de uso

Propiedad	Bioaceite de olote cocido	Solvente (convencional)	Solvente (bio-based)	Combustible líquido
Densidad (kg/m³)	1029 ± 14	791	1049	860–930
Viscosidad (cSt, 40 °C)	1.956 ± 0.111	0.39	1.22	2–6
Poder calorífico (MJ/kg)	17.9 ± 1.0	29.5	14.6	42–43
Solubilidad en agua (% m/m)	81.9 ± 4.3	Miscible	Miscible	No miscible
Composición predominante	C2 (41 %), C5 (17 %), C6 (9 %)	C3 cetona	C2 ácido	Mezcla HC

El cuadro anterior muestra las propiedades del bioaceite obtenido de olote cocido y las de solventes convencionales, solventes bio-basados y combustibles líquidos. Similar al cuadro anterior, se presentan propiedades clave como la densidad, viscosidad, poder calorífico, solubilidad en agua, composición predominante y pH.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de este trabajo fue pirolizar olote de maíz crudo y cocido para su evaluación como materia prima en la obtención de bioaceite, mediante análisis fisicoquímicos de la fase líquida producida ya que en esta fase se recupera todo el bioaceite. Para alcanzar este objetivo se definió previamente el muestreo a emplear. En este caso, se trabajó con un total de ocho muestras, correspondientes a cuatro réplicas de olote crudo y cuatro de olote cocido, lo que permitió establecer una base estadísticamente válida de comparación entre ambos tipos de materia prima. El número de muestras se determinó utilizando la Ecuación 1, lo que aseguró que los resultados obtenidos fueran representativos y confiables. El sistema experimental empleado permitió recrear a escala laboratorio el proceso de pirólisis en condiciones controladas, haciendo posible el estudio detallado de la degradación térmica del olote y la obtención de sus principales productos, biochar, bioaceite y fracción gaseosa.

Los análisis termogravimétricos del olote crudo (figuras 20 y 21, cuadros 37 y 38) evidencian un comportamiento similar, en donde se puede observar las mismas temperaturas de transición y picos similares. Debido a esto los datos exactos usados para la discusión de esta sección se referirán al análisis 1 que se presentó en la sección de resultados. De la misma manera, en los análisis termogravimétricos del olote cocido (figuras 18 y 19, cuadros 35 y 36) se tiene un comportamiento similar, tanto en las temperaturas de transición como en los picos, por lo que se hará referencia al TGA No.1 presentado en la sección de resultados.

En la Figura No.3 y el Cuadro No.10 se observa que la pérdida de masa inicial del 3.99% hasta 75 °C, atribuida a la posible eliminación de humedad, pero sobre todo a compuestos volátiles ligeros, coherente con la primera zona de degradación descrita para biomásas lignocelulósicas (<200 °C). Las siguientes dos temperaturas dadas en el resultado del análisis son 282.48 °C y 474.24 °C es decir que entre los 75°C y los 474°C se pierde 86.56% de masa, en la gráfica se puede apreciar que la zona principal de degradación coincide con estas temperatura por lo tanto en esta zona se perderá toda la humedad y ocurre el proceso de pirólisis. Al conocer estas temperaturas fue posible delimitar el rango posible de operación para la operación del reactor en la siguiente etapa de la experimentación. Continuando con el segundo punto de temperatura, con una pérdida del 66.3% a 282 °C, que corresponde a la descomposición conjunta de hemicelulosa y celulosa, alcanzando su máxima tasa de degradación en este rango. Posteriormente, entre 474–573 °C se observa una pérdida adicional de 20.56% y 4.83%, respectivamente, atribuida a la descomposición lenta de la lignina, componente que se degrada en un rango más amplio y deja un residuo carbonoso (Zubiolo et al., 2023).

El análisis termogravimétrico confirma que, en un rango operativo hasta 600°C queda material alrededor del 4.3% sin degradarse. A diferencia de la hemicelulosa y la celulosa, la lignina no se degrada completamente en el rango de temperaturas trabajadas (200–600 °C) por lo que ese porcentaje podría ser atribuido a la lignina.

En contraste, el olote cocido (Figura 5, Cuadro 3) mostró una pérdida inicial de 3.39% a 80.8 °C, asociada igualmente a compuestos volátiles y humedad residual. Sin embargo, para esta muestra se tienen 2 zonas con pérdida significativas del 41.79% hasta los 279.9 °C y 33.75% entre 279.9°C y 340.9 °C, entre ambas 75.54%. Esto indica un desplazamiento de la degradación hacia temperaturas más altas y una mayor contribución de la celulosa. Este corrimiento puede atribuirse al proceso de cocción previo, que reduce parte de los extractivos y altera la proporción relativa de hemicelulosa, favoreciendo que la fracción celulósica sea más dominante en la pirólisis.

Con base en estas observaciones, el rango de pirólisis definido para el olote crudo fue de 220 a 320 °C, en concordancia con la ventana de mayor pérdida de masa identificada en el TGA y atribuida a la degradación de hemicelulosa y celulosa. Para el olote cocido, en cambio, el rango se estableció entre 250 y 350 °C, dado que el análisis mostró un desplazamiento de la descomposición hacia temperaturas más altas, reflejando la mayor contribución de la celulosa tras la eliminación parcial de extractivos por el tratamiento de cocción. Esta selección de rangos permitió orientar el proceso de pirólisis hacia la liberación de volátiles y condensables, buscando obtener la mayor fracción líquida posible y una degradación más efectiva de la materia prima.

En el Cuadro 5 y el Cuadro 6 se muestran las propiedades físicas determinadas para el olote crudo y cocido, respectivamente. Se observa que la humedad inicial del olote crudo fue de 81.31 % m/m, con una desviación estándar de 0.85 % m/m, mientras que en el caso del olote cocido se incrementó a 85.04 % m/m, con una desviación estándar de 0.85 % m/m. Este aumento puede atribuirse a la absorción de agua durante el proceso de cocción, lo cual coincide con lo reportado en la literatura, donde se describe que los tratamientos térmicos en biomasa lignocelulósica pueden incrementar su contenido de agua (Fonseca Prieto, 2013; Ogunjobi & Lajide, 2013). Desde el punto de vista de la pirólisis, este resultado implica un mayor requerimiento energético para la evaporación de agua antes del inicio de la descomposición térmica, lo que podría disminuir el rendimiento neto de bioaceite y aumentar la proporción de agua en el mismo, reduciendo así su poder calorífico y estabilidad (Bridgwater, 2012; Zubiolo et al., 2023).

Respecto a la densidad aparente, el olote cocido presentó un valor de 436.780 kg/m³, con una desviación estándar de 24.16 kg/m³, ligeramente mayor al obtenido para el olote crudo, que fue de 424.239 kg/m³, con desviación estándar de 24.16 kg/m³. Una tendencia similar se observa en la densidad real, la cual pasó de 483.33 kg/m³, con desviación estándar

de 24.16 kg/m^3 , en crudo a 495.69 kg/m^3 , con desviación estándar de 24.16 kg/m^3 , en cocido. Este comportamiento sugiere una compactación de la estructura interna tras la cocción, posiblemente por gelatinización parcial de almidones o reblandecimiento de la matriz lignocelulósica, que genera un material menos poroso. Dicho incremento en la densidad puede favorecer al empaquetamiento del material en el reactor, aunque también podría dificultar la transferencia de calor hacia el núcleo de las partículas, lo cual influye en la uniformidad de la reacción de pirólisis. En cuanto a las densidades de bulto, los valores obtenidos para ambas muestras fueron menores siendo de 409.240 kg/m^3 para el olote crudo y 419.345 kg/m^3 para el olote cocido, lo cual va acorde a la teoría debido a que la densidad de bulto toma en cuenta los espacios vacíos, resultando en un mayor volumen.

En cuanto al tamaño de partícula, los resultados muestran valores muy similares entre ambos tratamientos. Para el olote crudo se obtuvo un valor de 1.875 cm , con una desviación estándar de 0.177 cm , mientras que para el cocido fue de 1.85 cm , con desviación estándar de 0.187 cm . Esto indica que la cocción no modificó significativamente la morfología externa del material. Sin embargo, es posible que se hayan producido cambios en la porosidad interna, lo cual no se refleja en la dimensión macroscópica pero sí podría impactar en la difusión de los volátiles durante la reacción. En procesos de pirólisis, un tamaño de partícula menor generalmente favorece la transferencia de calor y masa, por lo que un paso de molienda previa podría resultar recomendable para mejorar la eficiencia del proceso.

Es importante destacar que las desviaciones estándar reflejan una dispersión limitada de los datos respecto a la media en todas las mediciones. Con valores de 0.85 \% m/m para humedad en el olote crudo y 0.85 \% m/m para el cocido; en el caso de las densidades, tanto la aparente como la real presentaron desviaciones estándar de 24.16 kg/m^3 en ambas muestras; Por otra parte, el tamaño de partícula empleado en el proceso se obtuvo mediante corte manual, seleccionando fragmentos con dimensiones inferiores a 2 cm . Esto se hace con el objetivo de reducir el tamaño de partícula, lo que aumenta la superficie específica y mejora la transferencia de calor durante el proceso. Los valores de tamaño de partícula obtenidos fueron de 0.177 cm en el olote crudo y 0.187 cm en el cocido. Estos resultados reflejan una alta reproducibilidad experimental y confiabilidad de los datos obtenidos. La homogeneidad observada permite concluir que las diferencias entre olote crudo y cocido no son atribuibles a errores de medición, sino a los cambios inducidos efectivamente por el tratamiento de cocción.

En conjunto, los resultados sugieren que, aunque la cocción aumenta la humedad ($81.31 \text{ \%} \pm 0.85$ en crudo frente a $85.04 \text{ \%} \pm 0.85$ en cocido) y la densidad (aparente de $713.07 \pm 24.16 \text{ kg/m}^3$ en crudo a $719.32 \pm 24.16 \text{ kg/m}^3$ en cocido; real de $483.33 \pm 24.16 \text{ kg/m}^3$ en crudo a $495.69 \pm 24.16 \text{ kg/m}^3$ en cocido), El tamaño de partícula se mantiene prácticamente inalterado ($1.875 \pm 0.177 \text{ cm}$ en crudo y $1.85 \pm 0.187 \text{ cm}$ en cocido), por lo que no constituye una variable que pueda afectar el proceso al momento de realizar la comparación

entre muestras de los bioaceites obtenidos. Estas variaciones deben ser consideradas al diseñar las condiciones de operación del reactor de pirólisis, ya que influyen directamente en la transferencia de calor, la eficiencia energética y el rendimiento de bioaceite.

El sistema se armó como un reactor por lotes colocado dentro de una mufla, con salida única de vapores hacia un condensador. La mufla aporta un calentamiento homogéneo y controlado en rampa, condición indispensable para reproducibilidad térmica y para alinear el perfil de calentamiento con el comportamiento de desvolatilización de la biomasa. Se empleó una rampa de 10 °C cada 30 min, un régimen deliberadamente lento que desacopla las etapas de hemicelulosa/celulosa/lignina, reduce craqueo secundario por sobrecalentamiento rápido y favorece la captura de volátiles en la fase líquida al dar tiempo a su evacuación y condensación. Operar con rampas lentas también facilita comparar contra TGA y asignar pérdidas de masa a ventanas de temperatura específicas.

Los vapores se enfrían de inmediato en el condensador para evitar reacciones secundarias y maximizar la recuperación de bioaceite. Las uniones llevan sello de grafito para minimizar fugas y la entrada de O₂; como el sistema no es perfectamente cerrado, pueden entrar trazas al arranque, pero el flujo de gases purga el aire rápidamente. Se mantuvieron tiempos y masa inicial constantes para fijar residencia y carga térmica, asegurar comparabilidad y facilitar los cierres de balance; así se dirige el flujo al condensador.

Su descomposición ocurre de manera más lenta y en un intervalo más amplio, lo que provoca que una fracción de sus compuestos permanezca como residuo sólido (char). Este comportamiento explica tanto el elevado porcentaje de biochar en el olote crudo como la presencia de compuestos fenólicos pesados en el bioaceite obtenido, ya que la lignina aporta moléculas más estables y menos volátiles.

En términos de rendimiento de productos de pirólisis (cuadros 9 y 10), el olote crudo presentó un valor elevado de biochar (66.35% m/m), acompañado de un bajo rendimiento de bioaceite (13.25% m/m) y una fracción gaseosa de 20.39% m/m. Por el contrario, el olote cocido mostró una disminución marcada en la formación de biochar (49.93% m/m) y un incremento tanto en el bioaceite (17.86% m/m) como en el gas de síntesis (32.22% m/m). Este comportamiento refleja que el tratamiento térmico previo disminuye la fracción sólida remanente, favoreciendo la formación de productos volátiles y líquidos.

Al comparar estos hallazgos con lo reportado para otras biomásas lignocelulósicas, se confirma que el olote de maíz sigue el mismo patrón: humedad <200 °C, hemicelulosa y celulosa 200–400 °C, y lignina >400 °C. Sin embargo, el tratamiento de cocción induce cambios significativos en la intensidad y localización de cada etapa, lo que repercute directamente en la distribución de productos. En particular, el incremento de bioaceite en el olote cocido (de 13% a 18% m/m) es consistente con la literatura, que indica que un

mayor aporte de fracciones volátiles en la etapa de 280–340 °C potencia la formación de compuestos condensables (Manals-Cutiño et al., 2011).

Adicionalmente, debe considerarse la influencia de las condiciones operativas utilizadas en la experimentación, ya que el reactor empleado no era completamente inerte. En este sistema ingresaban 35 g de olote seco, y la fracción no retenida como char era conducida directamente al condensador, lo que permite la posible ocurrencia de reacciones secundarias y ligera oxidación, debido a que el material no retenido permanece en la zona caliente del reactor por más tiempo antes de condensarse. Asimismo, la rampa de calentamiento aplicada (10 °C cada 30 minutos) tuvo un efecto en la dinámica de degradación: al ser moderada, prolongó el tiempo de residencia de los vapores, favoreciendo reacciones de craqueo y condensación que impactaron en la cantidad y calidad del bioaceite. Rampas más rápidas suelen inducir la formación de compuestos cerosos por descomposición incompleta, mientras que rampas más lentas extienden la liberación de volátiles, aumentando la captura de fase líquida. Estas diferencias explican las variaciones observadas entre los resultados y el análisis TGA realizado por CEMPRO, que opera bajo condiciones distintas de atmósfera y calentamiento.

Finalmente, aunque el rendimiento de bioaceite del olote es inferior al observado en otras biomásas lignocelulósicas bajo condiciones similares, la mejora relativa obtenida al someterlo a cocción y el análisis de las condiciones particulares de mi reactor resaltan la importancia tanto de los pretratamientos como de los parámetros operativos. Esto demuestra que la pirólisis de residuos agrícolas como el olote puede optimizarse ajustando la atmósfera del reactor, el rango de operación y la rampa de calentamiento, con implicaciones directas para maximizar la fracción líquida y reducir la generación de char residual.

El análisis por FTIR constituye una herramienta útil para la identificación cualitativa de los principales grupos funcionales presentes en los productos obtenidos por pirólisis, permitiendo inferir la presencia de ciertos tipos de compuestos de acuerdo con la teoría espectroscópica. No obstante, si bien el FTIR facilita una primera aproximación al tipo de estructuras químicas presentes, no permite una identificación inequívoca de compuestos individuales, debido a la superposición de bandas y a la complejidad de las mezclas generadas. Por ello, los resultados obtenidos deben interpretarse como un apoyo teórico y comparativo, y no como una técnica completamente concluyente, siendo necesario complementar el análisis con métodos más específicos para una caracterización química detallada.

Con base en lo ya mencionado, el análisis FTIR permite inferir sobre los grupos funcionales presentes en la materia prima antes del proceso de pirólisis, lo cual proporciona una base para interpretar los compuestos detectados en el bioaceite final. En el caso del olote crudo (Figura 12, Cuadro 7), el espectro mostró bandas representativas de alcoholes

y fenoles ($\sim 3328\text{ cm}^{-1}$) atribuidas al estiramiento O–H, típicos de la lignina y extractivos polares, así como hidrocarburos alifáticos ($\sim 2923\text{ cm}^{-1}$) correspondientes a estiramientos C–H de cadenas largas, indicativos de celulosa y hemicelulosa. Además, se identificaron grupos carbonilo (C=O) alrededor de 1629 cm^{-1} , asociados a estructuras aromáticas o ésteres, y enlaces C–O y C–O–C ($1242.5, 1052.6\text{ cm}^{-1}$) característicos de polisacáridos, éteres y estructuras de celulosa. Estos grupos reflejan una biomasa rica en polisacáridos estructurales con una contribución importante de lignina aromática.

En relación con la composición del bioaceite obtenido del olote crudo (Figura 16), se observó una distribución amplia de compuestos con número de carbonos entre 2 y 24, destacando un fuerte pico en C2 ($\sim 38\%$) y la presencia de compuestos pesados como C19 y C24. Esta composición se asocia a la fragmentación de componentes volátiles de la hemicelulosa y a la presencia de lignina parcialmente degradada, que genera compuestos aromáticos y fenólicos de mayor peso molecular. Lo anterior concuerda con los grupos funcionales detectados por FTIR, especialmente los carbonilos y los grupos fenólicos.

Por otro lado, el FTIR del olote cocido (Figura 13, Cuadro 8) conservó muchos de los grupos funcionales observados en el crudo, pero presentó algunas diferencias relevantes. Se mantienen las señales de O–H (3284 cm^{-1}) y C–H (2923 y 2853 cm^{-1}), indicando la persistencia de estructuras alifáticas y alcoholes, pero se intensificó notablemente la banda a 1743 cm^{-1} correspondiente a C=O de ésteres o cetonas. Esta modificación sugiere la formación de nuevos grupos funcionales derivados de reacciones térmicas durante la cocción, como ruptura de enlaces glucosídicos o degradación parcial de extractivos. Asimismo, se incrementó la intensidad de bandas entre 1155 y 1027 cm^{-1} , propias de enlaces C–O en éteres y alcoholes, resultado de la despolimerización de hemicelulosa.

La composición del bioaceite derivado del olote cocido (Figura 17) mostró una distribución más estrecha de compuestos con predominancia de cadenas cortas como C2, C5 y C6, y ausencia de fracciones superiores a C9. Esto evidencia que el pretratamiento térmico facilitó la ruptura de estructuras complejas, generando compuestos más ligeros, como ésteres, aldehídos volátiles y fragmentos de alcoholes. Tal distribución está en línea con los cambios observados en el FTIR del olote cocido, donde predominan los carbonilos y enlaces oxigenados. En conjunto, estos resultados confirman que la estructura química inicial del olote influye directamente en la naturaleza del bioaceite obtenido.

En síntesis, el olote cocido, al haber sufrido una transformación térmica previa, presenta señales que indican ruptura parcial de hemicelulosa y modificación de extractivos, favoreciendo la formación de compuestos más ligeros en el bioaceite. El olote crudo, con mayor contenido de estructuras aromáticas intactas, genera un bioaceite con mayor diversidad de pesos moleculares, incluyendo compuestos más pesados derivados de la lignina. Estos hallazgos confirman que la composición funcional inicial permite anticipar parcialmente el comportamiento térmico de la biomasa y su impacto en la calidad/composición del bioaceite.

En el Cuadro 9 se presentan los resultados de pirólisis del olote crudo, donde se observa que el producto mayoritario fue el biochar, con un rendimiento de 66.36 % m/m y desviación estándar de 0.88 % m/m. El bioaceite mostró un rendimiento de 13.25 % m/m, con desviación estándar de 0.55 % m/m, mientras que el gas de síntesis alcanzó un 20.39 % m/m, con desviación estándar de 0.55 % m/m. Este perfil confirma que, bajo las condiciones establecidas, el olote crudo tiende a formar principalmente residuo sólido. Dicho comportamiento es característico de materiales lignocelulósicos con alto contenido de lignina, donde las reacciones de condensación aromática y carbonización favorecen la retención de carbono en forma de char (Ogunjobi & Lajide, 2013).

En el caso del olote cocido, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 9, la distribución de productos fue diferente. El biochar disminuyó a 49.93 % m/m, con desviación estándar de 0.66 % m/m, mientras que el bioaceite aumentó a 17.86 % m/m, con desviación estándar de 0.39 % m/m, y el gas de síntesis a 32.22 % m/m, con desviación estándar de 0.49 % m/m. La reducción en la fracción sólida y el incremento de volátiles sugieren que la cocción previa alteró la estructura de la biomasa, posiblemente debido a fenómenos de hidrólisis parcial de hemicelulosas y reblandecimiento de la matriz lignocelulósica, lo que facilita la liberación de compuestos orgánicos durante la pirólisis (Zubiolo et al., 2023).

Cabe resaltar que las desviaciones estándar obtenidas reflejan una dispersión limitada de los datos respecto a la media en todos los productos, con valores entre 0.39 % m/m y 0.88 % m/m. Esto demuestra que, tanto en el caso del olote crudo como en el cocido, las corridas realizadas fueron consistentes y reproducibles, lo que respalda la viabilidad experimental de cada sistema de manera independiente. En consecuencia, los balances de masa y los porcentajes de rendimiento pueden considerarse representativos para cada tipo de materia prima evaluada, sin atribuirse las diferencias a errores o variabilidad significativa en las mediciones.

Es importante mencionar que, los rendimientos de bioaceite obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos, como los evaluados en este trabajo, suelen ser menores en comparación con los reportados para materiales de origen polimérico, debido a diferencias en composición química y contenido de oxígeno. Estudios sobre pirólisis de polímeros y residuos similares reportan rendimientos de bioaceite que pueden superar el 40–60 % en peso, mientras que los residuos lignocelulósicos presentan valores típicamente más bajos, asociados a una mayor formación de char y gases. No obstante, los rendimientos obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos esperados para biomasa y residuos orgánicos, confirmando la viabilidad del olote como materia prima para la producción de bioaceite bajo las condiciones evaluadas.

Los balances de masa y energía (figuras 13 y 14) refuerzan este análisis. Para el olote crudo, de los 35 g de materia seca alimentados al reactor, se obtuvieron 22.9 g de biochar (603.48 kJ), 7.09 g de gas (106.31 kJ) y 5.01 g de bioaceite (85.27 kJ). En cambio, el olote cocido generó 17.48 g de biochar (274.52 kJ), 11.28 g de gas (169.13 kJ) y 6.25 g de

bioaceite (111.75 kJ). El análisis energético muestra que, mientras el biochar obtenido del olote crudo concentra una mayor proporción de energía en su matriz sólida, el olote cocido favorece una distribución más equilibrada entre las fracciones líquida y gaseosa. El bioaceite resultante puede emplearse como combustible líquido o como insumo en la obtención de compuestos químicos, mientras que el gas de síntesis presenta potencial para su uso en generación de energía y como materia prima en procesos de síntesis química.

En términos de rendimiento másico global, el olote crudo presenta un perfil más conservador, con predominancia de char. Por su parte, el olote cocido mostró un mayor rendimiento en productos volátiles, alcanzando un 50.07 % m/m al sumar bioaceite y gas de síntesis, frente al 33.64 % m/m obtenido en el olote crudo. Este aumento de más del 15 % en fracciones energéticas volátiles permite afirmar que la cocción favorece la producción de compuestos con mayor potencial de aprovechamiento. En este sentido, los resultados demuestran que el pretratamiento por cocción afecta de manera positiva al rendimiento de productos volátiles, al desplazar la distribución desde un perfil dominado por biochar hacia uno con mayor proporción de bioaceite y gas de síntesis. Esto confirma que el tipo de pretratamiento de la biomasa es un factor determinante en la eficiencia de conversión y debe considerarse al seleccionar la materia prima para aplicaciones de pirólisis.

En el Cuadro 11 se presentan los resultados de la prueba t para comparar los rendimientos de bioaceite, gas de síntesis y biochar entre el olote crudo y el cocido. La hipótesis nula (H_0) en cada caso establecía que *no existía diferencia significativa en el rendimiento entre ambos tratamientos*, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) planteaba que *sí existía una diferencia significativa*. Los valores obtenidos muestran que para el bioaceite, la prueba t arrojó un valor de $t = -4.813$ con 6 grados de libertad y un $p = 0.00296$. Dado que el valor p es menor que 0.05, se rechaza la H_0 y se confirma que existe una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento de bioaceite entre olote crudo y cocido. Este resultado valida lo observado en los balances de masa, donde el olote cocido mostró un incremento en la producción de bioaceite.

En el caso del gas de síntesis, el valor de t fue de -11.177, con 6 grados de libertad y un valor p de 0.000031, lo que también conduce al rechazo de la H_0 . Este resultado evidencia que las diferencias en la producción de gas entre crudo y cocido son altamente significativas. La magnitud del estadístico t refleja que la variación observada no es atribuible al azar, sino al efecto del tratamiento de cocción que favorece la liberación de fracciones gaseosas.

Para el biochar, el análisis arrojó un valor t de 10.447, con 6 grados de libertad y un valor p de 0.000045. Nuevamente, el valor p es muy inferior al umbral de 0.05, por lo que se rechaza la H_0 . En este caso, la diferencia significativa se relaciona con la reducción del rendimiento de biochar en el olote cocido frente al crudo, confirmando que la cocción previa desplaza la distribución de productos hacia compuestos volátiles.

En síntesis, los resultados estadísticos demuestran que en los tres productos analizados (bioaceite, gas de síntesis y biochar), las diferencias entre olote crudo y cocido son estadísticamente significativas al 95 % de confianza. Esto confirma que el pretratamiento de cocción no solo modifica la estructura física y química del olote, sino que también influye de manera determinante en la distribución de productos de la pirólisis, aumentando la proporción de compuestos volátiles (bioaceite y gas) y reduciendo la cantidad de char generado.

Los bioaceites obtenidos por pirólisis de olote crudo y cocido fueron caracterizados mediante análisis fisicoquímicos y cromatografía de gases, con el propósito de establecer diferencias derivadas del pretratamiento y evaluar su potencial de aplicación. En ambos casos se confirmó que los líquidos presentan una composición dominada por compuestos oxigenados volátiles de bajo peso molecular, principalmente alcoholes, ácidos y cetonas, con un claro predominio de fracciones de dos carbonos y la presencia en menor proporción de compuestos de C3–C6 y trazas de cadenas largas. Este perfil químico condiciona tanto su comportamiento energético y estabilidad como las posibles aplicaciones industriales que pueden derivarse.

En cuanto a la densidad, como se puede observar en el Cuadro 16 y Cuadro 17, el bioaceite del olote crudo presentó un valor de $1031.25 \text{ kg/m}^3 \pm 14.23$, mientras que el cocido alcanzó $1029.17 \text{ kg/m}^3 \pm 14.43$. Estos valores son superiores a los combustibles fósiles líquidos como el diésel ($\approx 830\text{--}850 \text{ kg/m}^3$) y consistentes con lo reportado en la literatura para bioaceites lignocelulósicos ($\approx 1000\text{--}1200 \text{ kg/m}^3$; Bridgwater, 2012; Zubiolo et al., 2023). Esta densidad elevada refleja la presencia significativa de compuestos oxigenados y agua, lo que coincide con la distribución cromatográfica dominada por especies ligeras de bajo número de carbonos. Desde el punto de vista práctico, esta característica favorece la compatibilidad con sistemas acuosos y abre la posibilidad de utilizar el bioaceite como co-solvente en formulaciones base agua, tales como adhesivos, tintas o recubrimientos. Sin embargo, esta misma naturaleza heterogénea, asociada a su origen y a la complejidad de sus componentes, limita su aplicación en sectores con estándares estrictos de pureza como la industria farmacéutica o alimentaria.

La viscosidad, también presentada en el Cuadro 16 y Cuadro 17, fue de $1.876 \text{ cSt} \pm 0.106$ en el bioaceite crudo y $1.956 \text{ cSt} \pm 0.111$ en el cocido. Estos valores, considerablemente menores que los reportados en la literatura para otros bioaceites ($\approx 5\text{--}15 \text{ cSt}$) y cercanos a la viscosidad del agua (1 cSt), confirman que el bioaceite de olote está constituido principalmente por compuestos de bajo peso molecular, entre los que predominan alcoholes, ácidos y cetonas de cadena corta. La baja viscosidad refleja la escasa presencia de fracciones pesadas derivadas de lignina y otros polímeros de la biomasa, lo que coincide con los resultados obtenidos en la cromatografía, donde se identificaron volátiles de C2 a C6 en mayor proporción.

Esta elevada fluidez no solo facilita operaciones de bombeo y atomización, sino que también resulta ventajosa en aplicaciones industriales que requieren rápida humectación de superficies y tiempos de secado reducidos, como en procesos de limpieza y desengrase o en la formulación de pinturas, resinas y adhesivos. En este sentido, el bioaceite podría sustituir parcialmente a solventes oxigenados convencionales, como acetona, metil etil cetona o isopropanol, aportando la ventaja de su origen renovable. No obstante, la naturaleza heterogénea y la presencia de oxigenados polares limitan su uso a aplicaciones industriales, quedando descartados aquellos sectores que demandan solventes de alta pureza, como el farmacéutico o el alimentario.

Respecto a la solubilidad en agua, los resultados presentados en el Cuadro 16 y Cuadro 17 muestran valores de $78.35 \% \pm 3.25$ en el bioaceite crudo y $81.88 \% \pm 4.32$ en el cocido, lo que evidencia su marcada polaridad y refuerza la presencia de alcoholes, ácidos y cetonas de cadena corta. Este comportamiento representa tanto una ventaja como una limitación. Por un lado, facilita su incorporación en sistemas “water-borne”, como adhesivos poliméricos, recubrimientos, tintas de impresión y limpiadores industriales, donde la miscibilidad con agua es esencial. Asimismo, su carácter hidrofílico lo convierte en un co-solvente atractivo para formulaciones de limpieza sostenibles, con el potencial de reducir el uso de solventes derivados del petróleo y disminuir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC), alineándose con los principios de la química verde (Clark et al., 2016). Por otro lado, la alta solubilidad compromete la estabilidad en almacenamiento y aumenta el riesgo de corrosión debido a la acidez y presencia de fenoles, lo que requeriría neutralización o el uso de inhibidores antes de su aplicación industrial.

En cuanto a la estabilidad térmica, se registró una pérdida de $10.55 \% \pm 0.81$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $26.13 \% \pm 0.83$ a $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el bioaceite crudo, mientras que en el cocido las pérdidas fueron ligeramente menores ($8.20 \% \pm 1.09$ y $21.19 \% \pm 1.09$, respectivamente). Estos resultados confirman la volatilidad característica de este tipo de biocombustibles, aunque también muestran que el pretratamiento de cocción confiere al bioaceite una ligera mayor retención de compuestos de mediano peso molecular (C5–C6), que incrementan su estabilidad relativa. Desde el punto de vista de aplicación, esta volatilidad lo hace atractivo en recubrimientos y tintas de secado rápido, aunque restringe su uso en procesos que requieren resistencia térmica superior a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El poder calorífico inferior, como se aprecia en el Cuadro 12 y Cuadro 13, fue de $17,011.500\text{ J/g} \pm 1.04$ en el bioaceite crudo y $17,880.500\text{ J/g} \pm 1.01$ en el cocido. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para bioaceites de residuos agrícolas ($15\text{--}20\text{ MJ/kg}$), pero claramente son inferiores a los combustibles fósiles líquidos convencionales (diésel $\approx 43\text{ MJ/kg}$; gasolina $\approx 46\text{ MJ/kg}$). El valor ligeramente mayor en el bioaceite cocido puede atribuirse a la mayor proporción de compuestos de C5–C6 identificados en la cromatografía, lo que confirma que el pretratamiento de cocción no solo

modifica la distribución de productos, sino que también repercute en la calidad energética del líquido.

Estos valores descartan su uso directo como sustituto de diésel o gasolina, pero lo posicionan como viable en esquemas de co-combustión, particularmente en mezclas con fuel oil N° 2 y N° 4, que son los combustibles residuales más empleados en calderas de generación de vapor, hornos cementeros y procesos de secado industrial. La similitud en densidad y composición oxigenada favorecería la miscibilidad con estos combustibles pesados, permitiendo aprovechar el carácter renovable del bioaceite sin comprometer la estabilidad de combustión. Asimismo, la combinación con biodiésel resulta atractiva debido a la naturaleza oxigenada de ambos, lo que facilita la mezcla en sistemas adaptados.

Los resultados evidencian que el bioaceite de olote podría mejorar sus propiedades energéticas mediante procesos de *upgrading*, tales como la destilación fraccionada o el hidrot ratamiento catalítico, que en la literatura han demostrado incrementar el PCI hasta valores en el rango de 25–30 MJ/kg, acercando a estos líquidos renovables a los combustibles fósiles convencionales en términos de densidad energética. Además, dichos tratamientos no solo contribuyen a aumentar el contenido energético, sino que también permiten reducir la acidez, la inestabilidad y el alto contenido de oxígeno característico de los bioaceites crudos, lo cual amplía su aplicabilidad en motores de combustión y procesos industriales. De esta manera, el aprovechamiento del olote mediante pirólisis, acompañado de estrategias de refinamiento posteriores, se proyecta como una alternativa viable y sostenible para diversificar la matriz energética y disminuir la dependencia de fuentes fósiles.

El análisis cromatográfico confirmó que en el bioaceite crudo predomina la fracción de C2 (~38 %), seguida por C3–C6 en proporciones de 3–8 % y trazas de C18–C20, mientras que en el cocido se observó una mayor concentración de C2 (41 %) y un aumento notable de compuestos C5 (17 %) y C6 (9 %). Esta distribución refuerza la idea de que ambos bioaceites están compuestos por oxigenados volátiles de cadena corta, semejantes a solventes industriales como acetona, ácido acético o etanol, que se utilizan ampliamente en pinturas, adhesivos, recubrimientos y limpieza. Por tanto, el bioaceite de olote puede considerarse un sustituto parcial de solventes oxigenados industriales, con la ventaja adicional de provenir de una fuente renovable.

En conjunto, la caracterización fisicoquímica presentada en el Cuadro 12 y Cuadro 13 muestra que el bioaceite de olote posee alta densidad, baja viscosidad, elevada solubilidad en agua, volatilidad marcada y poder calorífico moderado, lo que lo diferencia claramente de los combustibles fósiles convencionales, pero lo aproxima a solventes oxigenados de uso industrial. Estas características sustentan un doble potencial de aprovechamiento, por un lado, como co-solvente bio-based en formulaciones acuosas para recubrimientos,

adhesivos, tintas y limpieza industrial; y por otro, como combustible líquido en esquemas de co-combustión en sistemas térmicos industriales, donde su densidad energética y fluidez pueden ser aprovechadas de manera eficiente. Las diferencias entre bioaceite crudo y cocido, con una ligera mejora en estabilidad térmica y poder calorífico en el segundo, evidencian la influencia positiva del pretratamiento, que no solo modifica la composición química, sino que también amplía las posibilidades de aplicación.

El proceso de pirólisis presenta la ventaja de permitir el tratamiento conjunto del residuo de olote con otros materiales presentes en la corriente de residuos, reduciendo la necesidad de etapas intermedias de separación. Esta característica simplifica el manejo del residuo en condiciones reales, donde la segregación completa no siempre es viable, y contribuye a disminuir costos operativos y complejidad del proceso. En este sentido, la pirólisis se perfila como una alternativa adecuada para el tratamiento de olote crudo y cocido, al ofrecer mayor flexibilidad frente a la composición del material alimentado al reactor.

IX. CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización física del olote crudo y cocido, obteniéndose humedad, densidad aparente, densidad real y tamaño de partícula como propiedades clave para definir su comportamiento en la pirólisis. La humedad fue la propiedad más determinante, con valores de $81.31 \% \pm 0.85$ en el olote crudo y $85.04 \% \pm 0.85$ en el cocido, ya que condiciona el requerimiento energético de secado y la posterior liberación de volátiles. La densidad aumentó levemente tras la cocción (424.390 ± 24.16 a 436.78 ± 24.16 kg/m³ en densidad aparente y 483.33 ± 24.16 a 495.69 ± 24.16 kg/m³ en densidad real), lo que indica una ligera compactación estructural. En cambio, el tamaño de partícula se mantuvo prácticamente inalterado (1.875 ± 0.177 cm en crudo y 1.85 ± 0.187 cm en cocido). Estos resultados permiten establecer las condiciones de preparación de la materia prima y resaltan la influencia del pretratamiento en parámetros relevantes para el diseño de equipos de pirólisis.
- Se determinó el rendimiento de bioaceite como producto líquido de la pirólisis de olote crudo y cocido. El olote crudo presentó un valor de $13.25 \% \pm 0.55$, mientras que el olote cocido alcanzó $17.86 \% \pm 0.39$, lo que representa un incremento de más de 4.5 puntos porcentuales tras el pretratamiento. La prueba t confirmó que esta diferencia es estadísticamente significativa ($p < 0.05$), lo cual permite inferir que el proceso de cocción favorece la generación de fracciones condensables durante la reacción de pirólisis. Consolidando la influencia positiva del pretratamiento en el rendimiento líquido del proceso de pirólisis.
- La caracterización de los bioaceites de olote crudo y cocido mediante cromatografía de gases y análisis fisicoquímicos confirmó una composición dominada por oxigenados de bajo peso molecular (C1–C9 en el crudo y C1–C7 en el cocido). La cocción resultó en cambios en estabilidad térmica y poder calorífico, y generó propiedades aptas para etapas de transformación química (matrices más uniformes y menor susceptibilidad a degradación). En conjunto, sus bajas viscosidades (1.876 cSt en el crudo y 1.956 cSt el cocido), alta solubilidad (78–82 % m/m) y densidades de 1031 kg/m³ y 1029 kg/m³ para el crudo y cocido, respectivamente, sustentan su empleo como solvente tradicional y co-solvente bio-based en recubrimientos, adhesivos y limpieza; además, su PCI intermedio (17.0 MJ/kg el crudo y 17.9 MJ/kg el cocido) respalda su integración en esquemas de co-combustión con combustibles líquidos convencionales.

X. RECOMENDACIONES

- Evaluar la influencia del tamaño de partícula del olote en el proceso de pirólisis, con el propósito de establecer su impacto en la transferencia de calor y en la distribución de productos generados.
- Determinar la influencia de la composición atmosférica dentro del reactor sobre el proceso de pirólisis, con el propósito de identificar variaciones en la calidad y el rendimiento de los productos obtenidos en futuras investigaciones.
- Evaluar el uso de catalizadores heterogéneos para promover la desoxigenación del bioaceite y obtener productos líquidos con menor acidez, mayor estabilidad y mayor poder calorífico.
- Explorar la implementación de variaciones en las rampas de calentamiento, distintas a la evaluada en este trabajo, con el fin de analizar su efecto en la distribución de productos.
- Realizar un estudio térmico del sistema de pirólisis empleado, identificando pérdidas de calor en el reactor y en el condensador. Con esta información podrían proponerse mejoras de aislamiento o recuperación de energía para aumentar la eficiencia global del proceso.
- Evaluar el escalamiento del proceso de pirólisis a sistemas de mayor capacidad, con el fin de analizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en laboratorio y estudiar la viabilidad técnica y económica a nivel piloto o industrial.
- Replicar el estudio con otros residuos agrícolas, bajo condiciones similares de pirólisis, para determinar si el comportamiento observado es generalizable o propio del olote de maíz.
- Explorar la aplicación de pretratamientos fisicoquímicos en el olote, como lavados ácidos o básicos, con el objetivo de modificar su composición lignocelulósica y evaluar su efecto en la calidad del bioaceite y en la reducción de compuestos indeseados.
- Analizar la distribución geográfica y disponibilidad del residuo de olote a nivel nacional, ya que la recolección y el suministro continuo de la materia prima representan uno de los principales retos para el escalamiento del proceso.
- Evaluar el uso potencial del biochar y del gas de síntesis generados en la pirólisis, con el objetivo de mejorar la circularidad del proceso, la viabilidad técnica y económica del proyecto.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboelela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majozi, T., & Bassyouni, M. (2023). Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15(14), 11238. <https://doi.org/10.3390/su151411238>
- Agilent Technologies. (2025). *WAX GC Columns*. Recuperado de <https://www.agilent.com/en/product/gc-columns/wax-gc-columns>
- Aladin, M., Fahmi, M. R., & Aris, A. (2018). Effect of temperature and retention time on product yield of slow pyrolysis of corn cob. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 175, 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/175/1/012020>
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Camm, J. D., & Cochran, J. J. (2021). *Estadística para negocios y economía* (14.ª ed.). Cengage Learning.
- Amrullah, A., Nugroho, W. A., & Budiman, A. (2021). Analysis of bio-oil composition from pyrolysis using GC/MS technique. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 154, 104–115. [10.1016/j.jaap.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.05.001)
- Arroyo-López, M. S., & Guerrero-Espinosa, F. M. (2019). *Análisis comparativo de la densidad y velocidad de ignición óptimas para la combustión completa del olote perteneciente al Zea mays L.* *Científica*, 23(1), 43–50. Instituto Politécnico Nacional. Recibido 2 de abril de 2018; aprobado 28 de septiembre de 2018
- Bridgwater, A. V. (2007). The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass. *International Journal of Global Energy Issues*, 27(2), 160–203. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2007.013652>
- Carrier, M., Windt, M., Ziegler, B., Appelt, J., Saake, B., Meier, D., & Bridgwater, A. (2017). Quantitative insights into the fast pyrolysis of extracted cellulose, hemicelluloses and lignin. *ChemSusChem*, 10(16), 3212–3224. <https://doi.org/10.1002/cssc.201700984>
- Chin, K. L., Hakeem, K. R., & Yusup, S. (2015). Bio-oil production from biomass via fast pyrolysis. In K. R. Hakeem (Ed.), *Biomass and Bioenergy* (pp. 161–191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07641-6_8
- CIQUIME & Raízen Argentina S.A. (2019). *Ficha de datos de seguridad: Fuel Oil N°4*. Versión 1, marzo de 2019.
- Clark, J., Farmer, T., Hunt, A., & Sherwood, J. (2016). Opportunities for bio-based solvents created as petrochemical and fuel products transition towards renewable resources. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1524. <https://doi.org/10.3390/ijms17091524>

Córdoba, J. A., Salcedo, E., Rodríguez, R., Zamora, J. F., Manríquez, R., Contreras, H., Robledo, J., & Delgado, E. (2013). Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas. *Revista Latinoamericana de Química*, 41(3), 171–184

Corzo, A. G. (2019). *Técnicas de análisis en Química Orgánica: Cromatografía*. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales

Demirbas, A. (2017). *Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals*. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(7), 592–601. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798>

Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño (Colombia). *Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*, 5(1), 64–75. <https://doi.org/10.23850/26652447/5/1/2769>

Excedr (2023, septiembre 27) What Is Gas Chromatography & How Does It Work?. <https://www.excedr.com/blog/what-is-gas-chromatography-how-does-it-work>

Gallego Villa, J. D., Grisales Gallego, M., Mejía, A., & Galvis Ocampo, S. M. (2019). *Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño – Colombia*. *Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*, 64–75. [10.23850/26652447/5/1/2769](https://doi.org/10.23850/26652447/5/1/2769)

Grams, E. M. (2020). Quantitative analysis using gas chromatography: Calibration and methods. *Analytical Chemistry Series*, 15(4), 255–263

Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2018). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill.

Guizani, C., Haddad, K., Limousy, L., & Jeguirim, M. (2017). New insights on the structural evolution of biomass char upon pyrolysis as revealed by Raman spectroscopy and elemental analysis. *Carbon*, 119, 519–521. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.078>

He, Z., Wang, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2020). GC-MS analysis of pyrolysis oil derived from agricultural waste. *Biomass and Bioenergy*, 138, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105562>

Ibrahim, H. A.-H. (Ed.). (2020). Recent advances in pyrolysis. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92492>

John, B., & Brian, L. (2020). Slow pyrolysis of maize cob: Optimization of bio-oil yield using response surface methodology. *ACI*, 1380, 1–10.

- Jwaili, M. (2019) Pharmaceutical Applications of Gas Chromatography. *Open Journal of Applied Sciences*, 9, 683-690. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2019.99055>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista De Química*, 26(1-2), 37-40. Recuperado a partir de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547>
- Larptansuphaphol, T., & Jitjumroonchokchai, S. (2019). Determination of calorific value of bio-oil derived from biomass. *Energy Procedia*, 157, 1369–1376. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.356>
- Lu, Q., Li, W. Z., & Zhu, X. F. (2011). Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. *Energy Conversion and Management*, 50(5), 1376–1383. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.016>
- Maschio, G., Koufopoulos, C., & Lucchesi, A. (1992). Pyrolysis, a promising route for biomass utilization. *Bioresource Technology*, 42(3), 219–231. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90025-S](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90025-S)
- Masucci, M., & Caldwell, D. (2004). Gas chromatography in environmental analysis. *Environmental Chemistry Letters*, 2(4), 189–195. <https://doi.org/10.1007/s10311-004-0094-6>
- Marmioli, M., Gullì, M., Cangioli, L., Frusciante, S., Graziano, S., & Bevivino, A. (2018). Structural and functional features of chars from different biomass feedstocks. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1119. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01119>
- Meier, D. (2017). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 70, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.035>
- Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M., & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Revista Cubana de Química*, 23(2), 180–190.
- Mészáros, E., Jakab, E., Várhegyi, G., Szepesvári, P., & Marosvölgyi, B. (2004). Comparative study of the thermal behavior of wood and bark of young shoots obtained from an energy plantation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 317–328.
- Müller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., Krebs, L., & Müller, U. (2003). A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 68(2), 231–249.
- Ogunjobi, J. K., & Lajide, L. (2013). Characterisation of bio-oil and bio-char from slow-pyrolysed Nigerian yellow and white corn cobs. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 4, 77–84.

Perry, R. H., Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Sfetsas, T., Zanikos, F., Stournas, S., & Lois, E. (2010). Analysis of bio-oils by gas chromatography–mass spectrometry. *Renewable Energy*, 35(12), 2563–2570. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.032>

Tanquilut, N. C., Lim, P. K., & Ngo, S. (2020). Energy content analysis of pyrolysis bio-oils using bomb calorimetry. *Renewable Energy*, 156, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.135>

UNADM. (2020). *Unidad 1: Balance de masa y energía y operaciones unitarias*. División de Ciencias de la Salud, Biológicas y Ambientales, Ingeniería en Energías Renovables. Recuperado de: https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE2/ER/05/EBMOP/unidad_01/descargables/EBMOP_U1_Contentido.pdf

Undri, A., Abou Rjeily, M., Frediani, M., & Rosi, L. (2015). Use of GC-MS for the characterization of pyrolysis bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.06.002>

United States Department of Agriculture (USDA). (2019, junio 26). Grain and Feed Annual: Guatemala's Corn Sector. Oficina de Asuntos Agrícolas (GAIN). Reporte GAIN GT19007. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Grain+and+Feed+Annual+Guatemala+City+Guatemala+6-26-2019.pdf&utm_source=chatgpt.com

United States Department of Agriculture. (n.d.). *Zea mays L.* Germplasm Resources Information Network (GRIN). U.S. National Plant Germplasm System. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=311987>

Wilkie, C. A., & Morgan, A. B. (Eds.). (2024). *Fire retardancy of polymeric materials* (3rd ed.). CRC Press.

Wood, J., Jones, M., & Williams, P. T. (2013). Influence of biomass type and pyrolysis conditions on the properties of bio-oil. *Bioresource Technology*, 142, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.038>

Zubiolo, C., de Santana, H. E. P., Pereira, L. L., Ruzene, D. S., Silva, D. P., & Freitas, L. S. (2024). Bio-oil production and characterization from corn cob and sunflower stem pyrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(1), 65–77. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03337>

XII. ANEXOS

A. CÁLCULO DE MUESTRA

Cálculo 1. Tamaño de muestra

- Establecer los parámetros con los que se van a trabajar:
 - Margen de error del 5.0%.
 - Un valor de Z con una confianza del 95%, este valor debe ser de 1.96.
 - Desviación estándar estimada de 1.75%.
 - Diferencia mínima de 3.5.
- Cálculo del tamaño de muestra:

$$n = \frac{2 \cdot (1.96 + 0.84)^2 \cdot (1.75)^2}{(3.5)^2} = 3.92 \approx 4$$

Se muestra el cálculo del tamaño de muestra haciendo uso de la **Ecuación 1** de la sección de metodología.

Cálculo 2. Rendimientos de conversión

$$X = \frac{m_{\text{bioaceite}}}{m_{\text{Entrada}}} * 100 = \% \text{ conversión}$$

$$X = \frac{6.2}{35 \text{ g}} * 100 = 17.714\%$$

Se muestra el cálculo del % de rendimiento de conversión de olote cocido a bioaceite tras el proceso de pirólisis. Los datos se encuentran en el cuadro no. 31 y 39.

Cálculo 3: Solubilidad

$$\% \text{ pérdida} = \frac{m_o - m_f}{m_o} * 100$$

$$\% \text{ pérdida} = \frac{0.5 - 0.459}{0.5} * 100 = 8.200 \%$$

Se muestra el cálculo del % de solubilidad a 100 °C del bioaceite tras el proceso de pirólisis. Los datos se encuentran en el cuadro no. 18 y 60.

Cálculo 4. Viscosidad

$$\frac{n_{muestra}}{n_{patrón}} = \frac{\rho_{muestra} * t_{muestra}}{n_{patrón} * t_{patrón}}$$

$$n_m = 0.890 * \frac{0.920 * 1195.2}{0.9970 * 82.0} = 0.890 * 2.1966$$

$$= 1.955 \text{ mPa} * \text{s} * \frac{1 \text{ Pa} * \text{s}}{1000 \text{ mPa} * \text{s}} * \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}}{1 \text{ Pa} * \text{s}} = 1.955 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}$$

Se muestra el cálculo de viscosidad de bioaceite a partir de olote cocido tras el proceso de pirólisis. Los datos se encuentran en los cuadros no. 19 y 59.

B. DATOS ORIGINALES

Cuadro 18. Solubilidad de bioaceites

Bioaceite	Masa inicial (±0.1 g)	Vol. Etanol (± 0.10 ml)	Masa disuelta (± 0.1 g)
Olote crudo	1	10	0.7835
Olote cocido	1	10	0.8188

El cuadro anterior muestra la solubilidad del bioaceite obtenido de olote crudo y cocido en 10 mL de etanol. Se observa cómo la cantidad de masa disuelta varía entre ambos tipos de bioaceite, con el de olote cocido mostrando una mayor solubilidad en etanol.

Cuadro 19. Estabilidad térmica bioaceite de olote cocido

Temperatura (°C)	Masa inicial (±0.1 g)	Masa final (±0.1 g)
100	0.5	0.459
120	0.5	0.4265
135	0.5	0.39405

El cuadro anterior muestra la estabilidad térmica del bioaceite cocido a tres diferentes temperaturas: 100°C, 120°C y 135°C.

Cuadro 20. Estabilidad térmica bioaceite de olote crudo

Temperatura (°C)	Masa inicial (±0.1 g)	Masa final (±0.1 g)
100	0.5	0.44725
120	0.5	0.4067
135	0.5	0.36935

El cuadro anterior muestra la estabilidad térmica del bioaceite crudo a las mismas tres temperaturas (100°C, 120°C y 135°C).

Cuadro 21. Datos para determinar Densidad aparente de bioaceite Olote crudo

No. Mx	Masa Olote (± 0.1 g)	Vol. Inicial probeta (± 0.20 mL)	Vol. Final probeta (± 0.20 mL)
1	0.7	6	7
2	1.45	6	8
3	0.7	6	7
4	0.8	6	7.1

El cuadro anterior muestra las densidades reales del olote crudo obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001 g y una probeta mara ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 1 mL.

Cuadro 22. Datos para determinar Densidad real de bioaceite Olote crudo

No. Mx	Masa Olote (± 0.1 g)	Vol. Inicial probeta (± 0.20 mL)	Vol. Final probeta (± 0.20 mL)
1	0.8	20	21.5
2	0.5	20	21
3	0.6	20	21.5
4	0.6	20	21.2

El cuadro anterior muestra las densidades reales del olote crudo obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001 g y una probeta mara ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 1 mL.

Cuadro 23. Datos para cálculo Densidad aparente Olote cocido

No. Mx	Masa Olote (± 0.1 g)	Vol. Inicial probeta (± 0.20 mL)	Vol. Final probeta (± 0.20 mL)
1	0.7	6	7
2	1.5	6	8
3	0.7	6	7
4	0.8	6	7.1

El cuadro anterior muestra las densidades aparentes del olote cocido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001 g y una probeta mara ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 0.25 mL.

Cuadro 24. Datos para cálculo de Densidad real Olote crudo

No. Mx	Masa Olote (± 0.1 g)	Vol. Inicial probeta (± 0.20 mL)	Vol. Final probeta (± 0.20 mL)
1	0.75	20	21.5
2	0.6	20	21.2
3	0.7	20	21.45
4	0.6	20	21.2

El cuadro anterior muestra las densidades reales del olote cocido obtenidas a partir de una balanza analítica marca Pioneer con una incertidumbre de ± 0.0001 g y una probeta mara ValueWare de 25mL con una incertidumbre de ± 0.25 mL.

Cuadro 25. Datos cálculo de % de humedad en Olote crudo

No. muestra	Masa inicial (g)	Masa Final (g)
1	0.904	0.161
2	0.899	0.163
3	0.936	0.180
4	0.541	0.106

El cuadro anterior muestra los valores de masa inicial y masa final obtenidos para el olote crudo, determinados mediante una balanza de humedad marca OHAUS con una lectura mínima de 0.01 g / 0.1 %.

Cuadro 26. Datos cálculo de % de Humedad en olote cocido

No. muestra	Masa inicial (g)	Masa Final (g)
1	2.193	0.342
2	1.059	0.160
3	2.314	0.332
4	2.200	0.326

El cuadro anterior presenta las masas iniciales y finales registradas para el olote cocido, calculadas a partir de una balanza de humedad marca OHAUS con una lectura mínima de 0.01 g / 0.1 %.

Cuadro 27. Tamaño de partícula olote crudo y cocido

Olote crudo (cm)	Olote cocido (cm)
1.70	1.700
1.80	1.800
2.00	2.000
1.75	1.750
2.10	2.100
1.90	1.950
1.65	1.600
2.10	2.090

El cuadro anterior muestra las medidas de longitud de las partículas de olote crudo y cocido, determinadas utilizando una regla graduada en centímetros, con una precisión de ± 0.05 cm.

Cuadro 28. Datos cálculo de poder calorífico de bioaceite producido por pirólisis de Olote crudo

No. Mx	Peso crisol (± 0.1 g)	Peso bioaceite (± 0.1 g)	Peso crisol final (± 0.1 g)
1	5.787	0.210	5.787
2	5.787	0.198	5.787
3	5.787	0.200	5.787
4	5.787	0.205	5.787

El cuadro anterior muestra los datos obtenidos de poder calorífico del bioaceite producido por pirólisis de olote crudo, utilizando la bomba calorimétrica IKA C200.

Cuadro 29. Datos cálculo de poder calorífico de bioaceite producido por pirólisis de Olote cocido

No. Mx	Peso crisol (± 0.1 g)	Peso bioaceite (± 0.1 g)	Peso crisol final (± 0.1 g)
1	5.787	0.210	5.787
2	5.787	0.200	5.787
3	5.787	0.195	5.787
4	5.787	0.200	5.787

El cuadro anterior muestra los datos obtenidos de poder calorífico del bioaceite producido por pirólisis de olote cocido, utilizando la bomba calorimétrica IKA C200.

Cuadro 30. Pesos productos de pirólisis de olote crudo

No. Corrida	Bioaceite (±0.1 g)	Biochar (±0.1 g)	Gas de síntesis (±0.35 g)
1	4.1	24.4	6.5
2	5.4	22.5	7.1
3	4.55	22.6	7.85
4	4.5	23.4	7.1

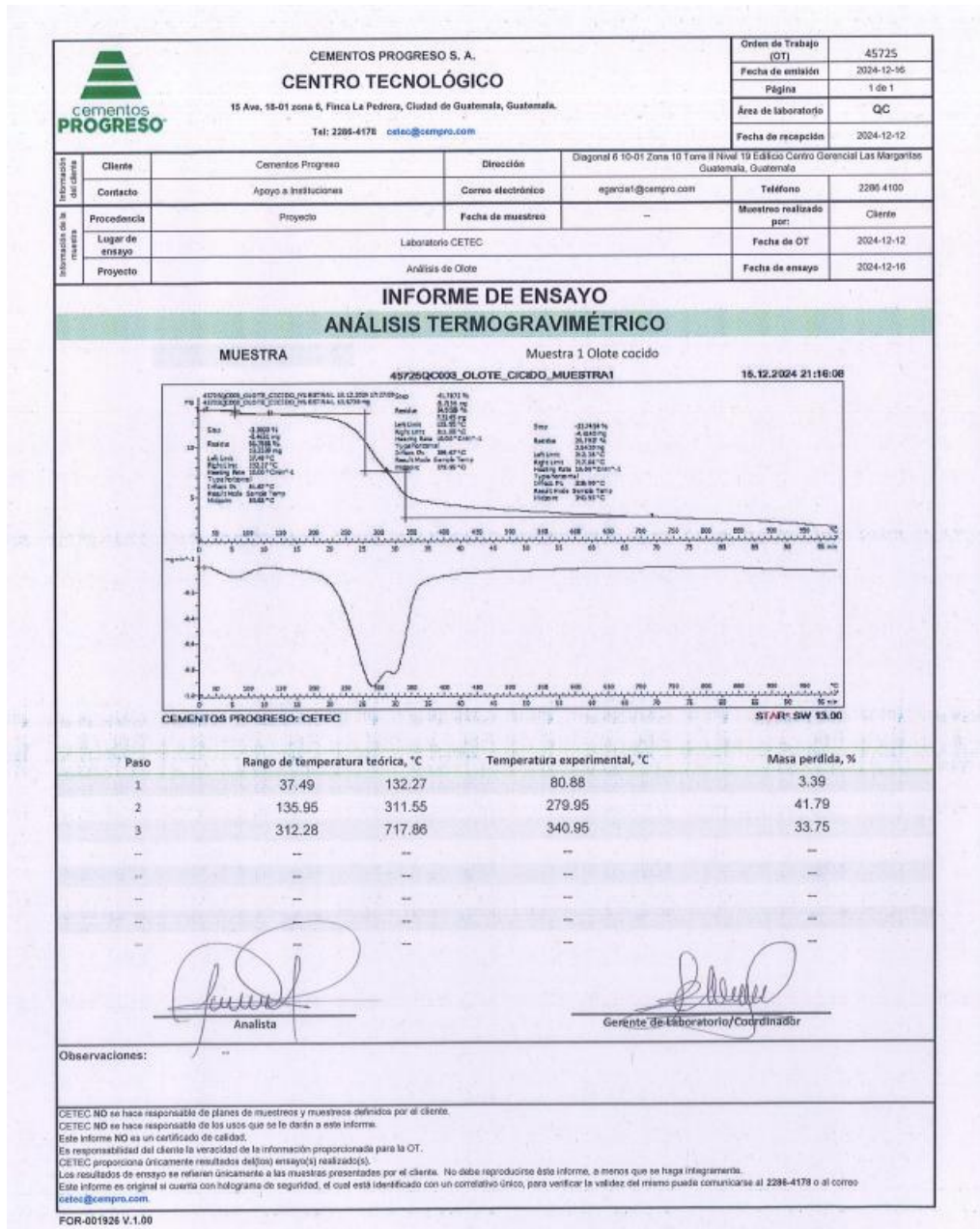
En el Cuadro 28 se presentan los valores de los productos obtenidos en la pirólisis del olote crudo en un reactor de 100 g. Se registran de manera individual los pesos de bioaceite, biochar y gas de síntesis correspondientes a cada una de las cuatro corridas realizadas. Esta información permite observar la distribución de las fracciones generadas en cada experimento y constituye la base para los cálculos posteriores de rendimiento y análisis estadístico.

Cuadro 31. Pesos productos de pirólisis de olote cocido

No. corrida	Bioaceite (g)	Biochar (g)	Gas de síntesis (±0.35 g)
1	6.2	17.5	11.3
2	6.8	17	11.2
3	5.9	18.4	10.7
4	6.1	17	11.9

El cuadro anterior muestra los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones experimentales pero utilizando olote cocido como materia prima. Al igual que en el caso anterior, se reportan los pesos de las tres fracciones principales de la pirólisis en cada corrida, lo que proporciona un registro comparativo de los productos sólidos, líquidos y gaseosos generados en el proceso.

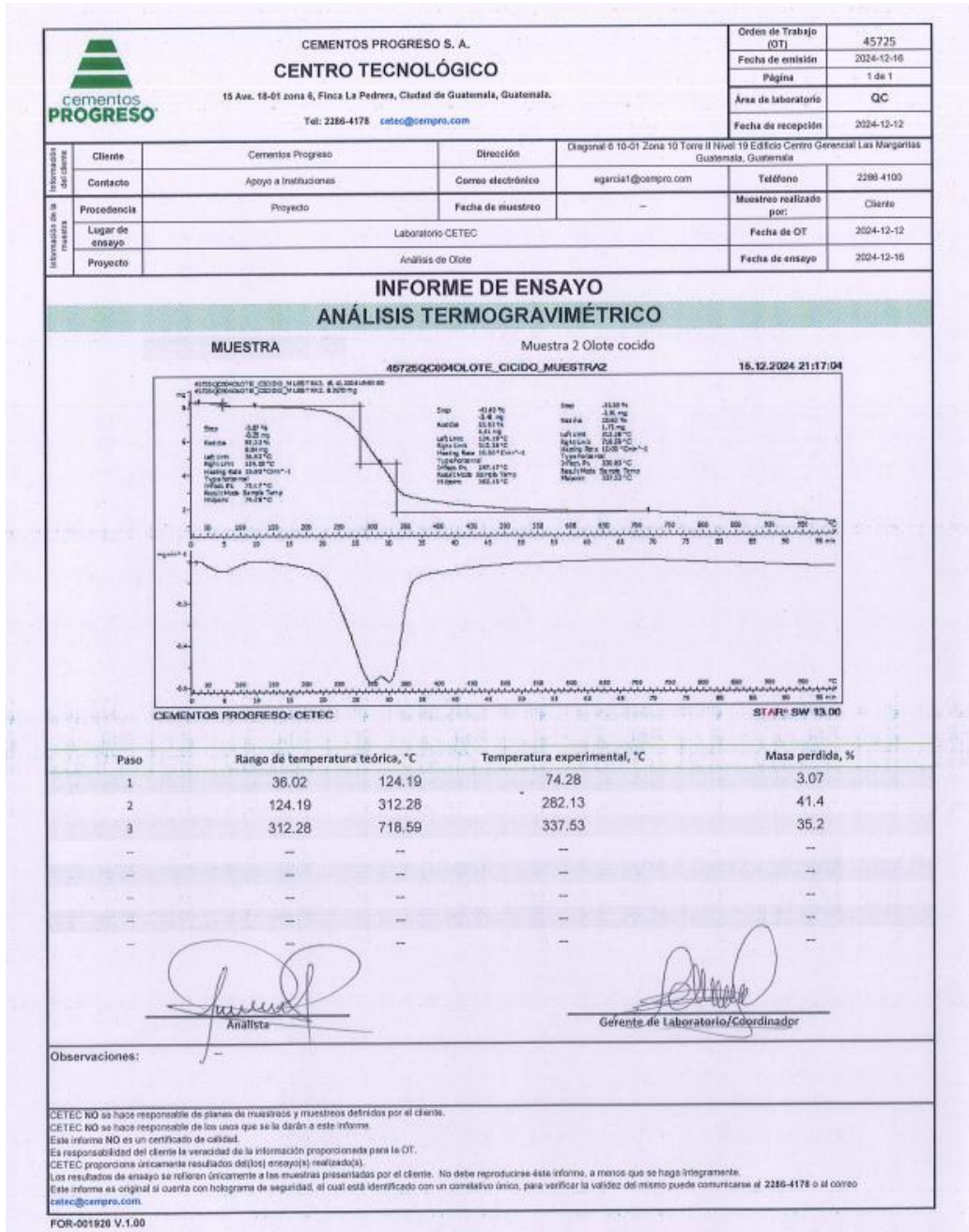
Figura 18. Análisis termogravimétrico Olote cocido muestra 1



Nota. CETEC, 2024.

Se muestra el Análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 19. Análisis termogravimétrico Olote cocido muestra 2



Nota. CETEC, 2024.

Se muestra el Análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 32. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
80.88	3.39
279.95	41.79
340.95	33.75

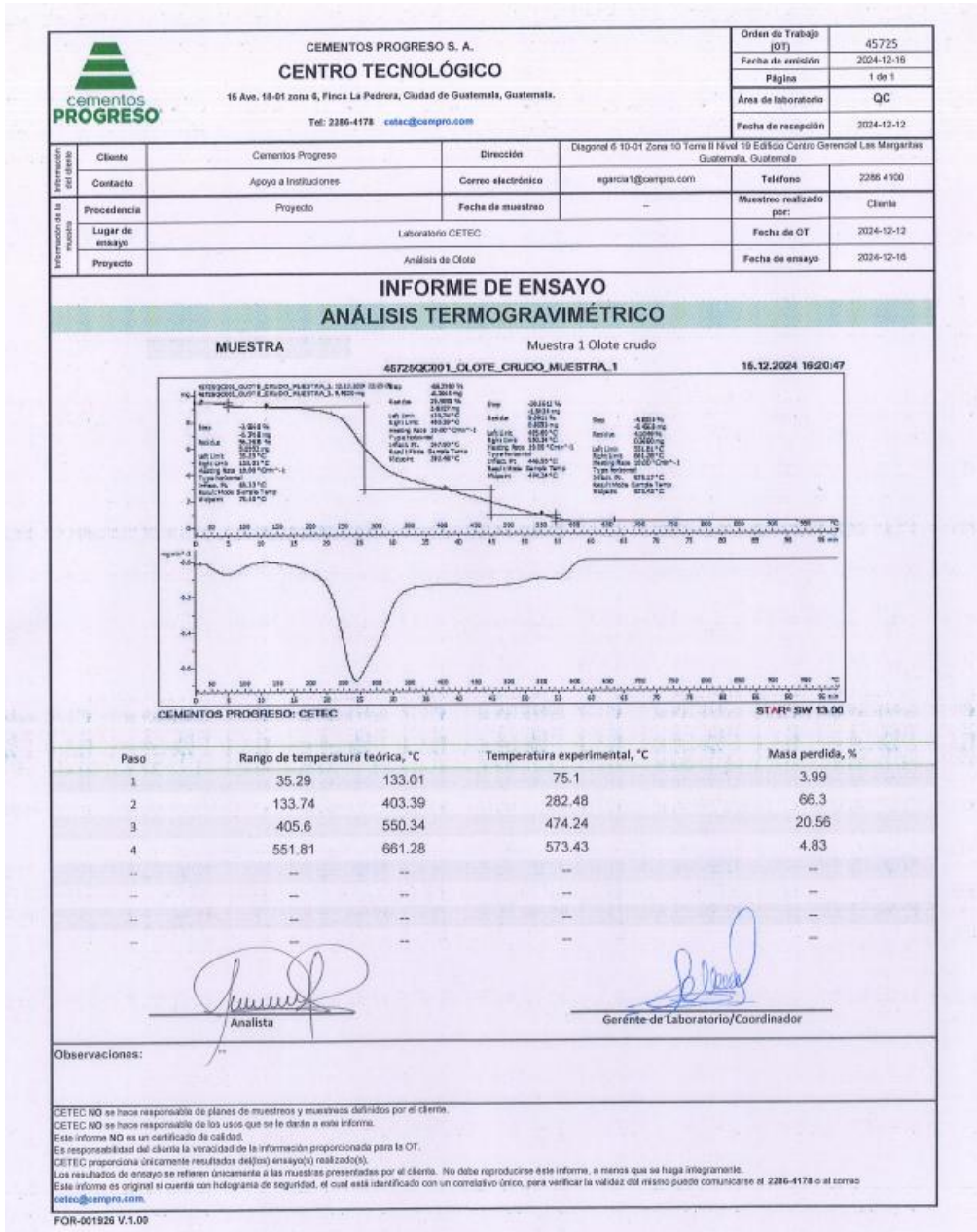
El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote cocido en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 33. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote cocido para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
74.28	3.07
282.13	41.4
337.53	35.2

El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote cocido en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

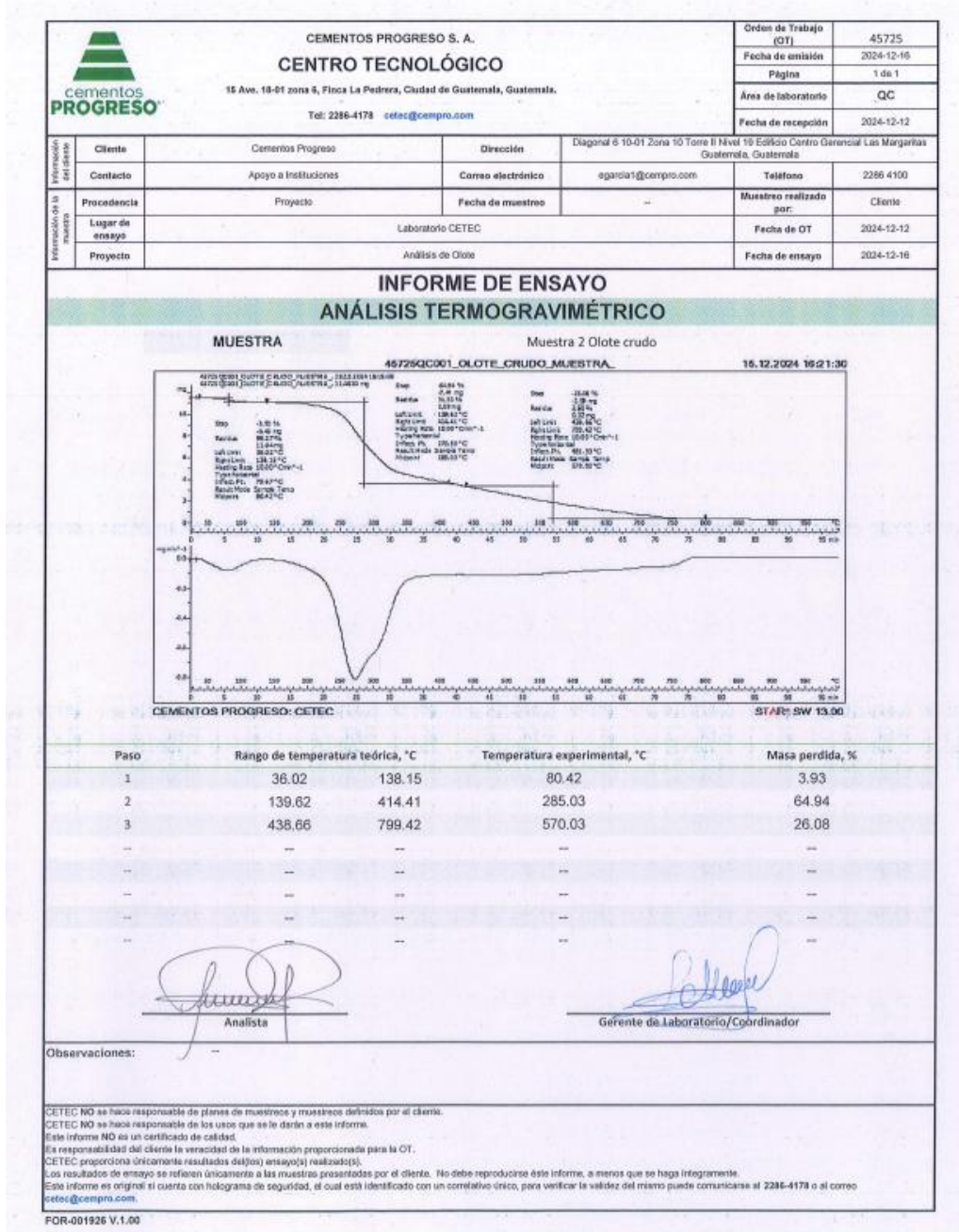
Figura 20. Análisis termogravimétrico Olote crudo Muestra 1



(Fuente CETEC)

Se muestra el Análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 21. Análisis termogravimétrico Olote crudo Muestra 2



(Fuente CETEC)

Se muestra el Análisis termogravimétrico realizado con la ayuda de Cementos Progreso, con el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 34. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
75.1	3.99
282.48	66.3
474.24	20.56
573.43	4.83

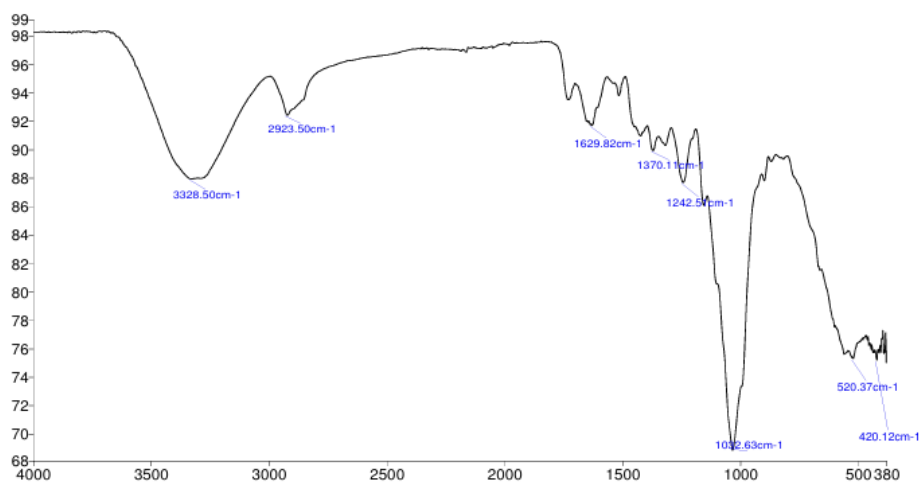
El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote crudo en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Cuadro 35. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de olote crudo para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
80.42	3.93
285.03	64.94
570.03	26.08

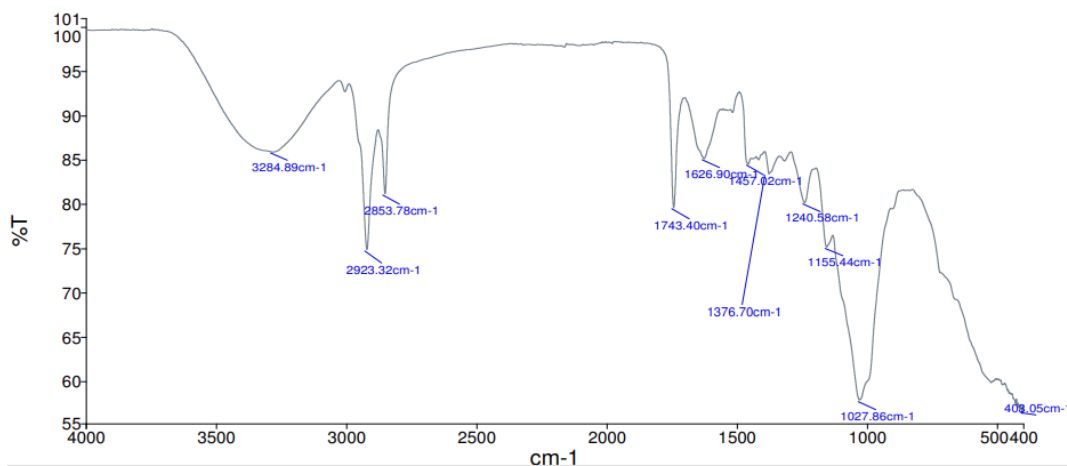
El cuadro anterior muestra las pérdidas de masa por temperatura experimental aplicada sobre las muestras de olote crudo en el análisis termogravimétrico, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 22. Espectro IR de muestra de olote crudo



Se muestra el espectro IR del olote crudo, proporcionado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 23. Espectro IR demuestra de olote cocido



Se muestra el espectro IR del olote cocido, proporcionado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 36. Grupos funcionales identificados en análisis FTIR de olote crudo

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación principal	Grupo funcional asociado
3328.5	Estiramiento O–H	Alcoholes, fenoles
2923.5	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
1629.8	Estiramiento C=O / C=C	Grupos carbonilo
1370.1	Flexión C–H	Metilos
1242.5	Estiramiento C–O	Ésteres, éteres o enlaces C–O–C
1052.6	Estiramiento C–O–C	Polisacáridos

El cuadro anterior muestra las principales bandas de absorción identificadas del espectro FTIR del olote de maíz crudo, asociadas a presencia de grupos funcionales característicos.

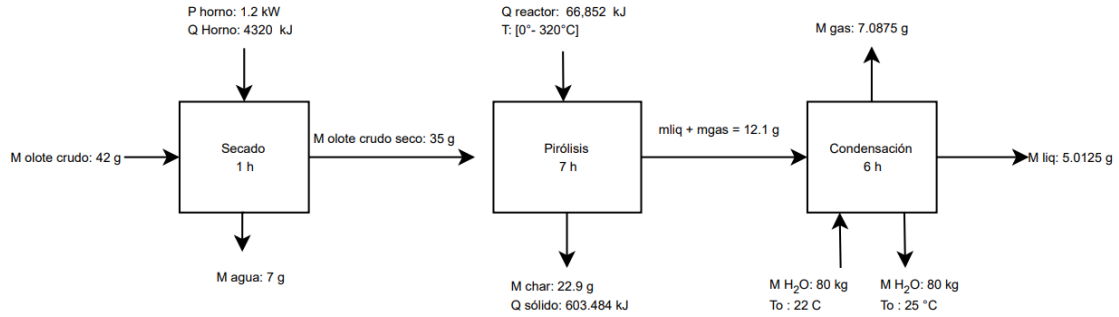
Cuadro 37. Grupos funcionales identificados en análisis FTIR de olote cocido

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación principal	Grupo funcional asociado
3284.8	Estiramiento O–H	Alcoholes, fenoles
2923.3	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
2853.8	Estiramiento C–H	Hidrocarburos alifáticos
1743.4	Estiramiento C=O	Grupos carbonilo
1626.9	Estiramiento C=C o C=O	Grupos carbonilo conjugados
1376.7	Flexión C–H	Metilos
1240.6	Estiramiento C–O	Éteres, ésteres
1155.4	Estiramiento C–O	Éteres, alcoholes
1027.8	Estiramiento C–O	Alcoholes, carbohidratos
408.1	Vibración fuera de plano	Enlaces C–H en aromáticos o impurezas.

El cuadro anterior muestra las principales bandas de absorción identificadas en el espectro FTIR del olote de maíz cocido, asociadas a la presencia de grupos funcionales característicos.

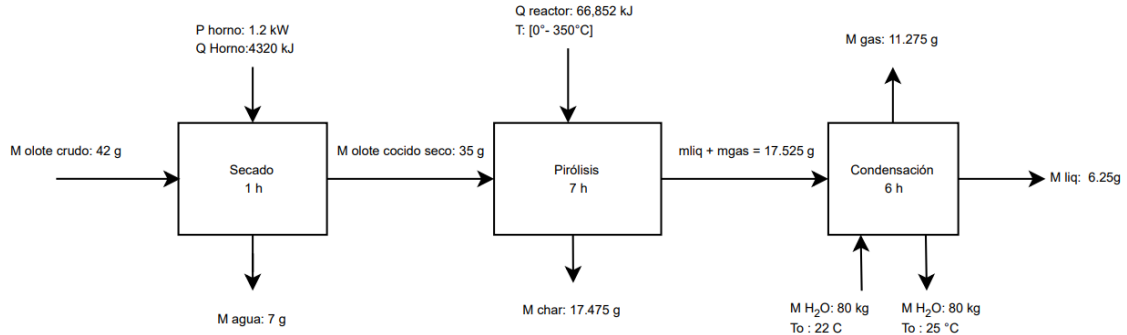
C. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

Figura 24. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote crudo



El balance de masa y consumo energético del reactor de 100 g se realizó a partir de los datos promedio de las 4 corridas de pirólisis del olote crudo. Los datos utilizados fueron recopilados de los cuadros 30, 52 y 54.

Figura 25. Balance de masa y consumo energético del proceso de pirólisis de olote cocido



El balance de masa y consumo energético del reactor de 100 g se realizó a partir de los datos promedio de las 4 corridas de pirólisis del olote crudo. Los datos utilizados fueron recopilados de los cuadros 31, 53 y 55.

D. IMÁGENES DE EXPERIMENTACIÓN

Figura 26. Bioaceite de olote crudo



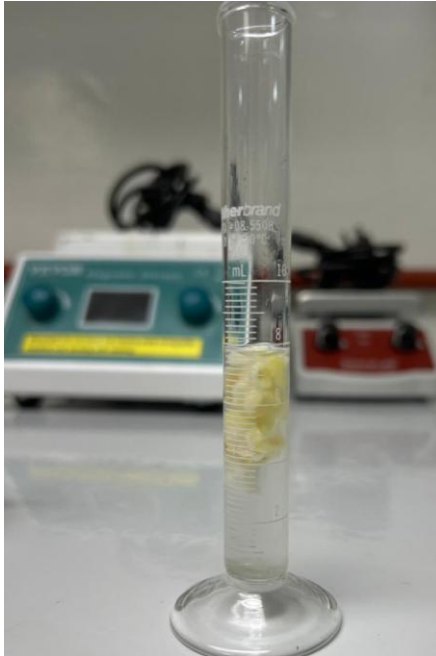
La figura anterior muestra el peso obtenido de la muestra No. 1 de bioaceite obtenida a partir de olote crudo. La foto fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la universidad del Valle de Guatemala.

Figura 27. Muestra de olote seco



La figura anterior muestra el peso obtenido de la muestra No.1 de olote tras el proceso de secado que fue introducido al reactor de pirólisis de 100 g. La foto fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 28. Pruebas de densidad real con etanol



La figura anterior muestra la probeta de 10 ml con la muestra de materia prima de olote crudo y etanol, para la determinación de la densidad real de la materia prima. La foto fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 29. Sistema para llevar a cabo el proceso de pirólisis de olote crudo y olote cocido



Se muestra la imagen del sistema utilizado para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad a las diferentes rampas de temperatura. La foto fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 30. Biochar resultante del proceso de pirólisis de olote crudo



La figura muestra el biochar resultante del proceso de pirólisis de olote crudo. La foto fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

E. DATOS CÁLCULADOS

Cuadro 38. Rendimiento de productos de pirólisis a partir de olote crudo

No. corrida	Bioaceite	BioChar	Gas de síntesis
1	11.714%	69.714%	18.571%
2	15.429%	64.286%	20.286%
3	13.000%	64.571%	22.429%
4	12.857%	66.857%	20.286%

El cuadro anterior muestra el rendimiento de los productos de pirólisis obtenidos a partir de olote crudo en cuatro corridas experimentales. Se observa la distribución de los productos (bioaceite, biochar y gas de síntesis) en cada corrida.

Cuadro 39. Rendimiento de productos de pirólisis a partir de olote cocido

No. corrida	Bioaceite	Biochar	Gas de síntesis
1	17.714%	50.000%	32.286%
2	19.429%	48.571%	32.000%
3	16.857%	52.571%	30.571%
4	17.429%	48.571%	34.000%

El cuadro anterior muestra el rendimiento de los productos de pirólisis obtenidos a partir de olote cocido, en comparación con el rendimiento de olote crudo. Se observa la distribución de los productos (bioaceite, biochar y gas de síntesis) en cada corrida.

Cuadro 40. Densidad aparente de Olote crudo

Densidad aparente (g/ml)	Densidad aparente (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desv. Estándar (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
0.7	700.000	713.068	15.118	2.120
0.725	725.000			
0.7	700.000			
0.727272727	727.273			

El cuadro anterior muestra el análisis estadístico de la densidad aparente del olote crudo, medida utilizando agua destilada. Se presentan los valores de densidad aparente, junto con el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos datos proporcionan información sobre la uniformidad de las muestras y su caracterización.

Cuadro 41. Densidad real de Olote crudo

Densidad real (g/ml)	Densidad real (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desv. Estándar (kg/m ³)	Coeficiente de variación (%)
0.5333	533.333	483.333	57.73502692	11.945
0.5	500.000			
0.4	400.000			
0.5	500.000			

El cuadro anterior muestra el análisis estadístico de la densidad real del olote crudo, obtenida utilizando etanol. El promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación reflejan cómo las muestras de olote crudo se comportan en términos de densidad bajo condiciones de etanol. Este parámetro es relevante para evaluar la masa y el volumen del material cuando se somete a diferentes procesos térmicos.

Cuadro 42. Densidad aparente de muestras de Olote cocido

Densidad aparente (g/ml)	Densidad aparente (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desv. Estándar (kg/m ³)	Coeficiente de variación (%)
0.7	700.000	719.318	24.159422	3.359
0.75	750.000			
0.7	700.000			
0.727272727	727.273			

El cuadro anterior muestra el análisis estadístico de la densidad aparente del olote cocido, medida utilizando agua destilada. Se presentan los valores de densidad aparente, junto con el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos datos proporcionan información sobre la uniformidad de las muestras y su caracterización.

Cuadro 43. Densidad real de muestras de Olote cocido

Densidad real (g/ml)	Densidad real (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desv. Estándar (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
0.500	500.000	495.690	8.6206897	1.739
0.500	500.000			
0.483	482.759			
0.500	500.000			

El cuadro anterior muestra el análisis estadístico de la densidad real del olote cocido, obtenida utilizando etanol. El promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación reflejan cómo las muestras de olote crudo se comportan en términos de densidad bajo condiciones de etanol. Este parámetro es relevante para evaluar la masa y el volumen del material cuando se somete a diferentes procesos térmicos.

Cuadro 44. Porcentaje de humedad de muestras de Olote crudo

% Humedad (m/m)	Promedio (m/m)	Desviación Estándar (m/m)	Coefficiente de variación (%)
82.19	81.310	0.032	0.040
81.87			
80.77			
80.41			

El cuadro anterior muestra el porcentaje de humedad de las muestras de olote crudo. Los valores de humedad se presentan junto con el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Este análisis permite evaluar la cantidad de agua presente en las muestras de olote crudo.

Cuadro 45. Porcentaje de humedad de muestras de Olote cocido

% Humedad (m/m)	Promedio (m/m)	Desviación Estándar (m/m)	Coefficiente de variación (%)
84.400	85.035	0.526	0.618
84.890			
85.650			
85.200			

El cuadro anterior muestra el porcentaje de humedad de las muestras de olote cocido. Los valores de humedad se presentan junto con el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Este análisis permite evaluar la cantidad de agua presente en las muestras de olote cocido.

Cuadro 46. Tamaño de partícula de muestra Olote crudo

Tamaño de partícula (cm)	Promedio (cm)	Desviación Estándar (cm)	Coefficiente de variación (%)
1.70	1.875	0.177	0.094
1.80			
2.00			
1.75			
2.10			
1.90			
1.65			
2.10			

El cuadro anterior presenta los valores de tamaño de partícula obtenidos para el olote crudo, junto con el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondiente. Las mediciones se realizaron utilizando una regla graduada en centímetros, con una precisión de ± 0.1 cm.

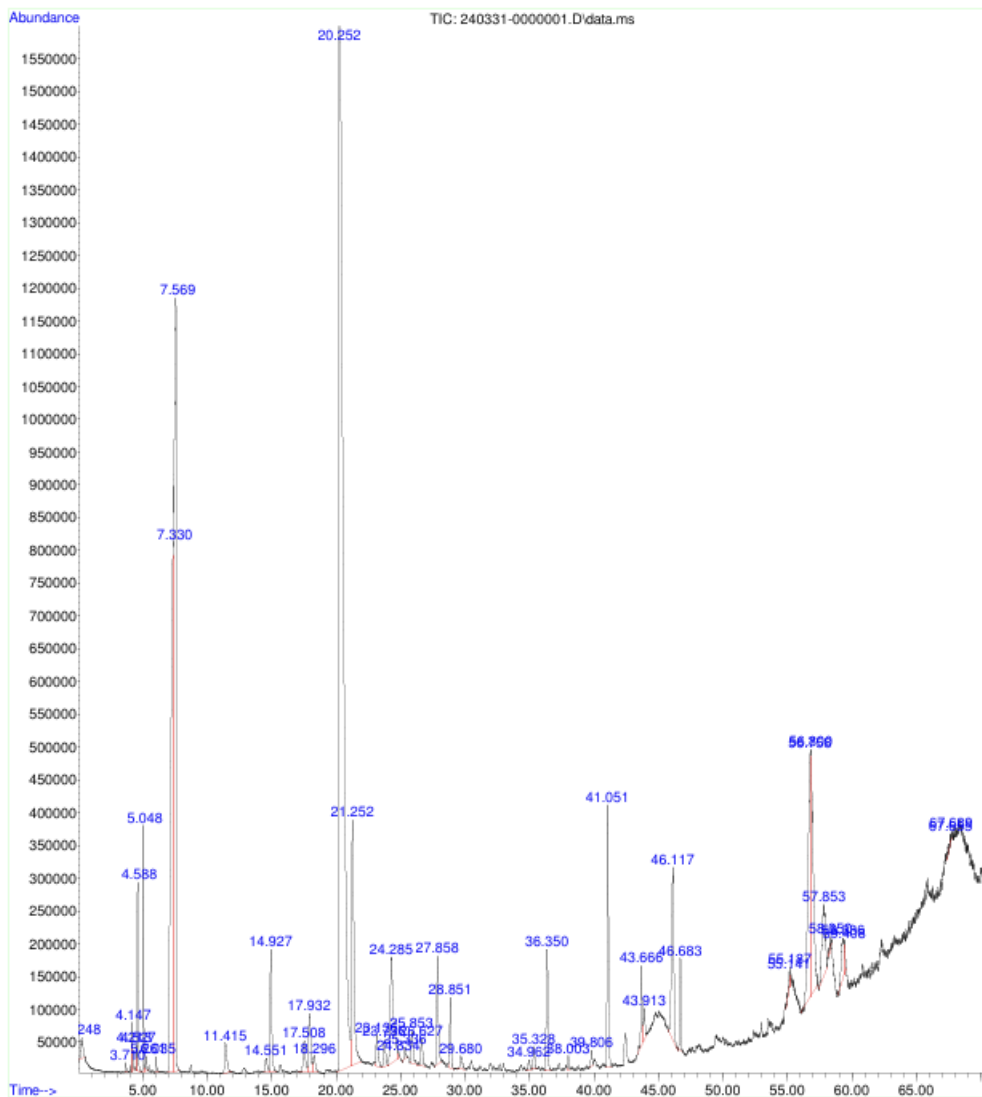
Cuadro 47. Tamaño de partícula de muestras de Olote cocido

Tamaño de partícula (cm)	Promedio (cm)	Desviación Estándar (cm)	Coefficiente de variación (%)
1.700	1.874	0.187	0.099
1.800			
2.000			
1.750			
2.100			
1.950			
1.600			
2.090			

El cuadro anterior muestra los valores de tamaño de partícula obtenidos para el olote cocido, además del promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Las mediciones se efectuaron con una regla graduada en centímetros, con una precisión de ± 0.1 cm.

Figura 31. Cromatograma Muestra 1 bioaceite de Olote crudo

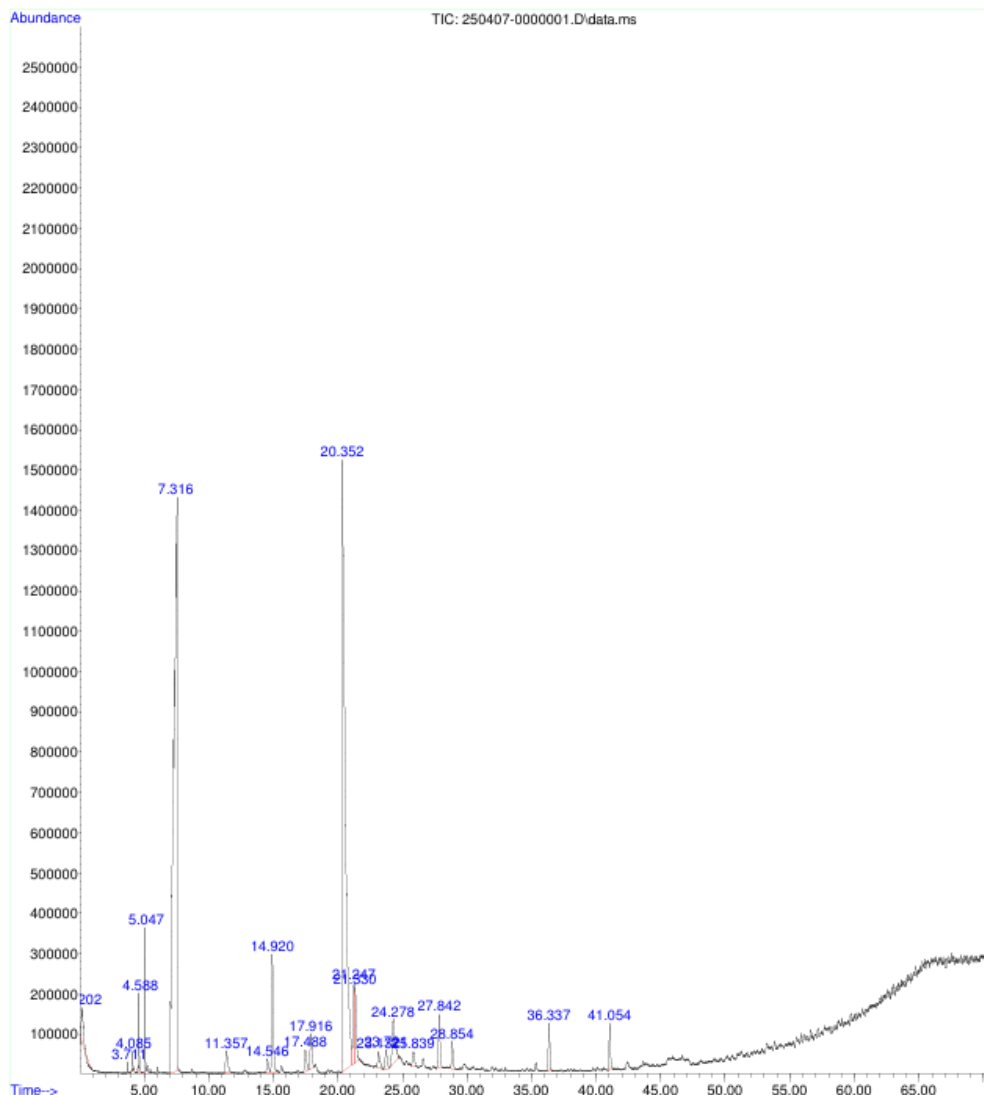
File :C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2025\240331-0000001.D
Operator : AdeM
Acquired : 31 Mar 2025 7:37 using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA DB WAXSCAN.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: TDG0012
Misc Info : Pirolisis
Vial Number: 1



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 1 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote crudo, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 32. Cromatograma Muestra 2 bioaceite de Olote crudo

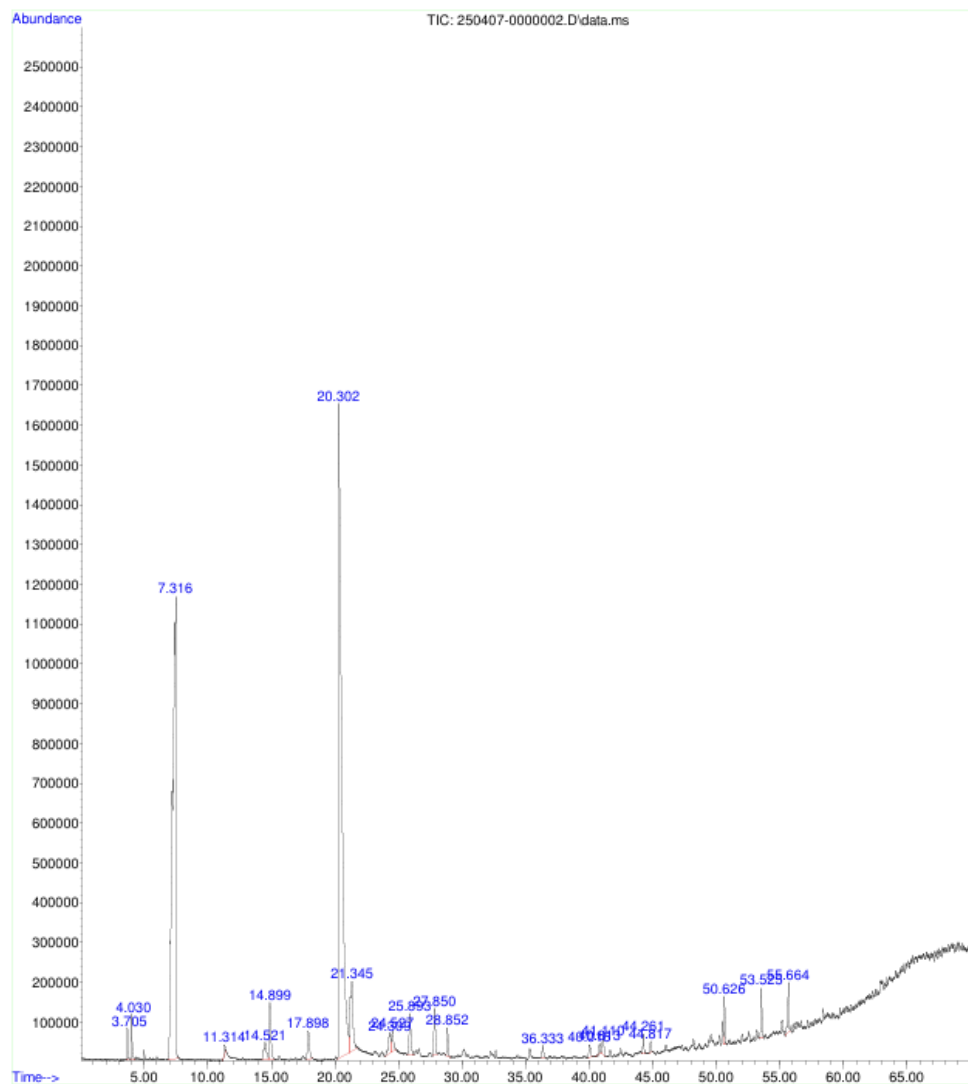
File :C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2025\250407-0000001.D
Operator : AdeM
Acquired : 7 Apr 2025 9:45 using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA DB WAXSCAN.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: TDG0013
Misc Info : IQ
Vial Number: 1



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 2 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote crudo, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

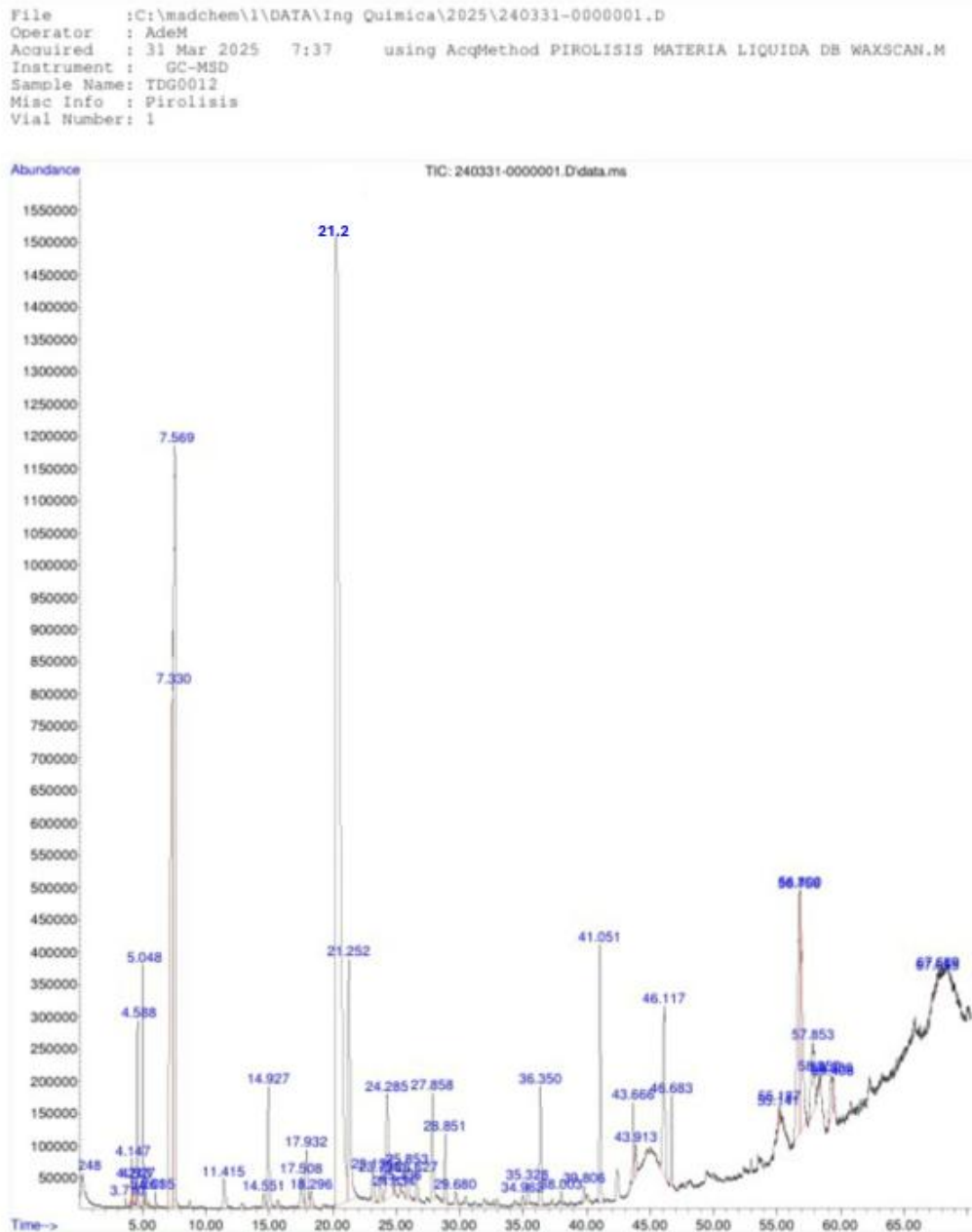
Figura 33. Cromatograma Muestra 3 bioaceite de Olote crudo

File :C:\msdchem\1\DATA\Ing Quimica\2025\250407-0000002.D
Operator : AdeM
Acquired : 7 Apr 2025 11:02 using AcqMethod PIROLISIS MATERIA LIQUIDA DB WAXSCAN.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: TDG0013
Misc Info : IQ
Vial Number: 2



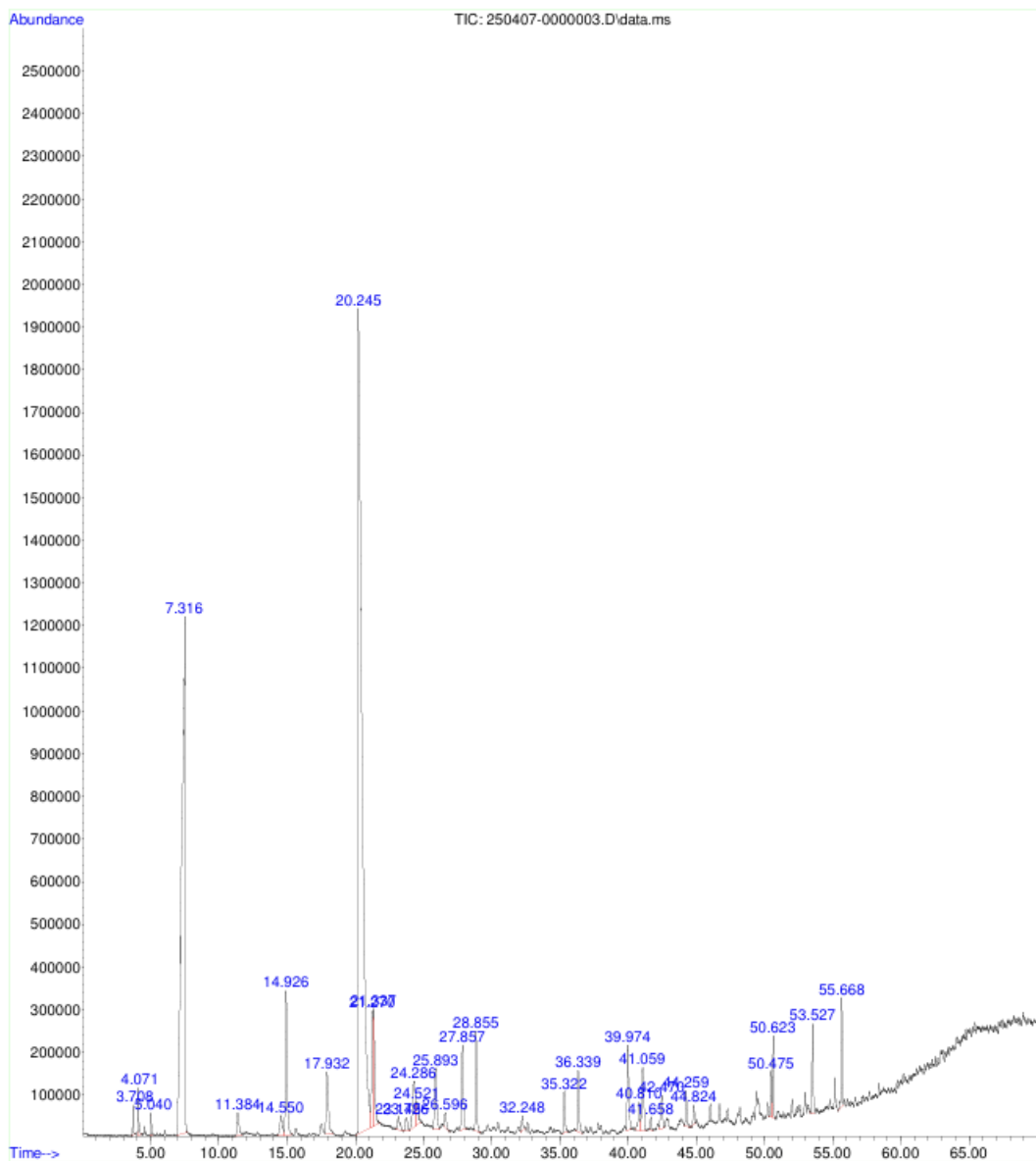
Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 3 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote crudo, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 34. Cromatograma Muestra 4 bioaceite de olote crudo



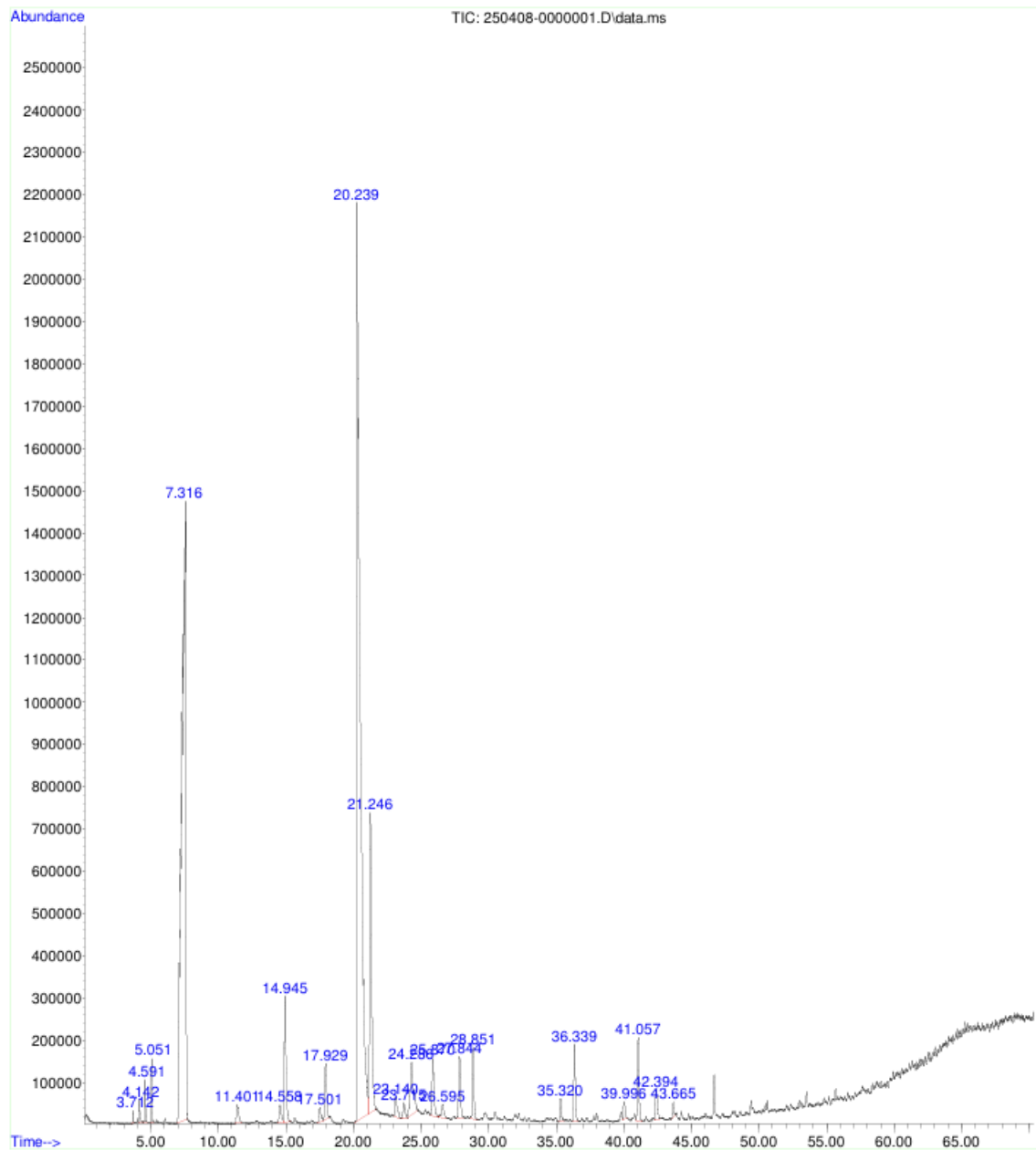
Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 4 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote crudo, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 35. Cromatograma Muestra 1 bioaceite de Olote cocido



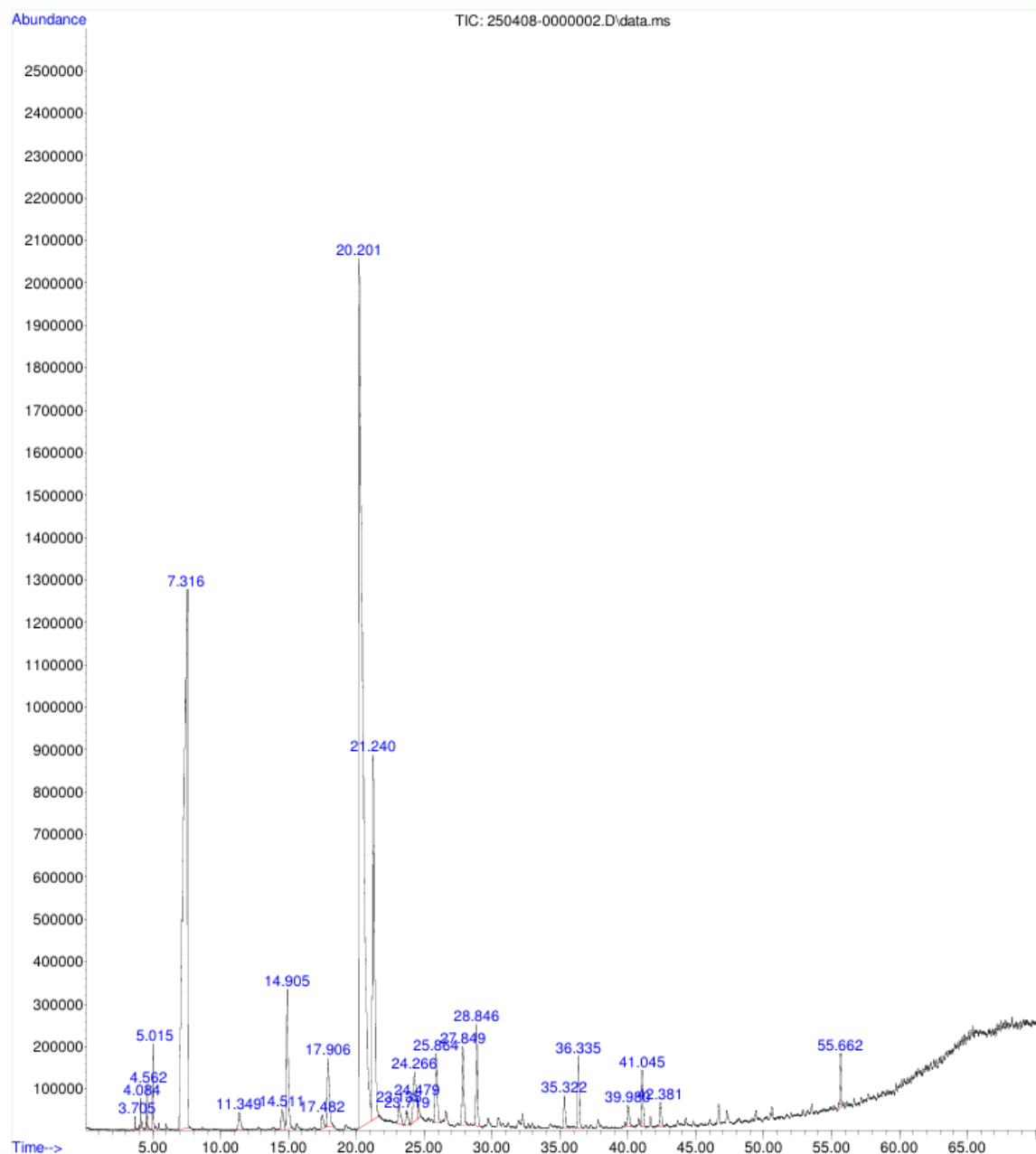
Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 1 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote cocido, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 36. Cromatograma Muestra 2 bioaceite de Olote cocido



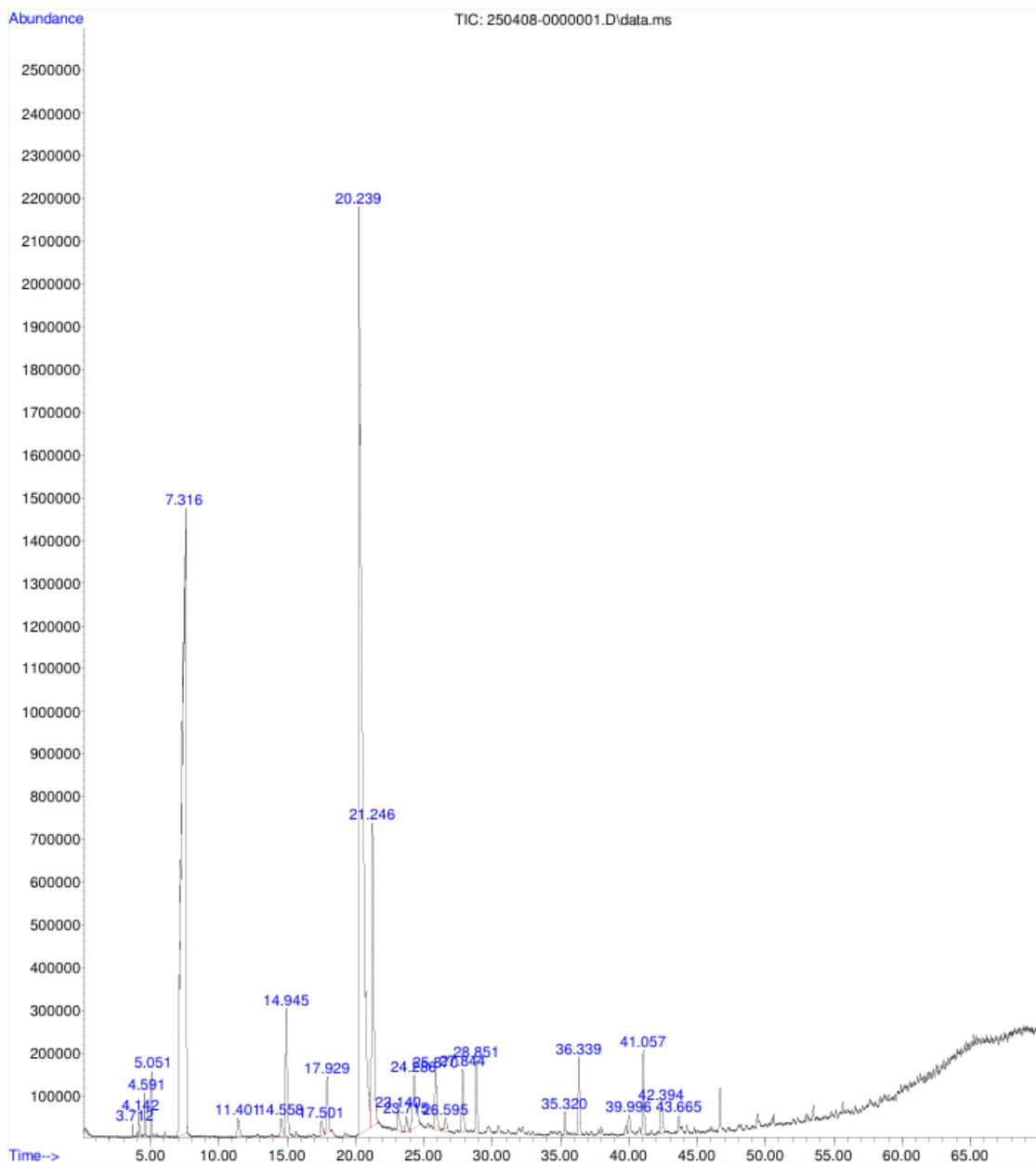
Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 2 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote cocido, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 37. Cromatograma Muestra 3 bioaceite de Olote cocido



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 3 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote cocido, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Figura 38. Cromatograma muestra 4 bioaceite de olote cocido



Aquí se muestra el cromatograma obtenido para la muestra No. 4 de bioaceite obtenido a partir del proceso de pirólisis de olote cocido, con un gradiente de 10°C cada 30 minutos. En el eje Y se representa la abundancia, mientras que el eje X muestra el tiempo de retención en minutos. El cromatograma revela los compuestos volátiles presentes en el bioaceite, con picos que corresponden a diferentes compuestos según su tiempo de retención. Los picos más prominentes indican los compuestos más abundantes.

Cuadro 48. Densidad bioaceite producido por pirólisis de Olote crudo

No. Muestra	Densidad (g/mL)	Densidad (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desviación Estándar (kg/m ³)
1	1.050	1050.00	1031.25	14.23187606
2	1.033	1033.33		
3	1.025	1025.00		
4	1.017	1016.67		

El cuadro anterior contiene el análisis estadístico de la densidad del bioaceite obtenido a partir de olote crudo en el reactor de 50 g. En este análisis, se presentan los valores de densidad del bioaceite, junto con su promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos parámetros proporcionan información sobre la consistencia y la variabilidad de la densidad del bioaceite.

Cuadro 49. Densidad muestras de bioaceite producido por pirólisis de Olote cocido

No. Muestra	Densidad (g/mL)	Densidad (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Desviación Estándar (kg/m ³)
1	1.050	1050.00	1029.166667	14.43375673
2	1.025	1025.00		
3	1.025	1025.00		
4	1.017	1016.67		

El cuadro anterior contiene el análisis estadístico de la densidad del bioaceite obtenido a partir de olote cocido en el reactor de 50 g. En este análisis, se presentan los valores de densidad del bioaceite, junto con su promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos parámetros proporcionan información sobre la consistencia y la variabilidad de la densidad del bioaceite.

Cuadro 50. Viscosidad muestras de bioaceite de pirólisis de olote crudo

No. muestra	Viscosidad (kg/m·s)	Promedio (kg/m·s)	Desviación Estándar (kg/m·s)	Coefficiente de variación (%)
1	1.972	1.876	0.106	5.665%
2	1.73			
3	1.933			
4	1.867			

El cuadro anterior contiene el análisis estadístico de la viscosidad de las muestras de bioaceite obtenidas a partir de la pirólisis de olote crudo. Se presentan los valores de viscosidad de las muestras, junto con el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estos parámetros permiten evaluar la consistencia y la variabilidad de la viscosidad del bioaceite.

Cuadro 51. Viscosidad muestras de bioaceite de pirólisis de olote cocido

No. muestra	Viscosidad (kg/m·s)	Promedio (kg/m·s)	Desviación Estándar (kg/m·s)	Coefficiente de variación (%)
1	2.06	1.95525	0.110	5.635%
2	1.809			
3	1.936			
4	2.016			

El cuadro anterior muestra el análisis estadístico de la viscosidad de las muestras de bioaceite obtenidas a partir de la pirólisis de olote cocido. Al igual que en el cuadro de olote crudo, se incluyen los valores de viscosidad, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estos parámetros permiten evaluar la consistencia y la variabilidad de la viscosidad del bioaceite.

Cuadro 52. Poder calorífico Olote crudo

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	21655	21829.6	241.02	1.10
2	21606			
3	22113			
4	21945			

El cuadro anterior muestra los datos obtenidos de poder calorífico del olote crudo, utilizado como materia prima para la producción de bioaceite por pirólisis, utilizando la bomba calorimétrica IKA C200.

Cuadro 53. Poder calorífico muestras de Olote cocido

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	21663	21725.8	281.29	1.29
2	21555			
3	22140			
4	21545			

El cuadro anterior muestra los datos obtenidos de poder calorífico del olote cocido, utilizado como materia prima para la producción de bioaceite por pirólisis, utilizando la bomba calorimétrica IKA C200.

Cuadro 54. Poder calorífico de muestras de bioaceite de pirólisis de olote crudo

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	18109	17011.5	1044.398	6.139
2	17320			
3	17010			
4	15607			

El cuadro anterior muestra los datos calculados de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos de poder calorífico obtenidos para el bioaceite obtenido a partir de pirólisis de olote crudo.

Cuadro 55. Poder calorífico de muestras de bioaceite de pirólisis de olote cocido

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	16855	17880	873.21	4.88
2	17450			
3	18650			
4	18550			

El cuadro anterior muestra los datos calculados de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos de poder calorífico obtenidos para el bioaceite obtenido a partir de pirólisis de olote cocido.

Cuadro 56. Poder calorífico char de pirólisis olote crudo

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	26084	26353	370.800	1.41
2	26009			
3	26789			
4	26531			

El cuadro anterior muestra los datos calculados de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos de poder calorífico obtenidos para el char obtenido a partir de pirólisis de olote crudo.

Cuadro 57. Poder calorífico de char de pirólisis olote cocido

No. muestra	Poder calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación Estándar (J/g)	Coefficiente de variación (%)
1	27326	27452	526.57	2.05
2	27110			
3	28280			
4	27090			

El cuadro anterior muestra los datos calculados de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos de poder calorífico obtenidos para el char obtenido a partir de pirólisis de olote cocido.

Cuadro 58. Estabilidad térmica bioaceite de olote crudo

Temperatura (°C)	Promedio de pérdida (%)	Desviación estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
100	10.55	0.81	7.65
120	18.66	1	5.36
135	26.13	0.83	3.18

El cuadro anterior muestra la estabilidad térmica del bioaceite obtenido de olote crudo a tres diferentes temperaturas: 100°C, 120°C y 135°C. Se presentan los valores promedio de pérdida de masa junto con la desviación estándar y el coeficiente de variación, que indican la consistencia de la pérdida de masa a medida que se incrementa la temperatura.

Cuadro 59. Estabilidad térmica bioaceite olote cocido

Temperatura (°C)	Promedio de pérdida (%)	Desviación estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
100	8.2	1.09	13.3
120	14.7	1.06	7.21
135	21.19	1.09	5.15

El cuadro anterior muestra la estabilidad térmica del bioaceite obtenido de olote cocido a tres diferentes temperaturas: 100°C, 120°C y 135°C. Se presentan los valores promedio de pérdida de masa junto con la desviación estándar y el coeficiente de variación, que indican la consistencia de la pérdida de masa a medida que se incrementa la temperatura.

Cuadro 60. Porcentaje de solubilidad de bioaceite de olote crudo y de olote cocido

Bioaceite	Solubilidad % m/m
Olote crudo	78.35
Olote cocido	81.88

El cuadro anterior muestra la solubilidad del bioaceite obtenido de olote crudo y de olote cocido. Se presentan los valores de solubilidad en porcentaje (% m/m).

Cuadro 61. Densidad de bulto del olote crudo

No. Muestra	Densidad olote crudo (kg/m³)	Desviación Estándar (kg/m³)
1	379.240	28.940
2	390.365	
3	428.115	
4	439.240	

El cuadro anterior contiene el análisis estadístico de la densidad del olote crudo. En este análisis, se presentan los valores de densidad del olote crudo junto con su promedio y desviación estándar.

Cuadro 62. Densidad de bulto del olote cocido

No. Muestra	Densidad olote cocido (kg/m³)	Desviación Estándar (kg/m³)
1	385.345	32.850
2	401.470	
3	437.220	
4	453.345	

El cuadro anterior contiene el análisis estadístico de la densidad del olote cocido. En este análisis, se presentan los valores de densidad del olote crudo junto con su promedio y desviación estándar.

F. ANÁLISIS DE ERROR

Ecuación 2 Determinación de la media

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{(17.714 + 19.429 + 16.857 + 17.429)\% \text{ m/m}}{4} = 17.857 \% \text{ m/m}$$

Este cálculo se hizo de la misma forma para todos los cálculos que necesitan de la media de los datos obtenidos durante el proceso de pirólisis de olote de maíz crudo y cocido a una rampa de 10°C cada 30 minutos

Ecuación 3 Determinación de Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(17.714 - 17.857)^2 + (19.429 - 17.857)^2 + (16.857 - 17.857)^2 + (17.429 - 17.857)^2}{3}} = 0.011 \% \text{ m/m}$$

[Se realizó este cálculo para determinar la desviación estándar del porcentaje de rendimiento del bioaceite a partir de olote cocido. El cálculo se realizó de la misma manera para el resto de los datos. Los datos se obtuvieron del cuadro 42 de la sección de datos calculados].

Ecuación 4 Determinación de coeficiente de variación

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100\%$$

$$C.V. = \frac{0.011}{17.857} * 100\% = 6.197 \%$$

[Se realizó este cálculo para determinar el coeficiente de variación del porcentaje de rendimiento del bioaceite a partir de olote cocido. El cálculo se realizó de la misma manera para el resto de los datos. Los datos se obtuvieron del cuadro 42 de la sección de datos calculados].

G. GLOSARIO

Bioaceite: fracción líquida condensada de vapores de pirólisis de biomasa; mezcla multicomponente con agua y compuestos oxigenados que condicionan densidad, viscosidad, miscibilidad y PCI (Bridgwater, 2007).

Biomasa lignocelulósica: sólido vegetal constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina; su composición gobierna cinética y productos de descomposición térmica (Perry et al., 2019).

Biochar: residuo sólido carbonoso de la pirólisis con alto carbono fijo; relevante en balances de masa/energía y como adsorbente (Perry et al., 2019).

Compuestos oxigenados: alcoholes, ácidos, ésteres, cetonas y fenoles; incrementan polaridad, acidez y reactividad del bioaceite, y reducen su PCI (Chang & Goldsby, 2002).

Condensador: intercambiador de calor que remueve calor latente para transformar vapor en líquido, usualmente a contracorriente (Perry et al., 2019).

Craqueo secundario: ruptura térmica adicional de moléculas en fase vapor por alta temperatura/tiempo de residencia; desplaza la distribución hacia fracciones más ligeras (Perry et al., 2019).

Cromatograma: señal vs. tiempo de una separación cromatográfica; cada pico corresponde a un componente con su tiempo de retención (Jwaili, 2019).

Degradación: cambio químico (térmico/químico) que reduce masa molar o modifica estructura; en biomasa ocurre en etapas asociadas a sus biopolímeros (Zubiolo et al., 2023).

Densidad aparente: masa por volumen de un sólido granular incluyendo vacíos interparticulares; clave para empaque y flujo en reactores/columnas (Perry et al., 2019).

Densidad del bioaceite: masa por volumen de la fase líquida; elevada cuando hay alto contenido de agua/oxigenados (Perry et al., 2019).

Densidad real: densidad del sólido excluyendo vacíos entre partículas; refleja compactación intrínseca del material (Perry et al., 2019).

Estabilidad térmica: resistencia a evaporación/descomposición al calentar; se evalúa por pérdida de masa y cambios de composición con la temperatura (Perry et al., 2019).

FTIR: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier para identificar grupos funcionales mediante bandas características (Perry et al., 2019).

Gas de síntesis: mezcla gaseosa rica en CO, H₂, CO₂ e hidrocarburos ligeros producida en pirólisis/gasificación; con valor energético/químico (Klug, 2012).

Grupos funcionales: conjuntos de átomos que determinan propiedades (acidez, polaridad, reactividad) y se evidencian en FTIR/GC (Chang & Goldsby, 2002)..

Hemicelulosa: polisacárido amorfo de la pared vegetal; se descompone a temperaturas relativamente bajas frente a celulosa/lignina (Zubiolo et al., 2023).

Humedad: agua contenida en la materia prima; impacta el balance de energía (calor de evaporación) y la composición del líquido condensado (Perry et al., 2019).

Lignina: polímero aromático tridimensional; se descompone en un rango amplio de T y favorece formación de char y fenoles (Zubiolo et al., 2023).

Miscibilidad: capacidad de dos líquidos para formar una sola fase; depende de interacciones moleculares y polaridad (Perry et al., 2019).

Pirólisis: descomposición térmica en ausencia (o mínima presencia) de oxígeno, generando fracciones sólida, líquida y gaseosa (Klug, 2012).

Poder calorífico: energía liberada por unidad de masa o volumen al quemar un combustible (término general que incluye PCI y PCS) (Perry et al., 2019).

Poder calorífico inferior (PCI): poder calorífico que excluye el calor de condensación del agua formada en la combustión (Wood et al., 2013).

Polaridad: medida de desigualdad en la distribución electrónica; gobierna solubilidad/miscibilidad y tensión superficial (Perry et al., 2019).

Reactor por lotes: equipo que opera de manera discontinua (cargar–procesar–descargar); útil para control de variables y cinética (Perry et al., 2019).

Rendimiento: fracción del producto respecto a la alimentación (base másica o molar); métrica central en balances de masa (Perry et al., 2019).

Sistema aislado: sistema que no intercambia ni masa ni energía (calor o trabajo) con el entorno (Perry et al., 2019).

Solubilidad en agua: cantidad máxima de soluto que se disuelve en agua a condiciones dadas; para mezclas complejas se expresa como fracción soluble (Treybal, 1980).

Tamaño de partícula: dimensión característica que afecta área específica, transferencia de calor/masa y caída de presión (Perry et al., 2019).

TGA (Análisis termogravimétrico): técnica que registra la masa de una muestra mientras se calienta para identificar etapas y temperaturas de pérdida de masa (Perry et al., 2019).

Tiempo de retención: en cromatografía, intervalo entre la inyección y el máximo del pico de un componente; base para identificación con patrones (Jwaili, 2019).

Upgrading: conjunto de operaciones (p. ej., destilación, hidrotratamiento) para reducir oxígeno/ácidos, aumentar estabilidad y PCI del bioaceite (Perry et al., 2019).

Viscosidad: resistencia interna al flujo (μ); gobierna pérdidas de carga, bombeo y régimen de flujo (Perry et al., 2019).