

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Pirólisis de residuos de limón para la obtención de bioaceite y biochar a escala laboratorio.

Trabajo de graduación presentado por

Siomara Melisa Reyes Reyes

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química Industrial.

Guatemala

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Pirólisis de residuos de limón para la obtención de bioaceite y biochar a escala laboratorio.

Trabajo de graduación presentado por

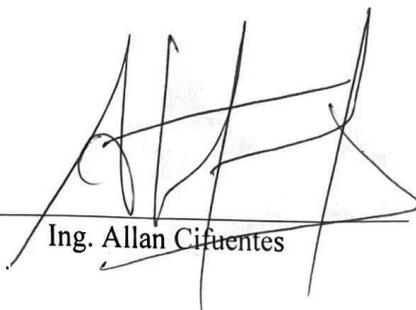
Siomara Melisa Reyes Reyes

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química Industrial.

Guatemala

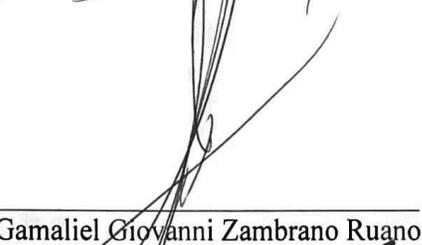
2024

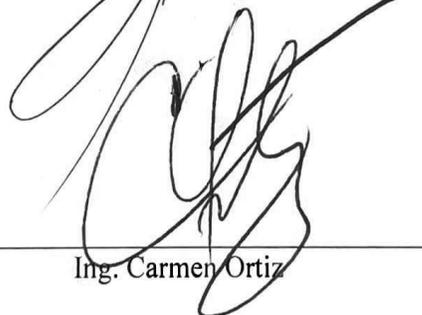
Vo Vo. Bo.

(f) 
Ing. Allan Cifuentes

Terna examinadora

(f) 
Ing. Allan Cifuentes

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de enero de 2024

PREFACIO

La pirólisis, un proceso termoquímico que descompone la biomasa en ausencia de oxígeno, se revela como una tecnología promisoría para la transformación de los residuos de limón en productos valiosos, como bioaceites y biochar. Además, este enfoque no sólo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al evitar la descomposición anaeróbica de estos residuos, sino que también puede generar fuentes adicionales de energía renovable.

Como estudiante de Ingeniería Química Industrial el enfoque de este trabajo se enmarca en la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para abordar el cambio climático. A través de una investigación exhaustiva, experimentación y análisis de resultados se espera arrojar luz sobre la viabilidad de la pirólisis de residuos de limón, así como su contribución potencial a la mitigación del cambio climático y la gestión de los desechos alimentarios. Además, se realizó un análisis económico del proceso de pirólisis a escala de laboratorio, evaluando los costos asociados con la materia prima, la energía y los equipos, así como los ingresos potenciales derivados de la venta de productos. Este análisis proporciona una comprensión más completa de la viabilidad económica del proceso y su potencial para la implementación a mayor escala.

Agradezco:

- ❖ A Dios, por permitirme la oportunidad de desarrollarme y llevar a cabo este trabajo.
- ❖ A mis padres, Siomara Reyes y Héctor Reyes por darme la oportunidad y todo su apoyo en esta y todas las etapas de mi vida, por su infinito amor y comprensión.
- ❖ A mi asesor y catedráticos por su apoyo y guía durante este trabajo de graduación.
- ❖ A mis amigos por acompañarme en esta etapa.
- ❖ A la Universidad del Valle de Guatemala por brindarme los insumos para llevar a cabo este trabajo.
- ❖ A Laboratorio CETEC de Cementos Progreso por la realización de los análisis termogravimétricos,

ÍNDICE

PREFACIO	i
LISTADO DE CUADROS.....	iv
LISTADO DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. Objetivo general	2
B. Objetivos específicos	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO	5
A. Generalidades del limón.....	5
B. Limón persa	8
C. Productos derivados de cáscaras limón	8
D. Lignocelulosa	10
E. Biomasa	12
F. Pirólisis.....	14
G. Productos de la pirólisis	15
H. Biocombustibles	16
I. Análisis próximo	19
J. Análisis termogravimétrico.....	19
K. Poder calorífico	20
L. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	21
M. Cromatografía de gases con detector de masas	22
V. ANTECEDENTES.....	24
VI. METODOLOGÍA	25

A. Determinación del tamaño de muestra	25
B. Recolección de residuos de limón secos	25
C. Caracterización de los residuos de limón	25
D. Pirólisis de residuos de limón.....	32
E. Caracterización de biochar	33
F. Caracterización de bioaceite.....	39
G. Análisis económico	39
VII. RESULTADOS	40
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
IX. CONCLUSIONES	61
X. RECOMENDACIONES	63
XI. BIBLIOGRAFÍA	65
XII. ANEXOS	70
A. Referencias	70
B. Balance de masa y energía.....	71
C. Datos originales	72
D. Cálculos	112
E. Datos calculados	119
XIII. IMÁGENES DEL PROCESO.....	124
XIV. GLOSARIO	129

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de productos de pirólisis de cáscara de naranja.....	16
Cuadro 2. Poder calorífico de pirólisis de biomasa	16
Cuadro 3. Eficiencia de proceso de molienda.....	40
Cuadro 4. Análisis granulométrico promedio de residuos de limón molidos	40
Cuadro 5. Análisis próximo de residuos de limón secos y molidos.....	41
Cuadro 6. Densidad aireada, compacta y de trabajo de los residuos de limón triturados.....	42
Cuadro 7. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de limón para pirólisis	42
Cuadro 8. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 2 de los residuos de limón para pirólisis	42
Cuadro 9. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier para materia prima.....	43
Cuadro 10. Rendimientos de proceso de pirólisis a escala laboratorio.....	44
Cuadro 11. Análisis granulométrico promedio de biochar de pirólisis	44
Cuadro 12. Análisis próximo de biochar proveniente de pirólisis	45
Cuadro 13. Densidad aireada, compacta y de trabajo de char proveniente de pirólisis.....	46
Cuadro 14. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de biochar de pirólisis.....	46
Cuadro 15. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 2 de biochar de pirólisis.....	46
Cuadro 16. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier para biochar	47
Cuadro 17. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier para bioaceite.....	48
Cuadro 18. Inferencia de compuestos comunes entre las 4 corridas identificados por cromatografía de gases.	48
Cuadro 19. Comparación entre precio de venta del aceite de pirólisis y sus productos de valor con el costo de procesamiento de los residuos de limón a escala laboratorio por corrida.....	50
Cuadro 20. Comparación entre precio de venta del char de pirólisis con el costo de procesamiento de los residuos de limón a escala laboratorio por corrida.....	50
Cuadro 21. Poder calorífico de carbones	70
Cuadro 22. Poder calorífico de combustibles sólidos	70
Cuadro 23. Masas del proceso de molienda.....	72

Cuadro 24. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 1	72
Cuadro 25. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 2	72
Cuadro 26. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 3	73
Cuadro 27. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 4	73
Cuadro 28. Datos de porcentaje de humedad para residuos de limón	73
Cuadro 29. Datos obtenidos para el poder calorífico de residuos de limón por medio de bomba calorimétrica.....	74
Cuadro 30. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de cenizas de residuos de limón	74
Cuadro 31. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de material volátil de residuos de limón	75
Cuadro 32. Datos para el cálculo de densidades de residuos de limón.....	75
Cuadro 33. Dimensiones del reactor de pirólisis a escala laboratorio	79
Cuadro 34. Residuos de limón iniciales dentro de reactor las corridas de pirólisis.....	79
Cuadro 35. Masas de productos obtenidos en las 4 corridas de pirólisis.....	80
Cuadro 36. Especificaciones de equipos utilizados en el proceso de pirolisis.	80
Cuadro 37. Análisis granulométrico de char de corrida 1 de pirólisis	81
Cuadro 38. Análisis granulométrico de char de corrida 2 de pirólisis	82
Cuadro 39. Análisis granulométrico de char de corrida 3 de pirólisis	83
Cuadro 40. Análisis granulométrico de char de corrida 4 de pirólisis	84
Cuadro 41. Humedades de char de pirólisis para las 4 corridas	84
Cuadro 42. Datos obtenidos para el poder calorífico del char por medio de bomba calorimétrica. .	85
Cuadro 43. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de cenizas de char	85
Cuadro 44. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de material volátil de char	86
Cuadro 45. Datos para el cálculo de densidades de char	86
Cuadro 46. Producción de bioaceite en la primera corrida de pirolisis	91
Cuadro 47. Producción de bioaceite en la segunda corrida de pirolisis.....	92
Cuadro 48. Producción de bioaceite en la tercera corrida de pirolisis.....	93
Cuadro 49. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 1	94
Cuadro 50. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 2.....	94
Cuadro 51. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 3.....	95
Cuadro 52. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 4.....	95
Cuadro 53. Producción de bioaceite en la cuarta corrida de pirolisis	96

Cuadro 54. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 1.....	97
Cuadro 55. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 2.....	98
Cuadro 56. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 3.....	99
Cuadro 57. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 4.....	100
Cuadro 58. Tarifa no social de electricidad EEGSA.....	110
Cuadro 59. Consumo de energía para la transformación de residuos de limón en biocombustibles por medio de una pirólisis a escala laboratorio.	110
Cuadro 60. Cotizaciones de precios de venta de aceite de pirólisis y sus productos de valor y del char de pirólisis.	111
Cuadro 61. Eficiencia del proceso de molienda.....	119
Cuadro 62. Análisis granulométrico promedio de los residuos de limón	119
Cuadro 63. Humedad promedio de los residuos de limón	119
Cuadro 64. Poder calorífico de residuos de limón para 4 corridas	119
Cuadro 65. Porcentaje de cenizas de residuos de limón para 4 corridas	120
Cuadro 66. Porcentaje de material volátil de residuos de limón para 4 corridas	120
Cuadro 67. Porcentaje de carbono fijo de residuos de limón para 4 corridas.....	120
Cuadro 68. Densidades aireada, compacta y de trabajo de residuos de limón para 4 corridas.....	121
Cuadro 69. Rendimientos para las corridas de pirólisis.....	121
Cuadro 70. Análisis granulométrico promedio para el char de pirólisis.....	121
Cuadro 71. Humedad promedio de char de pirólisis.....	122
Cuadro 72. Poder calorífico de char de corridas de pirólisis	122
Cuadro 73. Porcentaje de cenizas de char de corridas de pirólisis	122
Cuadro 74. Porcentaje de material volátil de char de corridas de pirólisis.....	122
Cuadro 75. Porcentaje de carbono fijo de char de corridas de pirólisis.....	123
Cuadro 76. Densidades aireada, compacta y de trabajo de char de corridas de pirólisis.....	123
Cuadro 77. Costo de operación de pirólisis de residuos de limón a nivel laboratorio por corrida .	123

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Partes del limón	5
Figura 2. Composición nutricional del limón.	7
Figura 3. Estructura de la celulosa.	11
Figura 4. Estructura de la hemicelulosa	11
Figura 5. Caracterización de biomasas de cáscara de frutas.	12
Figura 6. Comparación de variables y productos de los tipos de pirólisis	14
Figura 7. Biocombustibles según su estado	17
Figura 8. Procesos para obtener biocombustibles	18
Figura 9. Termograma de carbonato de calcio	20
Figura 10. Partes de calorímetro IKA C200.....	21
Figura 11. Diagrama de bloques de un cromatógrafo de gases.....	22
Figura 12. Tipos de detectores de masas	23
Figura 13. Curva granulométrica de los residuos de limón molidos.....	41
Figura 14. Rampa de temperatura de proceso de pirólisis de residuos de limón	43
Figura 15. Curva granulométrica promedio del biochar de pirólisis	45
Figura 16. Producción de bioaceite vs temperatura	47
Figura 17. Balance de masa de proceso de pirólisis de residuos de limón	71
Figura 18. Balance de energía de proceso de pirólisis de residuos de limón.....	71
Figura 19. Análisis termogravimétrico 1 para residuos de limón	76
Figura 20. Análisis termogravimétrico 2 de residuos de limón	77
Figura 21. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 1	78
Figura 22. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 2	78
Figura 23. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 3	79
Figura 24. Análisis termogravimétrico 1 para char	87
Figura 25. Análisis termogravimétrico 2 para char	88
Figura 26. Espectro infrarrojo char corrida 1	89
Figura 27. Espectro infrarrojo char corrida 2.....	89
Figura 28. Espectro infrarrojo char corrida 3.....	90
Figura 29. Espectro infrarrojo char corrida 4.....	90
Figura 30. Cromatograma de bioaceite corrida 1.....	101

Figura 31. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 1.....	102
Figura 32. Cromatograma de bioaceite corrida 2.....	104
Figura 33. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 2.....	105
Figura 34. Cromatograma de bioaceite corrida 3.....	106
Figura 35. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 3.....	107
Figura 36. Cromatograma de bioaceite corrida 4.....	108
Figura 37. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 4.....	109
Figura 38. Residuos de limón triturados	124
Figura 39. Reactor de pirólisis a escala laboratorio de Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	124
Figura 40. Medición de la densidad del char	125
Figura 41. Sistema de pirólisis a escala laboratorio en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	125
Figura 42. Medición de la masa de aceite	126
Figura 43. Char producto de la pirólisis de residuos de limón.....	126
Figura 44. Mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 para el proceso de pirólisis del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	127
Figura 45. Tamices para la curva granulométrica del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.	127
Figura 46. Medición de humedad con balanza de humedad del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	128
Figura 47. Bomba calorimétrica del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	128

RESUMEN

Se realizó una pirólisis a escala laboratorio utilizando un kit de destilación a nivel laboratorio, un reactor de pirólisis y una mufla. Se llevaron a cabo 4 corridas con la finalidad de tener el rendimiento de los productos para una temperatura final de 330°C. Previo a las corridas de pirólisis se realizó una caracterización de los residuos de limón para evaluar las condiciones iniciales. Se realizaron los siguientes análisis: análisis granulométrico, análisis próximo, termogravimétrico, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y densidad. Posteriormente se determinó el rendimiento de los productos y se realizó una caracterización de estos. Para el char se realizaron los siguientes análisis: análisis granulométrico, análisis próximo, termogravimétrico, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y densidad. Para la valorización del bioaceite se realizó una espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y una cromatografía de gases.

Se obtuvo una humedad de los residuos de limón de 29.75% m/m que fue el factor que más afectó durante el proceso, la caracterización y rendimiento de los productos. Para el biochar se obtuvo un poder calorífico de 27.24 MJ/Kg el cual se compara con el poder calorífico de los carbones bituminosos que son utilizados para generación de energía. En el bioaceite se encontraron productos de valor como ácido acético, metanol y fenoles que pueden ser separados y utilizados en otros procesos.

Se determinó que el rendimiento de los productos fue de 30.28 ± 0.99 %m/m, 50.37 ± 1.73 %m/m y 19.34 ± 2.62 %m/m para el biochar, bioaceite y gas de síntesis respectivamente. Estos rendimientos se deben a la temperatura final, el tiempo de residencia y las condiciones iniciales que favorecieron la producción de bioaceite. Por medio de un balance de energía se concluye que el proceso no es rentable energéticamente, por lo que se recomienda utilizar otras fuentes de calentamiento aparte de la electricidad para hacer el proceso más factible energéticamente, por ejemplo, el uso del mismo biochar producido en el proceso de pirólisis. A través de un análisis económico a nivel laboratorio se determinó que el proceso de pirólisis de residuos de limón no es factible en términos monetarios utilizando los equipos mencionados en este trabajo, con excepción del fenol que se podría extraer del aceite de pirólisis.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tema del calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero se han vuelto un tema a tratar de manera frecuente ya que se ha comenzado a evidenciar el cambio climático. Debido a estos efectos contraproducentes del cambio se han buscado alternativas que permitan seguir con las comodidades y actividades industriales, pero que a su vez generen menos contaminación (Organización de las Naciones Unidas, s.f.).

Una de las fuentes de contaminación más grandes en la actualidad son los combustibles derivados del petróleo que se utilizan para distintas actividades en la vida cotidiana, como el transporte. El uso de estos combustibles de forma masiva y frecuente ha hecho que se liberen gases de efecto invernadero, siendo el más común el dióxido de carbono (Organización de las Naciones Unidas, s.f.). Debido a esta problemática se ha optado por el uso de energías de fuentes limpias, es decir, que generen menos gases de efecto invernadero.

En esta investigación se propone el uso de residuos de limón recolectados en una industria juguera de Guatemala para transformarlos en productos combustibles menos contaminantes: bioaceite y char, así como investigar sus usos y proponer aplicaciones dentro de la industria.

La biomasa es considerada como fuente de energía limpia debido a su bajo contenido en nitrógeno y azufre, además de aprovechar los desperdicios. Está compuesta principalmente por 3 biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales al descomponerse por acciones térmicas liberan energía y forman productos de alto valor que se pueden usar en forma de energía (Viltres y Alarcón, 2022).

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar una pirólisis a nivel laboratorio para obtener bioaceite y biochar a partir de residuos de limón.

B. Objetivos específicos

1. Caracterizar residuos de limón por medio de análisis fisicoquímicos con la finalidad de conocer las condiciones iniciales de la reacción.
2. Llevar a cabo un proceso de pirólisis a escala laboratorio dentro de la Universidad del Valle de Guatemala para producir biochar y bioaceite.
3. Determinar el rendimiento de los productos de pirólisis de residuos de limón por medio de un balance de masa con la finalidad de evaluar el uso de los residuos como materia prima para la reacción.
4. Caracterizar el biochar por medio de análisis próximo para determinar su calidad y usabilidad como combustible.
5. Obtener una curva de rendimiento de bioaceite vs temperatura para determinar la distribución de la fracción líquida en el proceso de pirólisis.
6. Comparar el poder calorífico del char de pirólisis con distintos combustibles de sólidos para evaluar su uso y aplicaciones como combustible.
7. Caracterizar cualitativamente el bioaceite por medio de una cromatografía de gases y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con la finalidad de estimar su composición química y valorizarlo.
8. Hacer un análisis económico del proceso de pirólisis de residuos de limón a escala laboratorio para conocer la viabilidad económica del proceso.

III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años ha habido un aumento en la demanda energética, por lo que la alternativa de utilizar biomasa como fuente de combustibles se ha fortalecido, lo cual a su vez contribuye a no depender de los combustibles fósiles y de esta manera reducir la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos (Abu Bakar *et al.*, 2020). Se estima que el 40% - 60% de alimentos cítricos como el limón, naranja, entre otros, son convertidos en residuos (Hassen, 2021). Los residuos de cítricos también pueden ser usados como alimento para animales (United States Department of Agriculture, 2011), sin embargo, en este estudio se demuestra que puede ser utilizado como una fuente para la generación de energía que puede ser aprovechada. La materia orgánica cuando es desechada tiene un proceso de descomposición en el cual se genera metano, un gas de efecto invernadero que es de 28 a 34 veces más nocivo que el dióxido de carbono (Global Methane Initiative, 2011), por lo cual es de utilidad realizar un proceso como la pirólisis para aprovechar este tipo de residuos para evitar que estos sean simplemente desechados. La energía de la biomasa proviene del crecimiento de las plantas, las cuales absorben el dióxido de carbono a través de la fotosíntesis. Una ventaja de la biomasa es que emite menos gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, en comparación con los combustibles fósiles. De esta manera, la cantidad de dióxido de carbono liberado es igual o menor a la cantidad absorbida por las plantas durante su crecimiento (Nogales, 2015).

A partir del jugo de limón se pueden obtener otros productos como el ácido cítrico, pero esta técnica no ha sido rentable debido a la cantidad de jugo utilizada en el proceso, por lo que no supone una competencia en el uso del residuo de limón (Pochteca, 2022). Aun cuando las cáscaras de limón se pueden utilizar para otros productos como aceites esenciales, estos no suponen una competencia para la pirólisis ya que podría utilizarse los residuos luego de la extracción de los aceites en posteriores estudios.

Industrias jugueras, restaurantes y hogares desechan los residuos de materias orgánicas como el limón, por lo que su aprovechamiento beneficiaría la obtención de combustibles con menores emisiones y la reducción de residuos.

Se optó por el uso de limón tipo persa debido a que es un fruto con alta demanda dentro del mercado local, siendo uno de los más difundidos ya que no cuenta con semillas y posee un buen tamaño (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, 2003), además

es el tipo de limón más utilizado en las industrias jugueras, así como en restaurantes en Guatemala.

Asimismo, es de especial interés la comparación de la calidad del biochar de la pirólisis de residuos de limón frente a otros combustibles para determinar sus posibles usos y calidad. De igual forma es de interés el conocer la composición aproximada del bioaceite para saber el valor de los productos que contiene.

IV. MARCO TEÓRICO

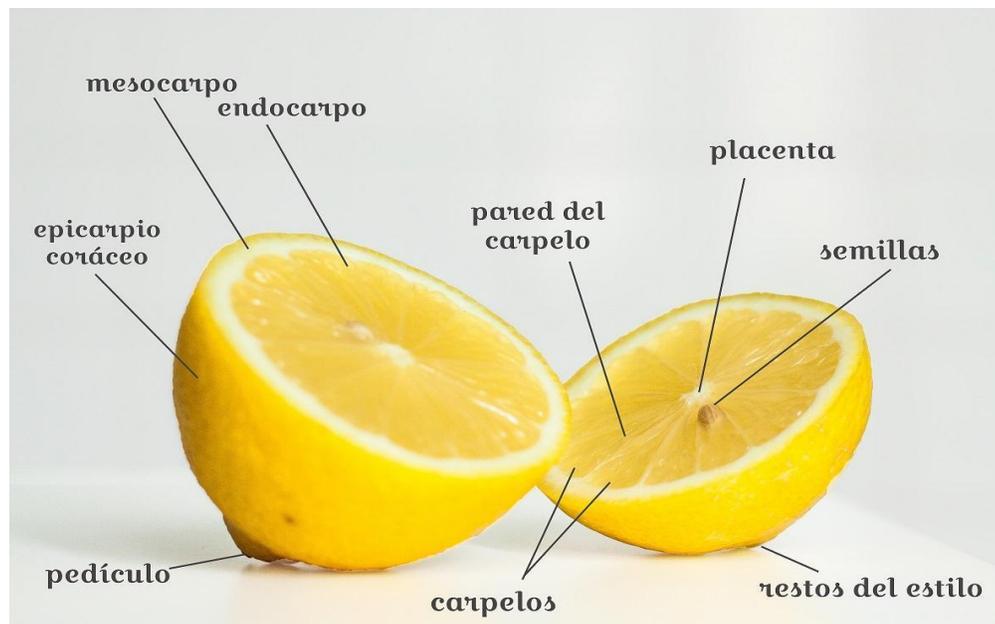
A. Generalidades del limón

El limón es una fruta redonda ligeramente alargada con tamaño de 7 a 12 centímetros de longitud que pertenece a la familia de los agrinos, por lo que suele compartir características con otras familias de agrinos. El limón pertenece a la familia de las rutáceas del género *Citrus*, especie *citrus limonum*. Se divide en distintas zonas:

- La zona más externa es la llamado flavedo o exocarpo que está formado por epidermis con vesículas que contienen aceites esenciales. Las vesículas son estructuras alargadas que nacen en el edocarpo y llegan hasta el interior de la fruta
- El mesocarpo o albedo se caracteriza por tener un aspecto de textura esponjosa de color blanco.
- Pulpa o el llamado endocarpo que es la zona en la que se encuentran los sacos de zumo y las semillas.

La porción comestible de un limón es de 64 gramos por cada 100 gramos del producto fresco (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, s.f.).

Figura 1. Partes del limón



La pulpa de los limones es amarilla pálida y jugosa con sabor ácido y se encuentra seccionada en gajos. Se utiliza de forma casera en frescos y el zumo se puede utilizar en la industria de preparados. También es utilizado como materia prima para ciertos medicamentos en la industria farmacéutica.

Dentro de las propiedades del limón para la salud humana se encuentran: refuerzo del sistema inmunológico, revitalizante, ayuda a activar el metabolismo.

El limón proviene del limonero, el cual es un árbol de unos 6 metros de altura, de hojas perennes, dentadas y puntiagudas. Se puede cultivar tanto en arenas como en arcillas ya que no es una planta exigente con la calidad del suelo, sin embargo, si es sensible al clima, por lo que se puede ver afectado por heladas o por climas extremadamente calientes.

El limonero puede tener más de una floración al año a diferencia de otros cítricos. En un mismo limonero se pueden encontrar limones en diferentes fases de crecimiento, por lo que por medio de controles se ha logrado obtener limones en épocas del año en las que hay escasez, el limón también puede almacenarse por largos periodos de tiempo sin que se vea afectada su calidad (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, s.f.).

El consumo de limón guatemalteco en 2021 fue de 105,000 toneladas métricas y desde 2017 la demanda de limones ha aumentado en un 1% de forma interanual. Para el 2026 se espera que el consumo de limón en Guatemala llegue aproximadamente a 106,000 toneladas métricas. En el 2021 Guatemala fue el decimoséptimo productor de limones (Guatemala Lemon Industry Outlook 2022 - 2026, s. f.).

Figura 2. Composición nutricional del limón.

	Por 100 g de porción		Recomendaciones	Recomendaciones
	comestible	Por unidad (110g)	día-hombres	día-mujeres
Energía (kcal)	44	31	3000	2300
Proteínas (g)	0.7	0.5	54	41
Lípidos totales (g)	0.4	0.3	100-117	77-89
AG saturados (g)	-	-	23-27	18-20
AG monoinsaturados	-	-	67	51
AG poliinsaturados (g)	-	-	17	13
ω-3 (g)*	-	-	3.3-6.6	2.6-5.1
C18:2 Linoleico (ω-6)(g)	-	-	10	8
Colesterol (mg/1000 kcal)	0	0	<300	<230
Hidratos de carbono (g)	9	6.3	375-413	288-316
Fibra (g)	1	0.7	>35	>25
Agua (g)	88.9	62.6	2500	2000
Calcio (mg)	12	8.4	1000	1000
Hierro (mg)	0.4	0.3	10	18
Yodo (μg)	3	2.1	140	110
Magnesio (mg)	18	12.7	350	330
Zinc (mg)	0.12	0.1	15	15
Sodio (mg)	3	2.1	<2000	<2000
Potasio (mg)	149	105	3500	3500
Fósforo (mg)	16	11.3	700	700
Selenio (μg)	1	0.7	70	55
Tiamina (mg)	0.05	0.04	1.2	0.9
Riboflavina (mg)	0.03	0.02	1.8	1.4
Equivalentes niacina (mg)	0.17	0.1	20	15
Vitamina B6 (mg)	0.11	0.08	1.8	1.6
Folatos (μg)	7	4.9	400	400
Vitamina B12 (μg)	0	0	2	2
Vitamina C (mg)	50	35.2	60	60
Vitamina A: Eq. Retinol (μg)	2.3	1.6	1000	800
Vitamina D (μg)	0	0	15	15
Vitamina E (mg)	0.5	0.4	12	12

Ingestas recomendadas/día para hombres y mujeres de 20 a 39 años con una actividad física moderada

Objetivos nutricionales/día.

Ingestas dietéticas de referencia

* datos incompletos

(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, s.f.)

B. Limón persa

El limón persa también se conoce como *Citrus Latifolia* y pertenece a la familia de las Rutáceas, se caracteriza por ser un árbol vigoroso y erguido. Sus brotes al inicio tienen tonos púrpura, pero van cambiando a tonos verdosos. El fruto se caracteriza por su falta de semillas y por tener un color verde o amarillo. Se encuentra bajo la partida arancelaria 0805509011. La plantación crece a temperaturas entre 22°C y 28°C. Sus variedades son la Tahití, Bearss, Hawaii, cayena lisa y la petrolera (Ministerio de Agricultura, ganadería y alimentación. 2014).

Se estima que en Guatemala hay aproximadamente 12,000 manzanas cuadradas de limón. Sus principales usos son como acompañamiento de bebidas, zumo de frutas, aderezos y ensaladas y como acompañamiento para otros alimentos (Ministerio de Agricultura, ganadería y alimentación. 2014).

C. Productos derivados de cáscaras limón

El limón y sus diferentes partes pueden ser utilizados para la elaboración de una variedad de productos, dentro de los cuales se encuentran:

- Aceites esenciales: El aceite esencial de limón se puede obtener por distintos métodos, pero el más común es el prensado en frío. El prensado en frío es una técnica de extracción de aceite que se realiza en ausencia de calor. Los aceites generados con esta técnica son más estables a los procesos de oxidación debido a que contienen sustancias antioxidantes. El aceite se extrae del pericarpio de la piel raspando los sacos de aceite cercanos a la superficie de la fruta, a medida que se realiza la extracción se lava la piel con agua formando un líquido viscoso. El líquido final obtenido se recolecta y se debe llevar a centrifugación a velocidades entre 80000-10000 rpm para separar la parte que contiene el aceite. El agua obtenida se puede recuperar y reutilizar (Cerutti y Neumayer, 2004).

El aceite por prensado de cáscara de limón da como resultado la obtención de aproximadamente 63% de limoneno, 12% de beta-pineno, 9% de gama-terpeno. El producto puede ser almacenado hasta por 30 días para propiciar la precipitación de los materiales que se encuentran en el aceite. Para el almacenamiento es de vital importancia tomar en cuenta que todos los aceites se exponen a deterioros que se deben a hidrólisis, polimerización y la oxidación. Debido a esto los aceites deben almacenarse en lugares secos y frescos, recipientes herméticos,

lugares oscuros. Se deben evitar los recipientes de plástico ya que se estará trabajando con ácidos cítricos (Cerutti y Neumayer, 2004).

Al cotizar en varias páginas, el precio del aceite esencial de limón comercial es, en promedio, de 776 Q/L.

- Ácido cítrico: es un ácido orgánico que se encuentra en frutas como el limón y la naranja. El ácido cítrico, un ácido tricarboxílico, ha encontrado una amplia aplicación en la industria química y farmacéutica debido a su compatibilidad con los organismos vivos, su versatilidad y su naturaleza química amigable con el entorno. Se emplea estratégicamente como componente en la formulación de medicamentos (Lambros *et al.*, 2022).

Fue el primer ácido que fue aislado en 1784 a partir del jugo de limón por un químico llamado Carl Wilhem. La producción de ácido cítrico a partir de frutos cítricos comenzó en el siglo XIX. El ácido se comenzó a obtener a partir de frutos cítricos en 1860, pero la técnica un duró mucho tiempo debido a la gran cantidad de jugo utilizado para obtener el ácido (Pochteca, 2022).

En 1893 se comenzó a obtener el ácido por medio de la fermentación de sacarosa con cultivos de *penicillium*. Posteriormente se descubrió que se podía obtener el ácido por medio de cultivos de hongos *Aspergillus niger*, por medio del cual se obtuvieron mejores resultados y se comenzó a producir de manera industrial (Pochteca, 2022).

- Pectinas: Son polímeros con alto peso molecular y se encuentra en todas las plantas. Las protopectinas junto con la celulosa forman parte de la pared celular de las plantas. Las pectinas se usan para la formación de geles y son utilizadas en industrias como la alimentaria para la fabricación de gelatinas y conservantes, en la farmacéutica como coagulante y emulsificante, en cosméticos para bases de maquillaje y espesantes (Ramírez-Gavidia *et al.*, 2020).

La pectina se puede obtener por hidrólisis, precipitaciones alcohólicas, secado y reducción de tamaño. La hidrólisis es un proceso en el que se rompen enlaces en un medio acuoso, caliente y con ácidos orgánicos o minerales. El rendimiento y propiedades de las pectinas van a variar según las variables de operación como el pH, tiempo y temperatura (Ramírez-Gavidia *et al.*, 2020).

Si bien es posible obtener pectinas de la cáscara de limón, también es posible su obtención por otras fuentes como las cáscaras de cacao, desechos de beneficios de café y frutas como el arándano y la naranja.

D. Lignocelulosa

La lignocelulosa o biomasa lignocelulósica es la que se obtiene de las plantas. La lignocelulosa es de los materiales más abundantes en la Tierra y está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las proporciones en las plantas pueden variar de las siguientes formas: 16%-85% es de hemicelulosa, 20%-55% de celulosa y de 15% - 40% de lignina.

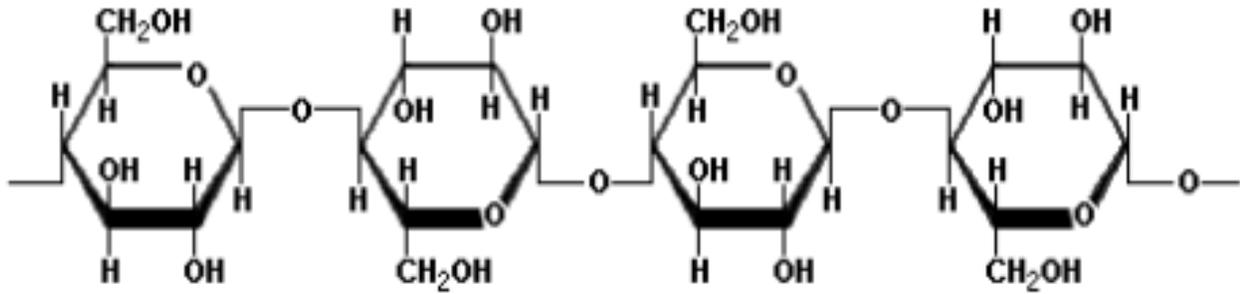
Actualmente hay dos métodos para la conversión de la biomasa lignocelulósica en fuentes de energía. En el primer método la fuente de energía se encuentra en la plataforma de azúcar donde el material lignocelulósico es tratado para facilitar la separación en sus componentes principales, luego la celulosa y hemicelulosa se hidrolizan con la finalidad de obtener de nuevo los azúcares llamados hexosas y pentosas de los cuales está conformado, estos productos pueden pasar a un proceso de fermentación en el que se pueden convertir en biocombustibles (Zumarraga, 2012).

1. Composición química de la lignocelulosa

Sus componentes principales son la celulosa, hemicelulosa y la lignina tal como se mencionaba anteriormente.

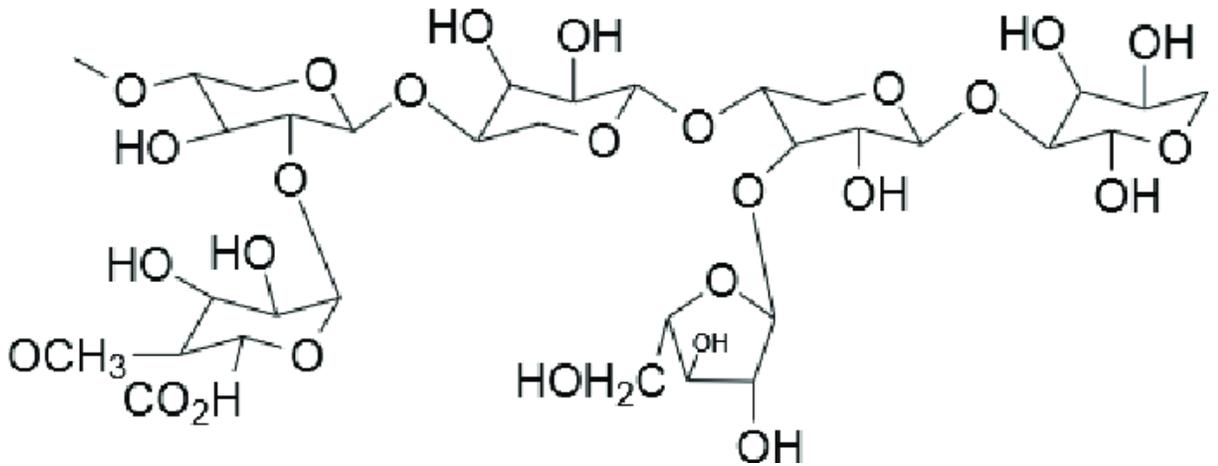
- Celulosa: es un polímero que está formado por microfibras, posee una estructura lineal formada por cadenas de glucosa unida por medio de enlaces estéricos del tipo β -1,4. Sus cadenas se conforman entre 100 y 14,000 unidades y cada residuo gira 180° respecto a sus vecinos. Se puede observar su estructura en la Figura 3. Es el componente más grande de la masa vegetal y se encuentra de forma exclusiva en las paredes de las células de origen vegetal (Zumarraga, 2012).

Figura 3. Estructura de la celulosa.



- Hemicelulosa: está conformado por polímeros de pentosas junto con hexosas que pueden formar cadenas de 100 a 200 unidades. Lo conforman los siguientes monosacáridos: xilosa, manosa, glucosa, galactosa, arabinosa, ácido glucurónico, ácido 4-O-metilglucurónico, ácido galacturónico y, en menos cantidad, ramnosa, y otros azúcares Ometilados (Zumarraga, 2012).

Figura 4. Estructura de la hemicelulosa



- Lignina: es un polímero formado a través de la condensación generada de forma aleatoria de radicales libres de alcoholes aromáticos. A pesar de su estructura compleja es sabido que se compone mayormente de 3 alcoholes: coniferílico, sinapílico y p-cumarílico. La lignina proporciona propiedades de hidrofobicidad y rigidez. Dado a que

tiene varios vínculos carbono - carbono es de interés en procesos térmicos para la generación de energía (Zumarraga, 2012).

En la siguiente figura se pueden observar la caracterización de distintas cáscaras de fruta como biomasa, entre la cuales se encuentra la cáscara de limón.

Figura 5. Caracterización de biomasas de cáscara de frutas.

Biomasa	Humedad (%)	Azúcares reductores (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Limón	79	1.8	21.6	6.0	8.9
Mandarina	77.5	3.4	20.2	7.8	9.1
Naranja	69.4	2.8	23.5	10.4	7.6

(Tejada *et al.*, 2014)

E. Biomasa

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes de carbono más grandes y abundantes de la Tierra. Dentro de las fuentes de biomasa se encuentran:

- Residuos forestales
- Residuos de cultivos
- Cultivos energéticos
- Desechos de animales
- Desechos de alimentos

Los desechos de los alimentos son la parte fibrosa estructural que está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina (U.S. Department of Agriculture, 2021).

La biomasa es un material orgánico renovable que es una fuente importante de energía en ciertos países donde se utiliza especialmente como fuente de energía para calefacción o cocinar. El uso de las fuentes de energía de biomasa ha aumentado su uso en varios países desarrollados para reducir las emisiones de dióxido de carbono que se provocan por las fuentes que provienen del petróleo. En 2021 la biomasa brindó un total aproximado de energía que abarcó el 5% de la

energía primaria total utilizada en Estados Unidos (U.S. Energy Information Administration, 2022).

Puede ser convertida en energía a través de diferentes procesos, por ejemplo:

- Combustión directa para generación de calor: es el método más común utilizado ya que esta puede ser quemada de forma directa para generar energía y ser utilizada para calentamiento o en procesos industriales que propician la generación de energía, por ejemplo, generar electricidad a través de turbinas de vapor usando la biomasa como fuente de energía.
- Conversión biológica para la obtención de combustibles líquidos y gaseosos.
- Conversión térmica que propicia la generación de productos combustibles líquidos, sólidos y gaseosos. Estas técnicas incluyen procesos de pirólisis y gasificación, ambos procesos son de descomposición en donde la biomasa se descompone a través del calentamiento. Estos procesos difieren en las temperaturas utilizadas y la cantidad de oxígeno utilizado durante el proceso.
 - Pirólisis: se calienta materia orgánica a temperaturas altas en casi completa ausencia de oxígeno dependiendo del tipo de pirólisis que se esté llevando a cabo.
 - Hidrotratamiento: se utiliza para tratar el bio aceite producido en la pirólisis rápida. Se trata con hidrógeno a elevadas temperaturas junto con un catalizador para producir fuentes renovables de diésel, gasolina y jet fuel.
 - Gasificación: se trata del calentamiento de materia orgánica a elevadas temperaturas entre 800°C y 900°C junto con inyecciones de oxígeno controladas o vapor con la finalidad de producir monóxido de carbono e hidrógeno que se conoce también como gas de síntesis. El gas de síntesis puede ser utilizado como fuente de combustible para máquinas de diésel, generación de electricidad en turbinas o como fuente de calor. También se puede tratar para separar el hidrógeno del gas y este hidrógeno extraído a su vez se puede utilizar en celdas de hidrógeno. Asimismo, el gas de síntesis se puede convertir para generar la producción de combustibles líquidos.
- Conversión química que genera combustibles líquidos

(U.S. Energy Information Administration, 2022)

F. Pirólisis

La pirólisis es el efecto de la descomposición térmica de materia orgánica que se puede encontrar en residuos, el proceso se puede realizar en ausencia de oxígeno. Los compuestos que están basados en carbono se descomponen dando como resultado gases, hidrocarburos condensables y residuo de carbono denominado char que es un sinónimo del coque. Es un proceso que puede ser utilizado de forma industrial y sus productos se pueden aprovechar de diferentes formas (Castells y Velo, 2012).

El punto de vista operativo divide la pirólisis en 3 procesos: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis instantánea. La composición y naturaleza de los productos y de los gases es función de la temperatura de proceso. La comparación de las variables de operación, así como la dominancia de los productos de los diferentes tipos de pirólisis se muestra a continuación en la Figura 6.

Figura 6. Comparación de variables y productos de los tipos de pirólisis

Proceso	Temperatura, °C	Velocidad de calentamiento, °C/s	Tiempo residencia	Producto mayoritario
Convencional	500	2	Gases 5 s Sólido horas	Char y condensables
Rápida	400 a 800	> 2	Gases: < 2 s	A temperaturas moderadas, 500 °C, condensables
Instantánea	> 600	> 200	Gases: < 0,5 s	Gases e hidrocarburos ligeros

(Castells y Velo, 2012)

El proceso de la pirólisis se trata de la descomposición de las lignocelulosas, cuya descomposición térmica es compleja debido a que se produce una gran cantidad de reacciones que en conjunto llevan a la formación de gases e hidrocarburos, así como un craqueo que da como resultado un compuesto de alto grado de carbonización denominado carbón, char o coque vegetal.

En la pirólisis de lignina ocurren reacciones de despolimerización, deshidratación y reacciones de descarbonilación, pérdidas de sustituyentes alifáticos, desmetoxilación, reagrupación de radicales libres y craqueo (Castells y Velo, 2012).

Los productos que son volátiles y se someten a pirólisis sufren de un proceso de craqueo, descomposición secundaria y polimerización, pero esto depende de la temperatura y del tiempo de residencia dentro del horno o reactor de pirólisis.

En la pirólisis convencional cuando se trabaja a temperaturas bajas o moderadas y tiempos de residencia altos se obtiene un mejor rendimiento en los líquidos y sólidos ya que no se da una desvolatilización tan grande y los productos formados se pueden recombinar de forma parcial. Si se quiere maximizar la producción de líquidos se debe trabajar a temperaturas intermedias y tiempos de residencia bajos para que no ocurra recombinación de productos volátiles. Para maximizar la producción de gases se debe trabajar a temperaturas elevadas y el tiempo de residencia debe ser corto (Gómez *et al.*, 2008).

G. Productos de la pirólisis

Gas: contiene elementos como el hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono, así como otros gases ya que esto depende las características de la materia prima utilizada y de las condiciones a las que se haya realizado el proceso. Se puede utilizar para la generación de energía mecánica y térmica o utilizarse como materia prima para la obtención de otros productos (Gómez *et al.*, 2008).

Líquido: es una fracción condensable o también llamado bioaceite y se puede utilizar como combustible rico en hidrocarburos luego de ser modificado para ser combustionado en motores o como fuente de generación de energía mecánica y térmica. Posee un valor de combustible que se encuentra entre el 50% y el 70% de los combustibles a base de petróleo, su composición hace que sea un producto térmicamente inestable, por lo que se dificulta poder refinarlo más. Este se optimiza a temperaturas de 500°C y con velocidades de calentamiento altas de alrededor de 1000 °C/ s en condiciones de pirólisis rápida. Aplicando estas condiciones se pueden obtener rendimientos de bioaceite entre 60% y 70% partiendo de biomasa como materia prima (U.S. Department of Agriculture, 2021)

El producto sólido es utilizado en la cocción de alimentos, como fuente de combustible en procesos industriales o como materia prima para la fabricación de carbón activado. El biochar también puede ser utilizado como modificador de suelo ya que el carbón es un muy buen adsorbente y tiene la capacidad de retener agua, nutrientes y/o productos químicos, provocando así una contaminación del agua o la erosión de los suelos. La aplicación del biochar en el suelo

puede ayudar a reducir las emisiones de carbono y ayudar a mitigar o disminuir el cambio climático (U.S. Department of Agriculture, 2021).

La distribución de productos en la pirólisis es dependiente de la materia prima y de las condiciones iniciales de la misma, según (Miranda et al., 2012) para la pirólisis de cáscara de naranja se puede observar la distribución de los productos a una temperatura de 700°C en el Cuadro 1, en la donde la humedad inicial de la cáscara era de 9.20 %m/m. Dichos valores de referencia pueden ser tomados como un balance de masa teórico.

Cuadro 1. Distribución de productos de pirólisis de cáscara de naranja.

Biomasa	Sólido (%m/m)	Líquido (%m/m)	Gas (%m/m)
Cáscara de naranja	22.0	53.9	21.4

(Miranda *et al.*, 2012)

Para obtener una estimación de un balance de energía teórico se ha recopilado información de distintas fuentes para los diferentes

Cuadro 2. Poder calorífico de pirólisis de biomasa

Producto	Poder calorífico (MJ/Kg)	Referencia
Sólido	30.46	Bhattacharjee y Biswas, 2019
Líquido	24.01	Bhattacharjee y Biswas, 2019
Gas	2.78 *	Weerachanchai, 2009

*Valor dado en MJ/kg-biomasa

H. Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos combustibles que provienen de la biomasa. Este término se usa para referirse a productos energéticos que viene de materia prima que se ha formado por medio de vía biológica, pero cabe resaltar que no son tomados en cuenta los combustibles fósiles o los derivados de petróleo (Salinas y Gasca, 2009).

Los biocombustibles contienen alcoholes, ésteres y otros grupos funcionales que proviene de materia orgánica que contiene celulosa. Los biocomponentes provienen de trigo, semillas, azúcar, etc. (Salinas y Gasca, 2009).

El utilizar este tipo de combustibles tiene la finalidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera que provocan cambio climático, esto se debe a que el uso de los biocombustibles hace que se reduzca la cantidad de emisiones de dióxido de carbono en comparación con los combustibles fósiles. Son una fuente de energía alternativa (Salinas y Gasca, 2009).

En la Figura 7 se puede visualizar tipos de biocombustibles según su estado

Figura 7. Biocombustibles según su estado

Tipos de biocombustibles		
<i>Sólidos</i>	<i>Líquidos</i>	<i>Gaseosos</i>
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogas
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas ¹ y pellets ²	Ésteres derivados de	
Triturados finos	aceites vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirólisis	

(Salinas y Gasca, 2009).

Los biocombustibles se pueden obtener por varios métodos diferentes: mecánicos, termoquímicos, biotecnológicos y extractivos con la finalidad de obtener combustibles líquidos, gaseosos o sólidos. A continuación, se pueden observar los diferentes procesos de obtención de los biocombustibles.

Figura 8. Procesos para obtener biocombustibles

Proceso de obtención de biocombustibles			
	<i>Técnicas</i>	<i>Productos</i>	<i>Aplicaciones</i>
Mecánicos	Astillado	Leñas	Calefacción
	Trituración	Astillas	Electricidad
	Compactación	Briquetas Aserrín	
Termoquímicos	Pirolisis	Carbón	Calefacción
	Gasificación	Aceites	Electricidad
		Gasógeno	Transporte Industria química
Biotecnológicos	Fermentación	Etanol	Transporte
	Digestión anaeróbica	Biogas	Industria química
			Calefacción Electricidad
Extractivos	Extracción físico-química	Aceites	Transporte
		Ésteres	Industria química
		Hidrocarburos	

(Salinas y Gasca, 2009).

I. Análisis próximo

El análisis próximo es un método para determinar la humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo en los carbones y otros materiales. Se considera como un método relativamente simple que puede realizarse con ayuda de una mufla.

Humedad: se refiere a la cantidad de agua presente en la muestra.

Material volátil (MV): son los componentes de la muestra que son liberados a alta temperatura en ausencia de oxígeno excluyendo a la humedad. Es expresado en porcentaje en peso.

Carbono fijo (CF): es el carbono que se encuentra en la muestra remanente luego de que se expulsara el material volátil.

Cenizas: es el residuo no combustible de la muestra. Es expresado en porcentaje en peso.

(López, 2018).

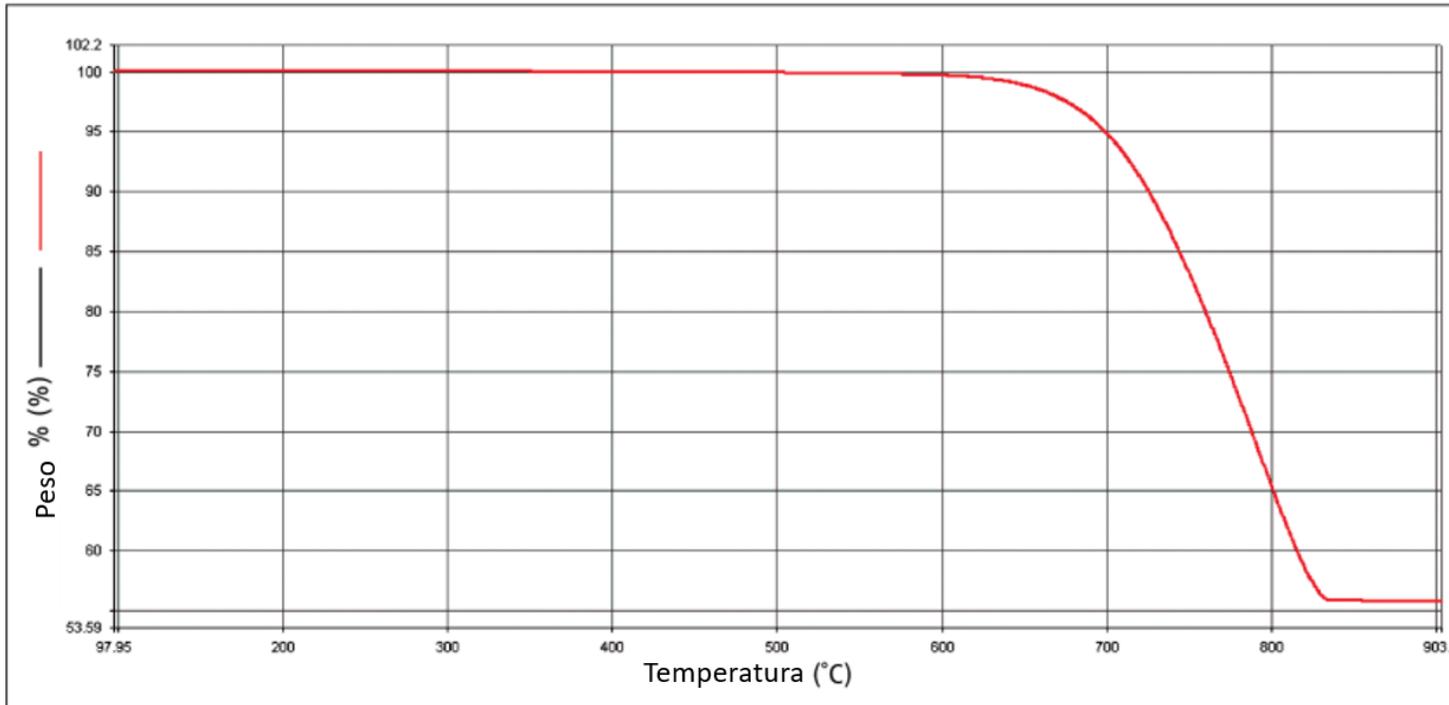
J. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico se refiere al registro de las curvas de descomposición térmica de algún material y las curvas que grafican la masa vs la temperatura se llaman termograma (Skoog, 2015).

En este método se va midiendo los cambios de masa a medida que se aumenta la temperatura. El aparato consta de una balanza altamente sensible para poder determinar los cambios de masa de la muestra, también cuenta con un horno para poder controlar el calor. La balanza debe ser aislada de efectos térmicos para que haya una mejor precisión. Los aparatos modernos tienen una computadora que calcula el porcentaje de pérdida en peso. Los equipos comerciales pueden llegar a una temperatura mayor a los 1000°C con capacidades de calentamiento que pueden ir desde 0.1°C hasta 200°C/min (Ebnesajjad, 2006).

Un descenso en la curva del análisis termogravimétrico (TGA) indica que ha habido una pérdida de masa. En un análisis en el que se introdujo una muestra de 15.013 mg de carbonato de calcio con un programa de temperatura de 100°C a 900°C @ 10°C/min en una atmósfera de nitrógeno con una tasa de purga de 20 mL/min (PerkinElmer, s.f.) se obtiene una curva como la que se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Termograma de carbonato de calcio



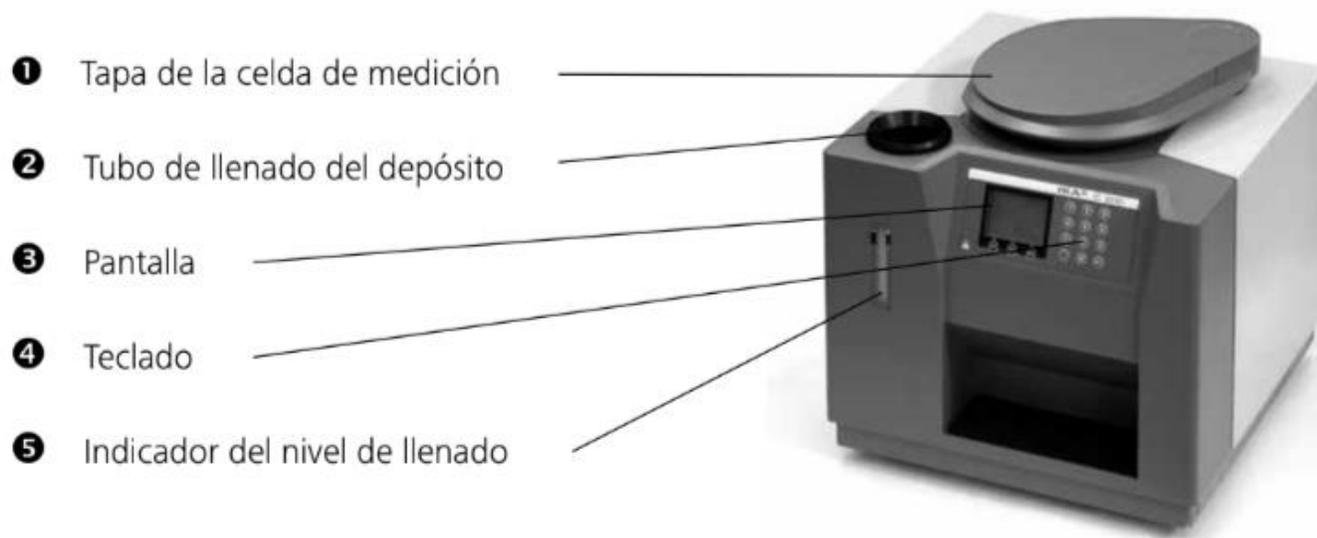
(PerkinElmer, s.f.)

K. Poder calorífico

El poder calorífico se refiere a la cantidad de energía almacenada en una unidad de masa y suele expresarse en Mega julios/kilogramo. Generalmente se usa una bomba calorimétrica para poder determinar el mismo (Gupta y Mondal, 2020).

La bomba calorimétrica es un equipo que permite determinar el poder calorífico de una muestra ya que se lleva a cabo una combustión en una atmósfera de oxígeno. Se necesita conocer la masa de la muestra, el incremento de temperatura dado a la combustión y hay casos en los que se debe corregir el valor del poder calorífico debido al uso de sustancias auxiliares como el ácido benzoico, medios de ignición u otros. Se puede usar en el estudio de combustibles sólidos y líquidos, materiales de desecho, entre otros (Universidad de Alicante, s.f.). Las partes del calorímetro IKA C 200 se muestran en la Figura 10.

Figura 10. Partes de calorímetro IKA C200



L. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Los espectrómetros de transformada de Fourier (FTIR) tienen la ventaja de tener una alta sensibilidad, resolución y velocidad para recoger los datos. Al inicio eran aparatos muy grandes y costosos, pero luego en la década de los 80's los equipos evolucionaron y los precios son más accesibles (Skoog, 2015).

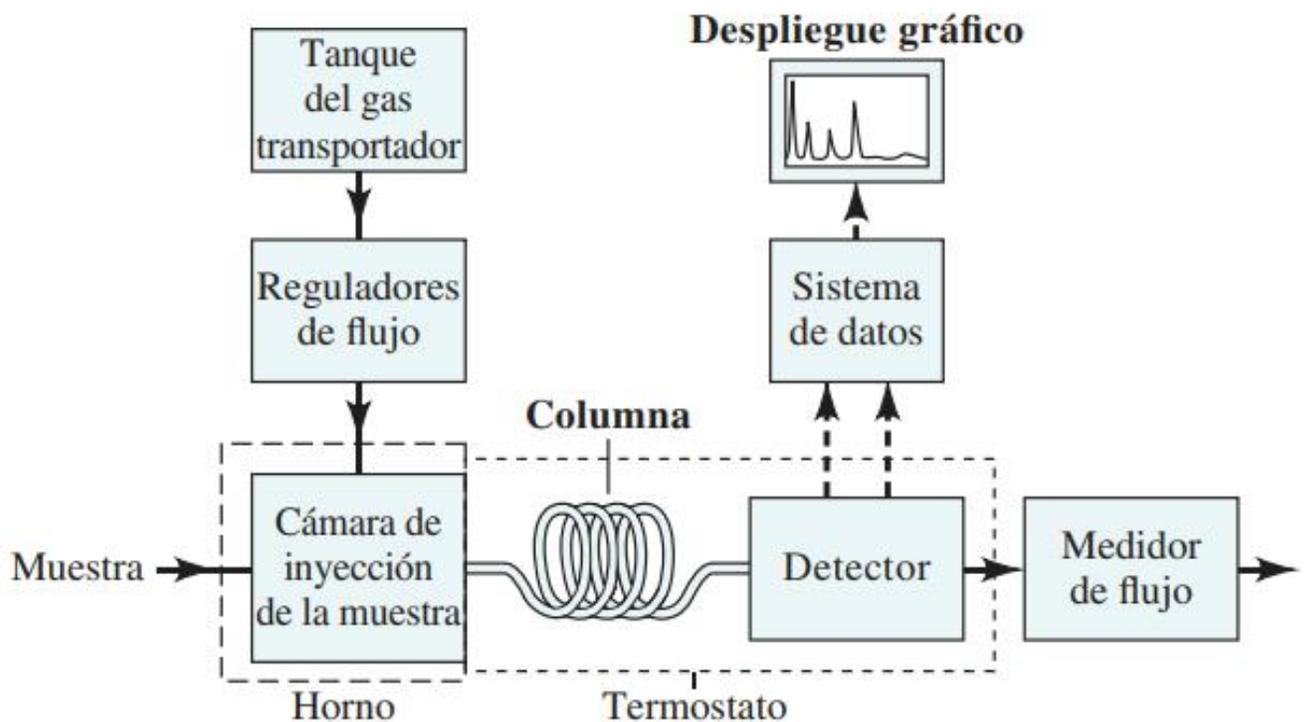
Estos equipos no poseen elementos dispersantes y las longitudes de onda se detectan y miden de forma simultánea usando un interferómetro de Michelson. Cuando se desean separar las longitudes de onda es necesario modular la señal de la fuente y pasarla a través de la muestra y pase a un interferograma que posteriormente será decodificado por una transformada de Fourier (Skoog, 2015).

La medición da como resultado un espectro que consta de una gráfica de transmitancia vs longitud de onda por medio del cual es posible identificar grupos funcionales ya que en el infrarrojo la absorción es debido a la excitación de los modos vibracionales. Las regiones de la gráfica en la que se presentan picos indican la inferencia de ciertos grupos funcionales, sin embargo, este método no es definitivo para la identificación de grupos funcionales por lo que se debe complementar con otros métodos.

M. Cromatografía de gases con detector de masas

La cromatografía de gases es una de las técnicas más utilizadas para el análisis cuantitativo y cualitativo de muestras. A continuación, se muestra el diagrama de bloques típico de un cromatógrafo en la Figura 11.

Figura 11. Diagrama de bloques de un cromatógrafo de gases



Los cromatógrafos pueden tener distintos detectores y el detector ideal debería tener las siguientes características:

1. Sensibilidad adecuada
2. Estabilidad y reproducibilidad
3. Respuesta lineal a los solutos
4. Temperaturas que van desde la ambiente hasta los 400°C
5. Tiempo de respuesta corto

6. Confiabilidad y factibilidad de uso
7. Similitud en las respuestas o respuestas altamente predecibles
8. No destruir la muestra

(Skoog, 2015).

En la siguiente tabla se pueden encontrar los diferentes tipos de detectores para un cromatógrafo

Figura 12. Tipos de detectores de masas

Detectores para cromatografía de gases		
Tipo	Sistemas aplicables	Límite de detección típico
Ionización de flama	Hidrocarburos	1 pg/s
Conductividad térmica	Detector universal	500 pg/mL
Captura de electrones	Compuestos halogenados	5 fg/s
Espectrómetro de masas (EM)	Ajustable para cualquier especie	0.25 a 100 pg
Termoiónico	Compuestos de nitrógeno y fósforo	0.1 pg/s (P) 1 pg/s (N)
Conductividad electrolítica (Hall)	Compuestos que contienen halógenos, azufre o nitrógeno	0.5 pg Cl/s 2 pg S/s 4 pg N/s
Fotoionización	Compuestos ionizados por radiación UV	2 pg C/s
Transformada de Fourier IR (FTIR)	Compuestos orgánicos	0.2 a 40 ng

(Skoog, 2015).

V. ANTECEDENTES

En Guatemala hay fechas en las que hay una mayor producción de limón, las ventas en el mercado local del limón persas son de noviembre a abril y de marzo a abril. Se estima que en Guatemala hay aproximadamente 12,000 manzanas cuadradas de limón (Ministerio de Agricultura, ganadería y alimentación. 2014).

Se encontró un estudio realizado para la pirólisis de cáscara de limón llamado “Pyrolysis of Lemon Peel Waste in a Fixed-bed Reactor and Characterization of Innovative Pyrolytic Products”, en este estudio la pirólisis se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo a temperaturas finales de 300°C, 400°C y 500°C con la finalidad de determinar el rendimiento máximo de los productos en cada una de las temperaturas y se realizó una caracterización de estos (ABADI *et al.*, 2021). Otro estudio realizado se titula “Upgrade of citrus waste as a biofuel via slow pyrolysis”, en este se realizaron pruebas a temperaturas desde 200°C hasta 650°C para las cuales se obtuvieron los rendimientos y se realizó una caracterización de materia prima y productos (Volpe *et al.*, 2015).

No se han realizado estudios de pirólisis de residuos de limón en el país, pero se han realizado investigaciones con otras materias como el estudio llamado “Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento.” llevado a cabo por estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala (Castellanos *et al.*, 2017) en el cual se realizaron pruebas con diferentes variaciones de humedad. Se efectuaron comparaciones de los productos sólidos, líquidos y gaseosos en función de la humedad y comparación de poder calorífico respecto a combustibles sólidos comerciales. También hay otro estudio realizado por alumnos de la Universidad del Valle llamado “Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia” en el que se caracterizaron los productos y se determinó el rendimiento de los reactivos y se realizó un modelo cinético de la descomposición térmica (Anleu *et al.*, 2019).

VI. METODOLOGÍA

A. Determinación del tamaño de muestra

Para la determinación del tamaño de muestra se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z_a^2 \times p \times (1 - p)}{d^2}$$

Donde:

n = tamaño de muestra

Z_a = Nivel de confianza

p = Proporción esperada

d = Precisión

B. Recolección de residuos de limón secos

Se recolectaron residuos de limón previamente secados a una temperatura de 60°C un tiempo de 4 horas con 10 minutos con humedad inicial de 29.75%.

C. Caracterización de los residuos de limón

1. Reducción de tamaño de los residuos de limón

- Se pesó la cantidad de residuos de limón inicial en una báscula Ohaus, serie 3000.
- Se colocó un recipiente o bolsa de nylon asegurada con cinta adhesiva en la parte inferior del molino para recolectar la muestra triturada.
- Se accionó el molino de discos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Los residuos de limón se agregaron dentro del molino por la tolva hasta triturar la cantidad de materia prima (MP) a utilizar.
- La muestra triturada fue recolectada.

- Se pesó la muestra triturada luego de la molienda.
- Se determinó la eficiencia del proceso de molienda.
- El molino de discos y sus partes internas se limpiaron con aire comprimido y un cepillo de alambre.

2. Análisis granulométrico de residuos de limón triturados

- Se pesaron los tamices de mesh Tyler 20, 30, 45, 60, 80 y 100 de la tamizadora ROTAP modelo RX-29 antes de realizar el proceso de tamizado.
- Los tamices fueron montados en un orden descendente de la base de la tamizadora hacia arriba para que los mesh de menor apertura quedaran abajo y los de mayor apertura arriba.
- Se pesaron 50 g de residuos de limón previamente molidos en la balanza analítica.
- Los 50 gramos se colocaron en el mesh que se encuentra hasta arriba y se cerró con la tapadera.
- Se bajó el brazo de la tamizadora y se aseguró que todo el montaje se encontrara de forma correcta.
- Se accionó la tamizadora por 20 minutos.
- Se pesó la cantidad de residuos de limón retenidos en cada plato.
- Fue calculada la cantidad de masa retenida por cada plato y el porcentaje que pasa.
- Se realizó una curva granulométrica y se repitió el procedimiento hasta llegar a un cuadruplicado.

3. Medición de humedad de la muestra triturada

- Se recolectaron aproximadamente 5 gramos de los residuos de limón secos y molidos.
- Se encendió la balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120.
- Fue creado un método de medición en la balanza específico para limón persa (temperatura de secado de 60°C con criterio de paro A60 que representa un cambio de humedad de 1mg/60s).
- Se abrió la balanza y se colocó el plato de aluminio.
- La balanza fue cerrada para tarar el plato de aluminio.
- Se colocó la muestra en el plato y se cerró la balanza.
- Al completarse el proceso de medición se anotó el porcentaje de humedad en base húmeda.
- Se realizó el mismo procedimiento para obtener un cuadruplicado de la medición de la materia prima.

4. Poder calorífico de los residuos de limón triturados

- Fabricación de pastillas para medición:
 - Se pesaron aproximadamente 0.8 g de ácido benzoico sobre papel encerado en una balanza analítica Ohaus Pioneer Series modelo PA114.
 - Se pesaron 0.2 g de residuos sobre papel encerado en la balanza analítica.
 - Se colocó el ácido y los residuos en un beaker y se mezclaron con ayuda de una espátula analítica hasta obtener una mezcla homogénea.
 - La mezcla se trasladó a una pastilladora marca Parr 2811 por medio de la cual se compactó la muestra hasta obtener una pastilla de una consistencia firme.
- Montaje de calorímetro
 - Se calibró el calorímetro IKA C 200 según instrucciones de manual de operación
 - Se preparó el recipiente de disgregación:
 - Primero se aflojó la tuerca de racor y se quitó la tapadera.
 - Se colocó una fibra de algodón centrada en el alambre de ignición.
 - Se pesó la pastilla formada en los pasos de la sección “Fabricación de pastillas para la medición” en el crisol que viene como material del calorímetro por medio de una balanza analítica y se anotó el valor.
 - Se colocó el crisol en su soporte.
 - Por medio de una jeringa se agregó agua destilada al recipiente de disgregación.
 - Con ayuda de pinzas se colocó en contacto la fibra de algodón con la pastilla.
 - Se colocó la tapa en el recipiente hasta el fondo y se puso la tuerca.
 - El oxígeno fue introducido dentro del recipiente haciendo uso de una estación de oxígeno.
 - Se colocó el adaptador de encendido.
 - Se puso el recipiente con el adaptador dentro de la caldera interna del equipo.

- Por medio de un recipiente se introdujo aproximadamente 2 L de agua en el depósito.
- Medición
 - Se seleccionó la opción de medición.
 - Apareció un menú en el que se ingresaron las siguientes cosas:
 - ❖ Peso: peso de la pastilla en el crisol.
 - ❖ Calibración: 0, ya que se estaba realizando una medición.
 - ❖ Recipiente de disgreg.: 1, corresponde al número de recipientes en el ensayo.
 - ❖ Qext1: 50, es el valor predeterminado para corregir la energía térmica del algodón.
 - ❖ Qext2: 0, valor predeterminado.
 - Se cerró la tapa del calorímetro y se aseguró que esta tenga contacto con el recipiente, de lo contrario aparecerá un mensaje.
 - Apareció el mensaje ¿Depósito lleno? y ¿Se ha cerrado la bomba de forma segura? Se verificó que el depósito se encontrara lleno y que la bomba se haya cerrado de forma segura.
 - Se empezó a llenar la caldera interna y comenzó la medición.
 - Después que terminó la medición apareció el valor en la pantalla y el mismo fue anotado.
- Después de medición
 - Se abrió la tapa del equipo y se esperó a que se vaciara la caldera.
 - Se retiró el recipiente de disgregación y el adaptador de encendido.
 - Se destensó el recipiente con ayuda de un botón de desaireación debajo de una campana.
 - El recipiente fue abierto y se verificó que haya ocurrido una combustión completa.
 - Se limpiaron todos los equipos para poder realizar nuevamente la medición hasta llegar a un cuadruplicado.

➤ Corrección de medición

- Al resultado obtenido se le restó el poder calorífico del ácido benzoico agregado en la pastilla por medio de la siguiente ecuación:

$$PC = \frac{m_{\text{pastilla completa}} \times PC_{\text{Bomba}} - Q_{AB}}{m_{\text{muestra}}}$$

Donde:

PC : Poder calorífico de la muestra

$m_{\text{pastilla completa}}$: Masa de la pastilla completa que se introdujo a la bomba.

PC_{Bomba} : Poder calorífico marcado por la bomba.

Q_{AB} : Calor aportado por el ácido benzoico en la medición.

m_{muestra} : Masa de muestra (residuos) dentro de la pastilla introducida a la bomba.

- Después de realizar el cálculo se obtuvo el poder calorífico de los residuos de limón.

5. Densidad de trabajo de materia prima

- Debido a que no se contaba con un equipo especializado para la medición de las densidades de sólidos se optó por realizar el siguiente procedimiento:
 - Con ayuda de una probeta se midieron aproximadamente 6 gramos de residuos de limón en una balanza analítica.
 - Se observó el volumen al que corresponde esta masa, con lo cual se obtuvo la densidad aireada.
 - Luego se agitó la probeta con vibraciones por aproximadamente 5 minutos.
 - Se volvió a leer el volumen que marcaba la probeta y con el peso se obtuvo la densidad compacta.
 - A partir de la densidad aireada y compacta se calculó la densidad de trabajo de la muestra con las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{trabajo} = C \times (\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

$$\text{Dónde: } C = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

➤ Se repitió el procedimiento hasta realizarlo en cuadruplicado.

6. Contenido de cenizas

- Se llevaron crisoles y su tapa a peso constante.
- Se adicionó aproximadamente 1 gramo de la materia prima seca al crisol y estos se llevaron a la mufla junto con sus respectivas tapas.
- Se llevó la mufla a una temperatura de 500°C durante 90 minutos.
- Después de ese tiempo se llevaron los crisoles a una desecadora hasta que llegaran a temperatura ambiente.
- Se volvió a pesar el crisol con su contenido restante luego del procedimiento y se determinó el porcentaje de cenizas de la muestra con la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = \frac{m_{cenizas}}{m_{muestra\ inicial} \times (1 - \%Humedad)}$$

Donde:

$\%Cenizas$: Porcentaje de cenizas en base seca.

$m_{cenizas}$: Masa de cenizas después del proceso de calentamiento.

$m_{muestra\ inicial}$: Masa de la muestra total antes del proceso de calentamiento.

$\%Humedad$: Humedad de la muestra inicial.

- Se realizó en cuadruplicado.

7. Material volátil

- Se llevaron crisoles y su tapa a peso constante.
- Se agregó 1 gramo de residuos al crisol y se llevó a la mufla.
- La mufla fue llevada a una temperatura de 500°C durante 10 minutos.
- Los crisoles fueron llevados a una desecadora en la que se dejaron hasta que llegaron a temperatura ambiente.
- Se pesó el crisol junto con su contenido residual en una balanza analítica.
- Se calculó el material volátil por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\%MV = \%Pérdida\ en\ peso - \%Humedad$$

Donde:

$\%MV$: Porcentaje de material volátil

$$\%Pérdida\ en\ peso = \frac{Peso\ de\ muestra - Peso\ después\ de\ calentamiento}{Peso\ de\ muestra} \times 100$$

$\%Humedad$: Porcentaje de humedad de la muestra inicial

- Se repitió procedimiento hasta un cuadruplicado.

8. Carbono fijo

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\%FC = 100\% - \%MV - \%Ceniza$$

9. Análisis termogravimétrico

Muestras de residuos de limón fueron enviados a Cetec de Cementos Progreso en donde fue realizado el análisis en duplicado.

10. Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier

Se enviaron tres muestras de residuos de limón al Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala para obtener la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

D. Pirólisis de residuos de limón

- Se armó el sistema de pirólisis a escala de laboratorio utilizando un sistema de condensación, una mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 y un reactor de pirólisis.
- Se pesaron aproximadamente 60 g de residuos de limón dentro del reactor y se cerró.
- Se colocó el reactor dentro de la mufla y se le colocó la chimenea. El sistema armando se puede observar en la Figura 41.
- Se colocó el sistema de condensación y las fibras de vidrio para evitar fugas en la chimenea.
- Se cerró la mufla y se le ajustó la rampa de calentamiento de la Figura 14.
- Se fue recolectando y pesando el bioaceite durante el proceso de pirólisis
- Luego de terminar con el proceso se apagó la mufla y se dejó enfriar.
- Cuando el sistema estaba frío se sacó el reactor y se le extrajo el char que contenía dentro y se pesó en la balanza.
- Se calculó la masa de gas de síntesis por diferencia.

E. Caracterización de biochar

1. Análisis granulométrico de char

- Se pesaron los tamices de mesh Tyler 20, 30, 45, 60, 80 y 100 de la tamizadora ROTAP modelo RX-29 antes de realizar el proceso de tamizado.
- Los tamices fueron montados en un orden descendente de la base de la tamizadora hacia arriba para que los mesh de menor apertura quedaran abajo y los de mayor apertura arriba.
- Se pesaron 10 g de char en la balanza analítica.
- Los 10 gramos se colocaron en el mesh que se encuentra hasta arriba y se cerró con la tapadera.
- Se bajó el brazo de la tamizadora y se aseguró que todo el montaje se encontrara de forma correcta.
- Se accionó la tamizadora por 20 minutos.
- Se pesó la cantidad char retenido en cada plato.
- Fue calculada la cantidad de masa retenida por cada plato y el porcentaje que pasa.
- Se realizó una curva granulométrica y se repitió el procedimiento hasta llegar a un cuadruplicado.

2. Medición de humedad de char

- Se recolectaron aproximadamente 3 gramos de char.
- Se encendió la balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120.
- Fue creado un método de medición en la balanza específico para char de residuos de limón (temperatura de secado de 60°C con criterio de paro A60 que representa un cambio de humedad de 1mg/60s)
- Se abrió la balanza y se colocó el plato de aluminio.
- La balanza fue cerrada para tarar el plato de aluminio.
- Se colocó la muestra en el plato y se cerró la balanza.
- Al completarse el proceso de medición se anotó el porcentaje de humedad en base húmeda.
- Se realizó el mismo procedimiento para obtener un cuadruplicado.

3. Poder calorífico de char

- Fabricación de pastillas para medición:
 - Se pesaron aproximadamente 0.8 g de ácido benzoico sobre papel encerado en una balanza analítica Ohaus Pioneer Series modelo PA114.
 - Se pesaron 0.2 g de char sobre papel encerado en la balanza analítica.
 - Se colocó el ácido y el char en un beaker y se mezclaron con ayuda de una espátula analítica hasta obtener una mezcla homogénea.
 - La mezcla se trasladó a una pastilladora marca Parr 2811 por medio de la cual se compactó la muestra hasta obtener una pastilla de una consistencia firme.
- Montaje de calorímetro
 - Se calibró el calorímetro IKA C 200 según instrucciones de manual de operación
 - Se preparó el recipiente de disgregación:
 - Primero se aflojó la tuerca de racor y se quitó la tapadera.
 - Se colocó una fibra de algodón centrada en el alambre de ignición.
 - Se pesó la pastilla formada en los pasos de la sección “Fabricación de pastillas para la medición” en el crisol que viene como material del calorímetro por medio de una balanza analítica y se anotó el valor.
 - Se colocó el crisol en su soporte.
 - Por medio de una jeringa se agregó agua destilada al recipiente de disgregación.
 - Con ayuda de pinzas se colocó en contacto la fibra de algodón con la pastilla.
 - Se colocó la tapa en el recipiente hasta el fondo y se puso la tuerca.
 - El oxígeno fue introducido dentro del recipiente haciendo uso de una estación de oxígeno.
 - Se colocó el adaptador de encendido.
 - Se puso el recipiente con el adaptador dentro de la caldera interna del equipo.

- Por medio de un recipiente se introdujo aproximadamente 2 L de agua en el depósito.
- Medición
 - Se seleccionó la opción de medición.
 - Apareció un menú en el que se ingresaron las siguientes cosas:
 - ❖ Peso: peso de la pastilla en el crisol.
 - ❖ Calibración: 0, ya que se estaba realizando una medición.
 - ❖ Recipiente de disgreg.: 1, corresponde al número de recipientes en el ensayo.
 - ❖ Qext1: 50, es el valor predeterminado para corregir la energía térmica del algodón.
 - ❖ Qext2: 0, valor predeterminado.
 - Se cerró la tapa del calorímetro y se aseguró que esta tenga contacto con el recipiente, de lo contrario aparecerá un mensaje.
 - Apareció el mensaje ¿Depósito lleno? y ¿Se ha cerrado la bomba de forma segura? Se verificó que el depósito se encontrara lleno y que la bomba se haya cerrado de forma segura.
 - Se empezó a llenar la caldera interna y comenzó la medición.
 - Después que terminó la medición apareció el valor en la pantalla y el mismo fue anotado.
- Después de medición
 - Se abrió la tapa del equipo y se esperó a que se vaciara la caldera.
 - Se retiró el recipiente de disgregación y el adaptador de encendido.
 - Se destensó el recipiente con ayuda de un botón de desaireación debajo de una campana.
 - El recipiente fue abierto y se verificó que haya ocurrido una combustión completa.
 - Se limpiaron todos los equipos para poder realizar nuevamente la medición hasta llegar a un cuadruplicado.

➤ Corrección de medición

- Al resultado obtenido se le restó el poder calorífico del ácido benzoico agregado en la pastilla por medio de la siguiente ecuación:

$$PC = \frac{m_{\text{pastilla completa}} \times PC_{\text{Bomba}} - Q_{AB}}{m_{\text{muestra}}}$$

Donde:

PC : Poder calorífico de la muestra

$m_{\text{pastilla completa}}$: Masa de la pastilla completa que se introdujo a la bomba.

PC_{Bomba} : Poder calorífico marcado por la bomba.

Q_{AB} : Calor aportado por el ácido benzoico en la medición.

m_{muestra} : Masa de muestra (char) dentro de la pastilla introducida a la bomba.

- Después de realizar el cálculo se obtuvo el poder calorífico del char.

4. Densidad de trabajo de char

- Debido a que no se contaba con un equipo especializado para la medición de las densidades de sólidos se optó por realizar el siguiente procedimiento:
 - Con ayuda de una probeta se midieron aproximadamente 6 gramos de char.
 - Se observó el volumen al que corresponde esta masa, con lo cual se obtuvo la densidad aireada.
 - Luego se agitó la probeta con vibraciones por aproximadamente 5 minutos.
 - Se volvió a leer el volumen que marcaba la probeta y con el peso se obtuvo la densidad compacta.

- A partir de la densidad aireada y compacta se calculó la densidad de trabajo de la muestra con las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{trabajo} = C \times (\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

Dónde:
$$C = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

- Se repitió el procedimiento hasta realizarlo en cuadruplicado.

5. Contenido de cenizas

- Se llevaron crisoles y su tapa a peso constante.
- Se adicionó aproximadamente 1 gramo de char al crisol y estos se llevaron a la mufla junto con sus respectivas tapas.
- Se llevó la mufla a una temperatura de 500°C durante 90 minutos.
- Después de ese tiempo se llevaron los crisoles a una desecadora hasta que llegaran a temperatura ambiente.
- Se volvió a pesar el crisol con su contenido restante luego del procedimiento y se determinó el porcentaje de cenizas de la muestra con la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = \frac{m_{cenizas}}{m_{muestra\ inicial} \times (1 - \%Humedad)}$$

Donde:

$\%Cenizas$: Porcentaje de cenizas en base seca

$m_{cenizas}$: Masa de cenizas después del proceso de calentamiento

$m_{muestra\ inicial}$: Masa de la muestra total antes del proceso de calentamiento

$\%Humedad$: Humedad de la muestra inicial

- Se realizó el proceso en cuadruplicado

6. Material volátil

- Se llevaron crisoles y su tapa a peso constante.
- Se agregó 1 gramo de char al crisol y se llevó a la mufla.
- La mufla fue llevada a una temperatura de 500°C durante 10 minutos.
- Los crisoles fueron llevados a una desecadora hasta llegar a temperatura ambiente.
- Se pesó el crisol junto con su contenido residual.
- Se calculó el material volátil por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\%MV = \%Pérdida\ en\ peso - \%Humedad$$

Donde:

$\%MV$: Porcentaje de material volátil

$$\%Pérdida\ en\ peso = \frac{Peso\ de\ muestra - Peso\ después\ de\ calentamiento}{Peso\ de\ muestra} \times 100$$

$\%Humedad$: Porcentaje de humedad de la muestra inicial

- Se repitió procedimiento hasta un cuadruplicado

7. Carbono fijo

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\%FC = 100\% - \%MV - \%Ceniza$$

8. Análisis termogravimétrico

Muestras de char fueron enviados a Cetec de Cementos Progreso en donde fue realizado el análisis en duplicado

9. Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier

Se enviaron 4 muestras de char al Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala para obtener la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

F. Caracterización de bioaceite

1. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

Se enviaron cuatro muestras de bioaceite al Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala para obtener la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

2. Cromatografía de gases con detector de masas

Se envían cuatro muestras de bioaceite al Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala para obtener una cromatografía de gases con detector de masas.

G. Análisis económico

- Se determinó el tiempo de uso y potencia de los equipos eléctricos (molino y mufla).
- Se calculó la energía utilizada por cada uno de los equipos y el costo de esta.
- Se cotizaron los precios de venta de los productos de la pirólisis.
- Realizar el análisis. Los detalles e información utilizada para el análisis económico se pueden encontrar en los cuadros Cuadro **58**, Cuadro **59** y Cuadro **60** de anexos.

VII. RESULTADOS

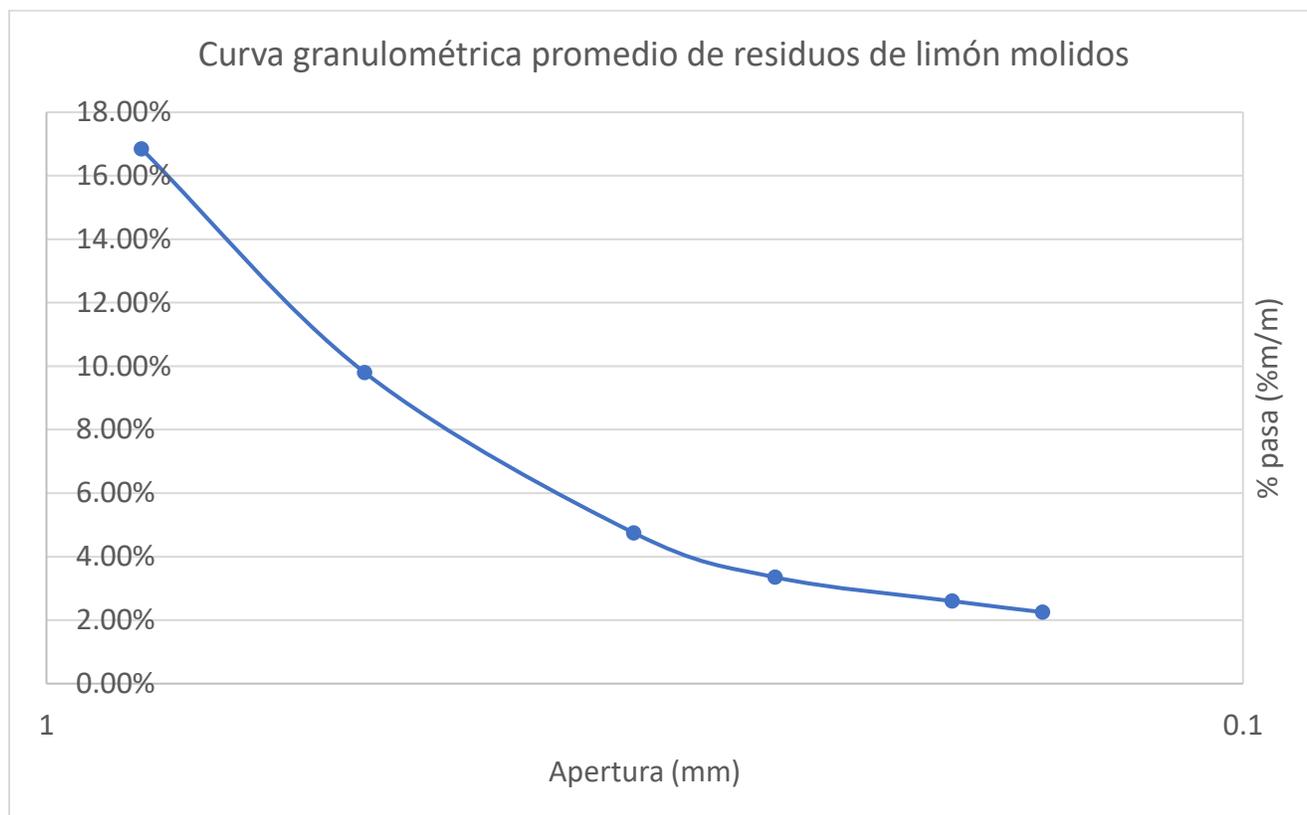
Cuadro 3. Eficiencia de proceso de molienda

Masa inicial ($\pm 0.01\text{g}$)	1220.00
Masa final ($\pm 0.01\text{g}$)	1180.00
Eficiencia ($\pm 0.57\% \text{m/m}$)	96.72%

Cuadro 4. Análisis granulométrico promedio de residuos de limón molidos

No. Tamiz Tyler	Apertura (mm)	Masa retenida ($\pm 0.01\text{g}$)	% de Retención (%m/m)	% que pasa (%m/m)
20	0.833	41.6	83.20 ± 0.16	16.85 ± 0.16
30	0.542	3.50	7.10 ± 0.07	9.80 ± 0.07
45	0.323	2.50	5.00 ± 0.05	4.75 ± 0.05
60	0.246	0.70	1.40 ± 0.01	3.35 ± 0.01
80	0.175	0.40	0.80 ± 0.01	2.60 ± 0.01
100	0.147	0.20	0.40 ± 0.004	2.25 ± 0.004
Remanente	-	0.40	0.80 ± 0.01	1.45 ± 0.01

Figura 13. Curva granulométrica de los residuos de limón molidos



Cuadro 5. Análisis próximo de residuos de limón secos y molidos

Medición	Valor	Desviación estándar
Humedad (%)	29.75	0.20
Poder calorífico superior (MJ/Kg)	16.97	0.17
Cenizas* (%m/m)	2.00	0.02
Material volátil* (%m/m)	68.3	0.38
Carbono fijo* (%m/m)	29.68	0.35

* Resultados mostrados en base seca

Cuadro 6. Densidad aireada, compacta y de trabajo de los residuos de limón triturados

Densidad	Valor (g/mL)	Desviación estándar (g/mL)
Aireada	0.298	0.019
Compacta	0.325	0.017
De trabajo	0.300	0.018

Cuadro 7. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de los residuos de limón para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
84.12	11.24
228.70	24.03
312.61	26.15
482.01	12.80
860.85	17.12

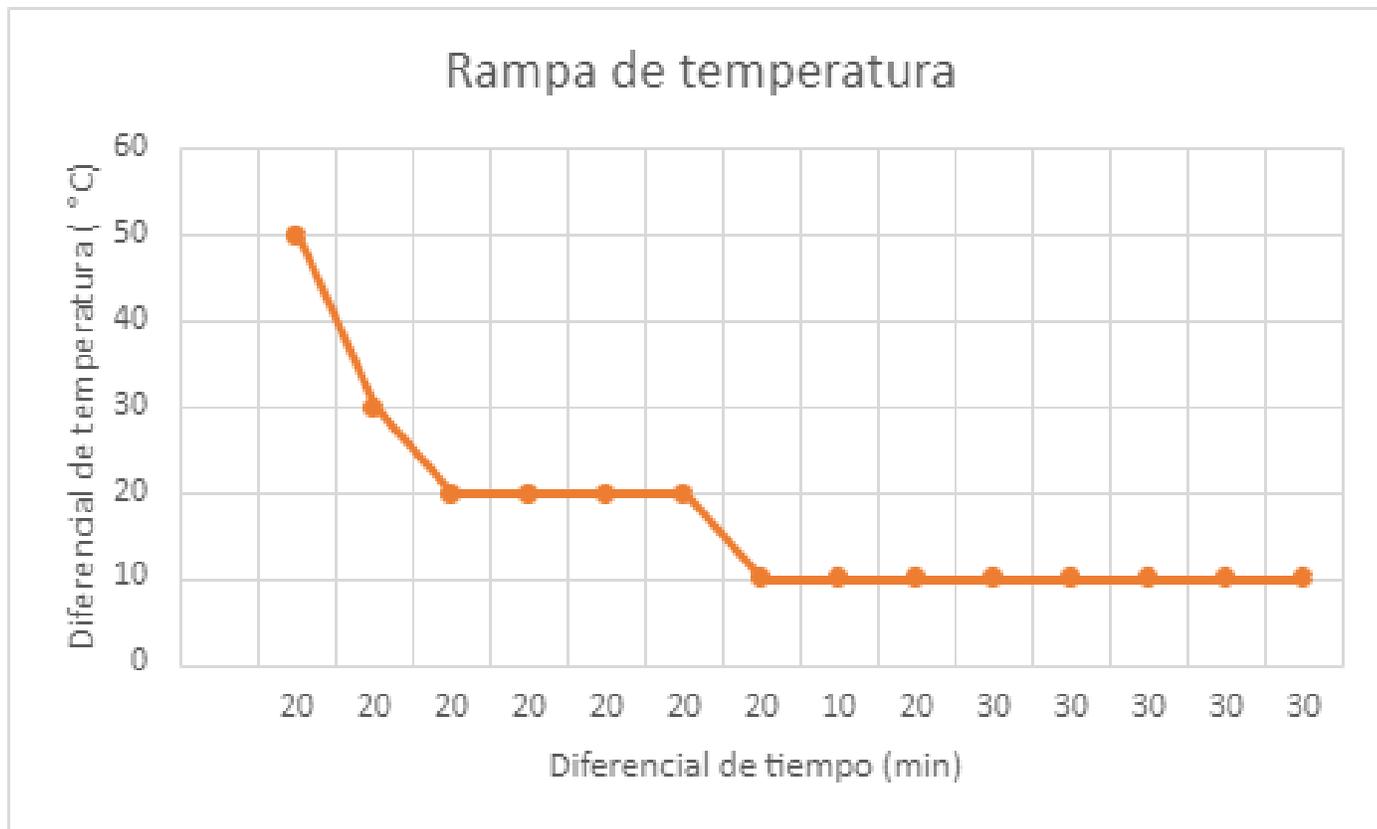
Cuadro 8. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 2 de los residuos de limón para pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
102.39	12.89
233.28	24.31
315.13	25.15
451.81	9.74
803.90	4.93

Cuadro 9. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier para materia prima

Longitud de onda (cm-1)	Enlace	Inferencia de grupo funcional
3277.04 - 3276.96	Estiramiento OH	Grupos O-H presentes como enlaces intramoleculares de hidrógeno
2924.05 - 2925.91	Estiramiento C-H	Estiramiento de metileno o estiramiento de C-H. Posible presencia de ácido alifático.
1624.51 - 1627.92	Estiramiento C-C	Indica la presencia de lignina en la muestra de residuos de limón.
1235.82 – 1234.98	Estiramiento C-H	Indica la presencia de celulosa dentro de la muestra de residuos de limón.

Figura 14. Rampa de temperatura de proceso de pirólisis de residuos de limón



Cuadro 10. Rendimientos de proceso de pirólisis a escala laboratorio

Producto	Rendimiento (%m/m)	Desviación estándar (%m/m)
Biochar	30.28	0.99
Bioaceite	50.37	1.73
Gas de síntesis	19.34*	2.62

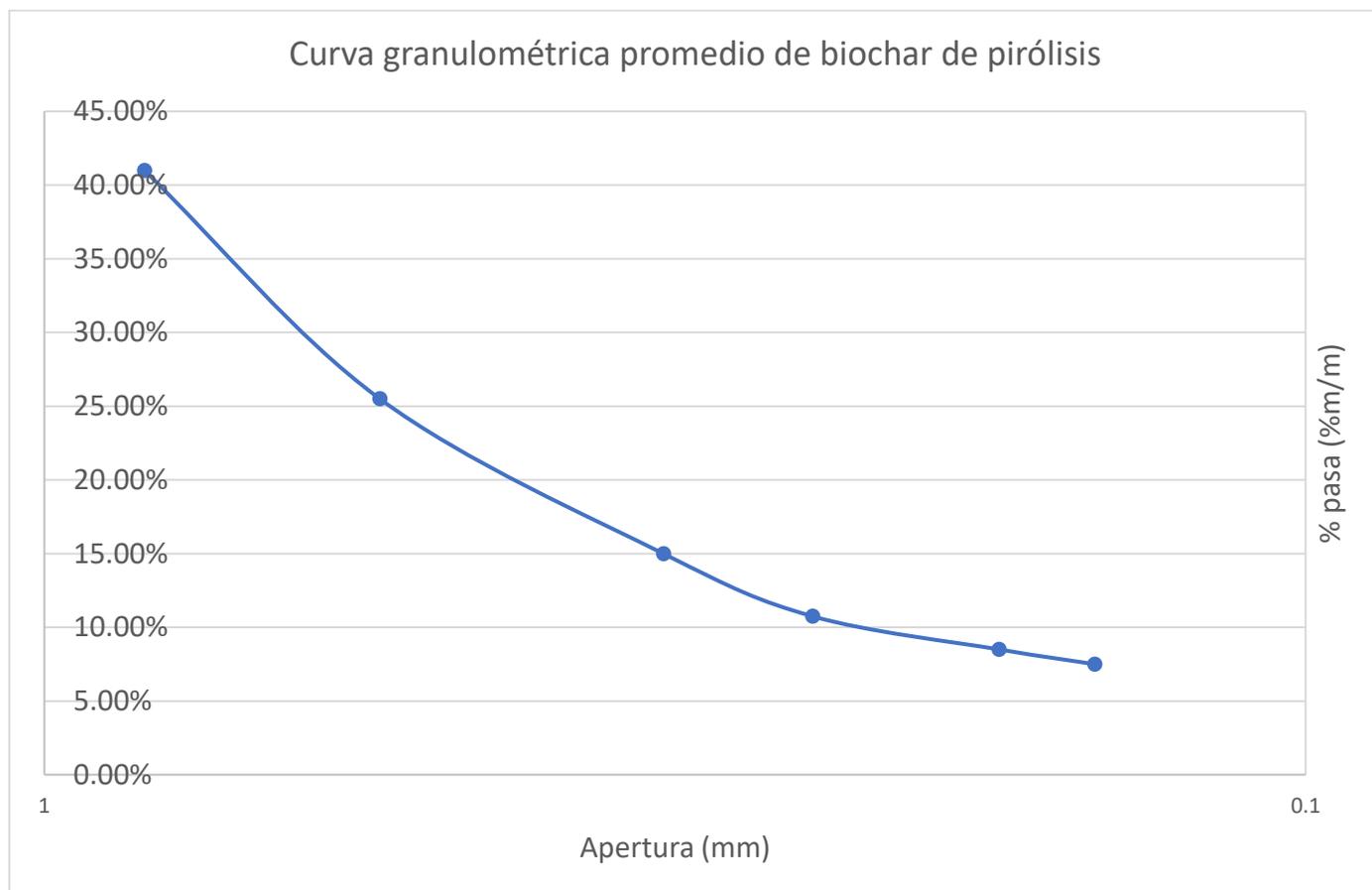
Condiciones ambientales: 23.5°C, presión de 989 mbar, humedad relativa de 44%

**Determinado por diferencia*

Cuadro 11. Análisis granulométrico promedio de biochar de pirólisis

No. Tamiz Tyler	Apertura (mm)	Masa retenida (\pm 0.01g)	% de Retención (%m/m)	% que pasa (%m/m)
20	0.833	5.9	59.00 \pm 1.00	41.00 \pm 1.00
30	0.542	1.55	15.50 \pm 0.65	25.50 \pm 0.65
45	0.323	1.05	10.50 \pm 0.50	15.00 \pm 0.50
60	0.246	0.43	4.25 \pm 0.10	10.75 \pm 0.10
80	0.175	0.23	2.25 \pm 0.05	8.50 \pm 0.05
100	0.147	0.10	1.00 \pm 0.01	7.50 \pm 0.01
Remanente	-	0.63	6.25 \pm 0.10	1.25 \pm 0.06

Figura 15. Curva granulométrica promedio del biochar de pirólisis



Cuadro 12. Análisis próximo de biochar proveniente de pirólisis

Medición	Valor	Desviación estándar
Humedad (%)	6.46	0.32
Poder calorífico superior (MJ/Kg)	27.24	0.14
Cenizas* (%m/m)	10.5	0.90
Material volátil* (%m/m)	81.5	0.96
Carbono fijo* (%m/m)	7.99	0.57

* Resultados mostrados en base seca

Cuadro 13. Densidad aireada, compacta y de trabajo de char proveniente de pirólisis

Densidad	Valor (g/mL)	Desviación estándar (g/mL)
Aireada	0.278	0.020
Compacta	0.291	0.021
De trabajo	0.278	0.020

Cuadro 14. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 1 de biochar de pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
100.06	6.24
441.00	27.22
722.25	5.79
947.52	1.98

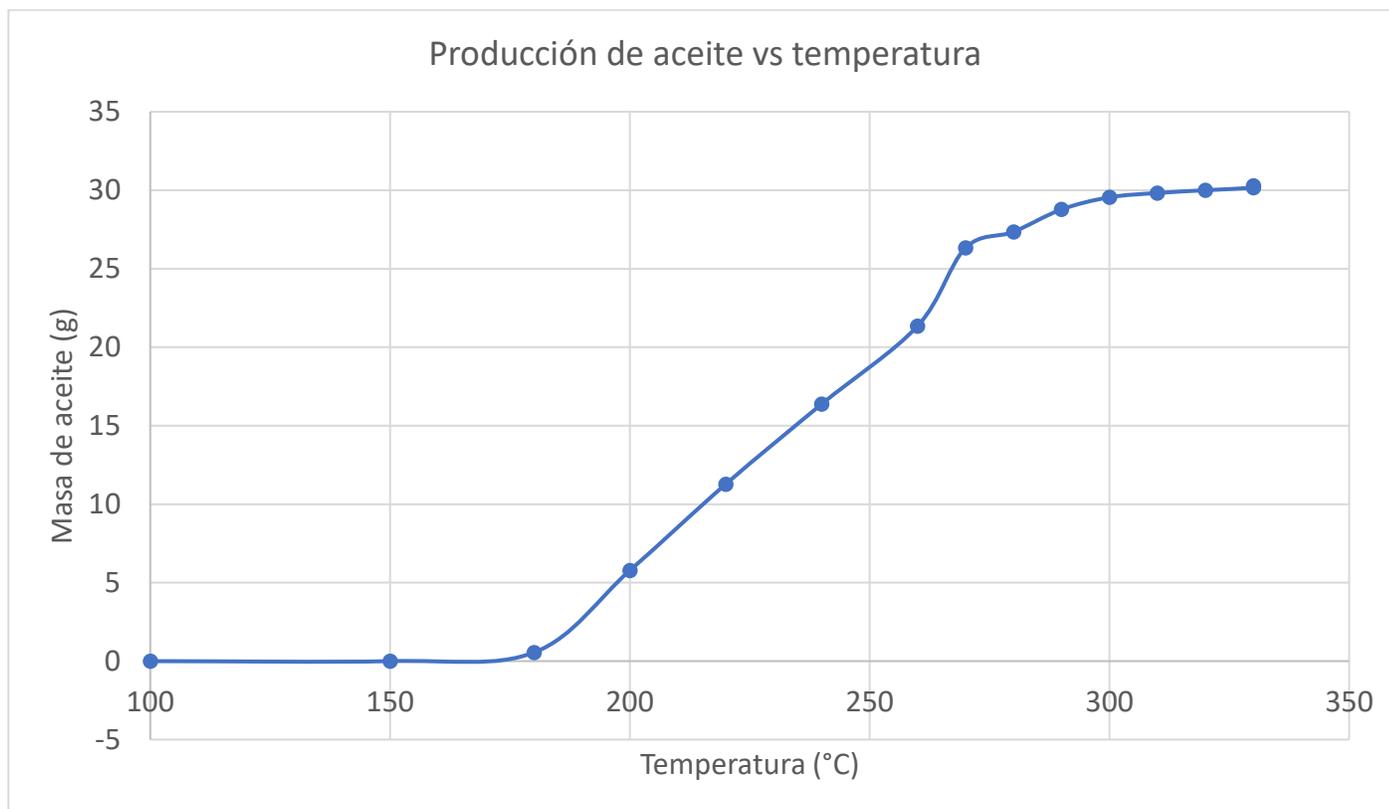
Cuadro 15. Pérdidas de masa según análisis termogravimétrico 2 de biochar de pirólisis

Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%m/m)
93.90	5.72
439.75	27.10
707.30	5.02
907.51	4.13

Cuadro 16. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier para biochar

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Enlace	Inferencia de grupo funcional
3250 - 3150	Estiramiento O-H	Vibración por estiramiento O-H. puede indicar la presencia de fenoles.
3000 - 2900	Estiramiento C-H	Estiramiento de C-H. Posible presencia de alquenos.
1000 -770	Enlaces de hidrógeno aromático	Indica la presencia de enlaces aromáticos de hidrógeno adyacentes.

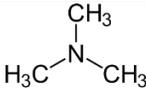
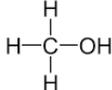
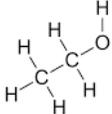
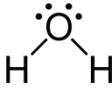
Figura 16. Producción de bioaceite vs temperatura

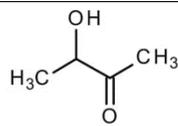
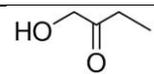
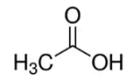
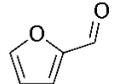
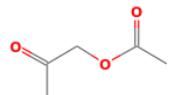
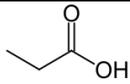
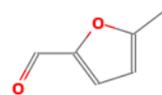
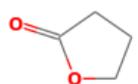
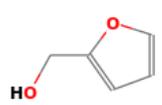
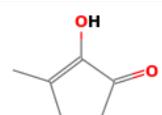


Cuadro 17. Inferencia de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier para bioaceite

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Enlace	Inferencia de grupo funcional
3307 - 3326	Estiramiento O-H	Indica la presencia de grupos OH o fenoles
2108 - 2109	Grupo carbonilo	Puede indicar la presencia de un aldehído y/o cetona en el aceite
1636 -1639	Estiramiento C=C	Presencia de ácido carboxílico en el producto
1395 – 1396	Estiramiento C-C	Infiere la presencia de aromáticos en el aceite
1000-1500	C=C	Indican la presencia de alquenos y/o aromáticos

Cuadro 18. Inferencia de compuestos comunes entre las 4 corridas identificados por cromatografía de gases.

No.	Tiempo de retención promedio (min)	Nombre de compuesto	Fórmula	Estructura	Corridas en las que se presentó
1	4.05	Trimetilamina	C ₃ H ₉ N		1,2,4
2	5.06	Alcohol metílico	CH ₃ OH		1,2,3,4
3	5.49	Alcohol etílico	C ₂ H ₆ O		1,2,3,4
4	7.79	Agua	H ₂ O		1,2,3,4

No.	Tiempo de retención promedio (min)	Nombre de compuesto	de	Fórmula	Estructura	Corridas en las que se presentó
5	14.71	2-Butanone, hydroxy-	3-	(CH ₃ CH(OH)COCH ₃) ₂		1,2,3,4
6	15.15	2-Propanona, hidroxi-	1-	C ₃ H ₆ O ₂		1,2,3,4
7	18.10	1-Hidroxi-2-butanona		C ₄ H ₈ O ₂		1,2,3,4
8	20.79	Ácido acético		CH ₃ CO ₂ H		1,2,3,4
9	21.47	Furfural		C ₅ H ₄ O ₂		2,4
10	21.56	2-Propanona, (acetiloxi)-	1-	C ₅ H ₈ O ₃		1,2,3
11	24.46	Ácido propanoico		C ₃ H ₆ O ₂		1,2,3,4
12	26.01	2-Furancarboxaldehído, 5-metil-		C ₆ H ₆ O ₂		1,2,4
13	28.12	Butirolactona		C ₄ H ₆ O ₂		1,2,3,4
14	29.20	2-furanmetanol		C ₅ H ₆ O ₂		1,2,3,4
15	35.60	2-Ciclopenten-1-ona, 2-hidroxi-3-metil		C ₆ H ₈ O ₂		1,2,4

No.	Tiempo de retención promedio (min)	Nombre de compuesto	Fórmula	Estructura	Corridas en las que se presentó
16	40.30	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃		1,2,4
17	41.40	Fenol	C ₆ H ₆ O		1,2,4
18	42.06	1H-Pirrol-2-carboxaldehído	C ₅ H ₅ NO		1,2,4

Cuadro 19. Comparación entre precio de venta del aceite de pirólisis y sus productos de valor con el costo de procesamiento de los residuos de limón a escala laboratorio por corrida.

Costo/Producto	Aceite de pirólisis	Ácido acético	Fenol	Metanol
Precio de venta(Q/g)	Q0.005	Q0.093	Q1.367	Q0.083
Costo de procesamiento de biomasa (Q/g)	Q0.432	Q0.432	Q0.432	Q0.432
Diferencia (Q/g)	-Q0.427	-Q0.339	Q0.935	-Q0.349

Cuadro 20. Comparación entre precio de venta del char de pirólisis con el costo de procesamiento de los residuos de limón a escala laboratorio por corrida.

Costo/Producto	Char
Precio de venta(Q/g)	Q0.113
Costo de procesamiento de biomasa (Q/g)	Q0.432
Diferencia (Q/g)	-Q0.319

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se obtuvo biochar y bioaceite por medio de 4 corridas de una pirólisis lenta a escala laboratorio de residuos de limón persa que fueron obtenidos de una industria juguera en la ciudad de Guatemala. Además, se llevó a cabo una caracterización de la materia prima, así como de los productos biochar y bioaceite obtenidos en el proceso con la finalidad de comprender las condiciones iniciales y finales de la pirólisis.

Las características que pueden afectar el rendimiento de una pirólisis pueden ser la humedad, tamaño de partícula, temperatura, tiempo de residencia de la muestra, la composición, entre otros. En este estudio se utilizó un limón previamente secado a una temperatura de 60°C un tiempo de 4 horas con 10 minutos, obteniendo así una materia prima inicial con una humedad de $29.75\% \pm 0.20\%$ tal como se muestra en el Cuadro 5. Debido a la alta humedad se separó el aceite obtenido en la pirólisis en 2 fracciones diferentes, la primera fracción fue la parte acuosa que contenía una gran cantidad de agua por lo que el aceite se encontraba diluido y la segunda fracción se separó cuando el aceite se comenzó a ver más denso y por lo tanto con menos contenido de agua.

Para adecuar el tamaño de partícula en relación con el reactor a nivel laboratorio se realizó una reducción de tamaño de partícula por medio de un molino de discos de simple rotación que tiene una malla de 2 mm, se utilizó el molino de discos para este proceso debido a la humedad de los residuos de limón ya que el molino de discos es apropiado para materiales con contenidos de humedad mayores (Mohammed *et al.*, 2019). Por medio de este proceso se obtuvo una recuperación del $96.72\% \pm 0.57\%$ obteniendo así un total de materia prima disponible para el proceso de 1180 g \pm 0.01 g. Con la finalidad de evaluar la distribución del tamaño de partícula se realizó un análisis granulométrico utilizando tamices Tyler. En el Cuadro 4 se observa el análisis granulométrico promedio de la materia prima en donde se visualiza que el Tamiz No. 20 (0.833 mm) fue el que obtuvo el mayor porcentaje de retención con $83.20\% \pm 0.16\%$ seguido por el Tamiz No. 30. El tamaño de partícula puede influir en la velocidad de calentamiento del proceso de pirólisis y puede afectar en la composición del char. Al estar por encima del tamiz de mayor tamaño no se tuvo un control del tamaño específico de partícula que entró al proceso y por lo tanto no se pueden realizar comparaciones de rendimientos y/o características de productos en relación con el tamaño de partícula, sin embargo, debido a la malla del molino se sabe que las partículas tienen un tamaño menor a 2mm, este tamaño es adecuado ya que se recomiendan partículas de 2mm o menores debido a que evita reacciones secundarias de craqueo (Fonseca, 2016). La curva granulométrica se

encuentra en la Figura 13. Dado lo anterior, se propone como una mejora al proceso el trabajar con tamaños de partícula controlados, es decir, que se encuentren dentro de los rangos de medición del equipo para saber exactamente el tamaño de partícula que entra al proceso y poder concluir acerca del efecto que tiene este factor en la pirólisis.

Para evaluar las condiciones de la materia prima en la entrada del proceso se realizó una caracterización por medio de análisis próximo que se puede encontrar en el Cuadro 5. La humedad de la materia prima (mencionada antes) es mayor que en los datos presentados en la literatura consultada, lo cual puede llevar a que la temperatura a la que comienza la descomposición térmica aumente y a su vez que las primeras partes de la fracción líquida tengan un mayor contenido de agua. Para propiciar la evaporación del agua el proceso se llevó a una temperatura inicial en la mufla de 100°C y después de 20 minutos se elevó a 150°C durante otros 20 minutos, sin embargo, la fracción diluida comenzó a salir cuando la temperatura se aumentó a los 180°C por 20 minutos más, misma que como se mencionó antes, fue separada de la fracción concentrada.

El poder calorífico reportado en la literatura de la cáscara de limón está en el rango de 17.73-18.01 MJ/Kg (ABADI *et al.*, 2021) y (Miranda *et al.*, 2012), mientras que el poder calorífico obtenido en este trabajo fue de 16.97 ± 0.21 MJ/Kg (Cuadro 5), este valor se encuentra cerca de los datos de literatura sin embargo la variación puede deberse al mayor contenido de humedad de la materia prima de estudio respecto a los estudios de literatura. El efecto que tiene el poder calorífico de los residuos de limón en el proceso es la energía disponible para ser liberada, ya que mientras mayor sea el poder calorífico mayor energía liberará en el proceso de pirólisis, de igual manera es útil para saber la calidad de los productos, así como para el balance de energía.

El porcentaje de cenizas obtenido fue de 2% m/m en base seca (ver Cuadro 5) con una desviación estándar de 0.03 % m/m, dicho valor se encuentra cercano a datos presentados por otros estudios que mencionan porcentajes de 2.85-5.37 %m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Miranda *et al.*, 2012) y (Volpe *et al.*, 2015). La diferencia nuevamente puede deberse a la cantidad de agua contenida en los residuos de limón. La cantidad de cenizas es importante en el inicio de una pirólisis ya que estas no se convertirán en energía útil durante el proceso, por lo que también se puede ver afectada la calidad de los productos.

Por medio del análisis próximo presente en el Cuadro 5 se determinó que el material volátil para los residuos de limón es de 68.3 ± 0.38 %m/m en base seca. En otros estudios se obtuvieron datos de material volátil de 69.84-80.81 %m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Miranda *et al.*, 2012) y (Volpe *et al.*,

2015). Para este caso se observa nuevamente que el valor obtenido está cercano a los estudios, pero las variaciones se deben a la naturaleza y composición de las cáscaras de limón. El material volátil es una medición importante en el inicio de la pirólisis ya que un mayor contenido de este en la materia prima puede llevar a producir una mayor cantidad de gases y aceites con mayor proporción de compuestos valiosos.

En el Cuadro 5 se puede visualizar que el carbono fijo obtenido fue de 29.68 ± 0.35 %m/m en base seca, dicho valor es mayor que los valores reportados en la literatura que se encuentran en un rango de 13.82-19.93 % m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Miranda *et al.*, 2012) y (Volpe *et al.*, 2015). Este dato puede deberse a que el estudio se realizó luego de un tiempo de almacenamiento de la materia prima, que, aunque se realizó en óptimas condiciones, pudo haber provocado una degradación natural, haciendo que algunos compuestos volátiles se hayan descompuesto dejando como resultado una mayor cantidad de carbono fijo.

La densidad de los residuos de limón puede tener efecto sobre la cantidad de oxígeno en el reactor debido a que no se está trabajando con una atmósfera inerte. Las densidades obtenidas fueron 0.298 ± 0.019 g/mL, 0.325 ± 0.015 g/mL y 0.300 ± 0.018 g/mL para la densidad aireada, compacta y de trabajo respectivamente (Cuadro 6). Debido a que las densidades presentadas son relativamente bajas se propicia una descomposición térmica más rápida y a su vez afecta el tiempo de residencia ya que materiales con menor densidad necesitarán un menor tiempo de residencia dentro del reactor.

En el Cuadro 7 y Cuadro 8 se encuentran datos de análisis termogravimétricos para los residuos de limón en los que se evidencia que la temperatura a la que ocurre la mayor pérdida de masa (25.15-26.15% m/m) está entre 312.61-315.13 °C, pero en las temperaturas de 228.7-233.28 °C se observa también un porcentaje alto de pérdida de masa (24.03-24.31 %m/m). Gracias a este análisis se logró determinar una temperatura final para el proceso de 330°C ya que a esta la mayor parte de los residuos de limón ya estarán degradados térmicamente en proceso de pirólisis. El análisis termogravimétrico se puede encontrar en la Figura 19 y Figura 20 de anexos.

En el Cuadro 9 se pueden observar los resultados de la identificación de grupos funcionales a través de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los residuos de limón. Se determinó la presencia de grupos O-H como enlaces intramoleculares de hidrógeno que se pueden encontrar entre las cadenas de celulosa en longitudes de onda en el rango de 3277.04-3276.92. Se identifican picos que indican la presencia de estiramientos C-H que infieren la presencia de ácidos alifáticos en las longitudes de onda entre 2924.05-2925.91. A longitudes de onda de 1624.61-

1627.92 se encuentra un pico en los espectros que indica estiramientos C-C que pueden ser la presencia de lignina dentro de la muestra. De igual forma, se identifican estiramientos C-H que indican la presencia de celulosa en los residuos de limón, lo cual indica que la materia prima es apta para el proceso de pirólisis ya que la biomasa lignocelulósica es adecuada para convertirse en energía a través de procesos térmicos tal como lo es la pirólisis (U.S. Energy Information Administration, 2022).

Para realizar las corridas de pirólisis se utilizó un sistema a nivel laboratorio compuesto por una mufla, un reactor cilíndrico de acero inoxidable con dimensiones de 5x17 cm de ancho y largo, una chimenea de acero inoxidable y un kit de condensación a escala laboratorio de vidrio pyrex 24/40. Se llevó a cabo un proceso de pirólisis lenta con la rampa de temperatura presente en la Figura 14 hasta llegar a una temperatura final de 330°C y un tiempo de residencia de 340 minutos. Dicha rampa se determinó por medio de una primera prueba experimental para evitar la formación de cera dentro de la columna de destilación ya que la cera afecta la utilidad del aceite como combustible. La temperatura final se determinó a través de los análisis de termogravimetría tal como se mencionó antes. Las corridas se llevaron a cabo a condiciones ambientales de 23.5°C, una presión de 989 mbar y una humedad relativa de 44%.

Por medio de un balance de masa se determinaron los rendimientos de los productos del proceso los cuales se pueden observar en el Cuadro 10. Para las 4 corridas los rendimientos promedio fueron de 30.28 ± 0.99 %m/m, 50.37 ± 1.73 %m/m y 19.34 ± 2.62 %m/m para el biochar, bioaceite y gas de síntesis respectivamente. Por medio de estos datos se determina que el bioaceite obtuvo el mayor rendimiento en el proceso, esto se debe a la mayor cantidad de humedad de los residuos de limón que, como se ha mencionado anteriormente, es mayor a la presentada en otros estudios de pirólisis de biomasa consultados.

El biochar del proceso es un sólido de color negro no aglomerante. Se realizó un análisis granulométrico para caracterizar la distribución del tamaño de partícula del biochar luego del proceso de pirólisis. En el Cuadro 11 se ve que el tamiz con el mayor porcentaje de retención es el No. 20 con un 59.00 ± 1.00 %m/m seguido de el tamiz No. 30 con un 15.50 ± 0.65 %m/m. Esta tendencia coincide con la tendencia de porcentaje de retención de la materia orgánica utilizada para el proceso. Evaluar el tamaño del char resultante es importante ya que dependiendo de su tamaño de partícula puede utilizarse para distintas aplicaciones, por ejemplo, el char con menor tamaño de partícula puede ser utilizado para fertilizantes, filtraciones y como adsorbente, mientras que los char

de mayor tamaño se utilizan para producción de energía. En este caso el tamaño de partícula obtenido en mayor proporción es mayor a los 0.833 mm por lo que es posible utilizarlo en las aplicaciones antes mencionadas realizando los respectivos ajustes que sean necesarios. En la Figura 15 de los resultados se puede observar la curva granulométrica promedio del char obtenido.

El análisis próximo del char presente en el Cuadro 12 se realizó con la finalidad de caracterizar este producto de pirólisis y determinar su uso como combustible. El primer parámetro que se observa es la humedad con un valor de 6.46 ± 0.32 %, dicho valor se encuentra por encima de la humedad de otros estudios que tienen datos en el rango de 0.40-2.14 % (ABADI *et al.*, 2021), (Bhattacharjee y Biswas, 2019) y (Volpe *et al.*, 2015). La humedad puede afectar en el contenido de energía ya que el agua está ocupando espacio que podría ocupar el material combustible por lo que se podría producir menos calor durante la combustión. Además, se puede necesitar calor adicional para que se produzca el encendido ya que se requiere energía para evaporar primero el agua presente.

El poder calorífico obtenido en el bichar de este trabajo fue de 27.24 ± 0.14 MJ/Kg (Cuadro 12), este valor es menor que el poder calorífico reportado en otro estudio cuyo valor corresponde a 30.46 MJ/Kg a una temperatura final de 350°C (Bhattacharjee y Biswas, 2019). Esta variación es esperable debido a lo mencionado en el anterior párrafo ya que al tener una mayor humedad parte del calor añadido para la combustión es utilizado para evaporar el agua y por lo tanto disminuye el poder calorífico del char. Al comparar el poder calorífico del char con otros tipos de carbones (presentes en el Cuadro 21) se observa que este se encuentra dentro del rango de los carbones bituminosos, pero al no contar con un análisis elemental el char de este estudio no se puede clasificar como tal, sin embargo, el carbón bituminoso es utilizado para la generación de energía por su poder calorífico (Okafor & Anyanwu, 2015), por lo que el char también se podría usar con este fin. También se comparó con el poder calorífico de otros combustibles sólidos (Ver Cuadro 22 de anexos) y el valor del char se encuentra cercano a los valores del coque de carbón y el carbón siderúrgico cuyo poder calorífico es de 26.52 MJ/Kg y 28.954 MJ/Kg respectivamente. El coque de carbón es utilizado como combustible en la fabricación de hierro y acero (Zhao *et al.*, 2018) al igual que el carbón siderúrgico. A través de estas comparaciones se puede determinar que el char del pirólisis de residuos de limón de este trabajo puede tener utilidad como combustible gracias a su poder calorífico teniendo aplicaciones en la generación de energía y en procesos de fabricación de hierro y acero. Además, cabe mencionar que el char tuvo un aumento de 10.27 MJ/Kg respecto al valor del poder calorífico de los residuos de limón antes de la pirólisis por lo que se observa un incremento en el valor calorífico.

En el Cuadro 12 también se observa un porcentaje de cenizas de 10.5 ± 0.90 %m/m que al compararlo con la literatura se tiene un valor que es mayor que los porcentajes de cenizas reportados con valores de 3.02-6.3 %m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Bhattacharjee y Biswas, 2019) y (Volpe *et al.*, 2015). La diferencia pueda deberse a la humedad de la materia prima inicial dado que interactúa con componentes inorgánicos. Otro factor que puede afectar es el tamaño de partícula de los residuos de limón ya que un mayor tamaño de partícula puede provocar la retención de minerales que a su vez provocarán mayor contenido de cenizas en el char. El contenido de cenizas afecta la calidad del char como combustible ya que las cenizas no tienen contenido energético, por lo que un mayor contenido de cenizas reducirá el contenido de energía disponible para la combustión, este es otro motivo por el cual el poder calorífico del char es menor que el de los reportados en la literatura.

En el análisis próximo del Cuadro 12 también se encuentra el material volátil del char con un valor de 81.5 ± 0.96 %m/m en base seca, dicho valor es mayor que los valores de otros estudios que se encuentran en el rango de 38.2-75.82 %m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Bhattacharjee y Biswas, 2019) y (Volpe *et al.*, 2015). Este valor se puede ver afectado por la humedad del char obtenido ya que esta es mayor que la de los estudios consultados, es importante tomar en cuenta este factor ya que durante el proceso de análisis de material volátil parte del peso perdido puede ser agua y por lo tanto dar mayores valores. El material volátil es un factor importante para el uso del char como combustible ya que estos pueden contribuir en el poder calorífico haciendo que aumente al haber una mayor cantidad de compuestos volátiles.

Se calculó el carbono fijo obteniendo un valor de 7.99 ± 0.57 %m/m (Cuadro 12) dicho valor se encuentra por debajo de los resultados de otros estudios que tienen valores de 18.34-61.8 %m/m (ABADI *et al.*, 2021), (Bhattacharjee y Biswas, 2019) y (Volpe *et al.*, 2015). Este bajo valor puede deberse a la humedad inicial de los residuos de limón ya que un mayor contenido de humedad en la materia prima implica una reducción en el porcentaje de carbono fijo en el char. El carbono fijo afecta en el potencial del char para ser usado como combustible ya que un mayor contenido de carbono fijo indica que tiene un mayor contenido energético para ser utilizado durante la combustión. En este caso se puede observar que el contenido bajo de carbono fijo puede estar relacionado con el menor poder calorífico del char de pirólisis respecto a otros valores de la literatura.

Se realizó un análisis simple para determinar la densidad del char en donde se obtuvieron datos de 0.278 ± 0.020 g/mL, 0.291 ± 0.021 g/mL y 0.278 ± 0.020 g/mL para la densidad aireada, compacta y de trabajo respectivamente (Cuadro 13). Estas densidades son importantes para el almacenamiento

del char al momento de aplicarlo en procesos industriales como generación de energía tal como se mencionaba en párrafos atrás.

En el Cuadro 14 y Cuadro 15 se pueden visualizar datos análisis termogravimétricos del char por medio de los cuales se determina que la temperatura a la que hay una mayor pérdida de masa (27.10-27.22 %m/m) está en el rango de 439.75-441.00 °C, estos son útiles para la caracterización del char como combustible ya que muestran las temperaturas a las que el material libera mayor energía y se produce una pérdida mayor de masa. A temperaturas bajas la pérdida de masa se debe a la liberación de compuestos volátiles, a temperaturas más altas se puede deber a oxidación y combustión de compuestos orgánicos y a temperaturas más altas la pérdida se puede comenzar a detener debido a la formación de cenizas.

En el Cuadro 16 se observa la identificación de posibles grupos funcionales dentro de las muestras de char. Se identifican estiramientos O-H que infieren la presencia de fenoles en el producto en un rango de longitud de onda de 3250-3150. Puede contarse con la presencia de alquenos debido al pico de estiramiento C-H en longitudes de onda de 3000-2900. También se encuentran encales de hidrógeno aromático de hidrógenos adyacentes en longitudes de onda de 1000-770.

El bioaceite obtenido luego del proceso de pirólisis era un líquido de color café oscuro (en el caso de la fracción concentrada) y color café claro (fracción diluida) que contenía sólidos disueltos y un olor característico. En la Figura 16 se puede observar una gráfica con la distribución de la fracción líquida a lo largo del proceso de pirólisis donde la mayor producción se da a temperaturas entre 180-270 °C y la producción comienza a decaer cerca de los 320°C por lo que a esa temperatura se ha agotado el bioaceite en el proceso y es parte de los criterios de la temperatura final de 330°C que se le colocó al proceso.

Se realizó un análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier para poder inferir grupos funcionales dentro del aceite, dichos grupos funcionales fueron verificados posteriormente por una cromatografía de gases. En el

Cuadro 17 la presencia de un pico en longitudes de onda de 3307-3326 indica que hay estiramientos O-H que puede significar que hay fenoles en el aceite. Se identifican grupos carbonilo a longitudes de 2108-2109 que indican la posible existencia de aldehídos y/o cetonas. Se identifica ácido carboxílico a través de estiramientos C=C en longitudes de onda de 1636-1639. Puede haber

aromáticos en el aceite ya que se contó con picos a longitudes de 1395-1396. A longitudes de onda de 1000-1500 se infiere la presencia de alquenos y/o aromáticos.

Para tener un mejor estimado sobre la composición del bioaceite se realizó un análisis cualitativo por medio de una cromatografía de gases con detector de masas (GC/MS), los compuestos que se obtuvieron en común entre las corridas se encuentran en el Cuadro 18, sin embargo, cabe mencionar que cada bioaceite tiene su propia composición principal que se puede observar en el Cuadro 54 al Cuadro 57 en la sección de datos originales. Los datos y cromatogramas están presentados en la Figura 30 a Figura 37. La composición general del aceite muestra cetonas, aldehídos, aromáticos, alcoholes y ácidos. Los aceites de pirólisis se caracterizan por tener una composición compleja, sin embargo, debido a que el equipo solamente puede detectar compuestos con concentraciones lo suficientemente grandes se reportan únicamente los compuestos identificados por el equipo. El agua es el compuesto más abundante en el aceite según el porcentaje de área promedio de 70.87% para las 4 corridas, esto se puede deber a la humedad inicial de los residuos de limón. El contenido de agua puede tener efectos negativos sobre el uso del aceite como combustible ya que disminuye el poder calorífico, pero tiene un efecto positivo al reducir la viscosidad y ayuda a que tenga una mayor fluidez.

Para que el bioaceite de pirólisis pueda ser usado como combustible es necesario que se le realicen acondicionamientos y tratamientos previos. Sin embargo, el aceite posee compuestos con valor que pueden ser utilizados en diferentes campos de aplicación. Los compuestos que se destacan en este análisis son el ácido acético, metanol y fenoles. Estos compuestos pueden ser extraídos y purificados para ser utilizados, pero se recomienda realizar un análisis económico de los procesos de extracción con la finalidad de evaluar si es un proceso rentable.

El ácido acético puede tener diversas aplicaciones como la producción de productos químicos como el monómero de acetato de vinilo, se utiliza como producto de limpieza, se utiliza como regulador en cosméticos, en la industria textil tiene usos para realizar teñidos, es usado en la fabricación de agentes de limpieza, en la industria farmacéutica se utiliza en algunos suplementos o medicamentos para el estómago, tiene uso como fumigante y en la industria alimentaria se usa el ácido acético para la producción de alimentos como los encurtidos y salsas (PCC Group, 2021). El ácido acético de la pirólisis se puede separar por métodos como destilación reactiva o extracción líquido-líquido (Sarchami *et al.*, 2021).

El metanol tiene varias aplicaciones dentro de las cuales se encuentran: producción de formaldehído, como disolvente, se usa como anticoagulantes en pinturas y vehículos, puede

utilizarse como combustible en motores de gasolina, se usa en sistemas de refrigeración y se puede usar en el tratamiento de aguas residuales (Alqro, 2021).

El fenol tiene aplicaciones en la producción de resinas fenólicas, creación de nylon, es usado como antiséptico para controlar el crecimiento de microorganismos y se puede usar como disolvente en la producción de compuestos químicos. Se puede extraer por medio de técnicas como extracción por ultrasonido (Villamil, 2021).

El balance de energía del proceso se realizó para determinar si es factible de forma energética (ver Figura 18 de anexos). El proceso se llevó a cabo por 340 min por lo que la mufla tuvo un consumo de energía de 63138 KJ y la energía respecto al poder calorífico de los residuos de limón fue de 1019.7 KJ. La energía aportada por los productos fue de 495.7 KJ para el char respecto a su poder calorífico experimental, 726.9 KJ para el bioaceite respecto a un dato de literatura de poder calorífico de aceite de pirólisis de naranja (Bhattacharjee y Biswas, 2019) y 167.1 KJ para el gas con referencia un estudio de pirólisis de biomasa (Weerachanchai, 2009) dando un total de energía brindado por los productos de 1389.7 KJ, este valor supera el valor inicial de energía entregada por la biomasa por lo que se puede concluir que el proceso de pirólisis aumentó la capacidad energética de los residuos de limón, sin embargo, debido a la gran cantidad de energía eléctrica utilizada para el proceso hay una baja eficiencia por lo que el proceso de pirólisis a escala laboratorio realizado no es factible a nivel energético. En posteriores estudios se puede evaluar la posibilidad del uso de otros materiales de calentamiento como el char residual en lugar de utilizar únicamente energía eléctrica para poder mejorar el rendimiento energético.

Se realizó un análisis económico a nivel laboratorio con la finalidad de evaluar la viabilidad en términos monetarios del proceso, para esto se tomaron en cuenta diversos rubros: Costo de los residuos de limón, costos del proceso de molienda y del proceso de pirólisis (energía eléctrica), estos detalles se pueden ver en el Cuadro 77 de anexos. En el Cuadro 19 se encuentra el análisis económico respecto al aceite de pirólisis en el cual se compararon los precios de venta del aceite de pirólisis y de sus respectivos productos de valor (ácido acético, fenol y metanol) con los costos operación de los residuos de limón. Al realizar una diferencia entre los precios de venta de los productos y los costos de operación se obtuvieron valores negativos para aceite de pirólisis, ácido acético y metanol, lo cual indica que el proceso a nivel laboratorio no es factible económicamente respecto al bioaceite con los equipos y condiciones mencionadas en este trabajo. El producto de valor que dio una diferencia positiva fue el fenol con un valor de 0.935 Q/g, lo cual indica que es el único de los

productos que económicamente viable para el proceso, sin embargo, se recomienda realizar un análisis para evaluar la factibilidad económica de la extracción del fenol partiendo de aceite de pirólisis. A través del Cuadro 20 se observa una comparación entre el precio de venta del char respecto al costo de procesamiento por medio de una pirólisis de los residuos de limón. Se comparó el precio de venta de char de pirólisis con el costo de procesar la biomasa y se obtuvo un valor de -0.319 Q/g, lo cual indica que el proceso a escala laboratorio no es viable económicamente respecto al biochar con los equipos y condiciones presentados en este trabajo. Se recomienda evaluar la factibilidad económica del biochar y bioaceite elaborados por medio de pirólisis a nivel industrial y evaluando el uso de una fuente de calentamiento distinta a la electricidad.

Se identifica que el uso de residuos de limón como materia prima en el proceso a las condiciones mencionadas tiene mayores rendimientos en la producción de aceite seguido por el biochar. La pirólisis se puede utilizar para aumentar la energía de la materia prima. Por medio del análisis próximo del biochar se determinó que este puede ser utilizado como combustible para procesos de generación de energía y fabricación de acero y hierro. El bioaceite obtenido presentó agua, cetonas, aldehídos, alcoholes y ácidos, siendo el metanol, ácido acético y fenol los compuestos de mayor interés debido a sus potenciales aplicaciones industriales. Se recomienda realizar un análisis con diferentes condiciones de operación para evaluar el efecto sobre el rendimiento en los productos.

IX. CONCLUSIONES

1. Por medio de caracterización de los residuos de limón se determinó que la materia prima es adecuada para el proceso de pirólisis ya que el análisis próximo es parecido al de la literatura, el tamaño de partícula y la densidad son adecuadas ya que las partículas son iguales o menores a 2mm y el análisis termogravimétrico demostró que hay pérdidas de masa a temperaturas cercanas a 230°C y 315°C. Además, se cuenta con lignocelulosa dentro de la materia, lo cual indica que la materia prima puede ser sometida a un proceso de pirólisis.

2. Se llevó a cabo un proceso de pirólisis lenta a escala laboratorio en la Universidad del Valle de Guatemala utilizando la rampa de temperatura presente en la Figura 14, recuperando biochar y bioaceite del proceso.

3. Se obtuvieron rendimientos por medio de un balance de masa para el proceso de pirolisis a escala laboratorio de 50.37%, 30.28% y 19.34% para el bioaceite, biochar y gas de síntesis respectivamente, estos rendimientos indican que la materia prima cumple con generar una mayor proporción de biochar y bioaceite que son los productos de interés en este estudio.

4. Se realizó un análisis próximo para evaluar las condiciones de humedad, poder calorífico, cenizas, material volátil y carbono fijo del biochar por medio del cual se determinó que el char puede utilizarse como una alternativa de combustible al realizar comparaciones con la literatura.

5. Se obtuvo una curva de la distribución de la fracción líquida durante el proceso de pirólisis mediante la cual se determinó que la mayor producción de aceite se dio en el rango de temperatura de 180-270 °C.

6. Al realizar una comparación del poder calorífico del char con el de otros tipos de carbón y combustibles sólidos se determinó que el char puede aplicarse en la generación de energía eléctrica y en la fabricación de hierro y acero.

7. Al caracterizar el bioaceite de forma cualitativa con espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y cromatografía de gases se estimó que este contiene agua, cetonas, aldehídos, alcoholes, ácidos y aromáticos, pero se destaca la presencia del ácido acético, metanol y fenoles ya que estos pueden ser extraídos del aceite y ser utilizados en aplicaciones industriales después de una purificación.

8. A través de un análisis económico a nivel laboratorio donde se compararon los precios de venta de los productos con los costos de operación de la pirólisis se determinó que el proceso no es viable económicamente ya que los costos de pirólisis a nivel laboratorio son mayores que los precios a los que se podrían vender los productos exceptuando al fenol que puede ser extraído del aceite de pirólisis.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un análisis elemental para complementar la caracterización del char y poder saber su composición exacta con la finalidad de compararlo con otros combustibles sólidos.
2. Se recomienda utilizar otras fuentes de calentamiento aparte de la electricidad para hacer el proceso más factible energéticamente, por ejemplo, el uso del mismo biochar producido en el proceso de pirólisis.
3. Se recomienda contar con un sistema de recolección del gas del proceso de pirólisis para poder caracterizarlo y ver los usos que puede tener a nivel industrial. También se recomienda evaluar las características del gas para utilizarlo en el mismo proceso de pirólisis y volverlo autotérmico.
4. Se recomienda trabajar con tamaños de partícula conocidos y controlados durante el proceso para poder evaluar el efecto que tiene este factor en el rendimiento y distribución de los productos.
5. Se recomienda realizar un análisis próximo del bioaceite con la finalidad de determinar su uso y calidad como combustible líquido.
6. Se recomienda realizar el proceso a una escala mayor para determinar su factibilidad energética a un nivel de planta piloto y/o industrial.
7. Se recomienda elaborar un análisis económico a nivel industrial para determinar si el proceso es factible a una escala mayor.
8. Se recomienda llevar a cabo el proceso de pirólisis a otras temperaturas finales para poder ver la distribución de los productos.
9. Se recomienda realizar un análisis económico de la extracción de los compuestos de interés en el bioaceite para determinar si estos son factibles.
10. Se recomienda realizar las mediciones de caracterización y pirólisis con la materia prima lo más fresca posible para evitar posibles degradaciones o cambios en los resultados.

11. Se recomienda trabajar con otras humedades de la materia inicial para determinar el efecto que esta tiene en la distribución de los productos.
12. Se recomienda el uso del biochar obtenido en el proceso para la fabricación de carbones activados o como componente en la elaboración de compostaje.
13. Se recomienda realizar un estudio cinético del proceso de pirólisis con la finalidad de poder tener un proceso controlado dentro del reactor.
14. Se recomienda realizar la extracción y venta de aceites esenciales de la cáscara de limón antes de realizar el proceso de pirólisis ya que este tiene un valor alto en el mercado y mejoraría la viabilidad del proceso en términos monetarios al incluirlo en el análisis económico. Asimismo, es recomendable realizar nuevamente las caracterizaciones de materia prima y productos si se realiza la extracción.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abidi, S., *et al.* (2021). *Pyrolysis of lemon peel waste in a fixed-bed reactor and characterization of innovative pyrolytic products*. Research Square. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-656531/v1>
- Abu Bakar, M.; *et al.* (2020). *Pyrolysis of solid waste residues from lemon myrtle essential oils extraction for bio-oil production*. *Bioresource Technology*, 318, 123913. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123913>
- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. (2003). *Perfil de mercado y productivo del limón persa*: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACY148.pdf
- Alqro. (2021). Usos del metanol. *ALQRO - Venta y distribución de alcohol etílico de 96°*. <https://alqro.com/usos-del-metanol/>
- Anleu, S.; *et al.* (2019). *Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia*: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3623>
- ArQuimi. (2024). Ácido Acético 80%: <https://www.arquimi.com/p8321325-acido-acetico-80.html>
- Barrera, R.; Pérez, J. y Salazar, C. (2014). Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista ION*, 27(2), 43-54. Extraído de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000200005&lng=en&tlng=es.
- Bhattacharjee, N., & Biswas, A. (2019). *Pyrolysis of Orange Bagasse: comparative study and parametric influence on the product yield and their characterization*. *Journal of environmental chemical engineering*, 7(1), 102903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102903>
- Castellanos, M.; *et al.* (2017). *Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana Deli x AVROS a nivel laboratorio y su escalamiento*: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3121>
- Castells, X. y Velo, E. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Días de Santos. Madrid: https://books.google.com.gt/books?id=29Vl_0IqlnoC&printsec=frontcover&dq=pirólisis&hl=e&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=pirólisis&f=false
- Cerutti, M. y Neymayer, Fernando. (2004). *Introducción a la obtención de aceites de limón*. INVENIO. Página 150.

- Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2023). *Ajuste tarifario trimestral para el período de mayo – julio 2023*: <https://www.cnee.gob.gt/wordpress/wp-content/uploads/2023/AJUSTE-TARIFARIO-TRIMESTRAL-PARA-EL-PERIODO-DE-MAYO%E2%80%93JULIO2023.pdf>
- COCISA. (2024). *3.5 lt. alcohol metílico tec. (metanol)*: <https://cocisa.mx/products/my-5420-3500>
- Ebnesajjad, S. (2006). *Surface and material characterization techniques*. Elsevier eBooks (pp. 43-75). <https://doi.org/10.1016/b978-081551523-4.50006-7>
- Fonseca, W. (2016). *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta* (pp. 44): <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/935cfe32-0b63-4adc-924e-bf8cb1eb5968/content>.
- Global Methane Initiative. (2011). *Metano de Vertederos: Reducción de las Emisiones, Avance de las Oportunidades de Recuperación y Utilización*: https://www.globalmethane.org/documents/landfill_fs_spa.pdf
- Gómez, A. et al. (2008). *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de Palma de aceite*: <https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf>
- Guatemala Lemon Industry Outlook 2022 - 2026. (s. f.): <https://www.reportlinker.com/clp/country/2894/726307>
- Gupta, G. K., & Mondal, M. K. (2020). *Bioenergy generation from agricultural wastes and enrichment of end products*. En *Elsevier eBooks* (pp. 337-356). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818996-2.00015-6>
- Hassen, A. (2021). *Pyrolysis of Lemon Peel Waste in a Fixed-bed Reactor and Characterization of Innovative Pyrolytic Products*: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-656531/v1>
- Henan Doing. (2021). *Is pyrolysis plant profitable*: <https://www.doinggroup.com/index.php?u=show-2239.html>
- Lambros, M. P., Tran, T., Fei, Q., & Nicolaou, M. (2022). *Citric acid: a multifunctional pharmaceutical excipient*. *Pharmaceutics*, 14(5), 972. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050972>
- López, G. (2018). *Predicción del análisis próximo de carbones colombianos mediante espectroscopia ftir-dr en la región del infrarrojo medio utilizando mínimos cuadrados parciales*. UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. (Sin fecha). *Lemon. Citros Limon*: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/limon_tcm30-102531.pdf

- Miranda, R., et al. (2012). *Characterization of pyrolysis products obtained during the preparation of Bio-Oil and activated carbon*. En InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/39368>
- Muhammad S. Abu Bakar, et al. (2020). *Pyrolysis of solid waste residues from Lemon Myrtle essential oils extraction for bio-oil production*: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123913>
- Ninu. (2024). *Fenol Podologico 90% Ninu 100 Gramos Liquido*: <https://www.ninu.mx/fenol-podologico-90-ninu-100-gramos-liquido/p/MLM26919646>
- Nogales, S. (2015). *Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirólisis de biomasa mediante diversos métodos*: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/4377/1/TDUEX_2016_Nogales_Delgado.pdf
- Okafor, I. F., & Anyanwu, C. N. (2015). *Production of smokeless briquette fuel from sub-bituminous coal for domestic and industrial uses*. Science journal of energy engineering, 3(4), 33. <https://doi.org/10.11648/j.sjee.20150304.11>
- Organización de las Naciones Unidas. (Sin Fecha). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20cadena,gas%20natural%2C%20carb%C3%B3n%20y%20petr%C3%B3leo>
- Organización de las Naciones Unidas. (Sin Fecha). *¿Qué es el cambio climático?*: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- PCC Group. (2021, 26 octubre). *Ácido acético: propiedades y aplicaciones únicas - Portal de productos del Grupo PCC*. Portal de productos del grupo PCC. <https://www.products.pcc.eu/es/blog/acido-acetico-propiedades-y-aplicaciones-unicas/>
- PerkinElmer. (Sin Fecha). *Thermogravimetric Analysis (TGA)*: https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/faq_beginners-guide-to-thermogravimetric-analysis_009380c_01.pdf . Pág. 4
- Pochteca. (2022). *Ácido Cítrico*. Extraído de: <https://guatemala.pochteca.net/acido-citrico>
- Ramírez-Gavidia, T. C., González-Colmenares, N. M., & Guerrero-Pernía, E. K. (2020). *Pectina de residuos de naranja aplicando el principio de las 3R*. Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, 84-91. <https://doi.org/10.15649/2346030x.819>
- Salinas, E. y Gasca, V. (2009). *Los biocombustibles*: <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Santos, R., et al. (2015). *Pyrolysis of mangaba seed: Production and characterization of bio-oil*. El Sevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.060>. Pg: 43-48

- Sarchami, T., Batta, N., & Berruti, F. (2021). *Production and separation of acetic acid from pyrolysis oil of lignocellulosic biomass: a review*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(6), 1912-1937. <https://doi.org/10.1002/bbb.2273>
- Secretaría de energía del Gobierno de México. (2021). *Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2021 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*. Extraído de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/619062/Lista_Combustibles_2021_26feb2021.pdf
- Soil Reef. (2024). *Soil reef™ pure biochar – 1 cubic foot size*: <https://www.soilreef.com/product-page/soil-reef-pure-biochar-1-cubic-foot-size>
- Skoog, D., West, D., Holler, J., & Crouch, S. (2015). *Fundamentos de química analítica* (Novena ed.). México, D.F.: Cengage Learning. Pag. 291.
- Tejada, L; Marimón, W. y Mendinar, M. (2014), *Evaluación del potencial de las cáscaras de frutas en la obtención de bioetanol*. Universidad de Antioquia. Extraído de: <http://www.udea.edu.co/hm>
- Universidad de Alicante. (Sin Fecha). *Análisis de poder calorífico (bomba calorimétrica)*: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis-termico/analisis-de-poder-calorifico-bomba-calorimetrica.html>
- U.S. Department of Agriculture. (2021). *What is pyrolysis?*: <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/wyndmoor-pa/eastern-regional-research-center/docs/biomass-pyrolysis-research-1/what-is-pyrolysis/>
- U.S. Department of Agriculture. (2011). *Cleaning Cows from Inside Out*: <https://agresearchmag.ars.usda.gov/2011/nov/cows/>
- U.S. Energy Information Administration. (2022) *Biomass explained*: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
- Villamil, E. (2021). *Extracción de compuestos fenólicos a partir del residuo agroindustrial de frutilla*: <https://www.semanticscholar.org/paper/Extracci%C3%B3n-de-compuestos-fen%C3%B3licos-a-partir-del-de-Galindo-Esteban/dd16b023bb7006719a148fedffb22d81cbafe126>
- Viltres, R. y Alarcón, A. (2022). *Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa*. *Rev Cub Quim* vol.34 no.1 Santiago de Cuba: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212022000100131#B1

- Volpe, M., Panno, D., Volpe, R., & Messineo, A. (2015). *Upgrade of citrus waste as a biofuel via slow pyrolysis*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115, 66-76.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.06.015>
- Weerachanchai, P. (2009). *Studies of biomass pyrolysis and gasification for fuel production*. Suranaree University of Technology:
<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/3317/2/fulltext.pdf>
- Zhao, J., Loo, C. E., Yuan, J., Wang, F., Wang, J., Zhang, H., & He, M. (2018). *A fundamental study of the cocombustion of coke and charcoal during iron ore sintering*. *Energy & Fuels*, 32(8), 8743-8759. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00939>
- Zumarraga, J. (2012). *Efecto de los pre-tratamientos hidrotérmicos en la composición química y la sacarificación del bagazo de agave tequilana*:
https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/676/1/PCER_M_Tesis_2012_Jose_Alberto_Zumarraga_Pech.pdf

XII. ANEXOS

A. Referencias

Cuadro 21. Poder calorífico de carbones

Carbón	Poder calorífico (MJ/kg)
Antracita	>32.6
Bituminoso (Hulla)	24.5-32.6
Sub bituminoso	22.1-24.5
Lignito y turba	14.7-19.3

(Barrera *et al.*, 2014)

Cuadro 22. Poder calorífico de combustibles sólidos

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)
Azufre	9.296
Carbón térmico	22.543
Coque de carbón	26.521
Carbón siderúrgico	28.954
Coque de petróleo	32.658

(Secretaría de energía del Gobierno de México, 2021)

B. Balance de masa y energía

Figura 17. Balance de masa de proceso de pirólisis de residuos de limón

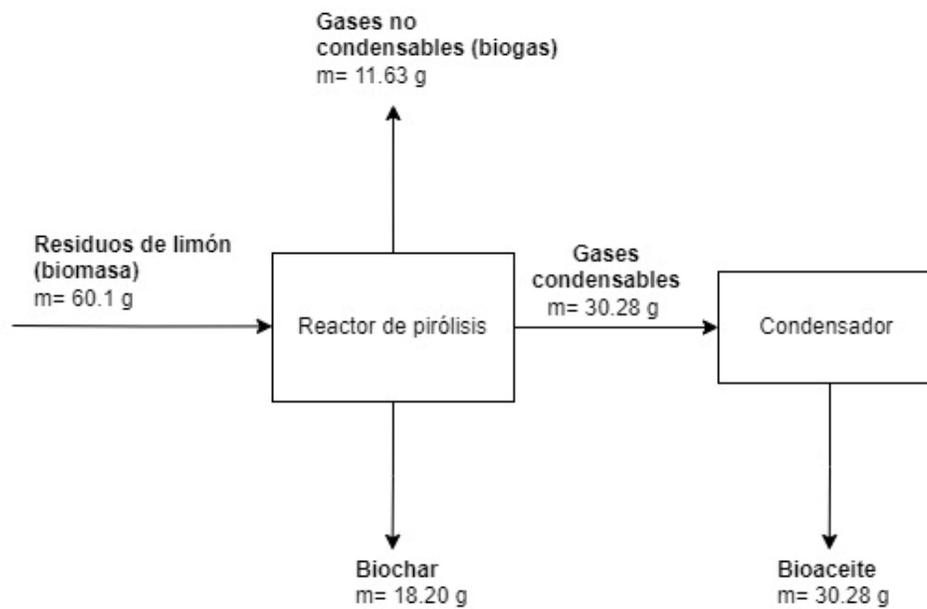
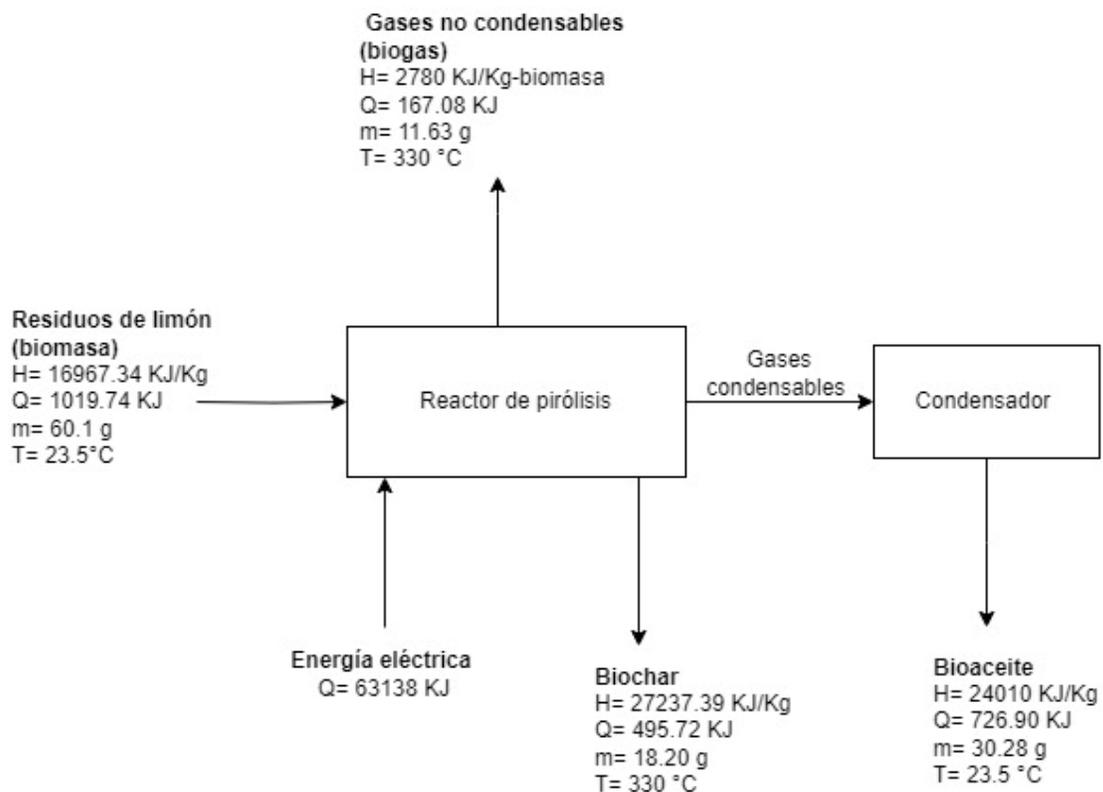


Figura 18. Balance de energía de proceso de pirólisis de residuos de limón



C. Datos originales

Cuadro 23. Masas del proceso de molienda.

Parte del proceso	Masa (\pm 1Kg)
Entrada	1.22
Salida	1.18
Pérdidas	0.04

Cuadro 24. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 1.

No. Tamiz	Peso inicial plato (\pm 0.01g)	Peso + muestra (\pm 0.01g)	Retención de muestra (\pm 0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	422.4	40.6	81.2%	81%	0.833	19%
30	368.9	372.9	4	8.0%	89%	0.542	11%
45	330.5	333.2	2.7	5.4%	95%	0.323	5%
60	329.8	330.5	0.7	1.4%	96%	0.246	4%
80	338	338.4	0.4	0.8%	97%	0.175	3%
100	322.8	323	0.2	0.4%	97%	0.147	3%
Plato final	463.3	463.7	0.4	0.8%	98%	-	2%

Cuadro 25. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 2.

No. Tamiz	Peso inicial plato (\pm 0.01g)	Peso + muestra (\pm 0.01g)	Retención de muestra (\pm 0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)	No. Tamiz
20	381.8	424.3	42.5	85.0%	85%	0.833	0.833	15%
30	368.9	371.9	3	6.0%	91%	0.542	0.542	9%
45	330.5	332.9	2.4	4.8%	96%	0.323	0.323	4%
60	329.7	330.4	0.7	1.4%	97%	0.246	0.246	3%
80	338	338.3	0.3	0.6%	98%	0.175	0.175	2%
100	322.9	323	0.1	0.2%	98%	0.147	0.147	2%
Plato final	463.3	463.7	0.4	0.8%	99%	-	-	1%

Cuadro 26. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 3.

No. Tamiz	Peso inicial plato ($\pm 0.01g$)	Peso + muestra ($\pm 0.01g$)	Retención de muestra ($\pm 0.01g$)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)	No. Tamiz
20	381.8	423.3	41.5	83.0%	83%	0.833	0.833	17%
30	368.9	372.5	3.6	7.2%	90%	0.542	0.542	10%
45	330.4	332.9	2.5	5.0%	95%	0.323	0.323	5%
60	329.7	330.4	0.7	1.4%	97%	0.246	0.246	3%
80	337.9	338.3	0.4	0.8%	97%	0.175	0.175	3%
100	322.8	323	0.2	0.4%	98%	0.147	0.147	2%
Plato final	463.3	463.7	0.4	0.8%	99%	-	-	1%

Cuadro 27. Análisis granulométrico de residuos de limón corrida 4.

No. Tamiz	Peso inicial plato ($\pm 0.01g$)	Peso + muestra ($\pm 0.01g$)	Retención de muestra ($\pm 0.01g$)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	423.5	41.7	83.4%	83%	0.833	17%
30	368.9	372.4	3.5	7.0%	90%	0.542	10%
45	330.5	333.0	2.5	5.0%	95%	0.323	5%
60	329.7	330.4	0.7	1.4%	97%	0.246	3%
80	337.9	338.3	0.4	0.8%	98%	0.175	2%
100	322.8	323.0	0.2	0.4%	98%	0.147	2%
Plato final	463.3	463.7	0.4	0.8%	99%	-	1%

Cuadro 28. Datos de porcentaje de humedad para residuos de limón

No. de prueba	Humedad (m/m%)
1	29.91
2	29.81
3	29.53
4	29.75

Cuadro 29. Datos obtenidos para el poder calorífico de residuos de limón por medio de bomba calorimétrica.

Medición	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4
Masa total de pastilla (g)	0.950	0.959	0.934	0.948
% biomasa en pastilla	0.181	0.186	0.185	0.184
Masa de residuos en pastilla (g)	0.172	0.178	0.173	0.174
Masa Ac B. en pastilla (g)	0.779	0.780	0.761	0.773
Calor_ab (J)	20601.63	20652.15	20142.57	20465.42
Calor bomba (J/g)	24790.00	24676.00	24679.00	24715.00

Cuadro 30. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de cenizas de residuos de limón

Corrida	Pesos de crisoles vacíos (g)	Masa inicial residuos(g)	Final cenizas + crisol (g)	Cenizas masa (g)
1	65.690	1.002	65.705	0.014
2	61.719	1.015	61.733	0.014
3	61.719	1.024	61.733	0.014
4	63.042	1.014	63.057	0.014

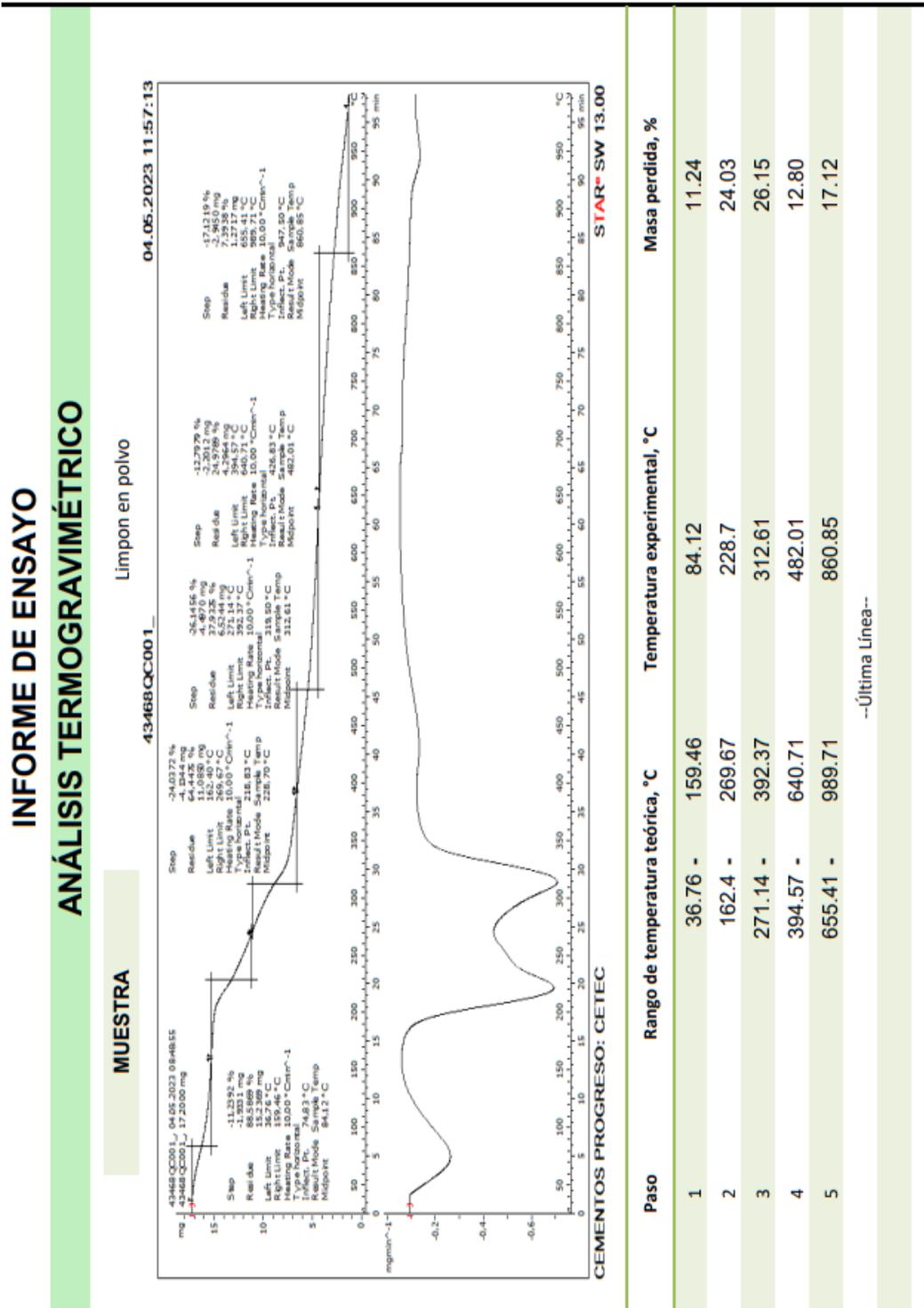
Cuadro 31. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de material volátil de residuos de limón

Corrida	Pesos de crisoles vacíos (g)	Masa inicial de MP (g)	Masa inicial MP + crisol	Remanente + crisol (g)
1	65.700	1.022	66.721	65.724
2	61.718	1.031	62.749	61.736
3	61.715	1.024	62.739	61.733
4	63.044	1.026	64.070	63.064

Cuadro 32. Datos para el cálculo de densidades de residuos de limón

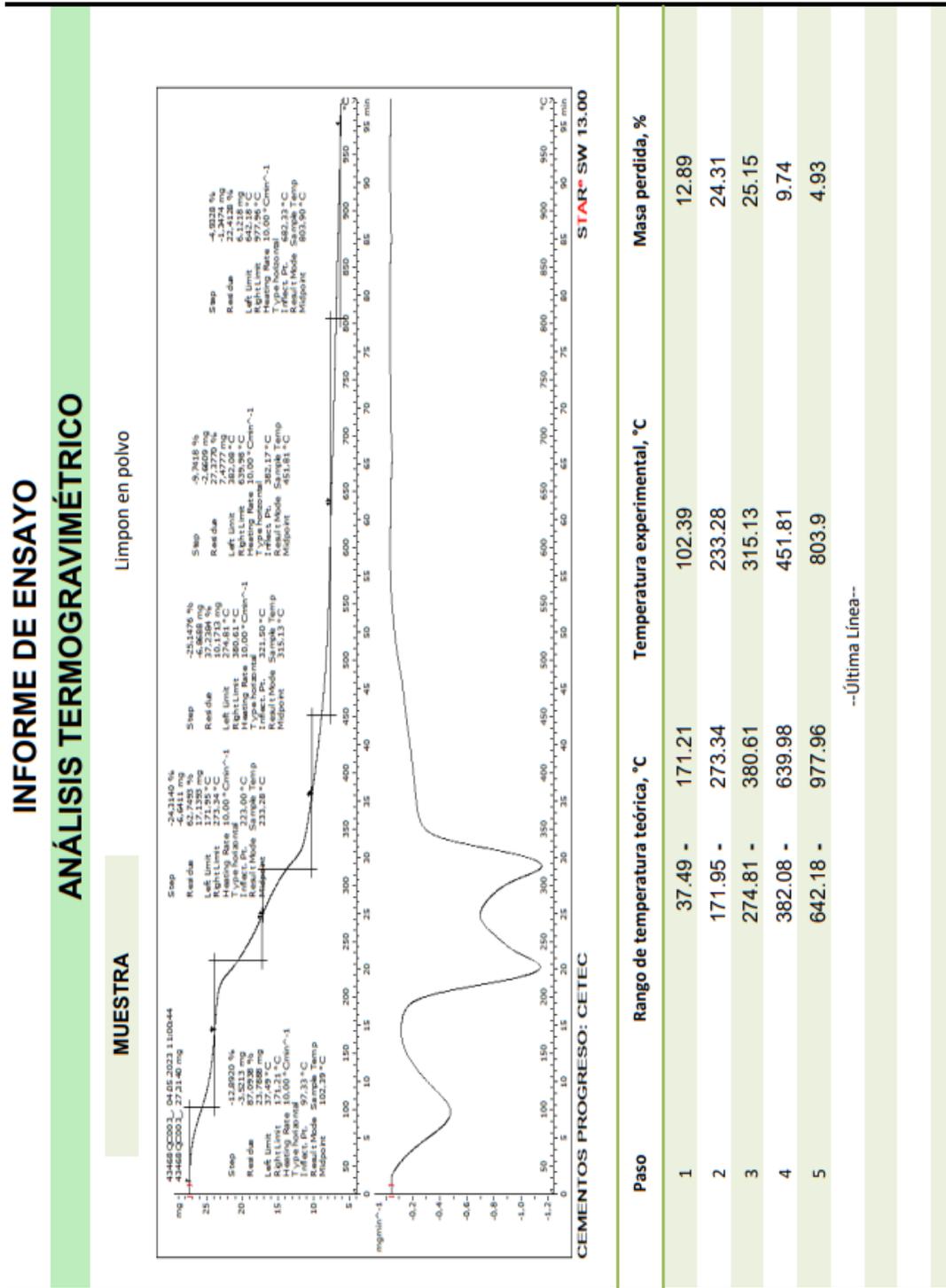
Corrida	1	2	3	4
Masa inicial (g)	11.30	12.90	12.70	12.30
Volumen aireado (mL)	41.00	42.00	41.00	41.33
Volumen compacto (mL)	37.00	38.50	38.00	37.83

Figura 19. Análisis termogravimétrico 1 para residuos de limón



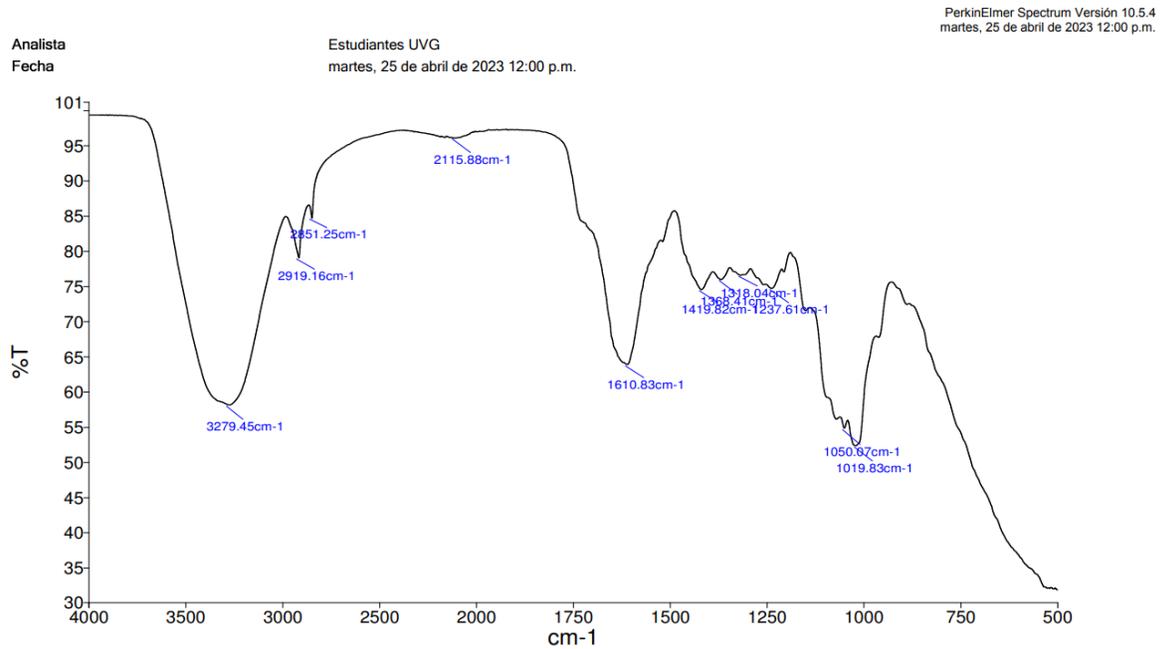
Análisis realizado por Laboratorio CETEC de Cementos Progreso

Figura 20. Análisis termogravimétrico 2 de residuos de limón



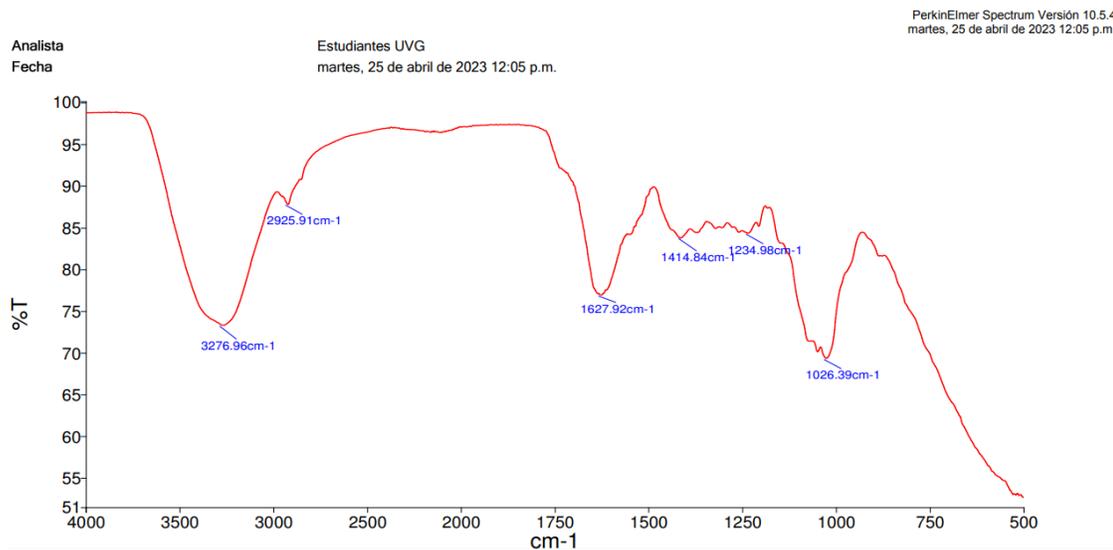
Análisis realizado por Laboratorio CETEC de Cementos Progreso

Figura 21. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 1



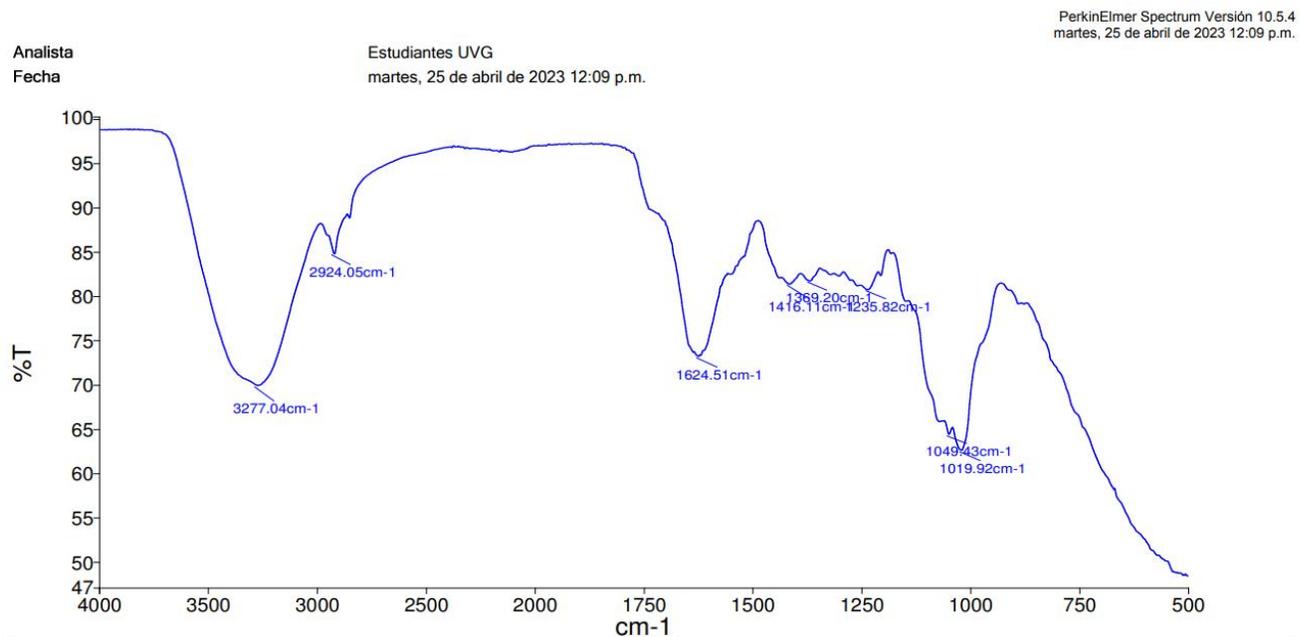
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 22. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 2



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 23. Espectro infrarrojo de residuos de limón corrida 3



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 33. Dimensiones del reactor de pirólisis a escala laboratorio

Largo (cm)	Ancho (cm)
17	5

Cuadro 34. Residuos de limón iniciales dentro de reactor las corridas de pirólisis

Corrida	Residuos de limón (g)
1	60.10
2	60.20
3	60.10
4	60.00

Cuadro 35. Masas de productos obtenidos en las 4 corridas de pirólisis

Corrida	Aceite (g)	Char (g)	Gas (g)
1	30.95	18.30	10.85
2	30.10	17.80	12.30
3	31.20	19.00	9.90
4	28.85	17.70	13.45

Cuadro 36. Especificaciones de equipos utilizados en el proceso de pirólisis.

Equipos utilizados	Especificaciones
Báscula	Marca Ohaus, serie 3000 con incertidumbre de $\pm 0.01\text{kg}$
Balanza Semianalítica	Marca Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme con una incertidumbre de $\pm 0.05\text{g}$
Balanza de humedad	Marca Ohaus, modelo MB 120 con incertidumbre de $\pm 0.001\text{g}$
Mufla	Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010
Tamizadora	ROTAP modelo RX-29

Cuadro 37. Análisis granulométrico de char de corrida 1 de pirólisis

No. Tamiz	Peso inicial plato (±0.01g)	Peso + muestra (±0.01g)	Retención de muestra (±0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	387.1	5.3	53%	53%	0.833	47%
30	368.9	370.5	1.6	16%	69%	0.542	31%
45	330.5	331.8	1.3	13%	82%	0.323	18%
60	329.7	330.2	0.5	5%	87%	0.246	13%
80	338	338.3	0.3	3%	90%	0.175	10%
100	322.9	323	0.1	1%	91%	0.147	9%
Plato final	463.3	464	0.7	7%	98%	-	2%

Cuadro 38. Análisis granulométrico de char de corrida 2 de pirólisis

No. Tamiz	Peso inicial plato (± 0.01g)	Peso + muestra (± 0.01g)	Retención de muestra (± 0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	387.8	6	60%	60%	0.833	40%
30	368.9	370.4	1.5	15%	75%	0.542	25%
45	330.5	331.5	1	10%	85%	0.323	15%
60	329.7	330.1	0.4	4%	89%	0.246	11%
80	338	338.2	0.2	2%	91%	0.175	9%
100	322.9	323	0.1	1%	92%	0.147	8%
Plato final	463.3	463.9	0.6	6%	98%	-	2%

Cuadro 39. Análisis granulométrico de char de corrida 3 de pirólisis

No. Tamiz	Peso inicial plato (±0.01g)	Peso + muestra (±0.01g)	Retención de muestra (±0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	388.4	6.6	66%	66%	0.833	34%
30	368.9	370.4	1.5	15%	81%	0.542	19%
45	330.5	331.3	0.8	8%	89%	0.323	11%
60	329.7	330	0.3	3%	92%	0.246	8%
80	338	338.1	0.1	1%	93%	0.175	7%
100	322.9	323	0.1	1%	94%	0.147	6%
Plato final	463.3	463.9	0.6	6%	100%	-	0%

Cuadro 40. Análisis granulométrico de char de corrida 4 de pirólisis

No. Tamiz	Peso inicial plato (±0.01g)	Peso + muestra (±0.01g)	Retención de muestra (±0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	387.5	5.7	57%	57%	0.833	43%
30	368.9	370.5	1.6	16%	73%	0.542	27%
45	330.5	331.6	1.1	11%	84%	0.323	16%
60	329.7	330.2	0.5	5%	89%	0.246	11%
80	338	338.3	0.3	3%	92%	0.175	8%
100	322.9	323	0.1	1%	93%	0.147	7%
Plato final	463.3	463.9	0.6	6%	99%	-	1%

Cuadro 41. Humedades de char de pirólisis para las 4 corridas

Corrida	Humedad (%m/m)
1	6.41
2	6.62
3	6.03
4	6.76

Cuadro 42. Datos obtenidos para el poder calorífico del char por medio de bomba calorimétrica.

Medición	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4
Masa total de pastilla (g)	0.805	0.832	0.833	0.844
% biomasa en pastilla	0.188	0.198	0.193	0.192
Masa de char en pastilla (g)	0.151	0.165	0.160	0.162
Masa Ac B. en pastilla (g)	0.654	0.667	0.672	0.682
Calor_ab (J)	17306.134	17655.300	17794.510	18050.027
Calor bomba (J/g)	26623.000	26629.000	26580.000	26643.000

Cuadro 43. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de cenizas de char

Corrida	Pesos de crisoles vacíos (g)	Masa inicial de char (g)	Final cenizas + crisol (g)	Cenizas masa (g)
1	17.245	0.993	17.354	0.109
2	20.598	1.080	20.698	0.100
3	23.948	1.004	24.041	0.093
4	19.017	1.006	19.116	0.099

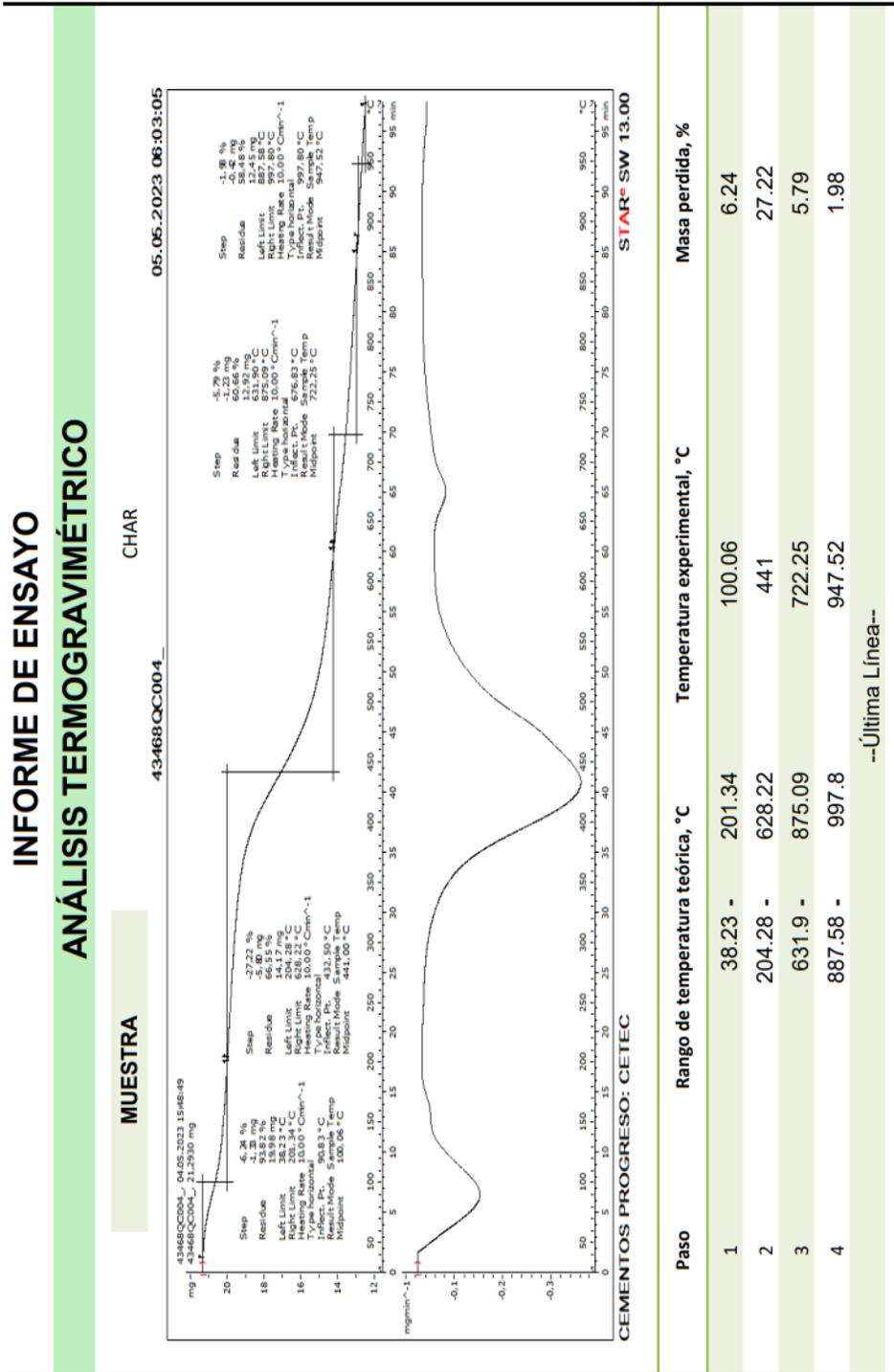
Cuadro 44. Datos obtenidos para el cálculo de porcentaje de material volátil de char

Corrida	Pesos de crisoles vacíos (g)	Masa inicial de char (g)	Masa inicial char + crisol	Remanente + crisol (g)
1	17.200	1.004	18.204	17.331
2	20.599	1.005	21.604	20.720
3	19.017	1.002	20.019	19.125
4	23.948	1.003	24.951	24.072

Cuadro 45. Datos para el cálculo de densidades de char

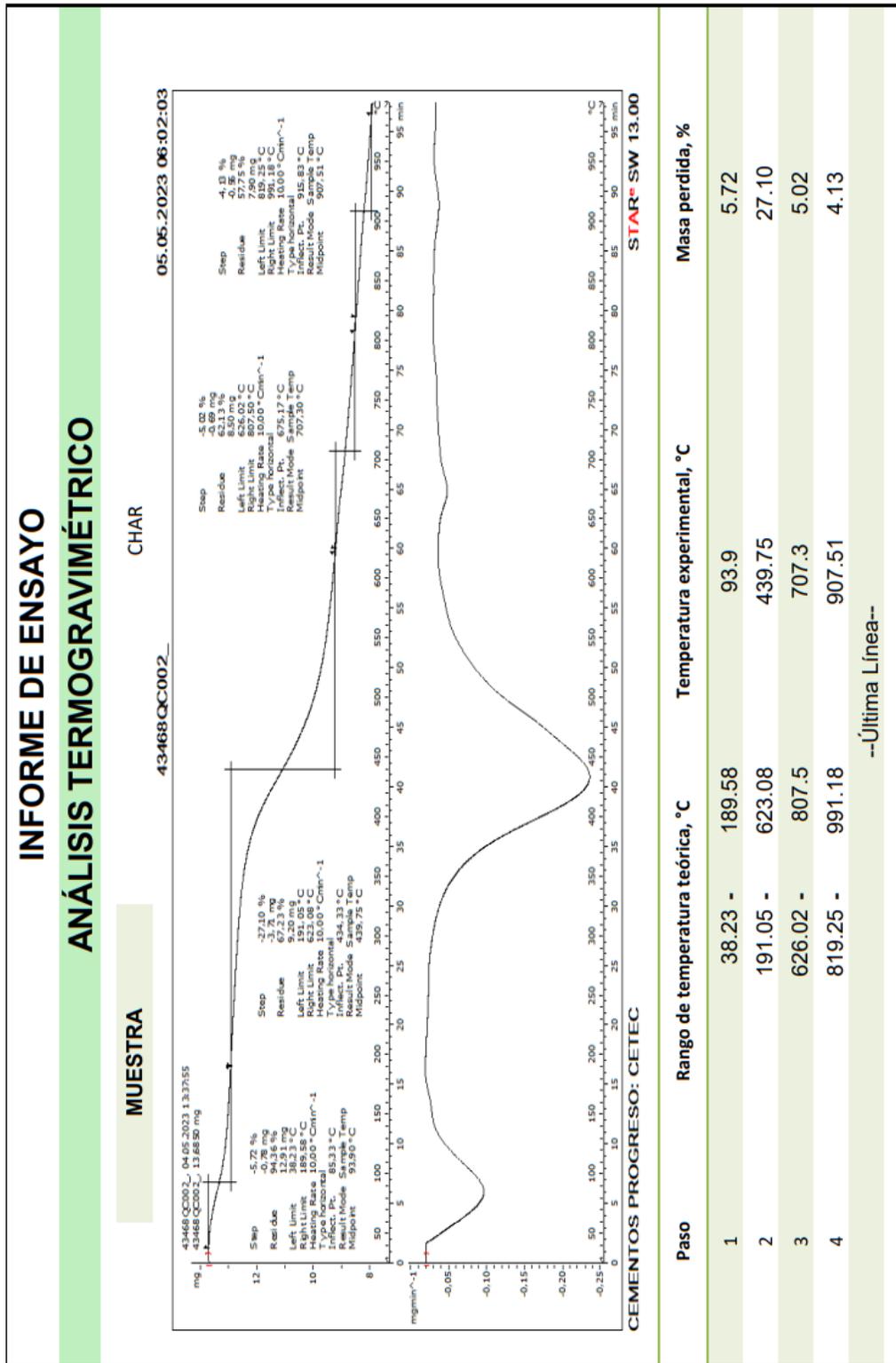
Corrida	1	2	3	4
Masa inicial (g)	5.80	5.90	6.00	4.60
Volumen aireado (mL)	22.00	22.00	22.00	15.00
Volumen compacto (mL)	21.00	20.50	21.50	14.30

Figura 24. Análisis termogravimétrico 1 para char



Análisis realizado por Laboratorio CETEC de Cementos Progreso

Figura 25. Análisis termogravimétrico 2 para char

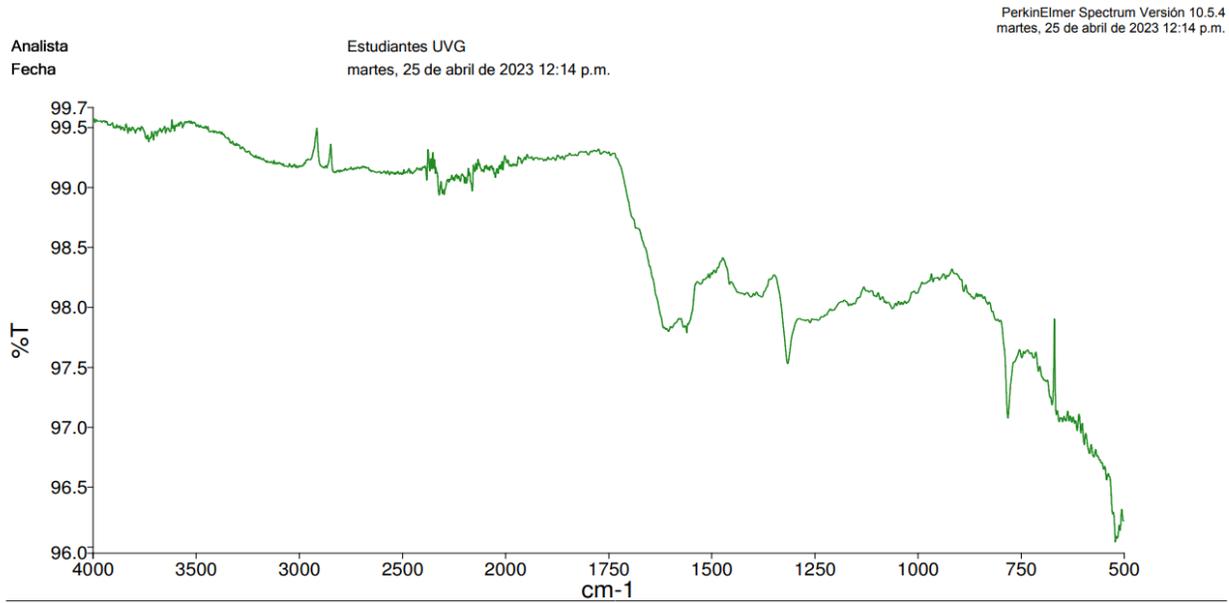


Paso	Rango de temperatura teórica, °C	Temperatura experimental, °C	Masa perdida, %
1	38.23 - 189.58	93.9	5.72
2	191.05 - 623.08	439.75	27.10
3	626.02 - 807.5	707.3	5.02
4	819.25 - 991.18	907.51	4.13

--Última Línea--

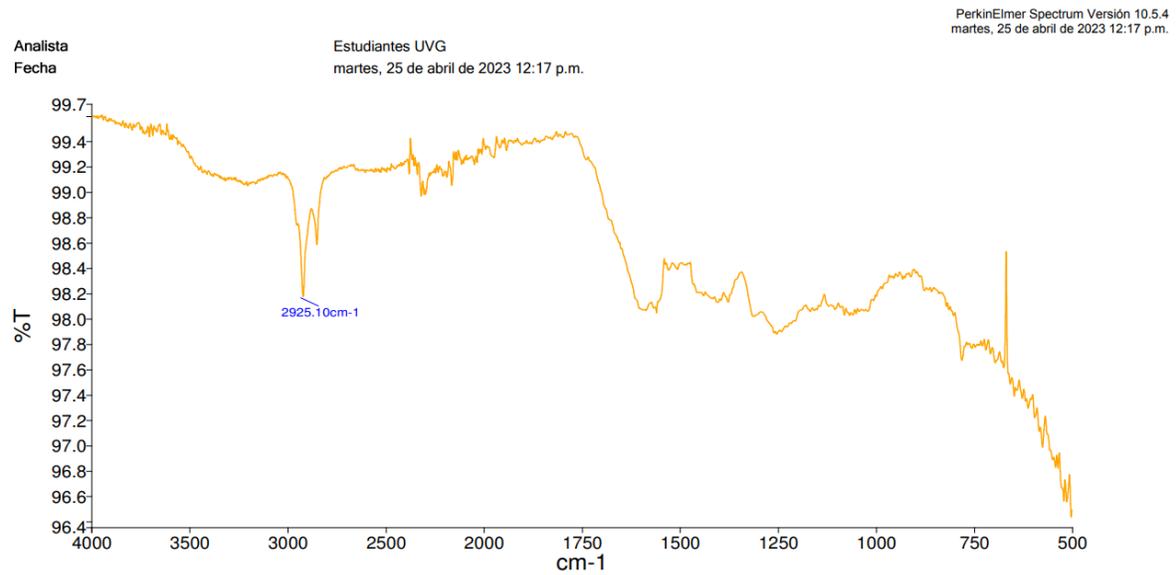
Análisis realizado por Laboratorio CETEC de Cementos Progreso

Figura 26. Espectro infrarrojo char corrida 1



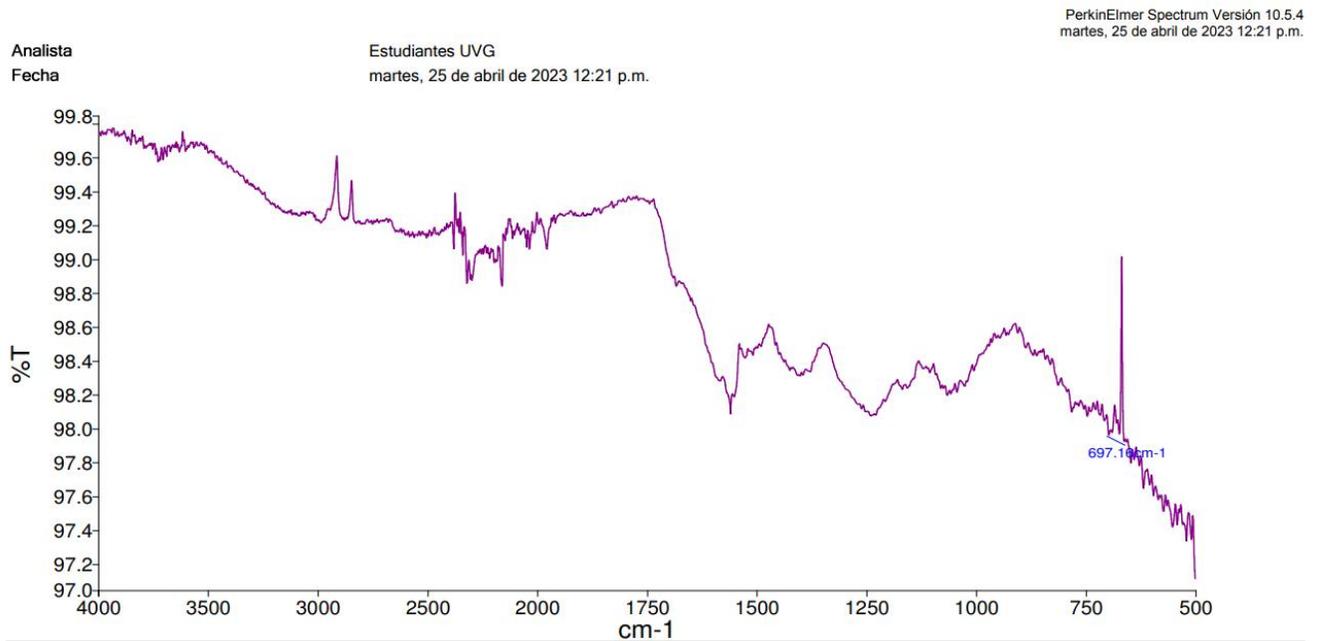
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 27. Espectro infrarrojo char corrida 2



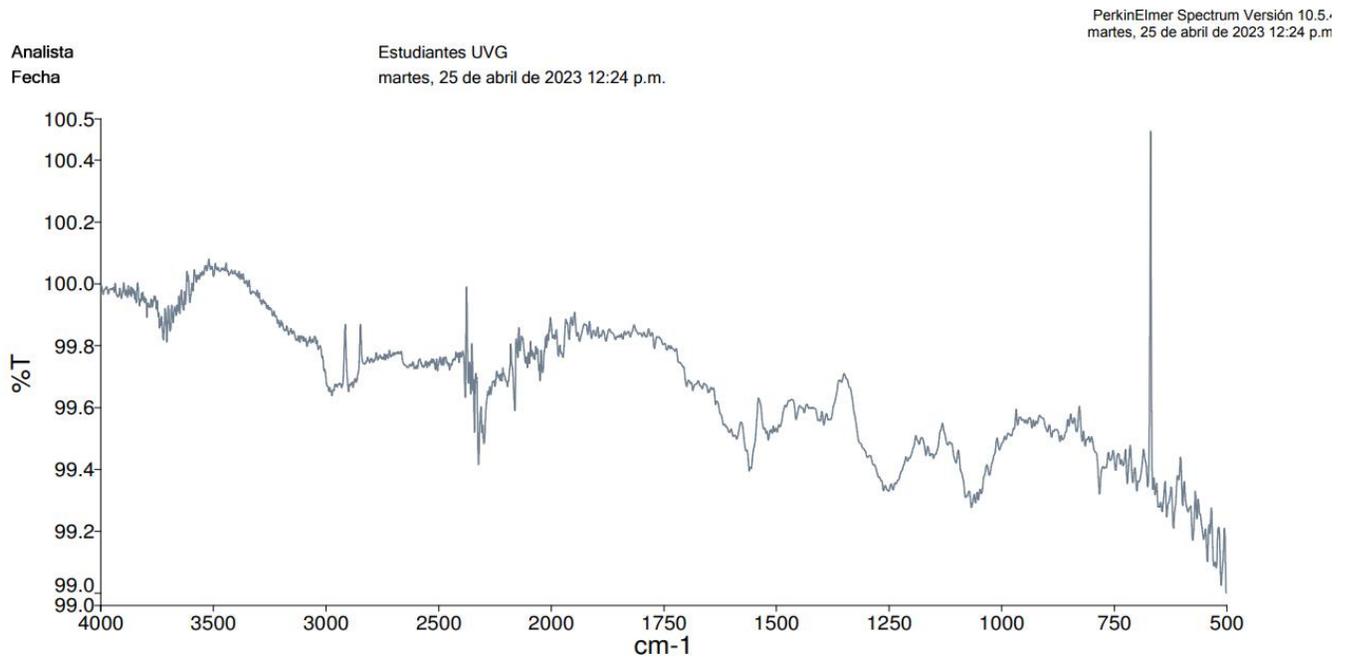
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 28. Espectro infrarrojo char corrida 3



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 29. Espectro infrarrojo char corrida 4



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 46. Producción de bioaceite en la primera corrida de pirolisis

Temperatura (°C)	Aceite (g)	Aceite acumulado (g)
100	0.0	0.0
150	0.0	0.0
180	0.6	0
200	5.6	6.2
220	5.3	11.5
240	5.8	17.3
260	5.6	22.9
270	4.6	27.5
280	0.8	28.3
290	1.6	29.9
300	0.5	30.4
310	0.3	30.7
320	0.1	30.8
330	0.1	30.9
330	0.05	30.95

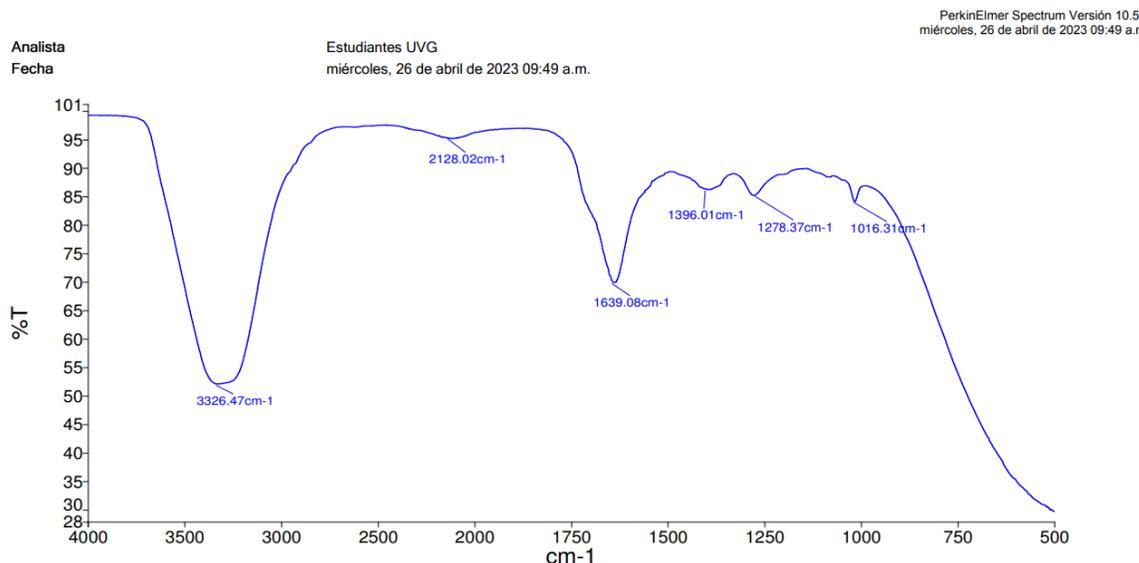
Cuadro 47. Producción de bioaceite en la segunda corrida de pirolisis

Temperatura (°C)	Aceite (g)	Aceite acumulado (g)
100	0.0	0.0
150	0.0	0.0
180	0.0	0.0
200	4.7	4.7
220	5.7	10.4
240	5.2	15.6
260	4.3	19.9
270	5.0	24.9
280	1.6	26.5
290	1.1	27.6
300	1.4	29.0
310	0.2	29.2
320	0.4	29.6
330	0.2	29.8
330	0.3	30.1

Cuadro 48. Producción de bioaceite en la tercera corrida de pirólisis

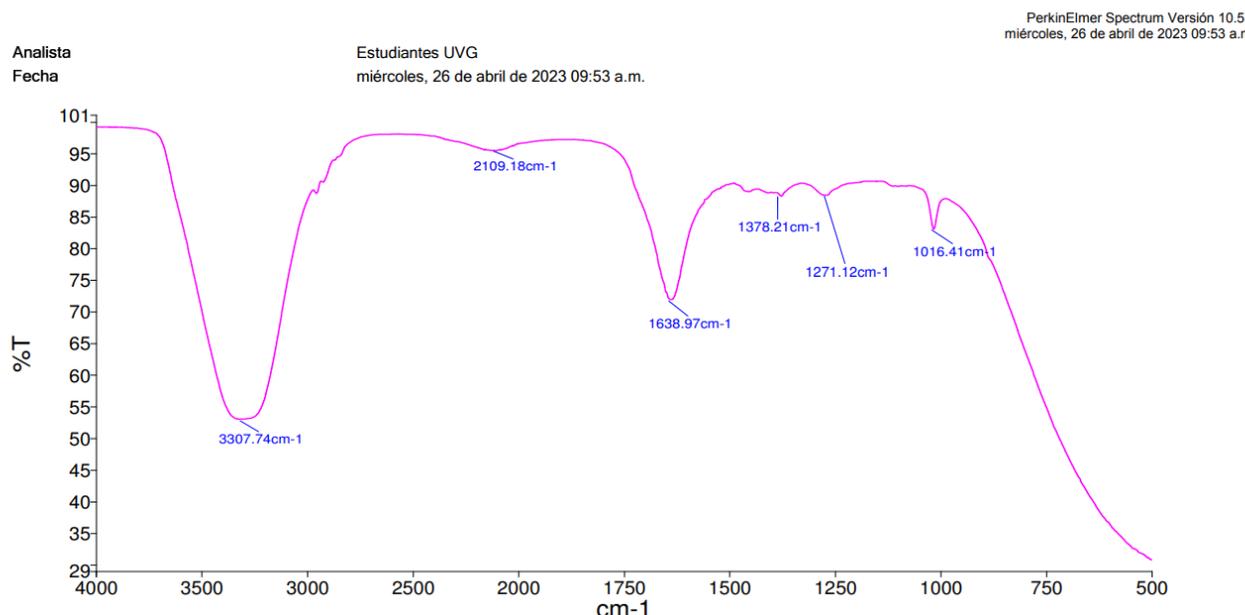
Temperatura (°C)	Aceite (g)	Aceite acumulado (g)
100	0.0	0.0
150	0.0	0.0
180	1.1	1.1
200	5.3	6.4
220	5.4	11.8
240	5.4	17.2
260	4.8	22.0
270	5.3	27.3
280	0.9	28.2
290	1.4	29.6
300	0.7	30.3
310	0.5	30.8
320	0.1	30.9
330	0.3	31.2
330	0.0	31.2

Cuadro 49. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 1



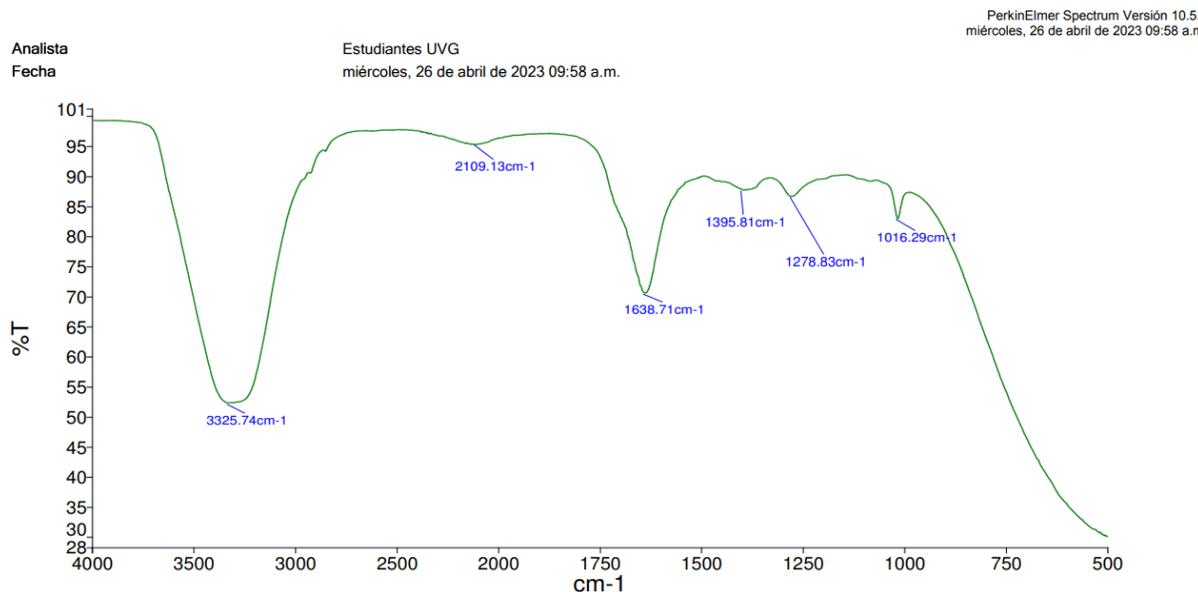
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 50. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 2



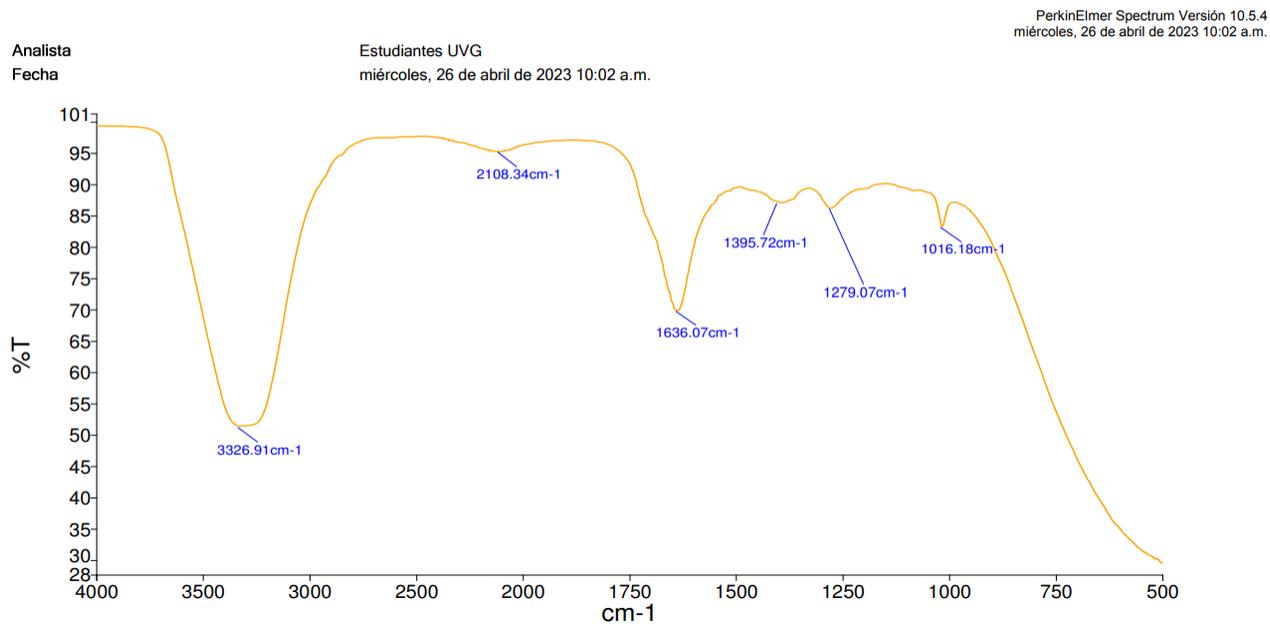
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 51. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 3



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 52. Espectro infrarrojo bioaceite corrida 4



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 53. Producción de bioaceite en la cuarta corrida de pirólisis

Temperatura (°C)	Aceite (g)	Aceite acumulado (g)
100	0.0	0.0
150	0.0	0.0
180	0.0	0.0
200	5.8	5.8
220	5.6	11.4
240	4.0	15.4
260	5.2	20.6
270	5.0	25.6
280	0.8	26.4
290	1.6	28.0
300	0.5	28.5
310	0.1	28.6
320	0.1	28.7
330	0.05	28.75
330	0.1	28.85

Cuadro 54. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 1.

No.	RT	% área	Nombre de compuesto
1	4.008	1.01	Trimetilamina
2	5.063	2.36	Alcohol metílico
3	5.486	0.28	Alcohol etílico
4	7.761	64.8	Agua
5	14.711	0.4	2-Butanone, 3-hydroxy-
6	15.157	4.97	2-Propanone, 1-hydroxy-
7	17.586	0.36	2-Cyclopenten-1-one
8	18.104	0.31	1-Hydroxy-2-butanone
9	20.783	11.79	Ácido acético
10	21.561	1.39	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-
11	24.254	0.3	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-
12	24.454	1.1	Ácido propanoico
13	26.01	0.26	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-
14	28.08	0.3	1,2-Ethandiol, monoacetate
15	28.123	1.98	Butyrolactone
16	29.198	0.46	2-Furanmethanol
17	35.598	0.42	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl
18	36.595	0.19	Phenol, 2-methoxy-
19	40.297	0.41	Maltol
20	41.398	0.45	Fenol
21	42.057	0.19	1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde
22	44.223	0.17	Butanal, 3-methyl-
23	50.65	0.17	Phenol, 3-amino-

Cuadro 55. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 2.

No.	RT	% área	Nombre de compuesto
1	4.09	0.33	Trimetilamina
2	5.045	3.33	Alcohol metílico
3	5.468	0.22	Alcohol etílico
4	7.854	72.34	Agua
5	14.707	0.32	2-Butanone, 3-hydroxy-
6	15.152	3.35	2-Propanone, 1-hydroxy-
7	18.104	0.26	1-Hydroxy-2-butanone
8	20.77	13.15	Ácido acético
9	21.475	0.44	Furfural
10	21.557	0.91	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-
11	24.459	0.87	Ácido propanoico
12	26.014	0.26	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-
13	28.12	0.78	Butyrolactone
14	29.203	0.32	2-furanmethanol
15	35.603	0.16	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl
16	40.297	0.34	Maltol
17	41.398	0.31	Fenol
18	42.058	0.18	1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde

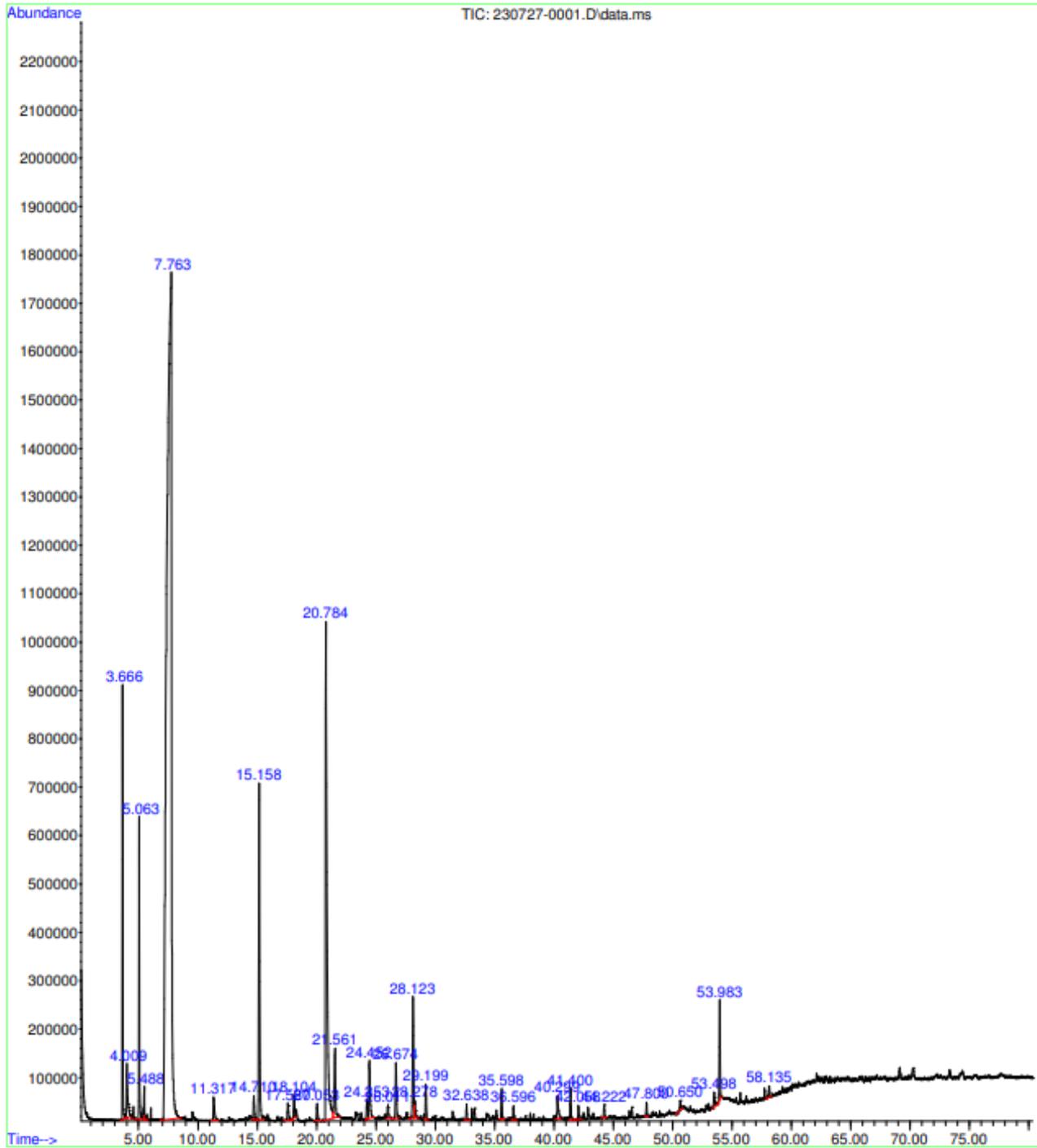
Cuadro 56. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 3.

No.	RT	% área	Nombre de compuesto
1	5.055	3.96	Alcohol metílico
2	5.478	0.28	Alcohol etílico
3	<i>7.77</i>	<i>77.77</i>	Agua
4	14.707	0.34	2-Butanone, 3-hydroxy-
5	15.148	2.87	2-Propanone, 1-hydroxy-
6	18.1	0.25	1-Hydroxy-2-butanone
7	20.825	10.09	Ácido acético
8	21.557	1.27	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-
9	24.464	0.61	Ácido propanoico
10	28.116	0.79	Butyrolactone
11	29.203	0.23	2-Furanmethanol

Cuadro 57. Composición principal determinada por cromatografía de gases para el bioaceite de la corrida 4.

No.	RT	% área	Nombre de compuesto
1	4.054	0.47	Trimetilamina
2	4.563	0.17	Ácido acético
3	5.059	4.08	Alcohol metílico
4	5.482	0.14	Alcohol etílico
5	7.788	68.56	Agua
6	14.707	0.3	2-Butanone, 3-hydroxy-
7	15.152	3.13	2-Propanone, 1-hydroxy-
8	18.104	0.2	1-Hydroxy-2-butanone
9	20.784	13.51	Ácido acético
10	21.479	0.83	Furfural
11	24.459	0.75	Ácido propanoico
12	26.019	0.28	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-
13	28.116	0.81	Butyrolactone
14	29.198	0.49	2-Furanmethanol
15	35.598	0.27	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl
16	40.297	0.37	Maltol
17	41.398	0.44	Fenol
18	42.057	0.23	1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde
19	42.858	0.42	2-Pyrrolidinone
20	44.218	0.25	2-Propanamine

Figura 30. Cromatograma de bioaceite corrida 1.



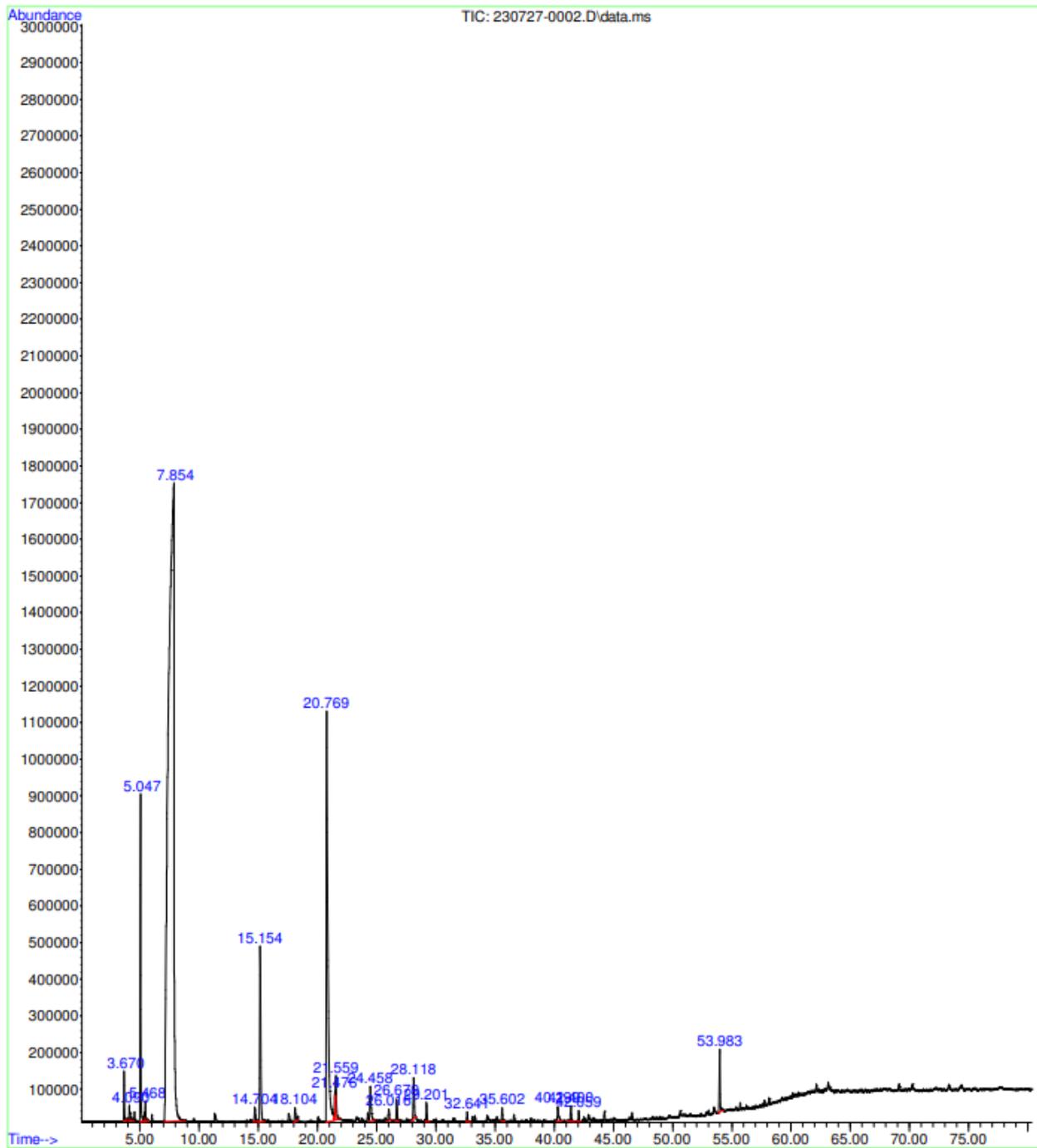
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 31. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 1.

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	3.667	2.24	C:\Database\NIST05a.L			
			Carbon dioxide	80	000124-38-9	4
			Carbon dioxide	81	000124-38-9	3
			Nitrous Oxide	83	010024-97-2	3
2	4.008	1.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Trimethylamine	247	000075-50-3	87
			Trimethylamine	248	000075-50-3	87
			Girard's reagent T	8200	000123-46-6	59
3	5.063	2.36	C:\Database\NIST05a.L			
			Methyl Alcohol	29	000067-56-1	43
			Methyl Alcohol	31	000067-56-1	9
			Methyl Alcohol	30	000067-56-1	4
4	5.486	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	86
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	78
5	7.761	64.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	1
6	11.318	0.45	C:\Database\NIST05a.L			
			Pyridine	1015	000110-86-1	94
			Pyridine	1016	000110-86-1	91
			Pyridine	1017	000110-86-1	80
7	14.711	0.40	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2002	000513-86-0	90
			Propane, 1-methoxy-2-methyl-	2095	000625-44-5	72
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2006	000513-86-0	72
8	15.157	4.97	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-hydroxy-	799	000116-09-6	80
			2-Propanone, 1-hydroxy-	800	000116-09-6	74
			2-Propanone, 1-hydroxy-	801	000116-09-6	64
9	17.586	0.36	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Cyclopenten-1-one	1151	000930-30-3	95
			2-Cyclopenten-1-one	1152	000930-30-3	91
			Furan, 2-methyl-	1146	000534-22-5	59
10	18.104	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hydroxy-2-butanone	1996	005077-67-8	91
			1-Hydroxy-2-butanone	1999	005077-67-8	91
			Butane, 2-nitro-	4433	000600-24-8	45
11	20.051	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Acetamide, N,N-dimethyl-	1860	000127-19-5	94
			Acetamide, N,N-dimethyl-	1858	000127-19-5	91
			Acetamide, N,N-dimethyl-	1859	000127-19-5	80
12	20.783	11.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Acetic acid	258	000064-19-7	94
			Acetic acid	255	000064-19-7	91
13	21.561	1.39	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	7816	000592-20-1	72
			1,2-Ethanediol, diacetate	20991	000111-55-7	64
			1,2-Ethanediol, diacetate	20992	000111-55-7	64
14	24.254	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	2759	002758-18-1	70
			2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	2762	002758-18-1	70
			Furan, 2,4-dimethyl-	2738	003710-43-8	58
15	24.454	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Propanoic acid	793	000079-09-4	96
			Propanoic acid	795	000079-09-4	94
			Propanoic acid	794	000079-09-4	94
16	26.010	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5619	000620-02-0	93
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5621	000620-02-0	87
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5620	000620-02-0	81
17	26.674	0.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Pyridine, 3-methoxy-	5418	007295-76-3	91
			Pyridine, 3-methyl-, 1-oxide	5441	001003-73-2	22
			2-Amino-4-methylpyrimidine	5397	000108-52-1	22
18	28.120	1.98	C:\Database\NIST05a.L			
			Butyrolactone	1626	000096-48-0	94
			Butyrolactone	1625	000096-48-0	94
			Butyrolactone	1624	000096-48-0	90
19	28.280	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			1,2-Ethanediol, monoacetate	4582	000542-59-6	64
			1,2-Ethanediol, monoacetate	4581	000542-59-6	50
			2-Propanone, 1-hydroxy-	801	000116-09-6	46
20	29.198	0.46	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Furanmethanol	3015	000098-00-0	93
			2-Furanmethanol	3020	000098-00-0	93
			2-Furanmethanol	3017	000098-00-0	86
21	32.637	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			2(5H)-Furanone	1316	000497-23-4	81
			Cyclopentanone	1369	000120-92-3	59
			Borane, diethylmethyl-	1349	001115-07-7	59
22	35.598	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	6245	000080-71-7	95
			1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	6225	000765-70-8	94
			1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	6229	000765-70-8	94
23	36.595	0.19	C:\Database\NIST05a.L			
			Phenol, 2-methoxy-	10080	000090-05-1	95
			Phenol, 2-methoxy-	10077	000090-05-1	94
			Phenol, 2-methoxy-	10079	000090-05-1	91

24	40.297	0.41	C:\Database\NIST05a.L Maltol Maltol Maltol	10748 000118-71-8 97 10746 000118-71-8 94 10747 000118-71-8 91
25	41.398	0.45	C:\Database\NIST05a.L Phenol Phenol Phenol	2529 000108-95-2 94 2532 000108-95-2 93 2533 000108-95-2 87
26	42.057	0.19	C:\Database\NIST05a.L 1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde 1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde 2(1H)-Pyridinone	2614 001003-29-8 91 2615 001003-29-8 83 2609 000142-08-5 18
27	44.223	0.17	C:\Database\NIST05a.L Butanal, 3-methyl- 2-Propanamine 1-Propanamine, N,2-dimethyl-	1714 000590-86-3 50 244 000075-31-0 49 1901 000625-43-4 47
28	47.802	0.18	C:\Database\NIST05a.L Caprolactam Caprolactam Caprolactam	6744 000105-60-2 95 6742 000105-60-2 95 6743 000105-60-2 90
29	50.650	0.17	C:\Database\NIST05a.L Phenol, 3-amino- Phenol, 4-amino- Phenol, 4-amino-	5409 000591-27-5 60 5410 000123-30-8 46 5402 000123-30-8 43
30	53.497	0.26	C:\Database\NIST05a.L 1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucop yranose 4,5-Octanediol, 2,7-dimethyl- 2-Propenoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	19879 1000098-14-8 46 38829 1000153-20-8 38 7120 000097-63-2 30
31	53.984	1.19	C:\Database\NIST05a.L 3-Pyridinol 3-Pyridinol 4(1H)-Pyridone	2603 000109-00-2 91 2605 000109-00-2 91 2607 000108-96-3 78
32	58.137	0.17	C:\Database\NIST05a.L Tetraethylene glycol monododecyl e ther Octaethylene glycol 3,6,9,12,15-Pentaoxanonadecan-1-ol	158005 005274-68-0 58 161142 1000289-34-2 58 120685 001786-94-3 50

Figura 32. Cromatograma de bioaceite corrida 2.



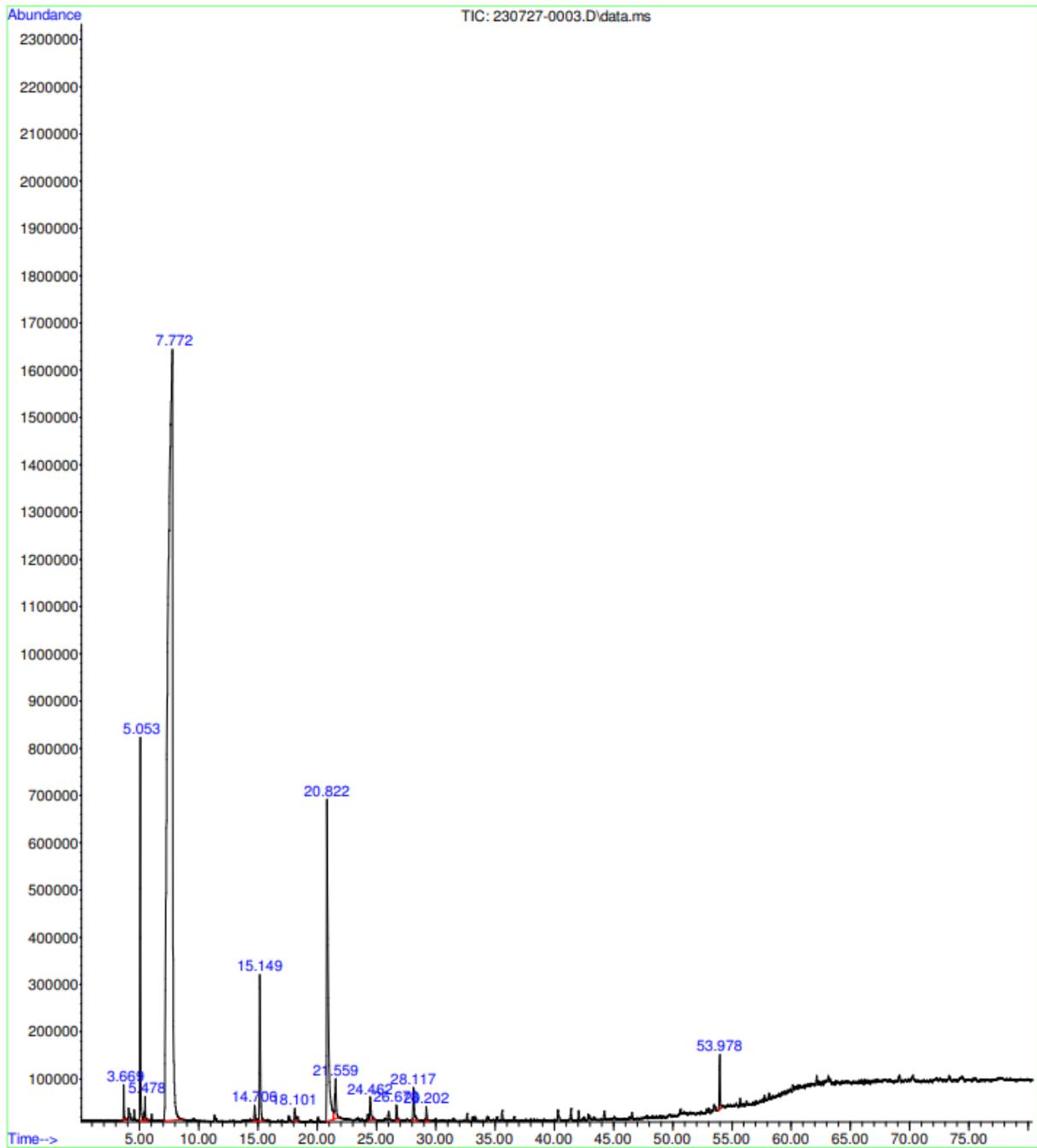
Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 33. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 2.

1	3.672	0.42	C:\Database\NIST05a.L			
			Carbon dioxide	80	000124-38-9	4
			Carbon dioxide	81	000124-38-9	3
			Nitrous Oxide	83	010024-97-2	3
2	4.090	0.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Trimethylamine	247	000075-50-3	87
			Trimethylamine	248	000075-50-3	87
			Girard's reagent T	8200	000123-46-6	59
3	5.045	3.33	C:\Database\NIST05a.L			
			Methyl Alcohol	29	000067-56-1	43
			Methyl Alcohol	31	000067-56-1	9
			Methyl Alcohol	30	000067-56-1	4
4	5.468	0.22	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	91
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	86
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	86
5	7.852	72.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	1
6	14.707	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2002	000513-86-0	86
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2006	000513-86-0	72
			Propylene Glycol	917	000057-55-6	59
7	15.152	3.35	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-hydroxy-	801	000116-09-6	90
			2-Propanone, 1-hydroxy-	799	000116-09-6	80
			2-Propanone, 1-hydroxy-	800	000116-09-6	78
8	18.104	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hydroxy-2-butanone	1996	005077-67-8	91
			1-Hydroxy-2-butanone	1999	005077-67-8	91
			Butyl glyoxylate	12813	006295-06-3	53
9	20.770	13.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Acetic acid	258	000064-19-7	94
			Acetic acid	254	000064-19-7	91
			Acetic acid	255	000064-19-7	91
10	21.475	0.44	C:\Database\NIST05a.L			
			Furfural	2674	000098-01-1	93
			Furfural	2677	000098-01-1	87
			Furfural	2676	000098-01-1	87
11	21.557	0.91	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	7815	000592-20-1	64
			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	7816	000592-20-1	64
			Ethanone, 1-oxiranyl-	1644	004401-11-0	64
12	24.459	0.87	C:\Database\NIST05a.L			
			Propanoic acid	793	000079-09-4	96
			Propanoic acid	794	000079-09-4	94

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Propanoic acid	795	000079-09-4	93
13	26.014	0.26	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5620	000620-02-0	95
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5621	000620-02-0	91
			2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	5619	000620-02-0	91
14	26.679	0.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Pyridine, 3-methoxy-	5418	007295-76-3	58
			Pyridine, 4-methoxy-	5419	000620-08-6	22
			2-Amino-4-methylpyrimidine	5397	000108-52-1	22
15	28.120	0.78	C:\Database\NIST05a.L			
			Butyrolactone	1625	000096-48-0	93
			Butyrolactone	1626	000096-48-0	93
			Butyrolactone	1624	000096-48-0	90
16	29.203	0.32	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Furanmethanol	3020	000098-00-0	93
			2-Furanmethanol	3015	000098-00-0	91
			3-Furanmethanol	3019	004412-91-3	87
17	32.642	0.16	C:\Database\NIST05a.L			
			2(5H)-Furanone	1316	000497-23-4	81
			Cyclopentanone	1369	000120-92-3	64
			2-Butenal, 2-methyl-, (E)-	1414	000497-03-0	53
18	35.603	0.23	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	6245	000080-71-7	95
			1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	6225	000765-70-8	95
			1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	6229	000765-70-8	94
19	40.297	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			Maltol	10746	000118-71-8	93
			Maltol	10747	000118-71-8	91
			Maltol	10745	000118-71-8	87
20	41.398	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Phenol	2529	000108-95-2	93
			Phenol	2533	000108-95-2	93
			Phenol	2532	000108-95-2	93
21	42.058	0.18	C:\Database\NIST05a.L			
			1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde	2614	001003-29-8	91
			1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde	2615	001003-29-8	83
			2(1H)-Pyridinone	2609	000142-08-5	14
22	53.984	1.04	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Pyridinol	2605	000109-00-2	94
			3-Pyridinol	2603	000109-00-2	91
			4-Pyridinol	2604	000626-64-2	87

Figura 34. Cromatograma de bioaceite corrida 3.

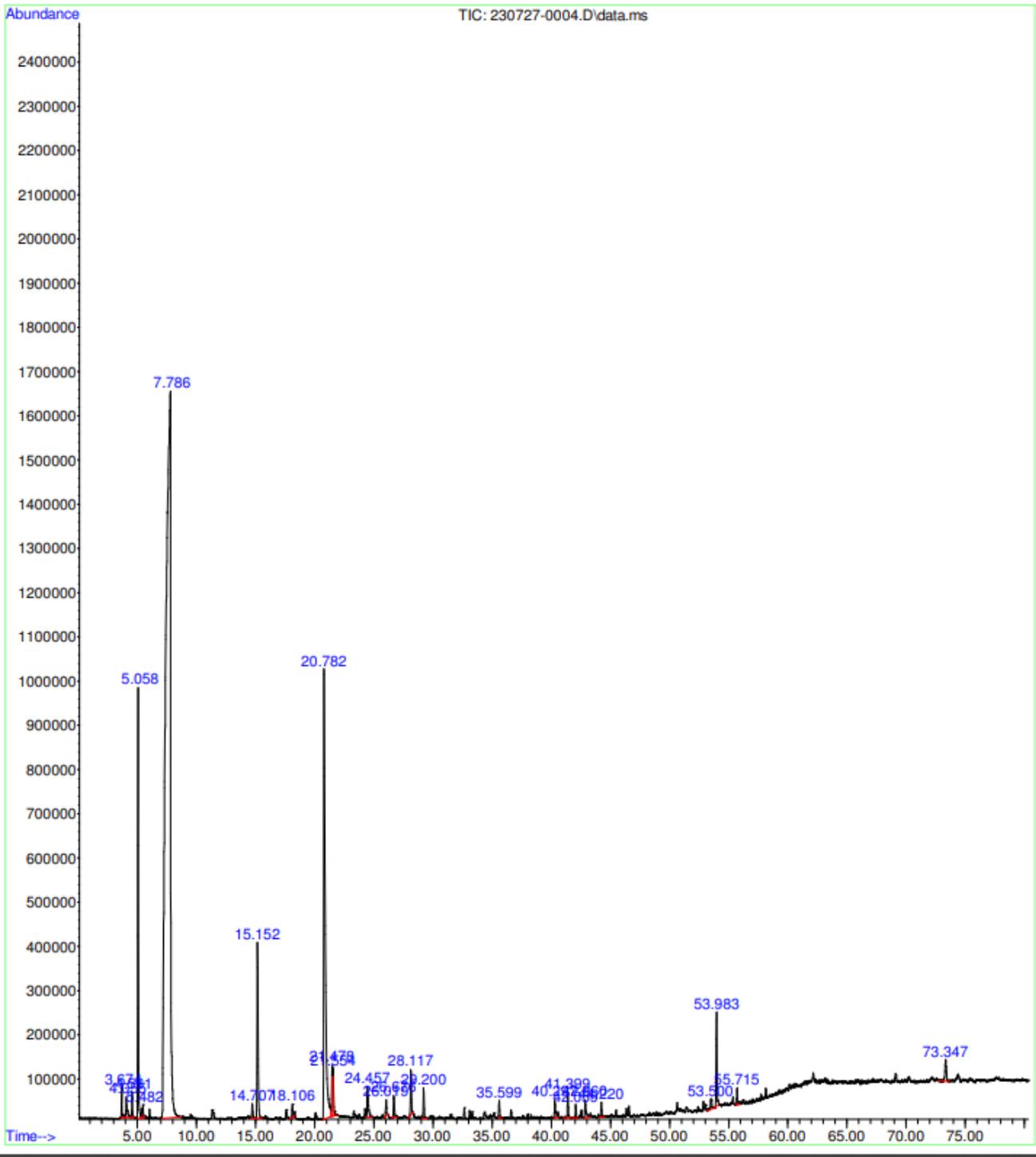


Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 35. Reporte de componentes de bioaceite por cromatografía de gases a través de base de datos para la corrida 3.

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	3.667	0.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Carbon dioxide	80	000124-38-9	4
			Ethyne, fluoro-	75	002713-09-9	4
			Carbon dioxide	81	000124-38-9	3
2	5.055	3.96	C:\Database\NIST05a.L			
			Methyl Alcohol	29	000067-56-1	43
			Methyl Alcohol	31	000067-56-1	9
			Methyl Alcohol	30	000067-56-1	4
3	5.478	0.28	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	94	000064-17-5	86
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	72
4	7.770	77.77	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	1
5	14.707	0.34	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2002	000513-86-0	78
			2-Butanone, 3-hydroxy-	2006	000513-86-0	78
			(2R,4R)-(-)-Pentanediol	4660	042075-32-1	50
6	15.148	2.87	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-hydroxy-	800	000116-09-6	80
			2-Propanone, 1-hydroxy-	799	000116-09-6	80
			2-Propanone, 1-hydroxy-	801	000116-09-6	64
7	18.100	0.25	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Hydroxy-2-butanone	1996	005077-67-8	91
			1-Hydroxy-2-butanone	1999	005077-67-8	90
			Butyl glyoxylate	12813	006295-06-3	59
8	20.825	10.09	C:\Database\NIST05a.L			
			Acetic acid	258	000064-19-7	94
			Acetic acid	254	000064-19-7	91
			Acetic acid	255	000064-19-7	91
9	21.557	1.27	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	7815	000592-20-1	58
			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	7816	000592-20-1	58
			Ethanone, 1-oxiran-yl-	1644	004401-11-0	53
10	24.464	0.61	C:\Database\NIST05a.L			
			Propanoic acid	793	000079-09-4	94
			Propanoic acid	794	000079-09-4	86
			Propanoic acid	795	000079-09-4	74
11	26.679	0.31	C:\Database\NIST05a.L			
			Pyridine, 3-methoxy-	5418	007295-76-3	90
			1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde, 1-met-	5450	001192-58-1	14
			hyl-			
			2-Amino-4-methylpyrimidine	5397	000108-52-1	14
12	28.116	0.79	C:\Database\NIST05a.L			
			Butyrolactone	1625	000096-48-0	90
-	-	-	-	-	-	-
pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			Butyrolactone	1626	000096-48-0	90
			Butyrolactone	1620	000096-48-0	81
13	29.203	0.23	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Furanmethanol	3020	000098-00-0	93
			3-Furanmethanol	3019	004412-91-3	89
			2-Furanmethanol	3015	000098-00-0	89
14	53.980	0.92	C:\Database\NIST05a.L			
			3-Pyridinol	2605	000109-00-2	95
			3-Pyridinol	2603	000109-00-2	91
			4(1H)-Pyridone	2607	000108-96-3	83

Figura 36. Cromatograma de bioaceite corrida 4.



Realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			2-Butanamine, (S)-	740	000513-49-5	53
24	53.502	0.32	C:\Database\NIST05a.L 1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucop yranose	19879	1000098-14-8	38
			Cyclopropane, 1,1-diethyl-	3315	001003-19-6	30
			2-Propenoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	7120	000097-63-2	30
25	53.984	1.47	C:\Database\NIST05a.L 3-Pyridinol	2605	000109-00-2	94
			3-Pyridinol	2603	000109-00-2	91
			4-Pyridinol	2604	000626-64-2	87
26	55.717	0.28	C:\Database\NIST05a.L 1,3-Butadiene, 1-[(1-methylethyl)t hio]-, (E)-	11969	088017-34-9	59
			5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	7820	1000194-17-0	50
			1,2,6-Hexanetriol	14604	000106-69-4	50
27	73.348	0.63	C:\Database\NIST05a.L 4-(4-Methyl-[1,3,2]dioxaborinan-2- yloxy)-phenol	62417	1000285-68-9	43
			Hydroquinone	5607	000123-31-9	42
			Hydroquinone	5608	000123-31-9	42

Cuadro 58. Tarifa no social de electricidad EEGSA

	Q/kWh	Referencia
Costo de energía eléctrica	1.474	(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2023)

Cuadro 59. Consumo de energía para la transformación de residuos de limón en biocombustibles por medio de una pirólisis a escala laboratorio.

Equipo	Tiempo de uso (h)	Consumo de energía (kWh)
Molino de discos	1.00	1.10
Mufla	5.67	17.54

Cuadro 60. Cotizaciones de precios de venta de aceite de pirólisis y sus productos de valor y del char de pirólisis.

Producto	Precio de venta (Q/g)	Referencia
Aceite de pirólisis	0.005	(Henan Doing, 2021)
Ácido acético	0.093	(ArQuimi, 2024)
Fenol	1.367	(Ninu, 2024)
Metanol	0.083	(COCISA, 2024)
Char de pirólisis	0.113	(Soil Reef, 2024.)

Para pasar los precios de algunas referencias que se encontraban en dólares de quetzales se utilizó el tipo de cambio de 7.82 Q/\$.

D. Cálculos

Cálculo 1. Tamaño de muestra

$$n = \frac{Z_a^2 \times p \times (1 - p)}{d^2}$$

Donde:

n = tamaño de muestra

Z_a = Nivel de confianza

p = Proporción esperada

d = Precisión

$$n = \frac{(1.96)^2 \times (95\%) \times (1 - 95\%)}{(30\%)^2} = 2.03$$

Cálculo 2. Eficiencia del proceso de molienda

$$\eta_{molienda} = \frac{m_{salida}}{m_{entrada}} \times 100$$

Donde:

$\eta_{molienda}$: Eficiencia de proceso de molienda

m_{salida} : Masa de salida del molino

$m_{entrada}$: Masa de entrada al molino

$$\eta_{molienda} = \frac{1180 \text{ g}}{1220 \text{ g}} \times 100 = 96.7\%$$

Cálculo 3. Porcentaje de retención en análisis granulométrico

$$\%Retención = \frac{m_{retención\ en\ tamiz}}{m_{entrada}} \times 100$$

Donde:

%Retención: Porcentaje de retención en el tamiz

m_{retención en plato}: Masa de retención en tamiz

m_{entrada}: Masa de entrada de muestra al proceso de tamizado

$$\%Retención = \frac{40.6\ g}{50\ g} \times 100 = 81.2\%$$

Este ejemplo se realizó para el porcentaje de retención del Tamiz No. 20 de la primera corrida del análisis granulométrico de residuos de limón. Se realizó el mismo cálculo para las demás mediciones de residuos de limón y char.

Cálculo 4. Cálculo del poder calorífico

$$PC = \frac{m_{pastilla\ completa} \times PC_{Bomba} - Q_{AB}}{m_{muestra}}$$

Donde:

PC: Poder calorífico de la muestra

m_{pastilla completa}: Masa de la pastilla completa que se introdujo a la bomba

PC_{Bomba}: Poder calorífico marcado por la bomba

Q_{AB}: Calor aportado por el ácido benzoico en la medición

m_{muestra}: Masa de muestra (char o residuos) dentro de la pastilla introducida a la bomba.

$$PC = \frac{0.950\ g \times 24790\ \frac{J}{g} - 20601.6\ J}{0.172\ g} = 17205\ \frac{J}{g}$$

Este ejemplo se realizó para el cálculo del poder calorífico de la primera corrida de residuos de limón. Se realiza el mismo procedimiento las demás mediciones de residuos de limón y de char.

Cálculo 5. Porcentaje de cenizas

$$\%Cenizas = \frac{m_{cenizas}}{m_{muestra\ inicial} \times (1 - \%Humedad)}$$

Donde:

%Cenizas: Porcentaje de cenizas en base seca

m_{cenizas}: Masa de cenizas después del proceso de calentamiento

m_{muestra inicial}: Masa de la muestra total antes del proceso de calentamiento

%Humedad: Humedad de la muestra inicial

$$\%Cenizas = \frac{0.014\ g}{1.002\ g \times (1 - 29.75\%)} = 2.06\%$$

Este ejemplo se realizó para el porcentaje de ceniza para la primera corrida de residuos de limón. Se realiza el mismo proceso para las demás mediciones de residuos de limón y char.

Cálculo 6. Porcentaje de material volátil

$$\%MV = \%Pérdida\ en\ peso - \%Humedad$$

Donde:

%MV: Porcentaje de material volátil

$$\%Pérdida\ en\ peso = \frac{Peso\ de\ muestra - Peso\ después\ de\ calentamiento}{Peso\ de\ muestra} \times 100$$

%Humedad: Porcentaje de humedad de la muestra inicial

$$\%Pérdida\ en\ peso = \frac{1.022\ g - 0.025\ g}{1.022\ g} \times 100 = 97.6\%$$

$$\%MV = 97.6\% - 29.75\% = 67.85\%$$

Ejemplo realizado para el material volátil correspondiente a la primera corrida de residuos de limón. Se realizó el mismo procedimiento para las demás corridas de residuos de limón y para el char.

Cálculo 7. Porcentaje de carbono fijo

$$\%FC = 100\% - \%MV - \%Ceniza$$

Donde:

$\%FC$: Porcentaje de carbono fijo

$\%MV$: Porcentaje de material volátil

$\%Ceniza$: Porcentaje de ceniza

$$\%FC = 100\% - 67.85\% - 2.1\% = 30.09\%$$

Ejemplo realizado para el carbono fijo correspondiente a la primera corrida de residuos de limón. Se realizó el mismo procedimiento para las demás corridas de residuos de limón y para el char.

Cálculo 8. Densidades

$$\rho_{trabajo} = C \times (\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

Dónde:

$$C = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

$$\rho = \frac{masa}{volumen}$$

$$C = \frac{0.305 \frac{g}{mL} - 0.276 \frac{g}{mL}}{0.305 \frac{g}{mL}} = 0.098$$

$$\rho_{trabajo} = 0.098 \times \left(0.305 \frac{g}{mL} - 0.276 \frac{g}{mL}\right) + 0.276 \frac{g}{mL} = 0.279 \frac{g}{mL}$$

Ejemplo realizado para la densidad correspondiente a la primera corrida de residuos de limón. Se realizó el mismo procedimiento para las demás corridas de residuos de limón y para el char.

Cálculo 9. Rendimiento de productos en pirólisis

$$\%Rendimiento = \frac{m_{producto}}{m_{residuos\ de\ limón}} \times 100$$

Donde:

$\%Rendimiento$: Porcentaje de rendimiento de productos de pirólisis

$m_{producto}$: Masa del producto de pirólisis (biochar, bioaceite o gas de síntesis)

$m_{residuos\ de\ limón}$: Masa de residuos de limón

$$\%Rendimiento = \frac{18.3\ g}{60.1\ g} \times 100 = 30.45\%$$

Se realizó este ejemplo para el rendimiento del char en la primera corrida de pirólisis. Se realizó el mismo procedimiento para las demás corridas de pirólisis.

Cálculo 10. Promedio

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} : Media de los datos

x_i : Observaciones de la muestra

n : Cantidad de observaciones

$$\bar{x} = \frac{30.45\% + 29.57\% + 31.61\% + 29.50\%}{4} = 30.28\%$$

Se realizó el cálculo de la media para el rendimiento de char en las 4 corridas de pirólisis. Se realizó el mismo procedimiento para otros cálculos de promedio.

Cálculo 11. Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

s: Desviación estándar de la muestra

\bar{x} : Media de los datos

x_i : Observaciones de la muestra

n: Cantidad de observaciones

$$S = \sqrt{\frac{(30.45\% - 30.28\%)^2 + (29.57\% - 30.28\%)^2 + (31.61\% - 30.28\%)^2 + (29.50\% - 30.28\%)^2}{3 - 1}} = 0.99\%$$

Se realizó el cálculo de la desviación estándar para el rendimiento de char en las 4 corridas de pirólisis.

Se realizó el mismo procedimiento para otros cálculos de promedio.

Cálculo 12. Incertidumbre de suma y resta

$$Sy = \sqrt{(Sa)^2 + (Sb)^2 + (Sc)^2 + \dots}$$

Donde:

Sy= Incertidumbre del resultado

a, b, c ...= Valor de cada medida

S (a, b, c ...) = Incertidumbre de la medida (a, b, c...)

$$Sy = \sqrt{(0.01g)^2 + (0.01g)^2} = 0.014 g$$

Se realizó el mismo procedimiento para otros cálculos de incertidumbre de suma y resta.

Cálculo 13. Costo de operación de los equipos

$$\text{Costo de operación} = \frac{\text{Consumo de energía} \times \text{Tarifa de electricidad}}{\text{Masa ingresada al reactor}}$$

Dónde:

Costo de operación: Costo de operación por equipo (Q/g)

Consumo de energía: Es el consumo energético de los equipos (kWh)

Tarifa de electricidad: Costo de la electricidad (Q/kWh)

Masa ingresada al reactor: Masa que se ingresa al reactor por cada corrida (g)

$$\text{Costo de operación mufla} = \frac{17.54 \text{ kWh} \times 1.474 \frac{\text{Q}}{\text{kWh}}}{60 \text{ g}} = 0.431 \frac{\text{Q}}{\text{g}}$$

Se realizó el mismo procedimiento para otros el cálculo de consumo del molino de discos.

E. Datos calculados

Cuadro 61. Eficiencia del proceso de molienda

Eficiencia ($\pm 0.57\%$m/m)	96.72%
--	--------

Cuadro 62. Análisis granulométrico promedio de los residuos de limón

No. Tamiz	Peso inicial plato (± 0.01 g)	Peso + muestra (± 0.01 g)	Retención de muestra (± 0.01 g)	Retención (%m/m)	Retención acumulado (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.8	423.4	41.6	83.2%	83%	0.833	16.85%
30	368.9	372.4	3.5	7.1%	90%	0.542	9.80%
45	330.5	333.0	2.5	5.0%	95%	0.323	4.75%
60	329.7	330.4	0.7	1.4%	97%	0.246	3.35%
80	338.0	338.3	0.4	0.8%	97%	0.175	2.60%
100	322.8	323.0	0.2	0.4%	98%	0.147	2.25%
Plato final	463.3	463.7	0.4	0.8%	99%	-	1.45%

Cuadro 63. Humedad promedio de los residuos de limón

Medición	Promedio (%m/m)	Desviación estándar (%m/m)
Humedad	29.75	0.20

Cuadro 64. Poder calorífico de residuos de limón para 4 corridas

Cálculo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4
Calor biomasa (J/g)	17205.593	16859.195	16837.239	16965.201
Poder calorífico biomasa (MJ/Kg)	17.206	16.859	16.837	16.965

Cuadro 65. Porcentaje de cenizas de residuos de limón para 4 corridas

Corrida	Cenizas base húmeda (%m/m)	Ceniza base seca (%m/m)
1	1.45%	2.06%
2	1.43%	2.03%
3	1.41%	2.00%
4	1.43%	2.03%

Cuadro 66. Porcentaje de material volátil de residuos de limón para 4 corridas

Corrida	MV base húmeda (%m/m)	MV base seca (%m/m)
1	96.59%	67.85%
2	97.53%	68.51%
3	97.50%	68.49%
4	97.20%	68.29%

Cuadro 67. Porcentaje de carbono fijo de residuos de limón para 4 corridas

Corrida	CF (%m/m)
1	30.09%
2	29.45%
3	29.51%
4	29.68%

Cuadro 68. Densidades aireada, compacta y de trabajo de residuos de limón para 4 corridas

Corrida	1	2	3	4
Densidad aireada (g/mL)	0.276	0.307	0.310	0.298
Densidad compacta (g/mL)	0.305	0.335	0.334	0.325
Compresibilidad	0.098	0.083	0.073	0.085
Densidad de trabajo (g/mL)	0.279	0.309	0.312	0.300

Cuadro 69. Rendimientos para las corridas de pirólisis

Corrida	Aceite (%m/m)	Char (%m/m)	Gas (%m/m)
1	51.50%	30.45%	18.05%
2	50.00%	29.57%	20.43%
3	51.91%	31.61%	16.47%
4	48.08%	29.50%	22.42%

Cuadro 70. Análisis granulométrico promedio para el char de pirólisis

No. Tamiz	Peso inicial plato (±0.01g)	Peso + muestra (±0.01g)	Retención de muestra (±0.01g)	Retención (%m/m)	Retención acumulada (%m/m)	Apertura de mesh (mm)	Pasa (%m/m)
20	381.80	387.70	5.90	0.59	0.59	0.833	41.00%
30	368.90	370.45	1.55	0.16	0.75	0.542	25.50%
45	330.50	331.55	1.05	0.11	0.85	0.323	15.00%
60	329.70	330.13	0.43	0.04	0.89	0.246	10.75%
80	338.00	338.23	0.23	0.02	0.92	0.175	8.50%
100	322.90	323.00	0.10	0.01	0.93	0.147	7.50%
Plato final	463.30	463.93	0.62	0.06	0.99	-	1.25%

Cuadro 71. Humedad promedio de char de pirólisis

Medición	Promedio (%m/m)	Desviación estándar (%m/m)
Humedad	6.46	0.32

Cuadro 72. Poder calorífico de char de corridas de pirólisis

Cálculo	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4
Calor char (J/g)	27322.926	27310.083	27079.161	27410.000
Poder calorífico char (MJ/Kg)	27.323	27.310	27.079	27.410

Cuadro 73. Porcentaje de cenizas de char de corridas de pirólisis

Corrida	Cenizas base húmeda (%m/m)	Ceniza base seca (%m/m)
1	11.00%	11.76%
2	9.27%	9.91%
3	9.28%	9.92%
4	9.82%	10.50%

Cuadro 74. Porcentaje de material volátil de char de corridas de pirólisis

Corrida	MV base húmeda (%m/m)	MV base seca (%m/m)
1	86.03%	80.5%
2	87.13%	81.5%
3	88.48%	82.8%
4	86.79%	81.2%

Cuadro 75. Porcentaje de carbono fijo de char de corridas de pirólisis

Corrida	CF (%m/m)
1	7.76%
2	8.58%
3	7.31%
4	8.31%

Cuadro 76. Densidades aireada, compacta y de trabajo de char de corridas de pirólisis

Corrida	1	2	3	4
Densidad aireada (g/mL)	0.264	0.268	0.273	0.307
Densidad compacta (g/mL)	0.276	0.288	0.279	0.322
Compresibilidad	0.045	0.068	0.023	0.047
Densidad de trabajo (g/mL)	0.264	0.270	0.273	0.307

Cuadro 77. Costo de operación de pirólisis de residuos de limón a nivel laboratorio por corrida

Rubro	Costo (Q)	Masa (g)	Costo por gramo (Q/g)
Residuos de limón	Q0.000	60	Q0.000
Molienda	Q0.081	60	Q0.001
Calentamiento con mufla	Q25.852	60	Q0.431
Costo total	Q25.932	-	Q0.432

XIII. IMÁGENES DEL PROCESO

Figura 38. Residuos de limón triturados

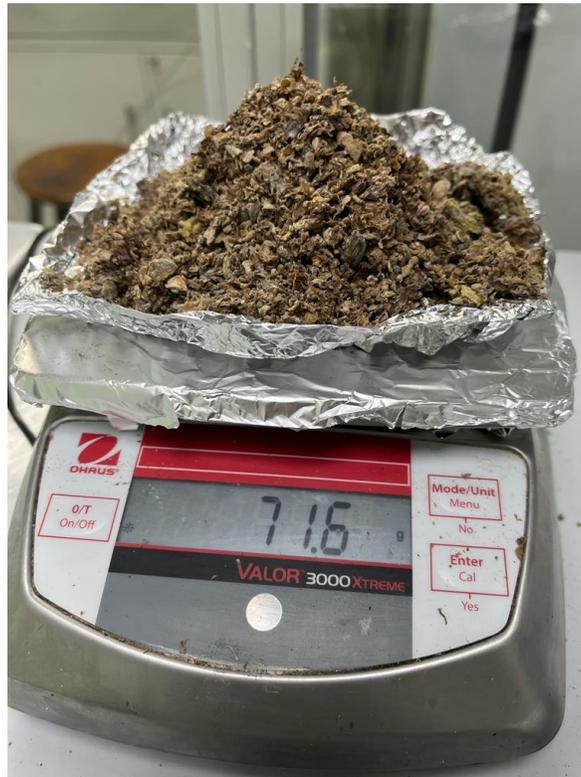


Figura 39. Reactor de pirólisis a escala laboratorio de Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.



Figura 40. Medición de la densidad del char

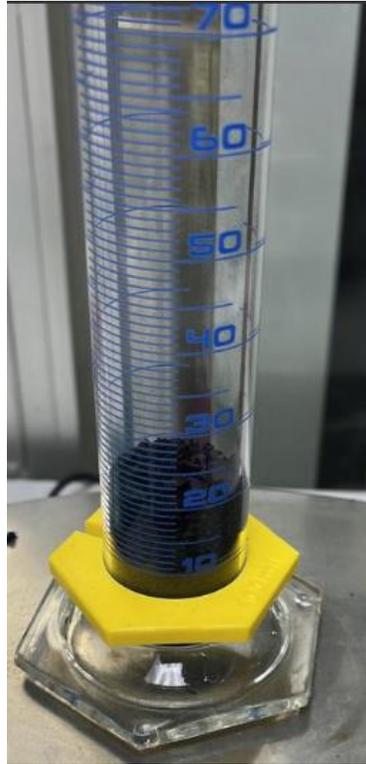


Figura 41. Sistema de pirólisis a escala laboratorio en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.



Figura 42. Medición de la masa de aceite



Figura 43. Char producto de la pirólisis de residuos de limón



Figura 44. Mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 para el proceso de pirólisis del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

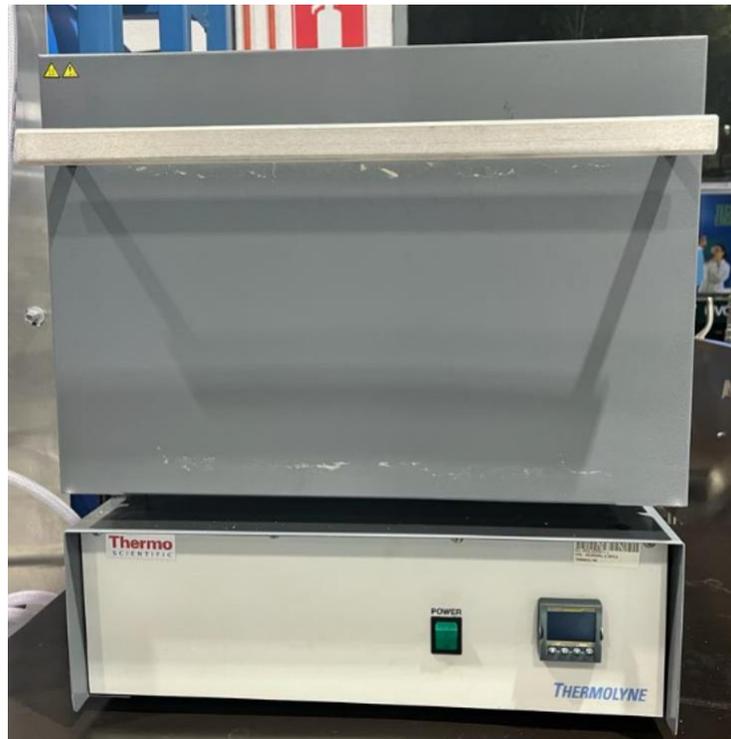


Figura 45. Tamices para la curva granulométrica del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

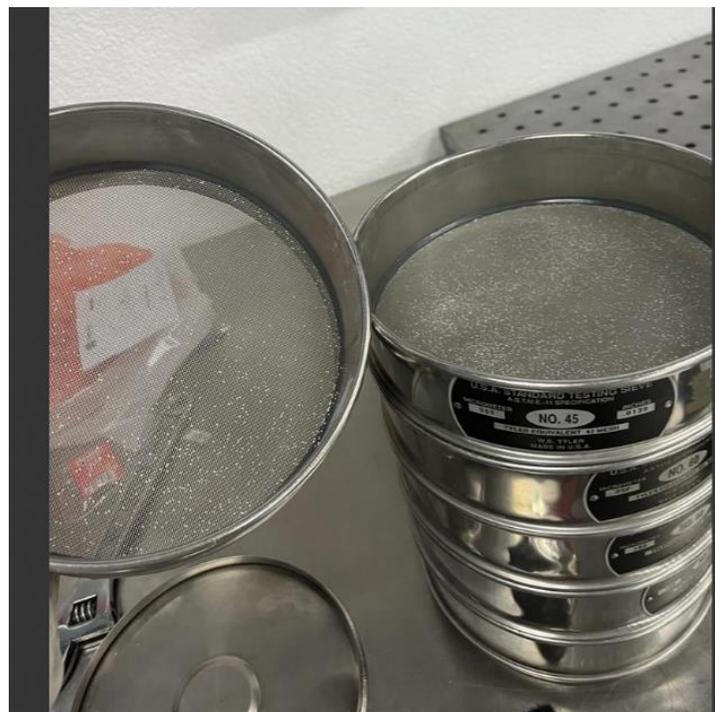


Figura 46. Medición de humedad con balanza de humedad del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.



Figura 47. Bomba calorimétrica del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.



XIV. GLOSARIO

Bioaceite: Un líquido producido a través de la pirólisis de materiales orgánicos, como residuos agrícolas o biomasa. Puede utilizarse como combustible o materia prima en diversas aplicaciones.

Biomasa: Material biológico renovable, como madera, residuos agrícolas o residuos forestales, que puede utilizarse como fuente de energía o materia prima en procesos industriales.

Char: Es el residuo sólido que queda después de la pirólisis de materiales orgánicos. Puede utilizarse como combustible o en aplicaciones agrícolas.

Curva granulométrica: Un gráfico que representa la distribución de tamaños de partículas en una muestra de material. Es importante en la ingeniería de procesos para comprender y controlar la composición de materiales granulares.

CF: Carbono Fijo

MP: Materia prima

MV: Material Volátil

Pirólisis: Un proceso térmico que descompone materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. Se utiliza para producir bioaceite, biogás y carbón vegetal, entre otros productos.

Poder calorífico: La cantidad de energía liberada por la combustión completa de una unidad de un combustible. Se expresa típicamente en unidades como calorías por gramo o julios por kilogramo y es crucial para evaluar la eficiencia de los combustibles.