

ANÁLISIS DE LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA A BAJA TEMPERATURA DEL  
RESIDUO DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITES ESENCIALES Y SU POTENCIAL  
ENERGÉTICO

CAMILO ERNESTOS ÁVILA ALEMÁN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2022

ANÁLISIS DE LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA A BAJA TEMPERATURA DEL  
RESIDUO DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITES ESENCIALES Y SU POTENCIAL  
ENERGÉTICO

CAMILO ERNESTO ÁVILA ALEMÁN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

YESID JAVIER RUEDA ORDÓÑEZ

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2022

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas dentro de la universidad que me aguantaron por tanto tiempo, a las personas de bienestar universitario por siempre estar ahí cuando más lo necesitaba y evitar que hiciera alguna locura, de verdad, buen programa, increíble programa, bastante útil para el estudiantado y debería recibir mayor visibilidad.

Al profesor Yesid por ser tan paciente con este montón de ansiedad y estrés convertido en aspirante de ingeniero. Al profesor Dcroz por ser tan estricto y enseñarme que, a pesar de mis limitaciones cognitivas, siempre podría dar más de mi si ponía el suficiente empeño en las cosas. A los profesores de ingeniería mecánica que, a pesar de haber sido una (en ocasiones) dura experiencia, puedo decir que gran parte de quien soy ahora no existiría sin su apoyo.

A la gente de los combos por alimentarme durante tantos años, poniendo el tóxico en esta relación tóxica. A mis padres porque me aguantaron e intentaron corregir a pesar de ser un desastre completo en algunas ocasiones, además de enseñarme buenos valores sin los cuales no sería la persona medio decente que soy ahora, brindándome siempre el amor incondicional que es tan grande y cálido que simplemente no sé qué hacer con eso (es gracias a ellos sigo trabajando en aceptar y dejar que otros se acerquen, y ese tipo de cosas). A tantas personas cuyos nombres quizás no recuerde con tanta claridad (soy muy malo con los nombres) sin quienes mi vida académica no hubiera sido ni la mitad de soportable. A la babilla, no sé, era chévere. Al staff de Café Motoso, “café motoso, siempre tu aliado en los planes de solo ir por un café y terminar perdiendo el tiempo de una manera genial”.

A Johan Gallo por ser de esas personas que con su lógica y compañerismo me hacían querer ser mejor persona, a la Mafe por siempre hacerme sentir querido y enseñarme que el estar bajoneado no es excusa para no poner el trabajo duro en las cosas. A los papus Julián y Brayan por siempre estar ahí sacando sonrisas hasta en los días más oscuros. A mis hermanos Oliver y Alejandro, por siempre estar 24/7, sin importar lo absurda o desastrosa que pueda ser la situación, por siempre estar en mi esquina apoyándome aun cuando mi vida no era más que un accidente de tránsito en cámara lenta.

## INDICE

	Pag.
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN .....	15
1.3 ENFOQUE DE LOS ANTECEDENTES.....	16
1.3.1 Pregunta de investigación. ....	16
1.3.2 Hipótesis de la investigación. ....	16
1.4 OBJETIVOS .....	17
1.4.1 Objetivo general. ....	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 REVISIÓN DE LITERATURA E IMPORTANCIA .....	18
2.2 BIOMASA .....	19
2.3 CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA .....	22
2.4 COMBUSTIÓN .....	24
2.5 TORREFACCIÓN.....	25
2.6 PLANTAS AROMÁTICAS.....	27
2.6.1 Citronela.....	28
2.6.2 Patchouli.....	29
2.6.3 Palma rosa. ....	30
2.7 ACEITES ESENCIALES.....	31
2.8 DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR DE AGUA.....	33
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA Y PREPARACIÓN.....	37
3.2 TRITURADO DE MUESTRAS EN NATURA: .....	38
3.3 CARACTERIZACIÓN .....	40
3.3.1 Prueba de humedad.....	40
3.3.2 Secado pre-volátiles.....	43
3.3.3 Prueba de volátiles:.....	44

3.3.4 Prueba de contenido de cenizas .....	45
3.3.5 Cantidad de carbón fijo.....	46
3.3.6 Análisis elemental. ....	47
3.4 TORREFACCIÓN .....	48
3.4.1 Triturado de torrefacciones.....	50
3.5 PODER CALORÍFICO.....	51
3.6 HIGROMETRIA .....	55
4. RESULTADOS EN INVESTIGACIÓN .....	57
4.1 ANÁLISIS PRÓXIMO .....	57
4.1.1 Contenido de humedad. ....	57
4.1.2 Prueba de volátiles.....	58
4.1.3. Prueba de cenizas.....	59
4.1.4 Contenido de carbón fijo.....	61
4.1.5 Análisis elemental. ....	61
4.2 ANÁLISIS DE TORREFACCIONES .....	62
4.3 ANÁLISIS PODER CALORÍFICO.....	69
4.4 SELECCIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	80
4.4.1 Construcción de herramienta de selección.....	80
4.4.2 Datos teóricos de referencia para el análisis.....	82
4.4.3 Datos experimentales usados para el análisis y despliegue de factores.....	84
4.5 ANÁLISIS HIGROMÉTRICO. ....	89
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES .....	96
BIBLIOGRAFIA .....	98
ANEXOS .....	103

## LISTA DE IMÁGENES

	Pag.
Figura 1. Secado natural de biomasas.....	38
Figura 2. Citronela, Patchouli y Palma rosa recortadas. ....	39
Figura 3. Intento de torrefactar Palma rosa sin triturar. ....	39
Figura 4. Trituradora de martillos Wiley Mill. ....	39
Figura 5. Gráfico del proceso de torrefacción.....	49
Figura 6. Honro mufla Terrigeo D8.....	50
Figura 7. Molino Elite Cuisine modelo ETS-630B.....	51
Figura 8. Calorímetro Parr modelo 6200 con Bomba de calor Parr 1108.....	52
Figura 9. Contenedores porosos, recipientes y escurridores. ....	56
Figura 10. Arreglo de muestras en secado de 24 h.....	58
Figura 11. Resultados de prueba de volátiles. ....	59
Figura 12. Resultados finales de las pruebas B-yzoon. ....	61
Figura 13. Problemas de distribución para un mismo nivel de diferentes biomasas. ....	63
Figura 14. Recolección de biomasa adicional para cada tratamiento. ....	63
Figura 15. Graficas de comportamiento de perdida de masa por especie. ....	66
Figura 16. Graficas comparativas entre las diferentes especies para cada uno de los tiempos de residencia. ....	68
Figura 17. Realización de pruebas de poder calorífico. ....	70
Figura 18. Comparación de la humedad absorbida por las biomasas tratadas.....	72
Figura 19. Diagrama de energía consumida durante el proceso [KJ/Kg]. ....	75
Figura 20. Mediciones experimentales de calor obtenidas con DSC de la descomposición térmica de la caña de azúcar en atmosfera de nitrógeno. ....	77
Figura 21. Arreglo de ecuaciones en el programa EES. ....	78
Figura 22. Comparación de calores para Citronela. ....	78
Figura 23. Comparación de calores para Patchouli.....	79
Figura 24. Comparación de calores para Palma rosa. ....	79
Figura 25. Pruebas 1 y 2 de higrometría. ....	90

Figura 26. Disolución de componentes en agua, biomasa virgen en comparación con biomasa tratada.....	93
Figura 27. Código de colores para los resultados de las torrefacciones. ....	108

## LISTA DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Dos principales grupos de biomasas y sus subclasificaciones.....	21
Cuadro 2. Comparación de procesos de conversión termoquímica. ....	23
Cuadro 3. Estaciones de degradación y transformación de la biomasa de acuerdo con la temperatura. ....	26
Cuadro 4. Clasificación de aceites esenciales. ....	32
Cuadro 5. Secado de biomasa de manera natural. ....	38
Cuadro 6. Tabla de experimentos para temperaturas y tiempos de torrefacción. ....	49
Cuadro 7. Resultado de análisis próximo de biomasas.....	53
Cuadro 8. Ecuaciones empíricas para predecir el poder calorífico. ....	55
Cuadro 9. Valores promedios de humedad usando el método B-yzoon. ....	57
Cuadro 10. Resumen de resultados para pruebas de volátiles usando prueba B-yzoon. ....	59
Cuadro 11. Cenizas de biomasas. ....	60
Cuadro 12. Resumen de análisis próximo de biomasas y los valores de carbono fijo. .	61
Cuadro 13. Composición elemental teórica.....	62
Cuadro 14. Comparación de resultados de pérdida de masa según tiempo y biomasa.	65
Cuadro 15. Comparación de valores según el tiempo de residencia para cada una de las biomasas. ....	68
Cuadro 16. Valores de poder calorífico para biomasas sin tratamiento térmico a partir de relaciones matemáticas.....	71
Cuadro 17. Humedad contenida en pruebas torrefactas.....	71
Cuadro 18. Poderes caloríficos de biomasas torrefactadas en MJ/Kg. ....	73
Cuadro 19. Comparación entre los valores teóricos y experimentales con la regresión lineal de EES para Patchouli. ....	73
Cuadro 20. Comparación entre los valores teóricos y experimentales con la regresión lineal de EES para Palma rosa.....	74

Cuadro 21. Comparación entre poderes caloríficos de biomosas tratadas respecto a restos sin tratamiento. ....	74
Cuadro 22. Comparación de propiedades entre diferentes tratamientos para biomasa.	83
Cuadro 23. Comparación energética de biomosas respecto al carbón. ....	85
Cuadro 24. Cálculo de energías aprovechables. ....	85
Cuadro 25. Comparaciones másicas respecto al carbón carbonizado. ....	86
Cuadro 26. Análisis de la humedad absorbida por biomasa tratada durante su contención. ....	86
Cuadro 27. Comparación de absorción de humedad. ....	87
Cuadro 28. Cálculos de CTT para determinar las mejores opciones. ....	88
Cuadro 29. Resultados de los secados de biomosas, primera etapa de higrometría y segunda etapa de higrometría. ....	90
Cuadro 30. Comparación de datos para biomasa sin tratamiento y biomasa torrefactada. ....	91
Cuadro 31. Humedad contenida en Patchouli. ....	103
Cuadro 32. Humedad contenida en Citronela. ....	103
Cuadro 33. Humedad contenida en Palma rosa. ....	104
Cuadro 34. Humedad contenida en muestras de Citronela en operación de pre-secado. ....	104
Cuadro 35. Volátiles contenidos en muestras de Citronela. ....	104
Cuadro 36. Contenido de cenizas en Citronela. ....	105
Cuadro 37. Humedad contenida en muestras de Patchouli operación de pre-secado.	105
Cuadro 38. Volátiles contenidos en muestras de Patchouli. ....	106
Cuadro 39. Contenido de cenizas en Patchouli. ....	106
Cuadro 40. Humedad contenida en muestras de Palma rosa operación de pre-secado. ....	107
Cuadro 41. Volátiles contenidos en muestras de Palma rosa. ....	107
Cuadro 42. Contenido de cenizas en Palma rosa. ....	107
Cuadro 43. Promedios de torrefacción 200°C y 15 minutos. ....	109

Cuadro 44. Promedios de torrefacción 200°C y 30 minutos.....	109
Cuadro 45. Promedios de torrefacción 250°C y 15 minutos.....	110
Cuadro 46. Promedios de torrefacción 250°C y 30 minutos.....	111
Cuadro 47. Promedios de torrefacción 275°C y 15 minutos.....	112
Cuadro 48. Promedios de torrefacción 275°C y 30 minutos.....	114
Cuadro 49. Promedios de torrefacción 300°C y 15 minutos.....	116
Cuadro 50. Promedios de torrefacción 300°C y 30 minutos.....	117
Cuadro 51. Secado de biomosas torrefactadas antes de las pruebas. ....	118
Cuadro 52. Comparación entre humedad absorbida durante contención para biomosas torrefactadas. ....	119
Cuadro 53. Poderes caloríficos de biomosas torrefactadas en MJ/Kg. ....	119
Cuadro 54. Secado de biomosas sin tratamiento.....	120
Cuadro 55. Primera etapa de prueba de higrometría para biomosas sin tratamiento térmico. ....	120
Cuadro 56. Secado de biomosas con tratamiento de 275°C y 15 minutos. ....	121
Cuadro 57. Primera etapa de prueba de higrometría para biomosas con tratamiento de 275°C y 15 minutos. ....	121
Cuadro 58. Segunda etapa de prueba de higrometría para biomosas sin tratamiento térmico. ....	122
Cuadro 59. Segunda etapa de prueba de higrometría para biomosas con tratamiento de 275°C y 15 minutos. ....	122

## LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo A. Desarrollo de prueba B-Yzoon para humedades.....	103
Anexo B. Pruebas B-yzoon para determinar la humedad, volatiles y cenizas contenidas. .....	104
Anexo C. Historial de torrefacciones. ....	108
Anexo D. Prueba de poder calorifico.....	118
Anexo E. Pruebas de higometria: resultados organizados.....	120

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA A BAJA TEMPERATURA DEL RESIDUO DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITES ESENCIALES Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO\*.

**AUTOR:** CAMILO ERNESTO ÁVILA ALEMÁN\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** BIOMASA, RESIDUOS DE DESTILACIÓN, TORREFACCIÓN, PODER CALORÍFICO, HIGROMETRÍA, TRATAMIENTO TÉRMICO, CITRONELA, PATCHOULI, PALMA ROSA.

### DESCRIPCIÓN:

Gracias a los avances tecnológicos recientes y la globalización, nuestra calidad de vida ha incrementado sustancialmente; sin embargo, se ha hecho necesario un mayor uso de energía eléctrica, así como de innovar constantemente para mantener a flote las economías de países tropicales como Colombia, que han visto esto como una oportunidad de hacer uso de plantas locales para la elaboración de productos con potencial internacional.

Para este estudio los restos de la destilación por arrastre de vapor escogidos fueron la Citronela (*Cymbopogon nardus*), el Patchouli (*Posgostemon Cablin*) y la Palma rosa (*Cymbopogon Martini*), las cuales son extraídas húmedas del proceso para luego ser usadas como futuro abono, siendo en varias ocasiones desechadas. Esta actividad requiere de vapor de agua presurizado, el cual es conseguido por medio de una caldera que usa gas natural. Este estudio sería el inicio de futuros estudios y posteriores desarrollos de cámaras de combustión u otros sistemas que permitan el aprovechamiento de estos materiales, disminuyendo el consumo de energía, así como la contaminación por el mal manejo de residuos.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo comparar el potencial energético de los restos de la destilación de plantas para la obtención de aceites esenciales, antes y luego de sometérseles a un tratamiento isotérmico conocido como torrefacción cuyo rango de temperatura estuvo comprendido entre los 200°C y 300°C, para encontrar las mejores condiciones para su uso. En orden de permitir futuras investigaciones o desarrollos sobre el tema, se requirió de la caracterización de los residuos, se realizaron tratamientos de torrefacción en conjunto con otros análisis para determinar qué ventajas poseen estos procesos sobre restos vírgenes. Finalmente se realizaron comparaciones entre los resultados para llegar a conclusiones sobre la utilidad de los tratamientos sugeridos y recomendaciones para la mejoría de los procesos.

---

\* Trabajo de grado.

## ABSTRACT

**TITLE:** LOW TEMPERATURE THERMAL DECOMPOSITION ANALYSIS FOR ESSENTIAL OILS PRODUCTION RESIDUE AND ITS ENERGETIC POTENTIAL\*.

**AUTHOR:** CAMILO ERNESTO ÁVILA ALEMÁN\*\*.

**KEY WORDS:** BIOMASS, DISTILLATION RESIDUE, TORREFACTION, HEATING VALUE, HYGROMETRY, THERMAL TREATMENT, CITRONELLA, PATCHOULI, PALMA ROSA.

### DESCRIPTION:

thanks to current technological advances and globalization, our current life quality has improved substantially; However, it has been made necessary an increase in the electrical power, as well as constant innovation in order to keep tropical countries such as Colombia economies afloat, which have seen this as an opportunity to make use of local flora to manufacture products with an international appeal.

For this study essential oils remains of steam drag distillation were selected, specifically the Citronella (*Cymbopogon nardus*), Patchouli (*Posgostemon Cablin*) and Palma rosa (*Cymbopogon Martini*), which wet remains are taken to be used as fertilizers, been disposed of in a lot of cases. This activity requires pressured steamed water that is acquired making use of a natural gas boiler. Thus, this research will be the beginning of future studies and future developments for combustion chambers and other systems that allow us to make the most of this remains, diminishing the energy consumption, as well as the contamination due to bad management of residue.

This investigative work has the objective to compare the distillation residues energetic potentials used for essential oils extraction, before and after being submitted to an isothermal treatment known as torrefaction which temperature range was between 200°C and 300°C, with the purpose of finding the best conditions to be used. To open the possibility of future investigations or developments about the subject a characterization of the remains was necessary, then torrefaction treatments with additional analyses were carried out to find the advantages of this processes in comparison to the virgin remains. lastly comparisons between all data were made to arrive to conclusions about the utility of the suggested processes and recommendations for the improvement of these.

## 1. PRELIMINARES

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, el ser humano se ha percatado del efecto que muchas de las actividades productivas que ejerce afectan gravemente el equilibrio del ecosistema en el cual vive, el consumo de energía durante el desarrollo de diversos procesos laborales, así como cotidianos ha generado un problema puntual debido a que, para su obtención, se requiere de la explotación de diferentes recursos que pueden llegar a impactar negativamente al medio ambiente. Como solución a este problema, se han realizado investigaciones sobre fuentes de energía alternas, muchas de las cuales han dado camino a la implementación de nuevas tecnologías de extracción como lo son las hidroeléctricas, generadores eólicos, paneles solares, entre otros. Dentro de estas alternativas tenemos a la combustión de biomasa, para la cual se hace uso de materiales orgánicos como combustible.

El centro nacional de investigaciones para la agro industrialización de especies vegetales, aromáticas y medicinales tropicales (CENIVAM) sección de química orgánica y biomolecular ubicada en la Universidad Industrial de Santander es un laboratorio que se especializa en el estudio, así como la síntesis de moléculas orgánicas a partir de productos naturales para su futura implementación en campos como la medicina, productos químicos, la industria de perfumería y cosméticos, entre otros.

En la investigación de los diversos componentes producidos se hace necesario el uso de diversas plantas, en especial aromáticas de origen herbáceo que son cultivadas, tratadas y procesadas por el personal encargado para su uso posterior en diversos procedimientos como la destilación de aceites esenciales, generando varias fuentes de residuos orgánicos durante su cultivación, así como en su posterior tratamiento. Gran parte de estos desechos son descartados como basura, mientras una parte es usada como combustible para calderas y hornos empleados por el centro.

Bajo estas circunstancias, se hace necesario poseer conocimiento acerca de las capacidades de estos compuestos orgánicos para ser usados como combustible sólido, generando reacciones de mejor calidad y estudiando su comportamiento, impulsando así el uso de material vegetal como una futura fuente de energía amigable con el medio ambiente.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

La combustión de biomasa es tal vez el proceso de obtención de energía más viejo que el ser humano conoce, siendo la quema de madera o restos leñosos una de las actividades que marco el camino de nuestra evolución como especie; sin embargo, debido al impacto ambiental que esta generaba a raíz de la creciente demanda por más energía, se abandonó parcialmente para dar pie a nuevas fuentes como lo son los combustibles fósiles, para, finalmente ganar de nuevo relevancia con las recientes crisis originadas por el uso indiscriminado de los hidrocarburos y sus derivados.

La combustión de biomasa ha generado un especial interés en el sector agroindustrial a pequeña, mediana y gran escala, debido a la posibilidad de usar los restos de diferentes actividades de producción que generan restos orgánicos para reducir costos en áreas como el consumo eléctrico, consumo de gas natural (al cual pueden o no tener acceso), manejo y transporte de desechos, impuestos a la producción de  $CO_2$ , y en general otros procesos que requieran de energía o manejo de desechos.

Desde un enfoque ambiental, la quema de biomasa se encuentra en una posición favorable en contraste con los combustibles fósiles y es que, al ser de origen vegetal, el carbono que libera durante su quema es el mismo que ha quedado retenido en la planta durante su desarrollo, de modo que, no altera la concentración de  $CO_2$  en la atmosfera; a pesar de esto, se debe tener cuidado al plantear las formas en que se producirá la combustión ya que, de ser manejada de manera inadecuada, puede generar diversos compuestos indeseados o simplemente no obtener el mayor potencial energético lo cual convertiría a la quema de restos en algo contraproducente.

### **1.3 ENFOQUE DE LOS ANTECEDENTES**

**1.3.1 Pregunta de investigación.** ¿Es posible y vale la pena realizar un pretratamiento térmico para mejorar las propiedades de los restos de la destilación para su uso como combustible?

**1.3.2 Hipótesis de la investigación.** Los residuos del proceso de destilación de plantas aromáticas tienen potencial para ser usadas como combustible para la generación de vapor necesaria para el proceso, siendo necesario para esto un posterior secado y pretratamiento térmico de los residuos.

## **1.4. OBJETIVOS**

**1.4.1 Objetivo general.** Analizar la descomposición termoquímica a temperaturas menores a los 300°C de biomasa residual del procesamiento aceites esenciales y su potencial energético.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Seleccionar los residuos para luego realizar la caracterización fisicoquímica y térmica de la muestra.
- Realizar la descomposición termoquímica de los residuos en un horno a temperaturas de 200, 250, 275 y 300 °C, con tiempos de residencia de 15 y 30 minutos para seleccionar las condiciones óptimas de este proceso, tomando como criterio el valor del poder calorífico por biomasa.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 REVISIÓN DE LITERATURA E IMPORTANCIA**

En la actualidad, los avances tecnológicos del ser humano han incrementado de manera exponencial gracias al descubrimiento de nuevas tecnologías, la conexión del mundo a través de la red, el comercio de manera global y la accesibilidad a servicios básicos para una población creciente han dado como resultado una mejora en la calidad de vida del ser humano; a pesar de esto, mantener estos estándares implican un consumo de energía cada vez mayor, de la mano a un aumento en la generación de desperdicios subproducto de la actividades comerciales, urbanas, industriales, entre otras. Estos suponen problemas serios para el medio ambiente y por tanto para la estabilidad del planeta, por lo cual, la reutilización de la biomasa residual de diferentes procesos con la finalidad de reducir el consumo energético ha ganado bastante interés.

Según Bandoni et al. (2003) el mayor uso de las plantas aromáticas se encuentra dentro de los campos de las industrias cosméticas, donde la fragancia obtenida de estas plantas juega un papel importante con un reconocimiento global bien posicionado. La industria alimenticia en donde las propiedades de estas plantas resultan útiles en las áreas de sabor, factores diferenciadores y efectos que los componentes de estas pueden generar. La industria licorera la cual posee un gran rol en las sociedades actuales y que hacen uso de extractos o escancias para acompañar estas bebidas, dándoles una identidad única ante diferentes competidores. En la industria farmacéutica las diferentes propiedades que algunos de los componentes traen a la mesa los hacen altamente apetecidos por los beneficios que puedan traer a nuestra sociedad, así como despiertan un gran interés en compañías a nivel global en la investigación y desarrollo de mejores productos, por lo cual la exploración de nuevas formas de fauna (especialmente en países con mayor biodiversidad) es una nueva frontera la cual puede traer nuevas oportunidades a poblaciones locales. En el uso de productos domésticos se hacen uso de diversos subproductos conseguidos de plantas aromáticas, dentro de las propiedades más

relevantes se tiene el olor, el cual por combinaciones únicas se pueden obtener fragancias altamente deseadas<sup>1</sup>.

Se calcula que Colombia cuenta con un 50% de su territorio cubierto por vegetación boscosa, lo cual combinado con su diversidad en climas dan como resultado el contener al menos 10% de las especies biológicas conocidas, siendo 55.000 especies de flora nativa, lo cual lo convierte en uno de los países con mayor biodiversidad del mundo y siendo el tercer país con mayor extensión de cultivos permanentes en Latinoamérica. El país posee un gran número de exportaciones de naturaleza vegetal como es el caso del Eucalipto, Menta japonesa, Citronela, Lemongrass, Ajo, Cebolla, entre otros productos, además de poseer un número considerable de plantas autóctonas del país que no han sido estudiadas completamente. Adicionalmente la exportación de flora es considerada un gran pilar en cuanto a la exportación del país, siendo destacable el considerable desperdicio de estos cultivos debido a no cumplir con los requisitos estéticos suficientes (Bandoni et al., 2003)<sup>2</sup>.

## **2.2 BIOMASA**

De acuerdo con la información recopilada en el libro de Basu “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction” se define la biomasa como cualquier tipo de componente orgánico que en algún momento haya estado vivo además de que posea carbono en su composición; sin embargo, se excluye cualquier material que haya sido influenciado por procesos geológicos durante su formación (como es el caso del petróleo o gas natural). Debido a la relación con otros organismos este tipo de recursos orgánicos hacen parte del ciclo de carbono lo cual además de hacerlos renovables, los niveles de CO<sub>2</sub> que liberan o absorben no afecta el contenido neto de este gas en el mundo lo cual los convierte en una fuente de combustible de especial interés en la lucha por el medio ambiente. Otra forma de entender la biomasa es como la interacción entre el dióxido de

---

BANDONI, A. L.; FOLCARÀ, S. C.; & CYTED (Asociación). Subprograma IV. Biomasa como Fuente de Productos Químicos y Energía. Los Recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica. (2.a ed.). 2003. pp. 19, 20.

<sup>2</sup> Ibid., p. 58.

carbono, aire, agua, sol y el medioambiente, que después de completar su ciclo de vida se descompondrá en el medio ambiente interactuando con otros organismos que aprovecharan sus componentes como combustible interno para funcionar, dando como resultado subproductos los cuales no solo son sólidos, sino que además incluyen a cualquier derivado de estos los cuales pueden ser además líquidos y gaseosos<sup>3</sup>. (Basu, 2018).

Las principales fuentes más comunes de biomasa según Basu, pueden ser dividida en las siguientes categorías<sup>4</sup>:

- Agrícolas: incluye cualquier tipo de resto o subproducto de actividades agrícolas
- Forestales: hace referencia a restos encontrados en bosques o extensiones silvestres.
- Municipales: hace referencia a cualquier tipo de desperdicio o subproducto derivado de las ciudades o poblaciones humanas, sean estas de actividades industriales o bien del día a día de las personas.
- Cultivos energéticos: hace referencia a cualquier tipo de cultivo cuyo principal (o único) propósito es el de transformarse en energía directamente.
- Biológicas: comprende los restos de cualquier entidad diferente de la humana, principalmente en la crianza de otras especies animales.

Se cree que, de toda la biomasa disponible actualmente en el mundo, siendo realistas solo un 5% puede ser usada como una fuente de energía lo cual generaría aproximadamente un 26% de la energía consumida en el planeta, equivalente a 6 billones de toneladas de petróleo, siendo los residuos derivados de plantas los que poseen mayor

---

<sup>3</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Design and Theory". 1 ed. Kidlington: Elsevier, 2010. pp. 2, 49.

<sup>4</sup> Ibid., pp. 2, 50.

interés dadas las relaciones que estas poseen con procesos ya existentes, sean estos por prácticas agrícolas, los residuos de estas, actividades forestales, etc. (IFP, 2007)<sup>5</sup>.

La biomasa tiene un interés energético creciente debido a los diferentes usos que se le pueden dar a esta, sea bien por los subproductos obtenidos al someterse a procesos termoquímicos o bien por la combustión directa de la misma (siendo calor o electricidad las principales formas de energía obtenidas de estos residuos) (Basu, 2018)<sup>6</sup>, además la relación entre la vida útil, tiempo de crecimiento, la capacidad de ser obtenida en cualquier parte del planeta y el poder ser transportada con relativa facilidad hacen de esta una gran alternativa a considerar para reemplazar completa o parcialmente combustibles fósiles. La biomasa puede ser dividida en 2 categorías principales según el comité de estandarización europeo propuesto en el cuadro encontrado en “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Biomass Characteristics Chapter 3”: biomasa virgen y biomasa residual, siendo la principal diferencia entre las dos que la segunda agrupa los subproductos de otros procesos, productos o ciclos naturales de otros seres vivos. (Basu, 2018)<sup>7</sup>.

Cuadro 1. Dos principales grupos de biomasas y sus subclasificaciones.

A. Biomasa Virgen	A.1 Biomasa Terrestre	1. Biomasa forestal 2. pastos o hierbas 3. cultivos energéticos 4. Cultivos cultivados
	A.2 Biomasa Acuática	1. Algas 2. Plantas acuáticas

<sup>5</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, “Practical Desing and Theory”. 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. pp. 1, 4.

<sup>6</sup> Ibid., pp. 1, 4.

<sup>7</sup> Ibid., pp. 30,31, 54.

B. Biomasa residual	B.1 desechos municipales	1. desechos sólidos municipales 2. Biosólidos, aguas residuales. 3 gases de vertedero
	B.2 desechos sólidos agrícolas	1. Ganadería y estiércol 2. Residuos de cultivos agrícolas
	B.3 residuos forestales	1. Ramas, hojas y residuos de suelo.
	B.4 desechos industriales	1. maderas de demolición, aserrín. 2. Aceites/grasas usadas.

Fuente: Basu, P. (2018). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, .2.3 Type of Biomass, Table 3.2 (P. 54). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812992-0.00001-7>.

### 2.3 CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA

Debido a la naturaleza de la biomasa (como es el caso de su gran volumen) su transporte y almacenaje es más complicado en comparación con los combustibles fósiles que, sumado a su baja densidad energética, generan resistencia a la normalización y uso de esta como fuente de energía alternativa, es por este motivo que, la realización de tratamientos térmicos y la obtención de productos líquidos o gaseosos genera gran interés<sup>8</sup> (Prabir Basu, 2018). La biomasa puede ser usada para generar diferentes formas de energía, así como productos secundarios dependiendo del tipo de procesos que se emplee, puede ser quemado directamente para generar calor o gases de combustión que transporten energía a otros procesos, ser mejorada incrementando su densidad energética o bien usada como base para otros productos. Los medios de conversión pueden separarse en tecnologías de conversión primaria que se encargan de convertir el combustible en calor o en subproductos transportadores de energía; las tecnologías de conversión secundaria se encargan de tomar lo producido de las tecnologías primarias y

<sup>8</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Desing and Theory". 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. p. 6.

las transforma en otros productos con potencial energético o en formas diferentes de energía (Pande & Bhaskarwar, 2012)<sup>9</sup>. Durante esta conversión, la biomasa puede ser convertida en otros productos, o bien ser oxidada durante una conversión termoquímica completa que, dependiendo de la cantidad de oxígeno presente, los biocombustibles sólidos darán como resultado dióxido de carbono, agua y calor. (Martin Kaltschmitt, 2018)<sup>10</sup>.

Dependiendo de los procesos empleados, de las temperaturas usadas, así como de los posibles productos derivados de los procesos, las conversiones termoquímicas pueden ser divididas en las siguientes categorías (Basu, 2018)<sup>11</sup>:

Cuadro 2. Comparación de procesos de conversión termoquímica.

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Catalizador	Secado
Combustión	700-1400	≥0.1	No requiere	No requiere, pero ayuda.
Carbonización/ torrefacción	500-900; 200-300	0.1	No requiere	Necesaria
Pirolisis	300-600	0.1-0.5	No requiere	Necesaria
Gasificación	500-1300	≥0.1	No requiere	Necesaria
Licuefacción	250-330	5-20	esencial	No requiere

De manera general, la combustión es la oxidación a una alta temperatura de un combustible en la presencia de oxígeno lo cual genera una reacción exotérmica con

<sup>9</sup> PANDE, Maneesha y BHASKARWAR, Ashok N. (2012). Biomass Conversion to Energy, En: Biomass Conversion. [en línea]. Springer, Berlin, Heidelberg: askar, C. y Baskar, S., Dhillon, R. (eds), 2012. pp. 4, 7.

<sup>10</sup> KALTSCHMITT, Martin. Biomass as Renewable Source of Energy, Possible Conversion Routes. En: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology [Libro electrónico]. New York: Springer. 2018. M. Kaltschmitt, & R. S. A. Meyer. pp. 1206–1207.

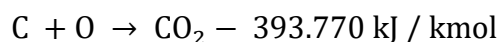
<sup>11</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Desing and Theory". 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. pp. 8,10.

liberación de energía en forma de calor y luz. La carbonización incluye procesos termoquímicos por los cuales la cantidad de carbón es aumentado, haciendo uso de un calentamiento lento de la biomasa entre los 500-900 °C en un espacio con poco oxígeno, la torrefacción se encuentra dentro de este grupo, pero la principal diferencia es que es realizada con menor oxígeno y a una temperatura menor. La gasificación tiene como objetivo el generar productos de gran interés (principalmente gases) los cuales se dan al calentar lentamente la biomasa con bajos niveles de oxígeno; por otra parte, la pirolisis tiene como principal diferencia el darse bajo una atmosfera sin oxígeno. La licuefacción se centra en la descomposición de la biomasa en productos líquidos al descomponer las largas moléculas de esta en presencia de un catalizador. (Basu, 2018)<sup>12</sup>.

## 2.4 COMBUSTIÓN

Según se ha descrito en el libro “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction” la combustión es una reacción química exotérmica de oxidación entre el oxígeno del ambiente e hidrocarburos contenidos en la biomasa, de los cuales los principales productos de combustión estables son el vapor de agua  $H_2O$  y el  $CO_2$ . Las dos principales formas de aprovechamiento de energía de esta reacción son la generación de calor y de electricidad haciendo uso de otros procesos posteriores para aprovechar la energía liberada, además su aprovechamiento se considera uno de los hitos principales en la evolución humana<sup>13</sup>. (Basu, 2018.)

De manera general, se puede ver la fórmula de oxidación exotérmica de 1 Kmol de carbono de manera adecuada en condiciones ideales, producirá 394 MJ en forma de calor: (Basu, 2018)<sup>14</sup>.



---

<sup>12</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, “Practical Desing and Theory”. 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. pp. 9, 10.

<sup>13</sup> Ibid., pp. 11, 12.

<sup>14</sup> Ibid... p. 24.

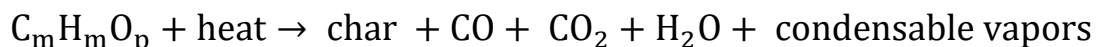
## 2.5 TORREFACCIÓN

La torrefacción es un tratamiento térmico “novedoso” parecido a la carbonización en el cual la biomasa se somete a un lento calentamiento entre las temperaturas de 200–300°C con poco contenido de oxígeno, durante este proceso se incrementan la cantidad de carbono presente, la densidad energética de los desechos, así como la capacidad hidrofóbica de los residuos, a la vez que se reduce el oxígeno contenido. (Basu, 2018)<sup>15</sup>.

Una definición más directa se puede encontrar en el apartado “4.2 WHAT IS TORREFACTION?” en donde P. Basu (2018) define a la torrefacción como “*un proceso térmico en un ambiente inerte y con oxígeno limitado en donde la biomasa es lentamente calentada a una temperatura dentro de un rango de 200-300°C y es retenida ahí durante un tiempo determinado, lo cual resulta en una degradación casi completa de la hemicelulosa, mientras maximiza el rendimiento masico y energético de los productos sólidos*” (Basu, 2018)<sup>16</sup>.

El interés de este proceso relativamente nuevo reside en que la biomasa al ser tratada térmicamente podría ser usada como remplazo del carbón, o bien para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la quema de este para la producción de electricidad. (Basu, 2018)<sup>17</sup>.

De manera general, durante una torrefacción se tendría la siguiente reacción térmica: (Basu, 2018)<sup>18</sup>.



Durante el proceso de torrefacción suceden procesos de de-volatilización y carbonización de la biomasa, dentro de los cuales los polímeros que componen estos residuos

---

<sup>15</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, “Practical Desing and Theory”. 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. p.12.

<sup>16</sup> Ibid., pp. 23, 24.

<sup>17</sup> Ibid., p. 1.

<sup>18</sup> Ibid..., p. 24.

vegetales son degradados a diferentes porcentajes ya que, debido a sus composiciones, el efecto que la temperatura tiene sobre cada uno de estos es diferente, de manera que entre el rango de temperatura de (200–300°C) diferentes secciones se verán afectadas (Basu, 2018)<sup>19</sup>, esto se puede observar de manera más detallada en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Estaciones de degradación y transformación de la biomasa de acuerdo con la temperatura.

Rango	Efectos sobre la biomasa
50-120°C	Esta etapa se conoce como secado no reactivo, existen pérdidas de humedad y cierta cantidad de la masa, aunque esta no se presentan cambios químicos en la estructura de esta.
120-150°C	Ocurre un suavizado de la lignina.
150-200°C	A esta etapa se le llama secado reactivo en donde ocurre una deformación no reversible en la biomasa aun cuando se agregue agua, ocurre el desprendimiento de enlaces de hidrogeno y oxígeno, así como la de-polirizacion de la hemicelulosa.
200-250°C	De-volatilización de la hemicelulosa, en esta etapa los sólidos formados durante la anterior etapa se carbonizan y pierden volátiles, además del quiebre de varios enlaces de hidrogeno, CO y CC, formando líquidos condensables y gases no condensables.
250-300°C	Durante esta fase se descompone gran parte de la hemicelulosa en productos volátiles y solidos; mientras que la celulosa y lignina solo presentan algunas modificaciones, de-volatilización y carbonización parcial de las mismas. La estructura celular de la biomasa es completamente destruida.

<sup>19</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Desing and Theory". 1 ed. Kidlington: Elsevier, 2010. pp. 106, 107.

Fuente: P.C.A. Bergman, A.R. Boersma, R.W.R. Zwart, J.H.A. Kiel. Torrefaction for Biomass Co-firing in Existing Coal-Fired Power Stations. Energy Research Centre of The Netherlands (2005), Figure 2.2 (P. 14). ECN Biomass Report ECN-C-05-013. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:b236c6e7-b1a3-42af-b28b-5239a304376f>.

## **2.6 PLANTAS AROMÁTICAS**

La relación del hombre con las plantas aromáticas es tan estrecha como la relación entre el instinto y la supervivencia del ser humano, ya que durante el avanzar de los años la experimentación, así como uso de diferentes elementos silvestres se hicieron intrínsecos con la vida rutinaria de nuestros ancestros, especialmente aquellos componentes que llamaran nuestra atención, es así que el hecho de que diferentes plantas sobresalieran ante las demás causaron un acercamiento temprano con nuestra especie, destacándose aquellas que por su olor distintivo hicieron que la imaginación humana las incluyeran dentro de los misterios iniciales de las ciencias (Bandoni et al., 2003).

De acuerdo con “Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica” se define una planta aromática como aquella que es capaz de generar un aceite esencial con propiedades determinadas (olor o sabor) luego de algún tipo de proceso, estos últimos no necesariamente deberán ser agradables, sino más bien poseer características diferentes que permitan la creación de diferentes productos<sup>20</sup>.

Debido al interés internacional por estas plantas para diversos usos, aquellos países con climas tropicales y gran variedad de flora han empezado a aparecer en el radar de empresas u organizaciones en búsqueda de diferentes componentes que los hagan destacar en el mercado, de manera que las plantas aromáticas se han convertido en un

---

<sup>20</sup> BANDONI, A. L.; FOLCARÀ, S. C.; & CYTED (Asociación). Subprograma IV. Biomasa como Fuente de Productos Químicos y Energía. Los Recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica. (2.a ed.). 2003. pp. 12, 13.

tema de interés en la elaboración de productos con diferentes aromas, en los campos de etnobotánica, fitoterapia y fitoquímica<sup>21</sup>.

**2.6.1 Citronela.** La Citronela (*Cymbopogon Nardus*) es una planta herbácea, se reproduce fácilmente por división y por semillas, esta planta posee una altura entre 100 y 180 cm, un tallo de 1 hasta 2 cm de diámetro de color púrpura característico, esta especie es originaria de África y Asia tropical pudiendo adaptarse fácilmente a los climas tropicales encontrados en Colombia, puede crecer de una manera sencilla en varios suelos, convirtiéndose en algunas ocasiones en una plaga. Los aceites esenciales que se extraen de esta planta poseen propiedades analgésicas, antimicrobianas e inhibitorias los cuales son preferiblemente extraídos desde las hojas parcialmente secas, además de poseer un característico aroma a limón lo cual hace que posea potencial como ingrediente en productos con aroma; sin embargo, cabe mencionar que la Citronela puede causar reacciones alérgicas en pieles sensibles (Morales Toscano & Solano Gonzalez. 2017)<sup>22</sup>.

Dentro de los principales componentes de su aceite esencial están los monoterpenos y sesquiterpenos, siendo los principales terpenoides el Citronela, citronelol y geraniol. Esta planta, como su familia (*Cymbopogon*) tienen la tendencia de florecer de manera tardía e irregular, es una hierba de múltiples cosechas y resiste a factores externos (Teresita García. 2014)<sup>23</sup>.

---

<sup>21</sup> VILLACRÉS DELGADO, Yesenia Marisol. (2018). Estudio comparativo de la composición química de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon cf. martini*, *Cymbopogon cf. nardus* aplicado en perfumería. Trabajo de titulación. [en línea]. Bioquímica Farmacéutica. Ecuador, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias. Escuela de bioquímica farmacéutica. 2018. p. 6.

<sup>22</sup> MORALES TOSCANO, A. C. y SOLANO GONZALEZ, A. F. Certificación de los aceites esenciales de Palmarosa (*Cymbopogon Martinii*) y Citronela (*Cymbopogon Nardus*) Ingenieros Químicos. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. 2017. p. 20.

<sup>23</sup> TERESITA GARCÍA, Rosita. Obtención de aceite esencial de citronela (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la calidad del aceite. [en línea]. Maestría Ingeniería Química. Resistencia: Universidad Tecnológica Nacional. Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica (QUIMOBIO). Facultad Regional Resistencia. 2014. p. 5.

De acuerdo con los estudios realizados a través de titulación postulado en “Chemical composition of Cymbopogon nardus essential oil and its broad spectrum benefit”<sup>24</sup> se tiene como referencia los siguientes valores para esta biomasa:

- Contenido de agua (%): 5.48 (raiz), 11.15 (hojas)
- C orgánico (%): 18.12 (raiz), 25.30 (hojas)
- N (%): 0.36 (raiz), 0.77 (hojas)

**2.6.2 Patchouli.** El Patchouli (*Pogostemon Cablin Benth*) es una planta aromática, perenne, erecta, con ramificaciones, originaria del sur y sureste de Asia, cuyas hojas poseen aceites aromáticos. La planta crece alrededor de 1 a 1.5 m de altura, sus hojas son de 7 a 10 cm de longitud ovaladas, cubiertas de tricomas sobre toda la epidermis con un color verde variable a plena luz del día; pero verde brillante en la sombra, además presentan un aspecto correoso, con márgenes dentados, pálidos hasta verde purpúreo. Sus flores son pequeñas, delicadas y soportado tanto por espigas axiliares tanto terminales. Esta especie se presenta a una altura de 800-1000 metros sobre el nivel del mar, además requiere suelos profundos, bien drenados, fértiles, algo ácidos, ricos en nutrientes y humus. (Das, 2016)<sup>25</sup>.

Los aceites esenciales obtenidos poseen importancia en la industria debido a su particular fragancia, además de ser usada como una fuerte base dando propiedades fijadoras para evitar la evaporación, por tanto, es altamente usada en productos con fragancia como lo son jabones, detergentes, perfumes, entre otras. Se han realizado diversas investigaciones sobre el potencial de varios fitocompuestos, como analgésico, anti-inflamatorios, anti-microbial, antidepresivo, entre otros. (A. Donelian et al, 2009)<sup>26</sup>.

---

<sup>24</sup> SAPUTRA, N. A., et al. (2020). Chemical composition of Cymbopogon nardus essential oil and its broad-spectrum benefit. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [en línea]. vol 415, Nro 1, 2019. pp. 11, 15.

<sup>25</sup> DAS, Kuntal. Patchouli (*Pogostemon Cablin Benth*) Oils. Chapter 72. Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety. [en línea]. 2016. pp. 634, 635.

<sup>26</sup> DONELIAN, A. et al. Comparison of extraction of patchouli (*Pogostemon cablin*) essential oil with supercritical CO<sub>2</sub> and by steam distillation. En: The Journal of Supercritical Fluids. [en línea]. 2009, vol 48(1). pp. 15, 16.

De acuerdo a los estudios y plasmados en “Thermal and Physical Properties of Patchouli Essential Oil Industry Residue as Renewable Feedstock for Bioenergy”<sup>27</sup> se tienen algunos valores de referencia sobre la caracterización para residuos luego de una destilación, los cuales son de importancia al momento de considerar este tipo de desecho como posible combustible para los cuales se consideraron la biomasa antes y después de realizado el proceso de destilación, así como diferentes partes de las plantas (hojas, tallos, raíces, etc.) usadas para cada análisis luego de haber sido secadas, trituradas y tamizadas en una malla 50, algunos de estos datos pueden observarse a continuación:

- Contenido de agua (siguiendo la norma ASTM D 1762-84 luego de un secado de 2 h a 105°C con su respectivo enfriamiento): 3.88-8.41%
- Contenido de volátiles (siguiendo la norma ASTM D 1762-84 con un calentamiento de 105°C por 2 h con su respectivo enfriamiento, luego de 500°C por 3 minutos para luego ser calentada a 950°C por 5 minutos): 69.95-85.51%
- Contenido de cenizas (siguiendo la norma ASTM D 1762-84 con un calentamiento inicial de 105° por 2 h con su respectivo enfriamiento, para luego ser calentado a 750°C por 6 h): 8.69-18.97%
- Carbón fijo (se realiza como la diferencia entre los resultados obtenidos durante la caracterización): 0.5989-4.1822%
- Poder calorífico inferior (antes de la destilación para mezcla): 13144 KJ/Kg
- Poder calorífico superior (antes de la destilación para las hojas): 15649 KJ/Kg

**2.6.3 Palma rosa.** La Palma rosa (*Cymbopogon Martini*) es una planta herbácea que crece de modo silvestre con una altura entre los 150 y 300 cm, de tallo largo y delgado, sus panículas varían entre 10 a 30 cm de longitud de tono rojizo. Es originaria del sur de Asia, pero puede darse en áreas tropicales. Requieren de una alta exposición a la luz

---

<sup>27</sup> GINTING, Zainuddin, et al. Thermal and Physical Properties of Patchouli Essential Oil Industry Residue as Renewable Feedstock for Bioenergy. En: Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering, [en línea]. 2022, vol 2(1). pp. 14, 15.

solar, teniendo dificultades creciendo con sombras. La principal característica de esta planta es su aroma parecido al de rosas generando especial interés para la creación de productos cosméticos, además, posee propiedades diuréticas, antisépticas y antimicrobianas.

De acuerdo con la bibliografía recolectada, de este tipo de planta se ve beneficiada durante su crecimiento debido a la topografía climática presente en Colombia (clima tropical), así como puede ser encontrada en otros países como el sur de Asia África y Oceanía, se pueden extraer aceites como motia y sofia de los cuales estudios han demostrado tener propiedades antisépticas, antimicrobianas y debido a su alto contenido de geraniol es bastante apetecido en la industria como componente aromático en productos (Morales Toscano & Solano Gonzalez, 2017)<sup>28</sup>.

## **2.7 ACEITES ESENCIALES**

Los aceites esenciales (AE) son una mezcla de compuestos volátiles complejos generados dentro de una planta aromática los cuales poseen un olor o sabor determinado y además un papel determinado en la misma o en una parte de ella (sistema de defensa contra animales, transmisión de compuestos, etc.), los cuales están constituidos por hidrocarburos terpénicos oxigenados, terpenos y sesquiterpenos, que pueden ser aislados por diferentes métodos físicos o químicos. Debido a su origen, los aceites esenciales pueden dividirse en: naturales, artificiales y sintéticos.

Los aceites esenciales son líquidos aromáticos espesos encontrados en las glándulas secretoras de las plantas cuyas propiedades varían según las plantas y las partes de las cuales son extraídos, siendo estas hojas, tallos, flores, etc. Como grupo, estas sustancias son inflamables, no presentan toxicidad, se degradan en la presencia de condiciones

---

<sup>28</sup> MORALES TOSCANO, A. C. y SOLANO GONZALEZ, A. F. Certificación de los aceites esenciales de Palmarosa (*Cymbopogon Martinii*) y Citronela (*Cymbopogon Nardus*) Ingenieros Químicos. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. 2017. p. 19.

ambientales cotidianas (luz, calor, oxígeno, etc.) (Teresita García, 2014)<sup>29</sup>. Debido a las propiedades individuales de estas sustancias, poseen un interés particular dentro de las industrias cosméticas, farmacéuticas y de perfumería. Dentro de las propiedades físicas de los AE se puede mencionar el que son líquidos a temperatura ambiente, son volátiles, no son grasos, densidad inferior a la del agua, además de ser insolubles en la misma, de acuerdo con sus propiedades los AE pueden ser divididos de la siguiente forma (Villacrés Delgado, Yesenia Marisol. 2018)<sup>30</sup>:

Cuadro 4. Clasificación de aceites esenciales.

<b>Consistencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esencias: son líquidos volátiles a temperaturas ambientes.</li> <li>- bálsamos: extractos cuya propiedad principal es el poseer una gran cantidad de ácido benzoico y cinámico.</li> <li>- Resinas: básicamente mezclas de resinas y aceites esenciales u otras combinaciones.</li> </ul>
<b>Origen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Naturales: básicamente AE obtenidas directamente de plantas sin ningún tipo de modificación.</li> <li>- Artificiales: se obtienen al someter los AE a procesos de modificación o enriquecimiento.</li> <li>- Sintéticos: son obtenidos a través de la combinación de sus componentes por síntesis química.</li> </ul>

<sup>29</sup> TERESITA GARCÍA, Rosita. Obtención de aceite esencial de citronela (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la calidad del aceite. [en línea]. Maestría Ingeniería Química. Resistencia: Universidad Tecnológica Nacional. Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica (QUIMOB). Facultad Regional Resistencia. 2014. pp. 3, 5.

<sup>30</sup> VILLACRÉS DELGADO, Yesenia Marisol. (2018). Estudio comparativo de la composición química de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon cf. martini*, *Cymbopogon cf. nardus* aplicado en perfumería. Trabajo de titulación. [en línea]. Bioquímica Farmacéutica. Ecuador, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias. Escuela de bioquímica farmacéutica. 2018. pp. 13, 14, 15.

Fuente: Villacrés Delgado, Yesenia Marisol. (2018). Estudio comparativo de la composición química de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon cf. martini*, *Cymbopogon cf. nardus* aplicado en perfumería. pp 13, 14.

De acuerdo con Morales Toscano, A. C. y Solano Gonzales, A. F (2017)<sup>31</sup>. las técnicas para la extracción de aceites esenciales dependerán en gran manera de la composición de las plantas de interés, un ejemplo de esto puede verse entre la destilación agua-vapor usada mayormente con plantas herbáceas en comparación con la hidrodestilación usada con mayor frecuencia para flores, en donde la primera técnica ofrece aceites con mayor calidad, pero menor volúmenes y la segunda dará mayores cantidades con una calidad reducida.

## **2.8 DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR DE AGUA.**

En términos generales la destilación es básicamente la separación de los AE los cuales están compuestos por volátiles por medio de un proceso térmico, para posteriormente pasar a ser enfriados en algún tipo de intercambiador de calor (Villacrés Delgado, Yesenia Marisol. 2018)<sup>32</sup>.

En este tipo de destilación se separan las sustancias componentes de acuerdo con su insolubilidad en el agua, es considerada como la manera más común de obtener AE, (Morales Toscano & Solano Gonzalez. 2017)<sup>33</sup>. Este tipo de proceso es especialmente útil al momento de separar pequeñas cantidades de una sustancia contenidas en grandes cantidades de sólidos o productos alquitranosos en donde otros procesos de separación

---

<sup>31</sup> MORALES TOSCANO, A. C. y SOLANO GONZALEZ, A. F. Certificación de los aceites esenciales de Palmarosa (*Cymbopogon Martinii*) y Citronela (*Cymbopogon Nardus*) Ingenieros Químicos. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. 2017. p. 21.

<sup>32</sup> VILLACRÉS DELGADO, Yesenia Marisol. (2018). Estudio comparativo de la composición química de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon cf. martini*, *Cymbopogon cf. nardus* aplicado en perfumería. Trabajo de titulación. [en línea]. Bioquímica Farmacéutica. Ecuador, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias. Escuela de bioquímica farmacéutica. 2018. p. 16.

<sup>33</sup> MORALES TOSCANO, A. C. y SOLANO GONZALEZ, A. F. Certificación de los aceites esenciales de Palmarosa (*Cymbopogon Martinii*) y Citronela (*Cymbopogon Nardus*) Ingenieros Químicos. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. 2017. p. 21.

son poco prácticos, en el caso de las plantas aromáticas los aceites de interés se encuentran en los estomas odoríferos que deben ser quebrados para liberar su contenido, para ello se hace uso de vapor de alguna sustancia (en este caso el agua) cuyo punto de ebullición es menor al de los componentes deseados, lo cual involucra una corriente de vapor que calienta estos elementos hasta alcanzar el nivel de cambio de estado al disminuir la temperatura requerida al añadir la tensión del vapor, esto ocurre debido a la ley de Dalton de presiones parciales ya que al tenerse una mezcla de dos líquidos inmiscibles dará como un resultado que se ejerzan tensiones de vapor independientes de cada componente sin importar las cantidades de cada uno, de manera que la temperatura de ebullición de la mezcla será correspondiente a la tensión de vapor cuyo valor será igual a la presión de confinamiento, acto seguido la mezcla es conducida a un intercambiador de calor en donde es enfriada gracias a un refrigerante (generalmente agua) para ser condensados nuevamente y finalmente ser separados por diferencias de densidad en un vaso florentino (Teresita García. 2014)<sup>34</sup>.

---

<sup>34</sup> TERESITA GARCÍA, Rosita. Obtención de aceite esencial de citronela (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la calidad del aceite. [en línea]. Facultad Regional Resistencia. 2014. pp. 9, 11.

### 3. METODOLOGÍA

Se requirió considerar la necesidad de incluir una serie de pasos para definir el procedimiento que se siguió durante el proceso, para esto, en los proyectos de grado disponibles sobre el tema se sugieren una serie de etapas que ayudan a realizar un bosquejo completo (Ortiz Mier & Velandia Rojas, 2018)<sup>35</sup>.

Para iniciar, se parte de los parámetros establecidos en el artículo “Análisis de descomposición térmica de paja de caña de azúcar en atmósferas inerte y oxidativas a través del método termo analítico” (Rueda Y. 2016)<sup>36</sup>, donde se establecen los siguientes pasos:

- Molido de muestras.
- Tamizado de muestras en mallas 28 y 35 de tamices estándar Tyler.
- Selección de muestras.
- Realización de análisis termo gravimétrico.

Luego se tienen los pasos establecidos en “Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos - caracterización y modelado matemático del proceso” (Ortiz Mier & Velandia Rojas, 2018):

- Selección de residuos.
- Secado.
- Triturado.
- Tamizado.
- Análisis fisicoquímico.
- Análisis termogravimétrico.

---

<sup>35</sup> ORTIZ MIER, Nubia Lizeth y VELANDIA ROJAS, Diego Fernando. Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos - caracterización y modelado matemático del proceso. Ingenieros mecánicos. Bucaramanga, Santander. 2018. p.p. 23

<sup>36</sup> RUEDA ORDOÑEZ, Yesid J. Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods. Universidade Estadual de Campinas. 2016.

También se puede tomar como referencia la estructura trabajada en la tesis “Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica” (Cortes Camacho & Mora Chacón, 2019) en el cual se establece el siguiente orden<sup>37</sup>:

- Preparación de las muestras a analizar.
- Caracterización de las muestras (Humedad, trituración, contenido de volátiles, cenizas, carbono fijo, poder calorífico, tamizado, etc.).
- Torrefacción.
- Selección de mejor opción.
- Análisis termogravimétrico.
- Modelo cinético.
- Validación de resultados.

De todos estos lineamientos se procede a establecer una serie de pasos que servirán para cumplir con los requisitos necesarios en orden de llevar a cabo los objetivos de este trabajo y con esto evitar la realización de actividades que no sean de ayuda para finalizar la misma.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado se plantearon los siguientes pasos:

- Recolección de muestras.
- Preparación de muestras para caracterización.
- Caracterización de las biomásas.
- Torrefacción.
- Pruebas de poder calorífico.
- Selección de mejor opción.
- Pruebas de higrometría.

---

<sup>37</sup> CORTES CAMACHO, Laura Tatiana y MORA CHACÓN, Angi Paola. Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica. Ingenieras mecánicas. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial De Santander. 2019, pp 34-36.

Estos pasos definitivos están sujetos a diversas limitaciones que se dieron durante el desarrollo del proyecto, prueba de esto es la ausencia de los pasos para analizar el comportamiento de las muestras durante sus procesos de combustión y transformaciones térmicas (Análisis termogravimétrico e implementación de modelo cinético).

### **3.1 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA Y PREPARACIÓN**

Las biomásas fueron adquiridas del centro nacional de investigaciones para la agro industrialización de especies vegetales, aromáticas y medicinales tropicales (CENIVAM) sección de química orgánica y biomolecular ubicada en la Universidad Industrial de Santander, las cuales son los remanentes del proceso de destilación de aceites esenciales por arrastre de vapor. Fueron escogidos residuos de Citronela, Patchouli y Palma rosa, debido a sus importancias y disponibilidades.

Las tres biomásas primero fueron secadas de manera natural, siendo expuestas a el medio ambiente, usando el sol como fuente de calor. Para esto primero se pesó cada especie, lo cual fue registrado como la masa inicial, para posteriormente ser expuestas al sol por periodos de hasta 4 horas con el fin de simular un secado estándar por al menos 3 días, hasta que al tocarse se pudiera sentir seca. Durante estas sesiones se dispuso de un plástico negro sobre la cual esparcir de manera uniforme los restos y una malla de nilón que sirvió como apoyo para evitar que una parte sustancial de las muestras fueran arrastradas con el viento, a lo largo de las sesiones los residuos se revolvieron de manera cuidadosa sobre el plástico para poder así tratar de tener un secado uniforme durante todo el proceso. Finalmente después de cada secado, las biomásas son recogidas y guardadas de manera cuidadosa para ser almacenadas en sus contenedores iniciales hasta el día siguiente.

Este sistema de secado se considera el más básico con el que el ser humano ha contado; sin embargo, es el que presenta mayores inconveniencias (Bandoni et al., 2003)<sup>38</sup>.

---

<sup>38</sup> BANDONI, A. L.; FOLCARÀ, S. C.; & CYTED (Asociación). Subprograma IV. Biomasa como Fuente de Productos Químicos y Energía. Los Recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica. (2.a ed.). 2003. pp. 126, 127.

Finalmente, de cada especie fueron guardadas muestras representativas en bolsas ziploc con su respectiva identificación en un refrigerador para su futuro uso. En total se almacenaron alrededor de 530 gr por biomasa.

Cuadro 5. Secado de biomasa de manera natural.

Biomasa	Peso inicial Kg	Peso final Kg	Humedad perdida	Porcentaje perdido
Citronela	1.9	1.6248	0.2752	14.48%
Patchouli	3.785	2.015	1.77	46.76%
Palma rosa	2.175	1.350	0.825	39.08%

Figura 1. Secado natural de biomásas.



### 3.2 TRITURADO DE MUESTRAS EN NATURA:

Debido a la falta de homogeneidad que las biomásas presentaban debido a sus características físicas, así como al proceso de triturado pre-destilado, una muestra significativa incluía no solo tamaños diferentes de hoja (como es el caso de la Citronela), pero también partes diferentes de la planta (como pasa con las otras dos) como se puede apreciar en la figura 2, esto conllevaría a realizar un análisis separado para cada una de características por aparte, debido a esto, se optó por realizar un triturado pretratamiento como un intento de no solo volver uniformes las muestras; sino también para reducir sus densidades y poder llevar a cabo las pruebas con mayor masa.

Figura 2. Citronela, Patchouli y Palma rosa recortadas.



Figura 3. Intento de torrefactar Palma rosa sin triturar.



El triturado se realizó en una Trituradora de martillos Wiley Mill, donde se usaron mallas de 2 mm y 1 mm de tamaño para ser almacenadas hasta realizar las posteriores pruebas.

Figura 4. Trituradora de martillos Wiley Mill.



### 3.3 CARACTERIZACIÓN

Para realizar la caracterización de las biomásas, se realizaron los análisis: estructural, próximo (el cual consta de la prueba de humedad, volátiles y ceniza) y de poder calorífico.

**3.3.1 Prueba de humedad.** El objetivo de este proceso es determinar la cantidad de agua contenida en la biomasa luego de un secado natural. Es importante como indicador, ya que una parte de la energía suministrada o generada será absorbida por esta en su cambio de fase, además, el agua contenida en la biomasa puede dar origen a diferentes agentes responsables por la descomposición de esta, así como puede modificar la calidad o composición de los gases generados, lo cual hace crucial su eliminación (durante la torrefacción) para su posterior almacenaje (Cortes Camacho & Mora Chacón, 2019)<sup>39</sup>.

Debido a los puntos anteriormente mencionados, así como de la necesidad de comprender el comportamiento de las muestras en su proceso de secado, se propuso un análisis de pérdidas en las primeras 4 horas (las cuales tienen como objetivo simular los procesos termoquímicos a los que se someterán las muestras) y finalmente a un periodo de 24 horas (en orden de conocer las proporciones máximas de humedad que se pueden esperar).

La prueba se llevó a cabo tomando como base la norma ASTM E1756 – 08 (ASTM E1756 – 08, Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, 2015)<sup>40</sup> método A ya que, debido a las diferentes limitaciones en los recursos disponibles se hizo

---

<sup>39</sup> CORTES CAMACHO, Laura Tatiana y MORA CHACÓN, Angi Paola. Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica. Ingenieras mecánicas. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial De Santander. 2019. pp. 34, 35.

<sup>40</sup> ASTM E1756 – 08, Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. [en línea]. (aprobada 2015). pp. 1, 2. [consultada: 1 de Julio de 2022] disponible en: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E1756+08](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08). 2015.

necesario el realizar ajustes a los procesos mencionados en este guía. De manera que se requiere de:

- Balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg
- Mufla
- Desecador
- Cajas de Petri

Según la norma, los siguientes pasos son realizados para muestras que han sido preparadas previamente de acuerdo con los lineamientos establecidos en la ASTM E1757-01, en las cuales las muestras húmedas recolectadas de cantidades mayores a 20 g son tratadas con un proceso de secado natural a la intemperie y su posterior molida en un molino de cuchillas, estos pasos se hicieron en orden de establecer un estándar de uso; sin embargo, solo se tomaron como una guía.

En forma general los pasos usados fueron los siguientes:

- Lavado y posterior secado de cajas de Petri a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por al menos 1 hora.
- Enfriamiento en desecador hasta alcanzar temperatura ambiente.
- Marcado de cajas de forma aleatoria para identificación de muestras de acuerdo con los rótulos escogidos.
- Pesaje de los contenedores.
- Pesaje de biomasa, aproximadamente 0.5 gr de un tamaño de malla de 1 mm por caja y registrar como masa inicial.
- Localización de los contenedores dentro de la mufla a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por el tiempo acordado de acuerdo con las condiciones del experimento.
- Enfriamiento de las cajas en el desecador hasta alcanzar una temperatura ambiente.
- Pesaje y anotación del nuevo valor de masa.

La principal diferencia respecto a las reglas establecidas en la norma, es el uso de los tiempos, así como el procedimiento sobre el cual se decide el tiempo límite de secado,

esto debido a que los posibles límites a establecerse carecen de algún tipo de orientación y por lo tanto requieren de la prueba y error a través de pesajes para dar por concluido el secado, además que el criterio de registro de las pérdidas de masa se considera muy bajo para las condiciones actuales del laboratorio y por tanto se considera algo poco objetivo intentar replicarlas. Finalmente se menciona la manera en que se realizan los cálculos, ya que en las ecuaciones sugeridas se encuentra la cantidad de material sólido seco y no la cantidad de materia que se considera humedad.

El intervalo de interés es de 4 horas, registrando la pérdida de masa por hora de dos muestras a la vez sin perturbar el proceso de las demás, de modo que no hay que realizar un nuevo calentamiento posterior al pesado, con este fin se usaron 10 muestras en total, siendo 8 para el intervalo de interés y 2 para el límite a 24 horas.

Esto se realizó debido a que, según la literatura encontrada, aun cuando se sugerían límites mayores a las 12 horas, el objetivo final del proceso debía estar enfocado en las ventajas que estos conocimientos podrían traer al tratamiento térmico en cuestión, de modo que parte del interés de esta etapa era el determinar la cantidad de masa que se perdería por evaporación de al menos una hora y que tan significativo sería esto en comparación con la cantidad de agua presente en las muestras. La idea se obtuvo luego de analizar los resultados de las pruebas de secados de volátiles en donde, para evitar la contaminación o exposición de los crisoles, se pensó en dejar en un resecado de 24 horas para asegurar la eliminación completa de rastros de humedad, descubriendo que las variaciones respecto a los perfiles vistos en las pruebas de humedad eran considerablemente pequeños y podrían ser atribuidos a factores medioambientales, esta prueba se convierte en el primer paso dentro de un conjunto de pruebas agrupadas a las que se le designó el nombre código “B-zyoon”.

Para el cálculo del porcentaje total de humedad contenida dentro de la muestra se hace uso de la siguiente relación para determinar el porcentaje de masa total sólida al someter la biomasa a un secado a 105°C sugerida por la norma:

$$\%m_{s105} = \frac{m_{f1} - m_c}{m_{i1} - m_c} * 100$$

Donde:

$\%m_{s105}$  masa total solida seca luego del secado de 105°C.

$m_c$  es la masa del contenedor seco

$m_{f1}$  es la masa combinada final del contenedor y muestra luego del secado a 105°C.

$m_{i1}$  es la masa inicial combinada con el contenedor luego del secado.

Para luego hacer las transformaciones que permitan determinar el porcentaje de humedad de las muestras a través de la expresión:

$$\%m_{w105} = \frac{m_{i1} - m_{f1}}{m_{i1} - m_c} * 100$$

**3.3.2 Secado pre-volátiles.** En orden de asegurar que las pruebas se realizaran con biomasa en base seca, se realizó un pre-secado de 24 horas de los crisoles con la cantidad de masa establecida en la prueba de volátiles, de modo que, la diferencia entre los pesajes será equivalente a la humedad contenida en la muestra, para llevar a cabo las pruebas de contenido de volátiles y cenizas de manera consecutiva, es por esto que para el conjunto de pruebas B-yzoon se realizó un pesaje de 1.8 gr por biomasa inicial, de modo que se estima que para cada paso se contenga la masa necesaria para realizar cada prueba. Se registro:

$$\% m_{wpre} = \frac{m_{ipre} - m_{fpre}}{m_{ipre} - m_{cpre}} * 100$$

Donde:

$m_{cpre}$ : Es el peso del crisol con su tapa.

$m_{ipre}$ : Es el peso inicial del crisol con la muestra.

$m_{fpre}$ : Es el peso final del crisol al final del secado

Se requiere hacer la aclaración que durante el almacenaje y manejo de los contenedores es posible que estos absorban algo de humedad, de modo que se comparan los pesos entre procedimientos, ya que las pruebas se hacen en base seca y se asumió que las temperaturas son suficientes para eliminar la masa ganada.

$$\% W_{hum} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} * 100$$

Donde:

$w_1$ : Es el peso final luego de terminar una prueba.

$w_2$ : Es el peso antes de iniciar la siguiente prueba.

**3.3.3 Prueba de volátiles:** Esta prueba tiene como finalidad determinar la cantidad de masa que es capaz de ser liberada como gas bajo condiciones específicas, para esto, se usó como base la norma ASTM E872-82 “Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels”<sup>41</sup>. Debido a ciertas limitaciones con los instrumentos disponibles se realizaron modificaciones en los pasos a seguir, de modo que se realizó un pre-secado de las muestras a analizar por un periodo de 24 horas, acto seguido se prosiguió con el análisis de material volátil expresado en la guía y finalmente, el remanente se somete a la prueba de cenizas que se verá más adelante. Las diferentes biomásas fueron tamizadas para una malla número 100. Se deberá hacer uso de los siguientes recursos:

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 mg
- Mufla
- Desecador
- Crisol

---

<sup>41</sup> ASTM E872-82 “Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultada: 1 de Julio de 2022]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E872+82\(2013\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82(2013)).

El procedimiento fue el siguiente:

- Pesaje inicial de las muestras contenidas en los crisoles luego del pre-secado.
- Insertar el crisol en el horno previamente programado a una temperatura de  $950 \pm 20$  °C.
- Mantener a esta temperatura por aproximadamente 7 minutos para luego ser retirado.
- Dejar enfriar el crisol hasta una temperatura ambiente sin destaparlo.
- Una vez se halla enfriado, registrar el nuevo peso.

Para el cálculo de la cantidad de materia perdida en la muestra se debe usar la siguiente expresión:

$$\%Volatiles = \frac{m_{vi} - m_{vf}}{m_{vi} - m_{vc}} * 100$$

Donde:

$m_{vi}$ : peso inicial combinado con el crisol.

$m_{vc}$ : peso del crisol y cobertura.

$m_{vf}$ : peso final combinado con el crisol.

**3.3.4 Prueba de contenido de cenizas.** El objetivo de esta prueba es determinar la cantidad de ceniza contenida en la biomasa luego de realizar un secado con oxidación a 575 °C. El procedimiento fue basado en la norma ASTM E1755-01 “Standard Test Method for Ash in Biomass”<sup>42</sup> la cual también define la ceniza como cualquier residuo solido inorgánico remanente luego de realizar el proceso. Se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos deben provenir de muestra en base seca, las cuales fueron sometidas con anterioridad al procedimiento para determinar la cantidad de volátiles, por tanto, se supone que los crisoles se encuentran sin humedad. Se usaron los siguientes recursos: (como se justifica que el contenido de las cenizas no reacciona en las pruebas de volátiles)

---

<sup>42</sup> ASTM E1755-01 “Standard Test Method for Ash in Biomass. [ En línea]. (aprobada en 2015). [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E1755+01\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01(2015)).

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 mg
- Mufla
- Desecador
- Crisol

Se siguió el siguiente procedimiento:

- Registrar el peso de los crisoles como  $m_{cont}$  el cual se determinó al inicio de la prueba.
- Registrar la masa inicial remanente en el contenedor y las masas combinadas.
- Para evitar flamas, primero calentar la muestra hasta 250 °C a una rata de 5 °C/min y mantener a esta temperatura durante 30 minutos.
- Calentar el contenedor con las muestras a  $575 \pm 25$  °C por al menos tres horas.
- Retirar el crisol para dejar enfriar hasta temperatura ambiente.
- Registrar el peso actual y volver a calentar con periodos de una hora hasta obtener una diferencia de peso menor a 0.3 mg.
- Finalmente anotar el valor como  $m_{ash}$  como el combinado del contenedor y las cenizas.

Finalmente, el porcentaje de cenizas contenidas se determina siguiendo la expresión:

$$\%Cenizas = \frac{m_{fash} - m_{cont}}{m_{iash} - m_{cont}} * 100$$

Donde:

$\%Cenizas$ : porcentaje de cenizas contenida en base seca.

$m_{fash}$ : masa final de las cenizas y el contenedor.

$m_{cont}$ : masa del contenedor.

$m_{iash}$ : masa inicial de biomasa seca y contenedor.

**3.3.5 Cantidad de carbón fijo.** El carbono fijo es el resultante de las muestras luego de una de-volatilización de estas después de un tratamiento térmico, este además de incluir carbono elemental, también contendrá cualquier residuo carbonoso formado durante el calentamiento de los residuos. Este valor es importante a tener en cuenta durante la construcción de reactores además de ser usado para el análisis de posibles combustibles

durante la gasificación, ya que la calidad de los productos obtenidos se verá influenciada por este valor. (Basu, 2018)<sup>43</sup>.

Para el contenido de carbono fijo se obtuvo en base a los resultados obtenidos de volátiles y cenizas, para esto se tomó la cantidad de la biomasa seca como 100% y se substrajeron los porcentajes de las otras pruebas de análisis próximo excepto por la de humedad. Se tomo la siguiente expresión:

$$\%C_f = 100 - \%Cenizas - \%Volatiles$$

**3.3.6 Análisis elemental.** Como parte de la caracterización de cualquier biomasa se requiere indagar en la composición de esta, esto es importante ya que permite anticipar el comportamiento y la relación que tendrá bajo diferentes circunstancias, de manera que investigadores puedan planear alrededor de posibles resultados en base de estos datos. Es debido a esto que diferentes metodologías para poder prever la composición elemental sin requerir de avanzadas instalaciones de laboratorio, como es explicado en el trabajo investigativo “A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials” por PARIKH, Jigsha et al<sup>44</sup>. En el cual exponen que una manera más practica de obtener esta información es el hallar relaciones con otras pruebas de caracterización más accesibles, además señalan que aunque se han realizado grandes avances en el modelador del comportamiento térmico de las biomásas, se requiere de un conocimiento previo de la composición elemental, haciendo estos modelos parcialmente dependientes de pruebas más complejas antes de poder ser usadas, ignorando las posibilidades de usar pruebas “menos complejas” como punto de partida.

---

<sup>43</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, “Practical Desing and Theory”. 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. p. 82.

<sup>44</sup> PARIKH, Jigsha; CHANNIWALA, S.A; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials [en línea]. En: FUEL. Vol., 86, (2017). Pag 1710-1719. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/244067708\\_A\\_correlation\\_for\\_calculating\\_elemental\\_composition\\_from\\_proximate\\_analysis\\_of\\_biomass\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/244067708_A_correlation_for_calculating_elemental_composition_from_proximate_analysis_of_biomass_materials)

Para el estudio los investigadores reunieron literatura disponible en una gran variedad de biomásas de base forestal o residuo agrícola en orden de presentar una mayor aplicabilidad. Para esto las literaturas analizadas siguieron los estándares ASTM D 2013-86 para la preparación de muestras, ASTM D 3172-73(84) para los análisis próximos, ASTM D 3173-87 para el cálculo de los valores de humedad, ASTM D 3175-89 para los análisis de cantidad volátil, ASTM D 3174-89 fue usada como guía para el análisis de ceniza, diferencia entre los valores mencionados se usó para el valor del carbón fijo y finalmente la ASTM Standard D 3176 hasta 79– 84 fue usada para el análisis ultimo. Se uso información sobre 250 especímenes de los cuales 200 fueron usados para la generación de las relaciones y 50 para la comprobación de estos. Posteriormente de los análisis se hallaron las siguientes expresiones que parten de las cantidades de carbono fijo (FC) y material volátil (VM) en porcentajes masicos en base seca.

$$C\% = 0.637FC + 0.455VM$$

$$H\% = 0.052FC + 0.062VM$$

$$O\% = 0.304FC + 0.476VM$$

### 3.4 TORREFACCIÓN

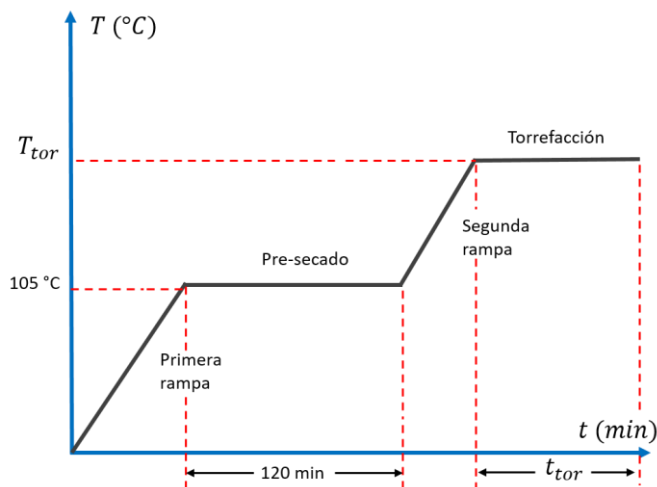
Como fue descrito con anterioridad, la torrefacción es un proceso isotérmico que tiene como objetivo mejorar características de combustible de varios materiales orgánicos, es por ello, las diferentes biomásas fueron sometidas a procedimientos de calentamiento para diferentes combinaciones de tiempo y temperatura. El proceso en cuestión constó de los siguientes pasos:

- Selección y pesaje de 2.5 gr de biomasa.
- Pesaje y registro del peso de cada contenedor.
- Calentar los contenedores con biomasa hasta alcanzar 105 °C.
- Secar a temperatura constante por 2 horas.
- Volver a calentar las muestras hasta alcanzar la temperatura de torrefacción ( $T_{tor}$ ).

- Torrefactar durante el tiempo de torrefacción ( $t_{tor}$ ).
- Enfriamiento posterior hasta alcanzar la temperatura ambiente en el desecador.
- Pesaje final y almacenaje.

El proceso térmico seguido puede verse de la siguiente manera:

Figura 5. Gráfico del proceso de torrefacción.



Las rampas de calentamiento entre las isothermas fueron de 5 °C/min para todos los casos. Durante la primera rampa y el pre-secado las cajas Petri se mantuvieron abiertas, permitiendo así la evaporación de la humedad en las muestras; luego los contenedores son tapados para simular una atmosfera reductora durante el proceso de torrefacción.

Las temperaturas y tiempos de torrefacción seleccionados fueron los siguientes:

Cuadro 6. Tabla de experimentos para temperaturas y tiempos de torrefacción.

Experimento	$T_{tor}$ (°C)	$t_{tor}$ (min)
1	200	15
2	200	30
3	250	15

4	250	30
7	275	15
8	275	30
5	300	15
6	300	30

De modo que, la designación para cada experimento fue dada por el número del nivel acompañada de la identificación de la especie (“X” para Citronela, “Y” para Patchouli, y “Z” para Palma rosa).

Las pruebas de torrefacción, humedad, volátiles, cenizas, así como los secados, fueron realizadas en un horno mufla marca Terrigeno modelo D8, en la cual se pueden programar temperaturas, tiempos estáticos y tiempos de transición para lograr las rampas.

Figura 6. Honro mufla Terrigeno D8.



**3.4.1 Triturado de torrefacciones.** Es posible que, debido a diferentes factores como la humedad contenida o la composición de las biomásas, la cantidad de masa que puede obtenerse al realizar el tamizado dependía de la planta en cuestión, así como del estado del tratamiento térmico, por este motivo se tomó la decisión de hacer un triturado adicional

para las muestras en natura, así como las torrefactadas, con el fin de reducir aún más el tamaño de grano. Para ello se usó un molino de cuchillas de acero inoxidable marca Elite Cuisine modelo ETS-630B con una capacidad máxima de 32 gr. posee una potencia de 150 vatios.

Figura 7. Molino Elite Cuisine modelo ETS-630B.



### 3.5 PODER CALORÍFICO.

De manera simple, el poder calorífico es la cantidad de energía que es desprendida durante un proceso de combustión por unidad de masa o volumen a determinadas condiciones (proceso inicia a los 25°C y luego de la reacción se enfría hasta llegar un punto final específico). De esta propiedad se tienen en cuenta dos valores, el poder calorífico superior o PCS (HHV) el cual considera que los productos son enfriados hasta el punto de partida y el vapor resultante condensado; así como el poder calorífico inferior o PCI (LHV) en donde el vapor no se condensa y por lo tanto no se puede hacer uso de toda la energía liberada durante la reacción. (Basu, 2018)<sup>45</sup>.

La prueba de poder calorífico tiene como objetivo determinar las mejores condiciones de torrefacción, para lo cual nos fijamos en la densidad energética obtenida (MJ/Kg) de las

---

<sup>45</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Desing and Theory". 1 ed. Kidlinggton: Elsevier, 2010. p. 82.

biomasas en base seca, de modo que, el poder calorífico obtenido corresponderá al superior (PCS). La prueba se llevó a cabo en el calorímetro Parr modelo 6200, el cual cuenta con una bomba de oxígeno del tipo isoperibolico Parr 1108. Para esto se requiere de la compresión de biomasa en forma de pellet en una prensa, luego se registró el peso de este para asignar una cantidad adecuada de ácido benzoico con la cual hacer el montaje con una mecha en la bomba de oxígeno y finalmente se introduce en el calorímetro.

Figura 8. Calorímetro Parr modelo 6200 con Bomba de calor Parr 1108.



Debido a las limitaciones presentes por problemas a nivel mundial se hizo necesario establecer los valores PCS de las biomasas sin ningún tipo de proceso térmico de manera teórica, para lo cual se investigaron antecedentes en las biomasas seleccionadas, los limitados resultados de estas investigaciones fueron planteados en las secciones 2,6, 2,7 y 2,8. En la literatura se encontró que el poder calorífico superior del Patchouli es aproximadamente 15649 KJ/Kg para las hojas y 13144 KJ/Kg para la mezcla de diferentes partes de la planta; sin embargo para las otras dos especies se hizo necesario hacer uso de modelos matemáticos expuesto en “Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis” (2017) como punto de referencia, en estos se usaron diferentes fuentes de biomasa con el objetivo de encontrar un modelo que pudiera ajustarse a los valores reales de manera aproximada; sin embargo, para la construcción de estos

modelos se reconoce que en algunos casos los contenidos volátiles, de carbono fijo y agua pueden variar en gran medida debido a la composición única de cada desecho. En el caso del carbono fijo tiene un efecto positivo, el agua contenida decrece la energía liberada al producirse la combustión, la ceniza tiene un efecto negativo ya que absorberá parte de la energía liberada; por otra parte los volátiles pueden desprenderse en gases no combustibles que absorberán energía (Özyuğuran & Yaman, 2017)<sup>46</sup>, de modo que cada modelo planteado tiene en cuenta estos resultados de los análisis próximo usando los estándares ASTM, cabe destacar que para esto los datos usados se obtuvieron de muestras secas. En el siguiente cuadro se exponen los resultados de los análisis próximos de las biomásas escogidas:

Cuadro 7. Resultado de análisis próximo de biomásas.

Resultado de análisis en base seca					
Code	Biomasa	Volátiles %	Carbono fijo %	Ceniza %	Poder calorifico superior (MJ/Kg)
1	Elaeagnus	76.43	22.67	0.90	19.80
2	green bean stem and husk	77.88	12.52	9.60	16.86
3	red lentil hull	74.73	20.03	5.24	18.27
4	chickpea husk	79.70	16.32	3.98	18.26
5	cornstalk	76.79	16.02	7.19	16.55
6	tobacco waste	72.85	11.78	15.36	14.51
7	broad bean husk	74.97	17.33	7.70	16.24
8	apricot stone	82.03	16.26	1.61	19.79
9	apricot pulp	78.80	20.12	1.08	18.52
10	Peach pulp	71.21	23.34	5.44	18.23
11	damson plum stone	82.33	16.67	1.00	21.23
12	coconut shell	83.01	15.97	1.02	20.24
13	cornelian cherry stone	79.27	18.67	2.06	19.84
14	cacao husk	75.03	20.56	4.41	17.85
15	peanut husk	79.32	20.53	0.15	19.16
16	broad bean husk	74.88	19.40	5.73	16.80

<sup>46</sup> ÖZYUĞURAN, Ayşe y YAMAN, Serdar. Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. En: Energy Procedia. [en línea]. 2017, vol 107. pp. 130-133.

17	almond shell	81.70	14.82	3.48	19.53
18	thyme	75.04	16.00	8.96	18.16
19	walnut shell	82.98	16.12	0.90	20.03
20	locust bean	70.29	24.16	5.54	18.04
21	apple pulp	82.56	15.13	2.31	19.85
22	sunflower stem	75.09	13.81	11.10	16.18
23	sour cherry stem	77.48	17.16	5.36	18.27
24	soybean residue	80.01	13.54	6.45	19.26
25	pea stem	74.67	12.27	13.06	16.31
26	pine cone	80.92	17.48	1.60	20.07
27	peach stone	86.42	12.61	0.97	20.31

Fuente: Özyuğuran, A., & Yaman, S. (2017). Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. Energy Procedia, P. 133.

Özyuğuran, A. & Yaman, S. concluyeron que, aunque no se puede establecer una relación directa entre los resultados con el potencial energético de las especies ya que varían en gran medida, si se puede hacer una correlación entre el contenido de carbono fijo y la ceniza, siendo:

- Valor más bajo de volátiles: 70.29% Locust vean (20)
- Valor más alto de volátiles: 86.42% Peach Stone (27)
- Valor más bajo de carbón fijo: 11.78% tobacco waste (6)
- Valor más alto de carbón fijo: 24.16% Locust vean (20)
- Valor más bajo de cenizas: 0.15% Peanut husk (15)
- Valor más alto de cenizas: 15.36% Tobacco waste (6)
- Valor más bajo de poder calorífico superior: 14.51 MJ/Kg Tobacco waste (6)
- Valor más alto de poder calorífico superior: 21.23% MJ/Kg Plim Stone (11)

Ecuaciones empíricas fueron desarrolladas usando el método de mínimos cuadrados ordinarios (Ordinary Least Squares) usando modelos lineales (1-4) como no lineales (5-8), los cuales son la base para los valores teóricos de PCS para las biomásas vírgenes.

Cuadro 8. Ecuaciones empíricas para predecir el poder calorífico.

N Eq.	Ecuación	$r^2$	Desviación (MJ/Kg)
1	$HHV = 167.2 - 1.449VM - 1.562FC - 1.846A$	0.827	1.483
2	$HHV = -17.507 + 0.3985VM + 0.2875FC$	0.826	1.484
3	$HHV = 22.3418 - 0.1136FC - 0.3983A$	0.827	1.482
4	$HHV = 10.982 + 0.1136VM - 0.2848A$	0.827	1.482
5	$HHV = -18.37 - 0,8469FC - 1,1251A + 4420/VM$	0.837	1.493
6	$HHV = 44.336 + 0.286FC - 2394.7/VM$	0.812	1.469
7	$HHV = 28.296 - 0.2887A - 656.2/VM$	0.823	1.479
8	$HHV = 18.297 - 0.4128A + 35.8/FC$	0.832	1.487

Donde VM (Volatile mater) contenido de volátiles, FC (Fixed carbon) contenido de carbono fijo y A (Ash) contenido de cenizas.

Fuente: Özyuğuran, A., & Yaman, S. (2017). Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. Energy Procedia, Table 2. Equations. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149>. P. 135.

### 3.6 HIGROMETRIA

Esta prueba tiene como finalidad determinar la capacidad que poseen las muestras en tratadas para absorber agua del ambiente. En el caso de la biomasa, la absorción de humedad representa un problema para su almacenamiento durante largos periodos de tiempo, siendo la reducción de esta propiedad uno de los puntos de interés al realizar el tratamiento de torrefacción.

La prueba tiene como objetivo poner en contacto la biomasa a un ambiente sobresaturado y determinar el cambio en la masa; sin embargo, los equipos para este tipo de procedimiento no son de fácil acceso, por lo cual se hizo necesario el planteamiento de una prueba equivalente, es así como se propuso usar como medio saturado agua líquida convencional, además del uso de contenedores porosos que permitiera el almacenamiento y absorción.

Figura 9. Contenedores porosos, recipientes y escurridores.



Basicamente la prueba contituye de contenedos hechos de Pomys familia recortados y sellados usando silicona liquida simulando pequeñas bolsas porosas, recipientes de agua y escurridores (como puede apreciarse en la figura 8). Para las pruebas se usaron 60 c.c de agua, garantizando que las bolsas quedaran totalmente sumergidas para y asi hubiera el mayor contacto con el liquido, se sumerjen 1 gr de biomasa por 1 hora para despues dejarlas escurriendo por lo menos unos 10 minutos, en teoria, el cambio de masa en los recipientes seria la suma del agua evaporada en el ambiente, absorbida por el contenedor y la biomasa.

La prueba de higrometría fue diseñada con dos partes, en la primera se mide la cantidad de agua que se pierde durante el proceso de sumersión usando los paquetes conteniendo biomasa seca, teniendo en cuenta el agua que se pierde por evaporación en el medio ambiente por lo que se usaron dos contenedores como punto de referencia y adicionalmente se tomó un promedio de absorción de agua para los paquetes. Para la segunda parte 2 gr de la biomasa contenida se somete a un proceso de secado de al menos 10 horas en la cual se espera toda el agua absorbida se evapore.

## 4. RESULTADOS EN INVESTIGACIÓN

### 4.1 ANÁLISIS PRÓXIMO

**4.1.1 Contenido de humedad.** Como fue descrito en el apartado 3.3.1, se prepararon 10 muestras de 0,5 gr por cada biomasa, se registraron sus pesos iniciales y acto seguido se sometieron a un secado de 105 °C, cada hora se retiraron 2 cajas Petri de la mufla para luego de enfriar medir sus pesos hasta completar un total de 4 horas. Las dos últimas muestras se retiraron luego de 24 horas de secado, garantizando la eliminación total de toda humedad contenida.

Estos fueron los resultados obtenidos para cada biomasa usando el método planteado B-yzoon:

Cuadro 9. Valores promedios de humedad usando el método B-yzoon.

Promedios de valores de humedad para cuadro de 4 h y 24 h						
Biomasa	1 h	2 h	3 h	4 h	24 h	Promedio
Citronela	8.17095	8.8505	8.5085	8.5695	8.3058	8.481
Patchouli	9.2337	9.4028	9.1978	9.1912	9.3179	9.2687
Palma rosa	8.6037	9.2774	9.0253	9.2565	9.0537	9.0433

Cabe mencionar que la humedad contenida en cada biomasa es variable debido a factores como la humedad en el ambiente, almacenaje, muestreo, manejo de las pruebas, entre otros. Sin embargo, esto debería aportar una idea de cuánto podría perderse durante la fase de secado y durante la torrefacción.

Figura 10. Arreglo de muestras en secado de 24 h.



Otras posibles variables para tener en cuenta para futuros trabajos fueron encontradas por prueba y error durante las primeras fases iniciales de esta prueba, en donde se intentó usar una misma muestra para medir pesajes de acuerdo con la norma ASTM E1756 – 08 (ASTM E1756 – 08, Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, 2015), dentro de las cuales se pueden mencionar:

- Uso de la misma muestra para pesajes en cambios de masas sin las adecuadas condiciones de laboratorio conllevan a medidas poco fiables y ganancias en humedad a la hora de manipularlas.
- Manejo de varias muestras al tiempo (más de 3) provoca resultados poco fiables, especialmente durante los procesos de enfriamiento en el desecador y apertura del horno.
- La distribución del calor en el horno ha probado ser algo dispareja, aunque esto no parece afectar resultados que implican tiempos relativamente altos, pueden presentar efectos notables respecto a la precisión (evidenciado en las primeras pruebas de humedad y las pruebas de torrefacción).

**4.1.2 Prueba de volátiles.** Como fue descrito en el postulado 3.3.2, se inició con un contenido de 1,8 gr. los cuales fueron sometidos a un pre-secado de 24 horas para eliminar todo rastro de humedad (prueba en base seca).

Los resultados expandidos pueden ser encontrados en el apéndice respectivo, la versión resumida de la prueba B-yzoon sección volátiles se presenta a continuación.

Cuadro 10. Resumen de resultados para pruebas de volátiles usando prueba B-yzoon.

Pruebas de secado y volatiles para las muestras.		
Biomاسas	Humedad %	Volátiles %
Citronela	8.30966	74.1575
Patchouli	9.80111	70.9185
Palma rosa	8.14274	72.5257

Aunque este tipo de diseño de prueba involucra más horas de trabajo con las mismas muestras, permite tener un control más grande sobre la fiabilidad de las mismas, ya que los principales problemas encontrados sobre experimentos realizados inicialmente pueden ser fácilmente solucionados, principalmente el garantizar que el procedimiento se realice en base seca de la misma manera que evitar que los contenedores usados absorban humedad del medio, especialmente en días húmedos y sin un desecador adecuado.

Figura 11. Resultados de prueba de volátiles.



**4.1.3. Prueba de cenizas.** Como fue establecido en el apartado 3.3.3, las pruebas de cenizas fueron realizadas partiendo de los remanentes de las pruebas de volátiles,

partiendo generalmente de 0,5 gr. en base seca, algunas consideraciones que se tienen en cuenta para esta prueba es la incidencia de la humedad en el ambiente durante el enfriamiento y las mediciones, ya que, se espera una variación tope de 0.0003 gr establecidos por la norma para dar por finalizada la prueba, sin embargo, es debido a este factor que se ven casos donde, la masa aumenta en relación a la toma anterior.

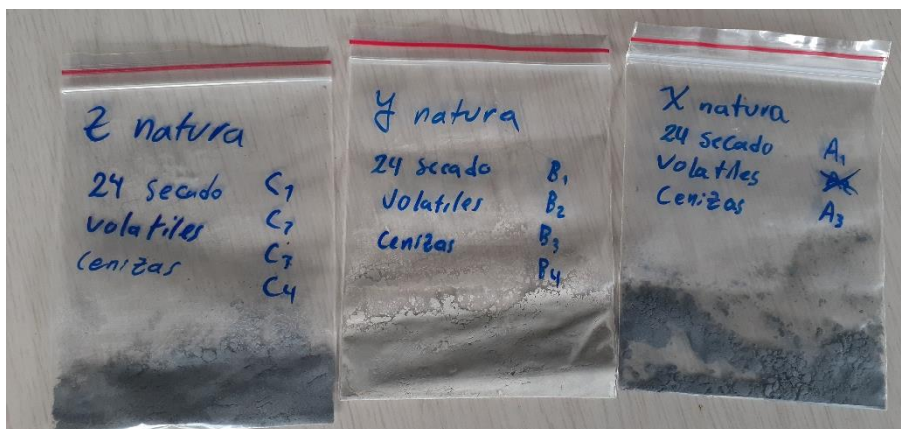
Cuadro 11. Cenizas de biomásas.

Contenido de cenizas			
Biomasa	Espécimen	% Cenizas respecto a masa inicial pre-volátiles	Promedio de contenido de cenizas.
Citronela	A1	5.737258932	5.655182485
	A3	5.573106038	
Patchouli	B1	10.39709003	10.41021038
	B2	10.4508827	
	B3	10.46747343	
	B4	10.32539538	
Palma rosa	C1	9.264732493	9.287764831
	C2	9.300791557	
	C3	9.246637312	
	C4	9.338897962	

Durante estas pruebas se pudieron apreciar algunas particularidades ya que, por ejemplo, como es el caso del Patchouli en el cual se requirió de la mayor cantidad de intervenciones para lograr una estabilidad, debido a algunos problemas con las jornadas académicas, se hizo necesario el almacenamiento de cada una de las probetas en el desecador por más de 5 horas luego de su enfriamiento. Adicionalmente se debe señalar la particularidad en los resultados de la Citronela que al parecer no muestra el mismo comportamiento de las otras dos especies, aunque este comportamiento puede derivarse a la química interna de la planta, también se podrían proponer otras circunstancias que pudieran afectar los resultados, principalmente el hecho de que una de las probetas estallo durante el experimento y que durante el manejo de las dos restantes se presentó el desprendimiento de la pestaña de la probeta A1 lo que implicó un cambio en el peso

de referencia (aun cuando no hubo ningún derrame del contenido o apertura del crisol), todas estos detalles pueden ser observados en la sección de apéndices.

Figura 12. Resultados finales de las pruebas B-zyoon.



**4.1.4 Contenido de carbón fijo.** Como se mencionó el capítulo anterior, el contenido de carbono fijo se obtuvo de la diferencia entre el total completo y los resultados de volátiles, así como de cenizas.

$$\%C_f = 100 - \%Cenizas - \%Volátiles$$

De esta expresión se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla.

Cuadro 12. Resumen de análisis próximo de biomásas y los valores de carbono fijo.

Biomasa	Humedad%	Volátiles%	Cenizas%	Carbón Fijo%
Citronela	8.48	74.15	5.655	20.2
Patchouli	9.268	70.91	10.410	18.68
Palma rosa	9.043	72.52	9.287	18.19

**4.1.5 Análisis elemental.** Como fue mencionado en el capítulo 3, para usar las expresiones del contenido elemental se hacen uso de los resultados obtenidos en las pruebas de análisis próximo teniendo en cuenta que estas fueron realizadas en base

seca, se debe mencionar que en para la investigación se asume que el contenido de oxígeno, hidrogeno y carbono presente están principalmente agrupados dentro del carbono fijo y material volátil de cada biomasa, mientras se supone el resto de la composición (el resto del 100%) estará comprendida por otros elementos que no reaccionarían o bien que quedarían como remanentes como cenizas, por lo tanto solo se requiere de estos datos para encontrar estos elementos. De manera que se calculó:

Cuadro 13. Composición elemental teórica.

Biomasa	Humedad%	Volátiles%	Cenizas%	Carbón Fijo%	Carbono %	Hidrogeno %	Oxigeno %
Citronela	8.48	74.15	5.655	20.2	46.60565	5.6477	41.4362
Patchouli	9.268	70.91	10.41	18.68	44.16321	5.36778	39.43188
Palma rosa	9.043	72.52	9.287	18.19	44.58363	5.44212	40.04928

## 4.2 ANÁLISIS DE TORREFACCIONES

Las torrefacciones se llevaron a cabo siguiendo el método explicado en el apartado 3.4. de este proceso se halló la cantidad de masa que se perdió para cada ítem, de modo que se pudo corroborar que, a una mayor temperatura y tiempo de torrefacción, mayor es la perdida. Además, se debe destacar los diferentes problemas durante el proceso, dentro de ellos destacan la dispersión de los resultados por prueba, posiblemente debido a la distribución de temperatura en la mufla, la constitución propia de cada muestra o la cantidad de humedad liberada durante la fase de secado, los resultados variaron de manera notoria al cambiar de posición, cantidad de muestras y tiempo de enfriamiento, ocasionando problemas cuando fue necesario realizar posteriores repeticiones con el fin de aumentar la masa disponible en pruebas. Es por estos motivos que se utilizó la desviación estándar y estándar porcentual como factor decisivo a la hora de aceptar los resultados (las muestras debían tener una desviación porcentual menor al 5%).

Figura 13. Problemas de distribución para un mismo nivel de diferentes biomazas.



En orden de obtener la mayor cantidad de masa torrefactada disponible para pruebas, las muestras luego fueron trituradas en orden de reducir su tamaño sabiendo que este proceso no afecta las propiedades de la torrefacción, cabe mencionar que, debido a la cantidad limitada que otorgaba cada prueba, además de las dificultades ya mencionadas, se hizo necesario preparar más de 3 torrefacciones por ítem a medida que se necesitaban en posteriores procesos pero teniendo presente que los resultados se encontrarán en el rango de masa (poca dispersión, se tomó como tope una dispersión porcentual menor al 5 %) en relación a sus predecesores.

Figura 14. Recolección de biomasa adicional para cada tratamiento.



Luego de someter cada una de las muestras a los diferentes tratamientos térmicos descritos en el capítulo 3, se procede a hacer un análisis de los diferentes resultados obtenidos, para esto se debe aclarar que los valores numéricos recolectados de las pruebas no representan nada en particular por si solos, por lo cual se hizo necesario el imponer una serie de reglamentaciones o restricciones que permitan tener un bosquejo objetivo de los valores analizados, de manera que algunas de las consideraciones a tener en cuenta son las siguientes:

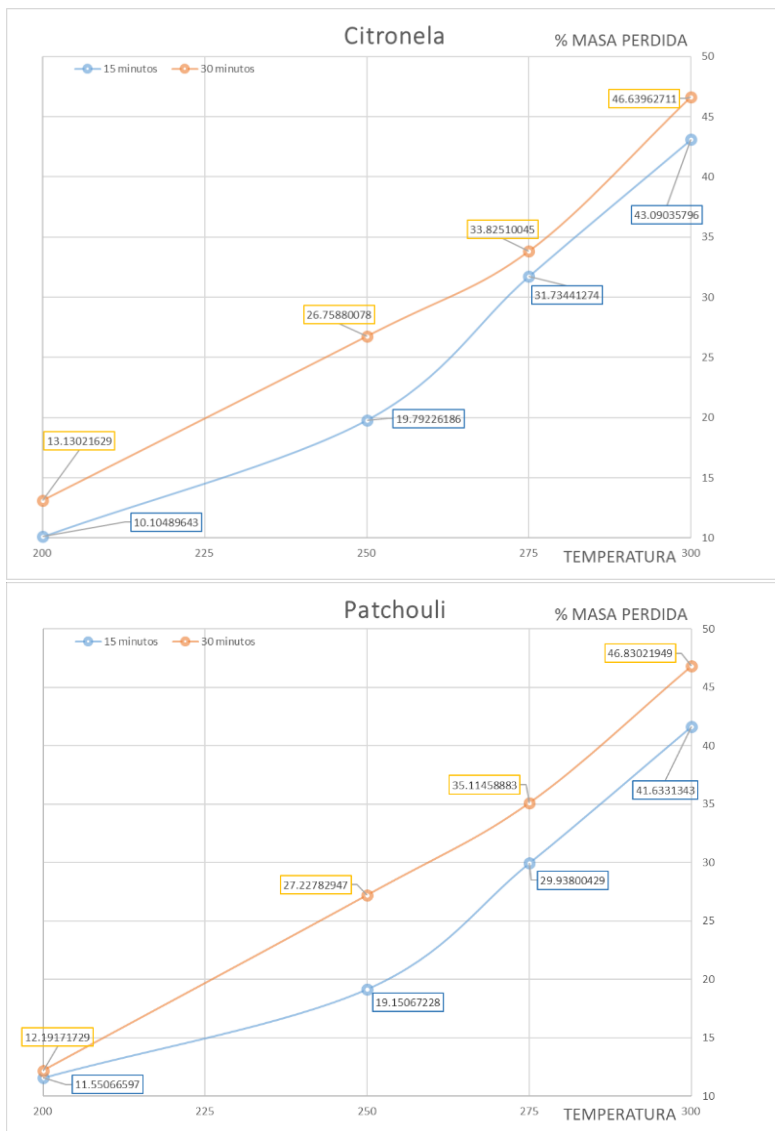
- En primer lugar, se determina que la desviación estándar porcentual no deberá exceder un valor de 5% (o al menos estar cerca de este) para garantizar así la homogeneidad o certeza de las propiedades analizadas posteriormente.
- La masa recolectada por cada uno de los niveles de tratamiento debió ser suficiente para poder llevar a cabo pruebas posteriores, por lo cual en algunos casos fue necesario el repetir las pruebas aun cuando los valores eran aceptables.
- Tercero, si por algún motivo alguna de las muestras presenta un valor aceptable, pero fue mezclada con pruebas anteriores que, en conjunto, alteran considerablemente su valor como grupo, serán descartadas para análisis posteriores y solo podrían ser usados para futuras referencias.
- El historial de las muestras puede ser consultado en el apéndice C en donde se muestra en mayor detalle todos los conjuntos de pruebas realizados por cada nivel de tratamiento térmico, de manera que pueden ser usados como futuras referencias para otros trabajos, o bien para tener una idea de las variaciones al presentar poco control sobre el ambiente de laboratorio.

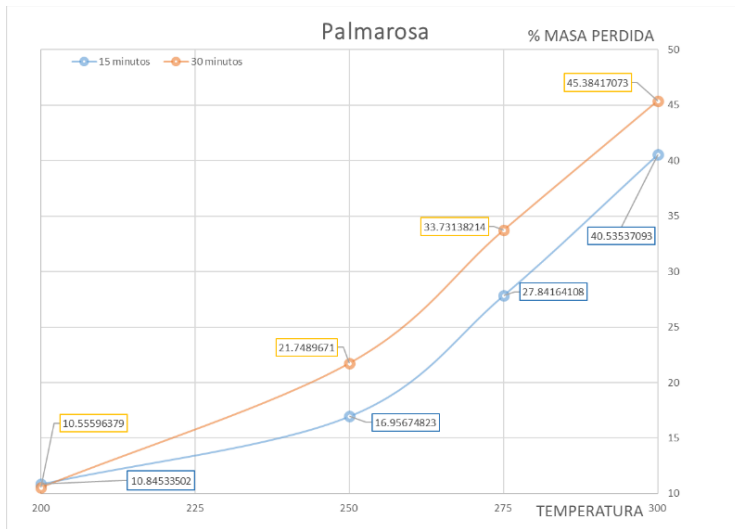
Luego de hacer un análisis de los datos obtenidos hasta el momento, se organizaron para poder analizar los resultados de una manera más clara, primero se compararon cada uno de los datos por especie, luego según los tiempos usados para el proceso y finalmente se realizó un análisis directamente cada uno de los grupos, separando los resultados con mayores desviaciones con el objetivo de determinar un promedio por cada nivel teniendo un número más grande de valores.

Cuadro 14. Comparación de resultados de pérdida de masa según tiempo y biomasa.

Análisis de Citronela			
15 minutos		30 minutos	
Temperatura	Perdida de masa	Temperatura	Perdida de masa
200	10.10489643	200	13.13021629
250	19.79226186	250	26.75880078
275	31.73441274	275	33.82510045
300	43.09035796	300	46.63962711
Análisis de Patchouli			
15 minutos		30 minutos	
Temperatura	Perdida de masa	Temperatura	Perdida de masa
200	11.55066597	200	12.19171729
250	19.15067228	250	27.22782947
275	29.93800429	275	35.11458883
300	41.6331343	300	46.83021949
Análisis de Palmarosa			
15 minutos		30 minutos	
Temperatura	Perdida de masa	Temperatura	Perdida de masa
200	10.84533502	200	10.55596379
250	16.95674823	250	21.7489671
275	27.84164108	275	33.73138214
300	40.53537093	300	45.38417073

Figura 15. Graficas de comportamiento de perdida de masa por especie.



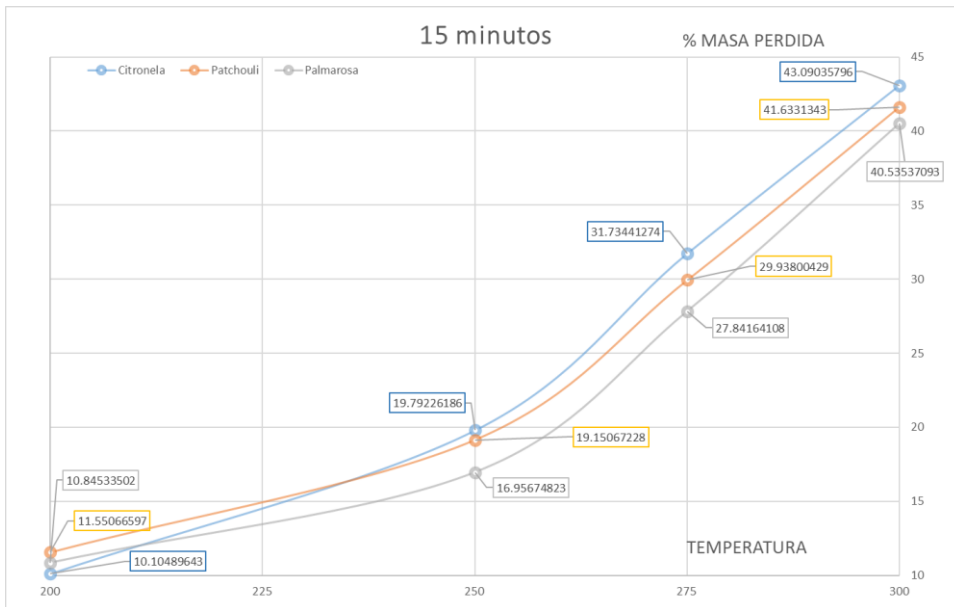


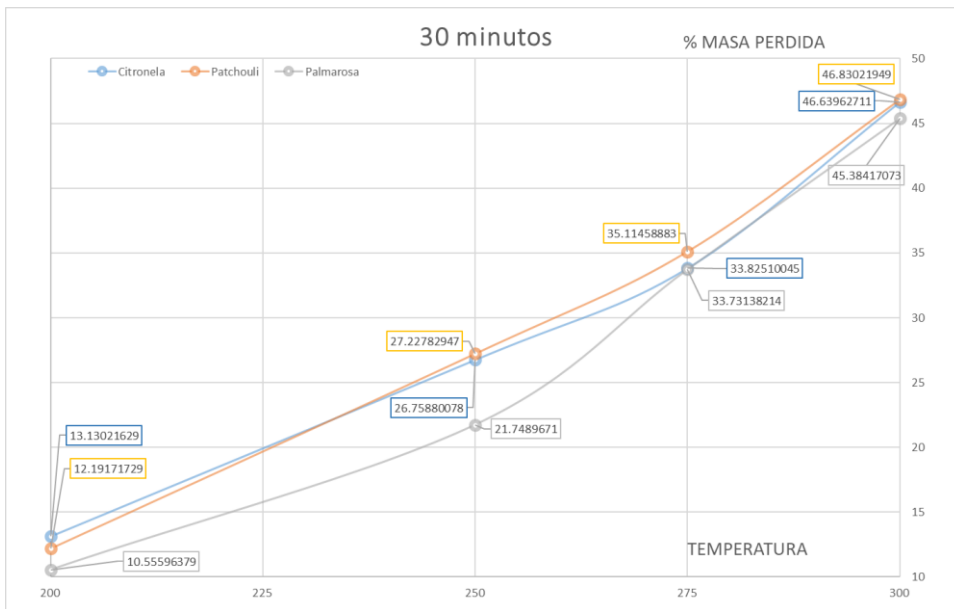
Al observar todas las gráficas se puede identificar una tendencia clara sobre el comportamiento de la biomasa al ser sometida a los diferentes niveles de torrefacción, inicialmente se puede observar que la pérdida de masa se incrementa al aumentar la temperatura de exposición como era de esperarse, esto es debido a que parte de los componentes volátiles son desprendidos, siendo por lo general las pérdidas más bajas de 10% y las más altas registradas de un 46%. Por otra parte, se puede apreciar una distinta variación entre las pérdidas para un mismo nivel con diferentes valores de tiempo de exposición, lo cual se acentúa al aumentar la temperatura, de manera que inicialmente las diferencias son relativamente bajas, hasta alcanzar separaciones de hasta 5%. Los saltos más altos en la diferencia de pérdidas basados en los tiempos (relativos a los comportamientos de cada biomasa) se presentaron a los 250°C para la Citronela y Patchouli y 275°C en el caso de la Palma rosa.

Cuadro 15. Comparación de valores según el tiempo de residencia para cada una de las biomásas.

15 minutos			
	Citronela	Patchouli	Palma rosa
Temperatura	Pérdida de masa	Pérdida de masa	Pérdida de masa
200	10.10489643	11.55066597	10.84533502
250	19.79226186	19.15067228	16.95674823
275	31.73441274	29.93800429	27.84164108
300	43.09035796	41.6331343	40.53537093
30 minutos			
	Citronela	Patchouli	Palma rosa
Temperatura	Pérdida de masa	Pérdida de masa	Pérdida de masa
200	13.13021629	12.19171729	10.55596379
250	26.75880078	27.22782947	21.7489671
275	33.82510045	35.11458883	33.73138214
300	46.63962711	46.83021949	45.38417073

Figura 16. Graficas comparativas entre las diferentes especies para cada uno de los tiempos de residencia.





Luego se ha procedido a comparar las biomásas entre ellas para cada uno de los niveles (misma temperatura y mismo tiempo) en orden de determinar algún tipo de patrón de comportamiento. Para los 15 minutos de exposición se encontró que las curvas presentaban similares tendencias lo que incluye una misma proporción en pérdidas; por el contrario, para el tiempo de 30 minutos las tres especies parecen tener un comportamiento similar entre ellas (a pesar de la gran diferencia a los 250°C de la Palma rosa que podría sugerir un problema durante la toma de datos), lo cual podría ser resultado de que los diversos componentes conformantes tienen el tiempo suficiente para desprenderse de la masa sólida durante el proceso, dando paso a una evaporación más homogénea.

### 4.3 ANÁLISIS PODER CALORÍFICO.

Como se mencionó en la sección anterior, la idea detrás de este proceso es el determinar el mejor tratamiento (tiempo y temperatura) sobre el cual el uso de la biomasa como posible combustible tendrá el mejor desempeño, se debe mencionar que no solo importara el potencial energético obtenido de la biomasa torrefactada, sino que además se tienen que tener en cuenta las inversiones de energía para poder conseguir el estado

en primer lugar, por lo cual se ha decidido enfocarse en el proceso térmico como tal y no en otros factores que se requieren para poder hacer uso del material (tritución, transporte, adquisición, secado natura, entre otros), esto debido a que el interés principal de esta investigación es el dar un primer vistazo al posible potencial de las biomásas recolectadas y no el de realizar un estudio financiero de las operaciones involucradas.

Debido a diversas limitaciones al momento de realizar las pruebas, no se pudieron completar todos los niveles propuestos (biomásas sin tratamiento térmico, temperatura de 300°C y tiempo de 30 minutos para Patchouli y Palma rosa), por lo cual se hace necesario el usar la literatura disponible y modelos matemáticos para poder obtener un estimado de estos vacíos en las pruebas; sin embargo, se considera que con los datos recopilados se puede hacer una buena primera estimación de la cual partir para futuras investigaciones.

Figura 17. Realización de pruebas de poder calorífico.



En el apartado 3 se explicó el proceso para encontrar los valores de los poderes caloríficos de las biomásas sin proceso térmico a pesar de la falta de información bibliográfica al respecto, esto se toma como un valor de referencia para comparar con los valores experimentales y tener como referencia para desarrollar mejores modelos en futuros trabajos. Para cada biomasa se usaron los valores de contenido de volátiles, el contenido de cenizas y la diferencia para el carbón fijo en el programa EES. Los

resultados de todas las 8 ecuaciones se observan a la siguiente tabla, así como del promedio de todas estas.

Cuadro 16. Valores de poder calorífico para biomásas sin tratamiento térmico a partir de relaciones matemáticas.

Poderes caloríficos de biomásas sin tratamiento térmico (MJ/Kg)			
Modelo	Citronela	Patchouli	Palma rosa
1	17.77	16.06	16.56
2	17.85	16.12	16.62
3	17.8	16.07	16.58
4	17.79	16.07	16.58
5	17.77	16.43	16.72
6	17.82	15.91	16.52
7	17.81	16.04	16.57
8	17.74	15.92	16.43
<b>Promedio</b>	<b>17.79</b>	<b>16.08</b>	<b>16.57</b>

A continuación, se exponen los resultados encontrados de las pruebas de poder calorífico realizadas:

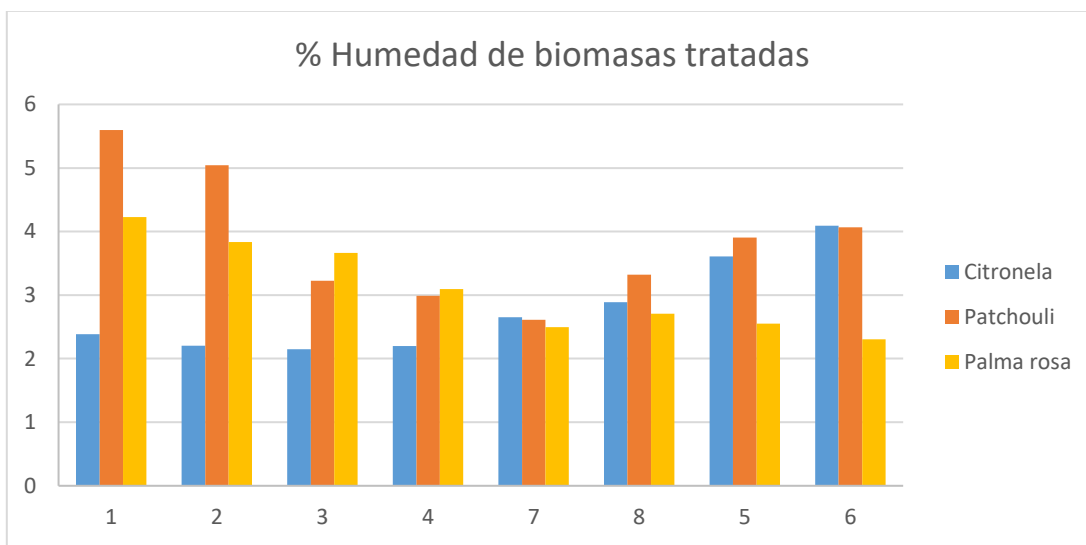
En primera medida se realizó un secado a las muestras torrefactadas en contención para poder servir de referencia en posteriores análisis, cabe mencionar que estos secados se realizaron antes de llevar a cabo las pruebas con al menos 4 horas a 105°C.

Cuadro 17. Humedad contenida en pruebas torrefactas.

%Humedad				
Especimen	Tratamiento	Citronela	Patchouli	Palma rosa
1	200°C 15 minutos	2.382414868	5.595719801	4.22766474
2	200°C 30 minutos	2.201924339	5.041329553	3.835539767
3	250°C 15 minutos	2.147265398	3.226870107	3.664538739
4	250°C 30 minutos	2.197994434	2.99061217	3.095202123
7	275°C 15 minutos	2.650170908	2.612435031	2.494838028
8	275°C 30 minutos	2.888375818	3.321014095	2.705312071
5	300°C 15 minutos	3.608913824	3.906757503	2.550347638
6	300°C 30 minutos	4.089134416	4.064178214	2.302

Del cuadro se puede hacer la siguiente comparación entre los diferentes tratamientos térmicos:

Figura 18. Comparación de la humedad absorbida por las biomásas tratadas.



De esta información se puede inferir que aun cuando el tratamiento térmico parece poseer un efecto positivo en la reducción de la absorción de humedad en el ambiente, hasta el momento no se tienen una tendencia clara sobre este comportamiento: sin embargo, se debe destacar que el tratamiento 7 (275°C con 15 minutos) parece presentar un punto de equilibrio para todos los especímenes, lo cual es un punto a su favor a la hora de considerar el mejor tratamiento.

Cuadro 18. Poderes caloríficos de biomásas torrefactadas en MJ/Kg.

CITRONELA		PATCHOULI		PALMAROSA	
ESPECIMEN	PODER	ESPECIMEN	PODER	ESPECIMEN	PODER
X1	18.59806667	Y1	17.6113	Z1	18.25745
X2	18.8438	Y2	17.91345	Z2	18.29765
X3	19.77975	Y3	19.03915	Z3	19.04025
X4	20.1825	Y4	19.6382	Z4	19.5885
X7	20.884	Y7	20.1011	Z7	19.9155
X8	21.0714	Y8	20.6214	Z8	20.7216
X5	22.4978	Y5	21.3105	Z5	21.4126
X6	23.1389	Y6		Z6	

X Citronela; Y Patchouli; Z Palma rosa.

Para obtener los términos faltantes se introdujeron los resultados de las pruebas realizadas en EES y Excel para tratar de obtener un modelo matemático en función de la temperatura manejada y sin tomar en cuenta el tiempo de residencia para el cual solo se tendrían solo 2 resultados por entrada.

Regresión lineal de EES para Patchouli con tratamiento 300°C y 30 minutos con 3 coeficientes con un error de 0.238%:

$$HHVY6_{teorico} = 1.42364500E + 01 + 5.49700000E - 03 * T + 6.44400000E - 05 * T^2$$

Cuadro 19. Comparación entre los valores teóricos y experimentales con la regresión lineal de EES para Patchouli.

Comparación entre valores reales y predicciones para Patchouli 30 m.			
Especimen	Temperatura	Poder experimental MJ/Kg.	Poder teórico MJ/Kg.
Y2	200	17.91345	17.91
Y4	250	19.6382	19.64
Y8	275	20.6214	20.62
Y6	300	-	21.69

La regresión lineal calculada usando EES para la Palma rosa con un tratamiento con tratamiento 300°C y 30 minutos estaría dada por la siguiente ecuación con un error de 3.16%:

$$HHVZ6_{teorico} = 2.37081223E + 01 - 6.99412455E - 02 * T + 2.14321818E - 04 * T^2$$

Cuadro 20. Comparación entre los valores teóricos y experimentales con la regresión lineal de EES para Palma rosa.

Comparación entre valores reales y predicciones para Palma rosa 30 m.			
Especimen	Temperatura	Poder experimental MJ/Kg.	Poder teórico MJ/Kg.
Z2	200	18.29765	18.29
Z4	250	19.5885	19.62
Z8	275	20.7216	20.68
Z6	300	-	22.01

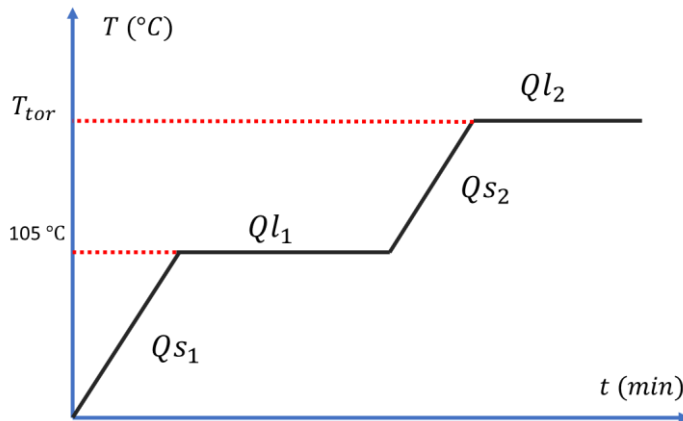
De manera que al comparar los resultados obtenidos respecto a las biomásas sin tratamiento térmico se tendría:

Cuadro 21. Comparación entre poderes caloríficos de biomásas tratadas respecto a restos sin tratamiento.

Comparacion entre poderes calorificos en MJ/Kg.								
CITRONELA VIRGEN: 17.79			PATCHOULI VIRGEN: 16.08			PALMAROSA VIRGEN: 16.57		
ESPECIMEN	PODER	COMPARACION	ESPECIMEN	PODER	COMPARACION	ESPECIMEN	PODER	COMPARACION
X1	18.59806667	1.045422522	Y1	17.6113	1.0952301	Z1	18.25745	1.101837658
X2	18.8438	1.059235526	Y2	17.91345	1.114020522	Z2	18.29765	1.10426373
X3	19.77975	1.111846543	Y3	19.03915	1.184026741	Z3	19.04025	1.149079662
X4	20.1825	1.134485666	Y4	19.6382	1.221281095	Z4	19.5885	1.182166566
X7	20.884	1.173917931	Y7	20.1011	1.250068408	Z7	19.9155	1.201901026
X8	21.0714	1.184451939	Y8	20.6214	1.282425373	Z8	20.7216	1.250549185
X5	22.4978	1.264631816	Y5	21.3105	1.325279851	Z5	21.4126	1.292251056
X6	23.1389	1.300668915	Y6	21.69	1.348880597	Z6	22.01	1.328304164

Luego de obtener estos valores se realizó una comparación entre el potencial energético de cada prueba y las inversiones requeridas para obtener estos resultados, con esto se espera alcanzar un equilibrio entre los gastos energéticos de los procesos y las ganancias obtenidas en forma del poder calorífico.

Figura 19. Diagrama de energía consumida durante el proceso [KJ/Kg].



De acuerdo con los datos expuestos en “Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica”

<sup>48</sup> (CORTES CAMACHO L.T. y MORA CHACÓN A. P.), en el proceso de torrefacción se tendrán 4 fases de calentamiento de la biomasa las cuales han sido expuestas en la imagen anterior, estas 4 fases son:

El primer calentamiento sensible en el cual la humedad y biomasa son calentadas desde una temperatura inicial hasta  $105^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{s1} = C p_w (m_{w105biomasa})(T_{sat} - T_0) + C p_s (1 - m_{w105biomasa})(105 - T_0)$$

Donde

$C p_w$  es el calor específico del agua=  $4.18 \text{ KJ/Kg}^{\circ}\text{K}$ .

$C p_s$  es el calor específico de la madera seca=  $1.38 \text{ KJ/Kg}^{\circ}\text{K}$ .

$m_{w105biomasa}$  es la cantidad de humedad contenida en la biomasa.

$T_0$  es la temperatura inicial del proceso (se asume  $30^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{sat}$  es la temperatura de saturación del agua a la presión atmosférica de Bucaramanga ( $92 \text{ KPa}$ ) =  $97.29^{\circ}\text{C}$ .

<sup>48</sup> CORTES CAMACHO, Laura Tatiana y MORA CHACÓN, Angi Paola. Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica. Ingenieras mecánicas. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial De Santander. 2019. pp. 60–66.

Luego de esto se procede a un proceso de secado de 2 horas para la cual se tiene la siguiente expresión:

$$Ql_1 = h_{fg}(m_{w105biomasa})$$

Donde

$h_{fg}$  es el calor latente de evaporación a 92 KPa= 2257.5 KJ/Kg\*K.

El siguiente calor es el de calentamiento de la biomasa de torrefacción libre de agua, de modo que:

$$Qs_2 = (1 - m_{w105biomasa})Cp_b(T_{tor} - 105)$$

Donde:

$Cp_b = 1.4490$  KJ/Kg\*k.

Que correspondería a un promedio entre el valor del calor específico de la madera seca y el carbón ya que se considera que durante este espacio la biomasa mejoraría su capacidad de producir energía debido a las pérdidas de componentes volátiles y a los cambios en su temperatura<sup>49</sup> (CORTES CAMACHO L.T. y MORA CHACÓN A. P.).

Finalmente, el último calor calculado es el consumido durante la torrefacción, para esto las autoras hicieron referencia a los datos encontrados en “Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods”<sup>50</sup> se tienen los siguientes valores

$$Ql_2 = T_{tor}Cp_{b2} - 430.58[KJ/Kg]$$

Donde:

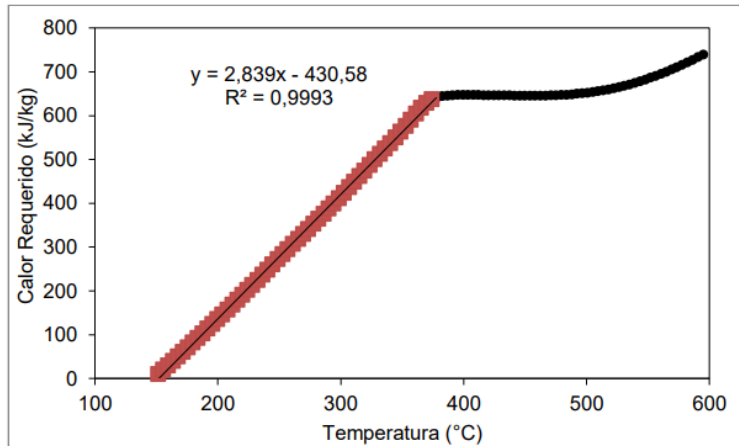
$Cp_{b2} = 2.839$  KJ/Kg\*K

---

<sup>49</sup> CORTES CAMACHO, Laura Tatiana y MORA CHACÓN, Angi Paola. Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica. Ingenieras mecánicas. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial De Santander. 2019. pp. 61–64.

<sup>50</sup> : RUEDA ORDOÑEZ, Yesid J. Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods. *Universidade Estadual de Campinas*. 2016.

Figura 20. Mediciones experimentales de calor obtenidas con DSC de la descomposición térmica de la caña de azúcar en atmosfera de nitrógeno.



Fuente: RUEDA ORDOÑEZ, Y.; Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods, 2016.

Finalmente se toma el calor total de la operación como la suma de los cuatro calores y se compara con los valores obtenidos de las pruebas de poder calorífico ( $Q_{cal}$ ).

$$Q_{total} \left[ \frac{MJ}{Kg} \right] = (Q_{s_1} + Q_{l_1} + Q_{s_2} + Q_{l_2}) \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] * \left( \frac{1000 J}{1 KJ} \right) * \left( \frac{1 MJ}{1 \times 10^6 J} \right)$$

Y

$$\eta = \frac{Q_{total}}{Q_{cal}} * 100$$

Donde

$Q_{cal}$  representan los valores obtenidos de las pruebas calorimétricas en  $\frac{MJ}{Kg}$ .

$\eta$  es la eficiencia energética comparativa entre la energía requerida para la reacción y la disponible por la biomasa, de manera que nos sugeriría cuanto de la energía disponible sería invertida si se usara la biomasa como fuente para el proceso en primer lugar.

El arreglo dentro del programa tendrá la siguiente configuración.

Figura 21. Arreglo de ecuaciones en el programa EES.

```

"proceso de torrefaccion de Citronela"
"proceso 1 subida de temperatura"
Cpw=4.18 [KJ/Kg*k]
Cps=1.38 [KJ/Kg*k]
m_wcitronela=8.4810/100 "humedad de citronela"
Tsat=97.29
"tiempo=15"
T0=30
T2=105
Q_S1=Cpw*(m_wcitronela)*(Tsat-T0)+Cps*(1-m_wcitronela)*(T2-T0) "[KJ/Kg]"

"proceso de evaporacion"
hfg_ev=2257.5 [KJ/Kg*K]
Q_L1=(m_wcitronela)*hfg_ev "[KJ/Kg]"

"proceso tercero de subida final de temeptratura"
Cpb=1.4490 [KJ/Kg*k]
Q_S2=(1-m_wcitronela)*Cpb*(Ttorr-T2)

"proceso de torrefaccion"
Q_L2=2.839*Ttorr-430.58 [KJ/Kg]

"finalmente"
Q_tot=(Q_S1+Q_L1+Q_S2+Q_L2)*(1000/1e6)

"comparacion"
n=Q_tot/Qcal*100
    
```

De estos cálculos se obtienen los siguientes resultados comparativos:

Figura 22. Comparación de calores para Citronela.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Ttorr	tiempo	Qcal	Q <sub>S1</sub>	Q <sub>L1</sub>	Q <sub>S2</sub>	Q <sub>L2</sub>	Q <sub>tot</sub> [MJ/Kg]	n	
200	15	18.6	118.6	191.5	126	137.2	0.5732	3.082	
200	30	18.84	118.6	191.5	126	137.2	0.5732	3.042	
250	15	19.78	118.6	191.5	192.3	279.2	0.7815	3.951	
250	30	20.18	118.6	191.5	192.3	279.2	0.7815	3.872	
275	15	20.88	118.6	191.5	225.4	350.1	0.8856	4.241	
275	30	21.07	118.6	191.5	225.4	350.1	0.8856	4.203	
300	15	22.5	118.6	191.5	258.6	421.1	0.9897	4.399	
300	30	23.14	118.6	191.5	258.6	421.1	0.9897	4.277	

Figura 23. Comparación de calores para Patchouli.

Patchouli Tabla Patchouli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
T <sub>torr</sub>	tiempo	Q <sub>cal</sub>	Q <sub>L1</sub>	Q <sub>S1</sub>	Q <sub>S2</sub>	Q <sub>L2</sub>	Q <sub>tot</sub>	n	
200	15	17.61	209.2	120	124.9	137.2	0.5913	3.358	
200	30	17.91	209.2	120	124.9	137.2	0.5913	3.301	
250	15	19.04	209.2	120	190.6	279.2	0.799	4.197	
250	30	19.64	209.2	120	190.6	279.2	0.799	4.069	
275	15	20.1	209.2	120	223.5	350.1	0.9029	4.492	
275	30	20.62	209.2	120	223.5	350.1	0.9029	4.378	
300	15	21.31	209.2	120	256.4	421.1	1.007	4.724	
300	30	21.69	209.2	120	256.4	421.1	1.007	4.641	

Figura 24. Comparación de calores para Palma rosa.

Palmarosa									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
T <sub>torr</sub>	tiempo	Q <sub>cal</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>ev</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>tot</sub>	n	
200	15	18.26	119.6	204.2	125.2	137.2	0.5862	3.21	
200	30	18.3	119.6	204.2	125.2	137.2	0.5862	3.203	
250	15	19.04	119.6	204.2	191.1	279.2	0.794	4.17	
250	30	19.59	119.6	204.2	191.1	279.2	0.794	4.053	
275	15	19.92	119.6	204.2	224.1	350.1	0.8979	4.509	
275	30	20.72	119.6	204.2	224.1	350.1	0.8979	4.333	
300	15	21.41	119.6	204.2	257	421.1	1.002	4.679	
300	30	22.01	119.6	204.2	257	421.1	1.002	4.552	

En estas comparaciones se puede apreciar que la cantidad de energía requerida en comparación con la energía potencial de cada tratamiento aumenta a medida que la temperatura de torrefacción aumenta, además, se puede apreciar que la inversión sería relativamente más alta para el tratamiento de 300°C con 15 minutos lo cual nos lleva a la conclusión de que la inversión energética necesarias para mejorar las propiedades de la biomasa quizás no valgan la pena; sin embargo se pueden tener valores algo menores alrededor de este nivel lo cual nos llevaría a pensar que quizás 250°C y 275°C sean las mejores opciones para lo que se quiere conseguir (reducción de volumen para transporte y mejoras en la calidad del combustible), así como también se deberá considerar la energía invertida en el sistema para que pueda alcanzar las condiciones operacionales, las pérdidas de energía y el tiempo invertido.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se decidió seleccionar el tratamiento de 275°C con 15 minutos (tratamiento 7) para el cual se poseen pérdidas de masa de alrededor de 28%, poder calorífico cercano a los 20  $\frac{MJ}{Kg}$  y una inversión energética en función de los resultados bastante aceptable. Cabe destacar que si se está dispuesto a soportar gastos mayores dado el tiempo de residencia el mismo nivel, pero con 30 minutos es una gran opción; por otro lado, si solo se considera la comparación del potencial obtenido respecto a los gastos vistos en la anterior tabla, el mejor tratamiento desde un punto de vista netamente energético sería el de 250°C con 30 minutos de residencia ya que es el nivel que presenta una mejor eficiencia.

#### 4.4 SELECCIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.

**4.4.1 Construcción de herramienta de selección.** Como parte del proyecto se ha propuesto como un objetivo el determinar el mejor tratamiento posible para los restos para lo cual es necesario tener en cuenta diferentes propiedades o aspectos propios de cada uno de los procesos llevados a cabo. Como primer paso se ideó una herramienta calificativa la cual ayudara al momento de calificar cada una de las opciones. La calidad de tratamiento térmico (CTT) se compone de factores (F) de interés a los cuales se les asigna un peso en el veredicto, esta sugiere que dependiendo de la importancia y número de factores, cada expresión aportara al total de manera diferente.

$$CTT = \left( \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2^i} * F_i \right) - \left( \frac{1}{2^{n-1}} * F_n \right)$$

En donde  $n$  número de factores a considerar,  $F$  cada uno de los factores y según la expresión, los dos últimos factores repetirían el mismo porcentaje.

Por otro lado, las características producto de los tratamientos térmicos de interés consideradas serían:

- Poder calorífico
- Absorción de humedad
- Rendimiento masico
- Eficiencia energética comparativa

Ahora bien, para crear los factores se han usado puntos de referencia que relacionan las cantidades experimentales y teóricas, o bien son un análisis de los datos disponibles, que serían usadas en conjunto para determinar la mejor opción disponible, de manera que se tienen en orden de importancia:

- (1) Comparación energética (compara el valor del poder calorífico obtenido respecto al del carbón).

$$CE = \left( \frac{Q_{cal}}{HHV_{carbon}} \right) * 100$$

- (2) Energía aprovechable (la cual muestra la cantidad de energía disponible si la usada durante el proceso de torrefacción proviniera de la biomasa tratada y el resto fuera usada con otros fines).

$$EA = \frac{Q_{cal} - Q_{total}}{Q_{cal}} * 100$$

$$EA = (1 - \eta) * 100$$

- (3) Comparación másica (el cual compara el residuo solido de la biomasa en comparación con la de otra biomasa con buenas propiedades).

$$CM = \left( \frac{\% RM_T}{\% RM_E} \right)$$

con

$$\% RM_E = \frac{masa\ original - masa\ perdida}{masa\ original}$$

$$\% RM_E = (100 - \%pedida)$$

En donde

$\% RM_T$  es el porcentaje rendimiento masico teórico

$\% RM_E$  es el porcentaje rendimiento masico experimental

$\%pedida$  son los datos desplegados en la sección 4.2 “Análisis de torrefacciones”

- (4) Comparación de absorción (la cual hace referencia a la comparación entre la capacidad de la biomasa para absorber agua del ambiente respecto a la del carbón).

$$CA = \frac{\% \text{ humedad absorbida por biomasa}}{\% \text{ humedad absorbida por carbon}}$$

Debido a que el hecho de que el valor sea próximo a la referencia (entre más cerca de 100%) no es algo positivo, se decidió hacer un ajuste al factor para poder cuantificar el impacto en el cálculo final y se recalcula como comparación de absorción corregida.

$$CA_c = 1 - CA$$

De manera que la expresión final  $CTT$  sería:

$$CTT = \left(\frac{1}{2}\right) * CE + \left(\frac{1}{4}\right) * EA + \left(\frac{1}{8}\right) * CM + \left(\frac{1}{8}\right) * CA_c$$

**4.4.2 Datos teóricos de referencia para el análisis.** Algunos de los datos de referencia a comparar han sido tomados de la tabla 4.3 encontrada en “Comparison of Typical Properties of Raw Wood, Torrefied Wood, Charcoal, and Coal” (Basu, 2018, P.98,), así como del uso de los mismos resultados de los experimentos completados hasta el momento.

Cuadro 22. Comparación de propiedades entre diferentes tratamientos para biomasa.

TABLE 4.3 Comparison of Typical Properties of Raw Wood, Torrefied Wood, Charcoal, and Coal.				
Specimen	Typical Wood	Torrefied Wood	Charcoal (Carbonization)	Torrefied Biochar
Temperatura °C	-	200-300	>300	260
Humedad %	30-60	1--5	1-5	En base seca
Densidad energética (MJ/Kg)	~18	20–24	30–32	20.3
Rendimiento masico	-	~80%	~30%	84.8

Fuente: Basu, P. (2018). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Table 4.3. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812992-0.00001-7>. pp. 82.

Según el documento de planeación de ordenamiento territorial expedido por la alcaldía de Bucaramanga, mensualmente se tiene en promedio una humedad relativa de 83%, (MUNICIPIO DE BUCARAMANGA SECRETARIA DE PLANEACION et al, 2014)<sup>51</sup> lo cual sería un dato de importancia a la hora de considerar la máxima humedad en el aire que estaría en contacto con las pruebas en contención.

De acuerdo con las pruebas realizadas en el paper “Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures”<sup>52</sup> se espera que después de un tratamiento de carbonización a madera proveniente de un eucalipto urophylla x Eucalyptus grandis de 7 años a 400°C expuesta a una humedad relativa de 33% y 98%, las humedades absorbidas sean de  $1.57 \pm 0.07\%$  y  $6.36 \pm 0.07\%$  respectivamente. Dentro de la misma publicación se menciona que la humedad absorbida aumenta a medida que la temperatura del proceso lo hace, se teoriza que la carbonización aumenta la porosidad de la biomasa lo cual es un detalle para tener en cuenta (Dias Júnior et al., 2016), de estos datos se puede hacer la siguiente interpolación.

<sup>51</sup> MUNICIPIO DE BUCARAMANGA SECRETARIA DE PLANEACION; BOHORQUEZ PEDRAZA, L. F.; MEJIA ABELLO, M. y PRADILLA NAVAS, G. E. PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BUCARAMANGA, SEGUNDA GENERACION. [en línea]. Bucaramanga, Santander. 2014. Nro 6. pp. 29.

<sup>52</sup> DIAS JÚNIOR, A. F, et al. Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. [en línea]. 2016, vol. 22, n. 4. pp. 423–430.

$$w_{abs} = 0.707369 * w_{rela} - 0.86177$$

Donde “ $w_{rela}$ ” es la humedad relativa como porcentaje y “ $w_{abs}$ ” es la humedad absorbida como porcentaje. teniendo en cuenta que la humedad relativa de Bucaramanga es en promedio de 83%, podemos deducir que:

$$w_{abs} = 0.707369 * (83) - 0.86177$$

$$w_{abs} = 5.2545\%$$

De manera que en resumen se tendrá:

- Como punto de referencia para el poder calorífico o bien densidad energética de 32 MJ/Kg el cual se tomó del carbón por carbonización.
- El rendimiento masico hace referencia al porcentaje masico de la torrefacción en referencia a la biomasa original, la cual en el caso de los datos obtenidos se tendría al restar del 100% respecto al porcentaje de perdida registrada. Se ha tomado como referencia 30% perteneciente el carbón por carbonización (70% de perdida durante la carbonización).
- De la humedad absorbida por el carbón se predijo que en las mejores condiciones la biomasa podría absorber un 5.2545% de humedad.

#### **4.4.3 Datos experimentales usados para el análisis y despliegue de factores.**

Haciendo uso de las relaciones expuestas en el apartado 4.4.1, los datos de referencia del apartado 4.4.2 y los valores experimentales disponibles, se han procedido a desplegar cada uno de los factores.

Los datos de poder calorífico han sido expuestos en la sección 4.3, entre más cercanos los valores estén del 100% mejor será la eficiencia de estos respecto al carbón. De manera que el factor  $CE$  sería:

Cuadro 23. Comparación energética de biomásas respecto al carbón.

Comparación de poderes caloríficos								
Densidad energética del Carbón carbonizado 32 MJ/Kg								
Citronela			Patchouli			Palma rosa		
Espécimen	Qcal MJ/Kg	CE	Espécimen	Qcal MJ/Kg	CE	Espécimen	Qcal MJ/Kg	CE
X1	18.6	58.125	Y1	17.61	55.03125	Z1	18.26	57.0625
X2	18.84	58.875	Y2	17.91	55.96875	Z2	18.3	57.1875
X3	19.78	61.8125	Y3	19.04	59.5	Z3	19.04	59.5
X4	20.18	63.0625	Y4	19.64	61.375	Z4	19.59	61.21875
X7	20.88	65.25	Y7	20.1	62.8125	Z7	19.92	62.25
X8	21.07	65.84375	Y8	20.62	64.4375	Z8	20.72	64.75
X5	22.5	70.3125	Y5	21.31	66.59375	Z5	21.41	66.90625
X6	23.14	72.3125	Y6	21.69	67.78125	Z6	22.01	68.78125

Para los datos de energía aprovechable  $EA$  se hizo uso de los resultados obtenidos en la sección 4.3. Entre más cercanos a 100 estén, mejor será el aprovechamiento de la energía disponible (energía no consumida durante el proceso de torrefacción teóricamente). De manera que:

Cuadro 24. Cálculo de energías aprovechables.

Análisis de energía aprovechable								
Citronela			Patchouli			Palma rosa		
Espécimen	$\eta$	EA	Espécimen	$\eta$	EA	Espécimen	$\eta$	EA
X1	0.03082	96.918	Y1	0.03358	96.642	Z1	0.0321	96.79
X2	0.03042	96.958	Y2	0.03301	96.699	Z2	0.03203	96.797
X3	0.03951	96.049	Y3	0.04197	95.803	Z3	0.0417	95.83
X4	0.03872	96.128	Y4	0.04069	95.931	Z4	0.04053	95.947
X7	0.04241	95.759	Y7	0.04492	95.508	Z7	0.04509	95.491
X8	0.04203	95.797	Y8	0.04378	95.622	Z8	0.04333	95.667
X5	0.04399	95.601	Y5	0.04724	95.276	Z5	0.04679	95.321
X6	0.04277	95.723	Y6	0.04641	95.359	Z6	0.04552	95.448

Para el análisis de comparación másica se tomaron los valores de pérdidas de masa expuestas en la sección 4.2 para calcular los remanentes sólidos, se toma como referencia el remanente del carbón carbonizado. Entre más cerca de 100 este, más cercano su comportamiento al carbón y por tanto mejor serán sus características globales, así como su densidad energética.

Cuadro 25. Comparaciones másicas respecto al carbón carbonizado.

Análisis de comparación másica							
% Rendimiento masico del carbón por carbonización.				30%			
Citronela				Patchouli			
Espécimen	% Perdida masa	% RMe	CM	Espécimen	% Perdida masa	% RMe	CM
X1	10.10489643	89.8951	33.3722292	Y1	11.55066597	88.44933	33.91772
X2	13.13021629	86.86978	34.53444767	Y2	12.19171729	87.80828	34.16534
X3	19.79226186	80.20774	37.40287495	Y3	19.15067228	80.84933	37.10606
X4	26.75880078	73.2412	40.96055269	Y4	27.22782947	72.77217	41.22455
X7	31.73441274	68.26559	43.94600736	Y7	29.93800429	70.062	42.81922
X8	33.82510045	66.1749	45.33440958	Y8	35.11458883	64.88541	46.23535
X5	43.09035796	56.90964	52.71514444	Y5	41.6331343	58.36687	51.39903
X6	46.63962711	53.36037	56.22149617	Y6	46.83021949	53.16978	56.42303

Palma rosa			
Espécimen	% Perdida masa	% RMe	CM
Z1	10.84533502	89.154665	33.64938896
Z2	10.55596379	89.444036	33.54052575
Z3	16.95674823	83.043252	36.12575298
Z4	21.7489671	78.251033	38.33815208
Z7	27.84164108	72.158359	41.57522489
Z8	33.73138214	66.268618	45.27029681
Z5	40.53537093	59.464629	50.45015914
Z6	45.38417073	54.615829	54.92913026

De los análisis realizados en la sección 4.3, se obtuvieron los siguientes datos de la humedad absorbida por las biomásas tratadas antes de las pruebas de calorimetría en condiciones de contención, lo cual ayudaría a entender el aumento de la capacidad hidrofóbica, como se podrá observar en la siguiente tabla:

Cuadro 26. Análisis de la humedad absorbida por biomasa tratada durante su contención.

%Humedad de biomásas tratadas								
Especimen	1	2	3	4	7	8	5	6
Citronela	2.3824149	2.2019243	2.1472654	2.1979944	2.6501709	2.888376	3.6089138	4.0891344
Patchouli	5.5957198	5.0413296	3.2268701	2.9906122	2.612435	3.321014	3.9067575	4.0641782
Palma rosa	4.2276647	3.8355398	3.6645387	3.0952021	2.494838	2.705312	2.5503476	2.302

Como se mencionó anteriormente, el que la biomasa tratada absorba más humedad del ambiente no es una característica deseada y por lo tanto al comparar con la absorción mostrada por el carbón carbonizado se tomara  $CA_c$  para los cálculos, de manera que se tiene:

Cuadro 27. Comparación de absorción de humedad.

Comparacion de absorcion de humedad							
% Humedad absorbida por el carbon a 83% de humedad relatvita. 5.25%							
Citronela				Patchouli			
Espécimen	% humedad	CA	CAC	Espécimen	% humedad	CA	CAC
X1	2.382414868	45.34047	54.65953243	Y1	5.595719801	106.4939	-6.49386
X2	2.201924339	41.9055	58.09450302	Y2	5.041329553	95.94309	4.056912
X3	2.147265398	40.86527	59.13473408	Y3	3.226870107	61.41155	38.58845
X4	2.197994434	41.83071	58.16929424	Y4	2.99061217	56.91526	43.08474
X7	2.650170908	50.43621	49.56378517	Y7	2.612435031	49.71805	50.28195
X8	2.888375818	54.96957	45.03043453	Y8	3.321014095	63.20324	36.79676
X5	3.608913824	68.68235	31.31765488	Y5	3.906757503	74.3507	25.6493
X6	4.089134416	77.82157	22.17842961	Y6	4.064178214	77.34662	22.65338
Palma rosa							
Espécimen	% humedad	CA	CAC				
Z1	4.22766474	80.457983	19.54201656				
Z2	3.835539767	72.995333	27.00466711				
Z3	3.664538739	69.74096	30.25904008				
Z4	3.095202123	58.90574	41.09425971				
Z7	2.494838028	47.480027	52.51997282				
Z8	2.705312071	51.485623	48.51437681				
Z5	2.550347638	48.536448	51.46355241				
Z6	2.302	43.810068	56.18993244				

Con toda esta información recopilada, se procede con los cálculos finales del CTT.

Cuadro 28. Cálculos de CTT para determinar las mejores opciones.

Calculo de calidad de tratamiento termico %					
Citronela					
Espécimen	CE	EA	CM	CAC	CTT
X1	58.125	96.918	33.372229	54.6595324	64.2959702
X2	58.875	96.958	34.534448	58.094503	65.25561884
X3	61.8125	96.049	37.402875	59.1347341	66.98570113
X4	63.0625	96.128	40.960553	58.1692942	67.95448087
X7	65.25	95.759	43.946007	49.5637852	68.25347407
X8	65.84375	95.797	45.33441	45.0304345	68.16673051
X5	70.3125	95.601	52.715144	31.3176549	69.56059991
X6	72.3125	95.723	56.221496	22.1784296	69.88699072
Patchouli					
Espécimen	CE	EA	CM	CAC	CTT
Y1	55.03125	96.642	33.917723	-6.4938586	55.10410803
Y2	55.96875	96.699	34.165342	4.05691212	56.93690675
Y3	59.5	95.803	37.10606	38.588446	63.16256324
Y4	61.375	95.931	41.22455	43.0847432	65.20891168
Y7	62.8125	95.508	42.81922	50.2819482	66.92089601
Y8	64.4375	95.622	46.235355	36.7967629	66.50326469
Y5	66.59375	95.276	51.399025	25.6493005	66.74691572
Y6	67.78125	95.359	56.423028	22.6533787	67.61492581
Palma rosa					
Espécimen	CE	EA	CM	CAC	CTT
Z1	57.0625	96.79	33.649389	19.5420166	59.37767569
Z2	57.1875	96.797	33.540526	27.0046671	60.36114911
Z3	59.5	95.83	36.125753	30.2590401	62.00559913
Z4	61.21875	95.947	38.338152	41.0942597	64.52517647
Z7	62.25	95.491	41.575225	52.5199728	66.75964971
Z8	64.75	95.667	45.270297	48.5143768	68.0148342
Z5	66.90625	95.321	50.450159	51.4635524	70.02258894
Z6	68.78125	95.448	54.92913	56.1899324	72.14250784
					Mejor opcion
					Segunda mejor opcion
					Tercera mejor opcion

Como se ha mencionado en la sección 4.4, el numero CTT se creó para poder cuantificar de alguna manera la mejor opción. De todo esto podemos deducir los siguiente:

- La mejor opción de manera consistente según los cálculos es el tratamiento de 300°C; sin embargo, se deberá mencionar que la cantidad de energía consumida, tiempo de enfriamiento y aumento en la capacidad de la biomasa para absorber humedad pueden hacer cuestionar este veredicto.
- La segunda mejor opción estará posicionada entre los tratamientos de 275 y 300°C.
- En la sección 4.3 se hizo mención de que para el tratamiento 7 (275°C con 15 minutos), las biomásas torrefactadas presentaban un comportamiento similar para la capacidad de absorber humedad del ambiente.

- Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, se decide seleccionar la temperatura de **275°C y el tiempo de 15 minutos**, pues se considera que debido a la inercia térmica del proceso el tiempo de residencia será suficiente para presentar las mejorías necesarias sin tener que gastar energía de manera innecesaria.

#### 4.5 ANÁLISIS HIGROMÉTRICO.

Una vez seleccionada el mejor tratamiento térmico se procedió a hacer un análisis para la capacidad de la biomasa de absorber agua al estar expuesto al medio ambiente, para ello se realizó la prueba descrita en el apartado 3.6, en el cual se explica que la prueba está constituida por 2 partes, en la primera 1 gr de las muestras secas fueron selladas dentro de contenedores porosos por 1 hora en 60 c.c de agua para garantizar la mayor exposición posible al líquido, luego esto se dejaron escurrir por 10 minutos. Para los cálculos realizados en el Excel se usaron las siguientes operaciones:

$$m_{wf} = m_{cf} - m_c$$

$$m_{w0} = m_{c0} - m_c$$

$$\Delta m_w = m_{w0} - m_{wf}$$

$m_{w0}$  masa de agua inicial

$m_{wf}$  masa de agua final

$m_{c0}$  masa de contenedor inicial con agua

$m_{cf}$  masa de contenedor final con agua

$m_c$  masa de contenedor

$\Delta m_w$  agua perdida

Ahora bien, esta diferencia en la masa de agua será el resultado de las perdidas por evaporación, el agua absorbida por la biomasa y el agua absorbida por los paquetes contenedores.

$$\Delta m_w = \bar{m}_p + m_b + m_\phi$$

$\bar{m}_p$  promedio de agua absorbida por paquetes

$m_{wb}$  masa absorbida por biomasa

$m_\varphi$  masa perdida por evaporación

De modo que:

$$m_{w0} - m_{wf} = \bar{m}_p + m_{wb} + m_\varphi$$

$$m_{wb} = m_{w0} - m_{wf} - \bar{m}_p - m_\varphi$$

Figura 25. Pruebas 1 y 2 de higrometría.



De las pruebas realizadas se obtuvo que  $\bar{m}_p$  el agua absorbida por los paquetes en promedio es de 8.434 gr de agua (13.8484%). Sin embargo, cuando se intentaron completar las comparaciones entre los promedios de absorción de los paquetes y los resultados de la segunda parte de la prueba se obtendrían algunos valores negativos ya que durante el sellado se podrían tener algunos problemas para los cálculos o bien el tiempo de exposición no sería suficiente para que el agua pueda penetrar todo el objeto sumergido; sin embargo, teniendo en cuenta esto, se realizaron los cálculos para la primera etapa.

Cuadro 29. Resultados de los secados de biomosas, primera etapa de higrometría y segunda etapa de higrometría.

Biomosas	%Humedad en almacenamiento.	% Absorción de agua primera prueba.	% Secado de primera prueba.
----------	-----------------------------	-------------------------------------	-----------------------------

Biomosas sin tratamiento térmico			
A1	8.502428315	12.38337524	76.9883085
A2	8.694208289	12.3041781	78.39247462
B1	8.502428315	13.25382514	74.64662105
B2	8.694208289	14.25598342	76.83118367
C1	9.070324987	13.75717479	81.6374269
C2	9.19236611	13.52412379	79.7466453
Biomosas con tratamiento térmico (275°C con 15 minutos, tratamiento 7)			
X1	2.169993991	11.90435717	73.46578776
X2	1.898015104	12.41274355	74.30259929
Y1	0.378662061	12.54910305	72.20634682
Y2	0.54200542	11.7298765	71.13749634
Z1	0.616167705	12.34890257	72.66689795
Z2	0.596144929	11.88260711	71.02990365
Empaques contenedores			
1	-	13.88398371	-
2	-	13.81300766	-
A, X (Citronela); B, Y (Patchouli); C, Z (Palma rosa)			

De manera que según las tablas se tienen las siguientes comparaciones:

Cuadro 30. Comparación de datos para biomasa sin tratamiento y biomasa torrefactada.

Biomasa o espécimen	Aspectos para comparar	Sin tratamiento térmico (%)	Con tratamiento térmico 7 (%)	Diferencia
Citronela	Humedad inicial	8.598318302	2.034004547	6.5643
	Agua absorbida por biomasa (1 gr seca)	12.34377667	12.15855036	0.1852
	Humedad liberada (2 gr en biomasa humedad)	77.69039156	73.88419353	3.806
Patchouli	Humedad inicial	8.598318302	0.46033374	8.1379

	Agua absorbida por biomasa (1 gr seca)	13.75490428	12.13948978	1.6154
	Humedad liberada (2 gr en biomasa humedad)	75.73890236	71.67192158	4.0669
Palma rosa	Humedad inicial	9.131345548	0.606156317	8.5251
	Agua absorbida por biomasa (1 gr seca)	13.64064929	12.11575484	1.52489
	Humedad liberada (2 gr en biomasa humedad)	80.6920361	71.8484008	8.843

Aun cuando los resultados experimentales son más pequeños para el Patchouli y Palma rosa, de los encontrados durante los pre-secados para la prueba de poder calorífico, no se puede pasar por alto el cambio en la capacidad de absorción inicial de cada una de las biomásas y como estas cambian como resultado del tratamiento térmico.

De todo lo anterior se pueden inferir las siguientes ideas:

- Existe un relevante cambio entre la humedad absorbida en condiciones de contención para muestras sin tratamiento en comparación con las que han sido tratadas, lo cual sugiere que la torrefacción posee un efecto positivo al momento de preservar los restos, lo cual se puede evidenciar con la prueba realizada al tratamiento **275°C con 15 minutos** (tratamiento 7).
- El agua absorbida durante la primera fase no presenta grandes diferencias entre la biomasa virgen y la que ha sido tratada, esto puede ser resultado en parte al método de sellado usado para los empaques, además de factores como el escurrido de estos antes de proceder con los pesajes, o bien por la disolución de algunos componentes dentro de los restos dentro del agua.

Figura 26. Disolución de componentes en agua, biomasa virgen en comparación con biomasa tratada



A la izquierda contenedores de control para evaporación en el ambiente, arriba contenedores con biomasa sin tratamiento y abajo contenedores con biomasa torrefactada. Se puede apreciar que las muestras tratadas parecen disolverse en mayor medida componentes en el agua.

- Al ser sometidas las biomazas a un ambiente sobresaturado (sumergidas en agua) existe un cambio notable en la capacidad de retención de líquidos, lo cual puede ser beneficioso en caso de accidentes durante contención pero que no conlleva a la total (o parcial) impermeabilidad de las muestras en el caso de inundaciones.
- La mayor ventaja observada del experimento es en la absorción de humedad del aire durante contención (mayor diferencia), de manera que este aspecto requiere de un refinamiento en futuras pruebas para poder determinar los límites de impermeabilidad que el tratamiento térmico debería aportar.
- En la primera prueba se calculó el porcentaje del agua absorbida por la biomasa respecto al líquido disponible; mientras que en la segunda etapa se calcula la pérdida de masa (agua) proporcional a la masa inicial de biomasa, de manera que las dos no puedan ser relacionadas directamente.
- Información de los cálculos realizados y datos recolectados serán expuestos en el anexo E.

## CONCLUSIONES

- Se realizaron las pruebas necesarias para poder caracterizar las biomásas en su estado de recolección, se encontró que: en general que la humedad contenida no superará el 10% masico y que gran parte de esta se perderá durante las 2 primeras horas de secado, la composición de volátiles estará comprendida entre los 70-74% de su composición, las cenizas tendrán la mayor diferencia de valores entre ellas siendo el valor más bajo 5.65% para la Citronela y el más alto 10.41% para el Patchouli. Finalmente, el contenido de carbón fijo estará entre el 18-20% de su composición.
- Se realizaron las pruebas de torrefacción para las temperaturas acordadas dando como resultado una reducción en la masa de los residuos, en donde las menores perdidas se registraron a los 200°C con valores alrededor de 10% y las perdidas más altas se registran a los 300°C con pérdidas alrededor de 46%.
- Se pudo apreciar diferencias en el comportamiento de cada una de las biomásas al tener diferentes tiempos de residencia, en general un mayor tiempo daba como resultado una mayor pérdida de masa; se debe mencionar que para el primer tratamiento (200°C) la diferencia fue casi nula en los casos de Patchouli y Palma rosa, o bien poca para el caso de la Citronela.
- Debido a las limitaciones presentadas por la pandemia, se encontraron relaciones matemáticas para encontrar los poderes caloríficos de las biomásas sin tratamiento y el tratamiento 6 (300°C con 30 minutos), estas relaciones fueron expuestas en los apartados 3.5 y 4.3, que en conjunto con los valores experimentales se usaron para encontrar que efectivamente la torrefacción tiene un efecto positivo en el aumento de la densidad energética.
- Aun cuando se hizo énfasis en el poder calorífico como factor decisivo para elegir el mejor tratamiento, se tomaron en cuenta otros factores importantes a la hora de considerar hacer uso de estos restos como futura fuente de energía, por lo cual se diseñó una manera de cuantificar la calidad de tratamiento térmico (CTT) el cual contiene el poder calorífico como mayor contribuyente, la absorción de humedad,

el rendimiento masico y la eficiencia energética. Con toda esta información se decidió que **la mejor opción es el tratamiento 7 (250°C y 15 minutos)**.

- Haciendo uso pruebas de higrometría y evaluando la humedad absorbida por las biomásas, se encontró que los restos presentan un comportamiento más estable o uniforme al tener el tratamiento 7 (250°C y 15 minutos) durante su guardado para posterior uso, que la humedad absorbida del ambiente tiende a aumentar a medida que el la temperatura de torrefacción es mayor, y que la humedad absorbida en un ambiente sobresaturado es menor para las muestras tratadas que para sus contrapartes sin tratamiento.

## RECOMENDACIONES

- Debido a las limitaciones presentadas en los dispositivos disponibles, se requiere hacer una mayor cantidad de pruebas para los procesos de torrefacción en orden de tener datos con mayor precisión, esto se propone como resultado de una gran cantidad de pruebas que debieron ser rechazadas por las condiciones de operación, número de muestras alojadas en la mufla y problemas con el desecador disponible.
- Las biomásas fueron trituradas para prever problemas en la diferencia en sus composiciones, especialmente en el caso del Patchouli y Palma rosa que poseen tallos leñosos y hojas de diferente composición, por esto se recomienda en futuras investigaciones hacer pruebas separadas para cada parte de la planta, o bien el realizar triturados más finos con el objetivo de hacer uniforme las propiedades de los componentes.
- Durante la fase de secado al sol, se encontraron varios problemas al momento de montar, mantener y recolectar las biomásas debido a factores externos como el viento, la lluvia y el clima, por esto se recomienda diseñar un mejor modelo de contención para secado, así como de tratar de anticipar las condiciones climáticas del día, estos aspectos pueden tener un impacto significativo al momento de determinar la pérdida de humedad (masa) durante estos secados.
- El conjunto de pruebas agrupadas para llevar a cabo el análisis próximo (B-yzoon) partió del hecho de que al realizarse de manera consecutiva, cada uno de los pasos debería dejar 0.5 gr de biomasa restantes para la prueba de cenizas, lo cual se cumplió casi en su totalidad; sin embargo se debe mencionar que, debido a las diferencias entre cada biomasa, el tratar de determinar un porcentaje para hacer las pruebas consecutivas puede ser algo riesgoso, además de tener el potencial de sacrificar una porción importante de tiempo. Por lo cual se recomienda hacer ajustes a la manera en que este porcentaje es decidido o bien evaluar si la realización de pruebas consecutivas ofrece una ventaja significativa.

- Debido a las limitaciones presentadas por la mufla, se aconseja realizar un estudio de pérdidas de calor interna, así como de distribución térmica interna para poder determinar la mejor manera de llevar a cabo los calentamientos de las pruebas, esto debido a que al tener una gran cantidad de muestras por cortos periodos de tiempo se encontraron grandes discrepancias entre los valores observados para las pérdidas de masas, los cuales fueron reducidos significativamente al reducir el número de muestras por experimento pero con un significativo incremento en el tiempo invertido.
- Se sugiere el considerar una manera más optima de realizar la prueba de higrometría ya que, aun cuando puede dar información a considerar como punto de referencia, se ve influenciada por muchos factores para poder dar resultados conclusivos, dentro de los cuales se pueden mencionar a los empaques contenedores de biomasa a ser sumergidos, la porosidad de los materiales usados, el tiempo de escurrido, las perdidas por humedad del ambiente (para lo cual se usaron contenedores de agua de referencia), el pegamento usado para sellar los empaques, entre otros factores.
- Aun cuando el poder calorífico presenta un gran grado de importancia al momento de decidir la mejor opción, se hizo necesario el considerar otras propiedades y aspectos (como el gasto de energía en el proceso en contraste con la mejoría de las propiedades o la masa disponible para ser usada como combustible) relevantes, de manera que se ideo una manera de cuantificar el impacto de estos; sin embargo se recomienda el buscar alternativas para la cuantificaciones de estos factores, especialmente los cualitativos.

## BIBLIOGRAFIA

ASTM E1755-01 "Standard Test Method for Ash in Biomass. [ En línea]. (aprobada en 2015). [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E1755+01\(2015\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1755+01(2015)).

ASTM E1756 – 08, Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. [ en línea]. (aprobada 2015). p.p. 1, 2. [consultada: 1 de Julio de 2022] disponible en: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E1756+08](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E1756+08). 2015.

ASTM E872-82 "Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. [en línea]. (aprobada en 2013). [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?E872+82\(2013\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E872+82(2013)).

BANDONI, A. L.; FOLCARÀ, S. C.; & CYTED (Asociación). Subprograma IV. Biomasa como Fuente de Productos Químicos y Energía. Los Recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica. (2.a ed.). 2003. pp. 12, 13, 19, 20, 58, 126, 127. [Libro electrónico]. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en [https://cyted.org/sites/default/files/recursos\\_vegetales.pdf](https://cyted.org/sites/default/files/recursos_vegetales.pdf).

BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis, "Practical Design and Theory". 1 ed. Kidlington.: Elsevier, 2010, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812992-0.00001-7>. pp. 1-8-12, 23, 24, 30, 31, 49, 50, 54, 82, 106-107. [Consultado el 12 de junio de 2019]. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=QSypbUSdkikC&oi=fnd&pg=PP1&dq=BASU.+Prabir.+Biomass+Gasification+and+Pyrolysis,+%E2%80%9CPractical+Design+and+Theory%E2%80%9D.+1+ed.+Kidlington.:+Elsevier,+2010.+364p.+ISBN+978-0-12-374988-8&ots=Vg0n2bGsfe&sig=SpZ8C1Vvnqf77FG50dpkpBqdtPI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=QSypbUSdkikC&oi=fnd&pg=PP1&dq=BASU.+Prabir.+Biomass+Gasification+and+Pyrolysis,+%E2%80%9CPractical+Design+and+Theory%E2%80%9D.+1+ed.+Kidlington.:+Elsevier,+2010.+364p.+ISBN+978-0-12-374988-8&ots=Vg0n2bGsfe&sig=SpZ8C1Vvnqf77FG50dpkpBqdtPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).

CORTES CAMACHO, Laura Tatiana y MORA CHACÓN, Angi Paola. Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos alimenticios a través de procesos de descomposición térmica. Ingenieras mecánicas. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial De Santander. 2019. pp. 34-36, 60–66. [Cedido por autores].

DAS, Kuntal. Patchouli (*Pogostemon Cablin Benth*) Oils. Chapter 72. Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety. [en línea]. 2016, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-416641-7.00072-9>. pp. 634, 635. [consultado el 1 de Julio de 2022]. ISBN 9780124166417. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124166417000729>

ORTIZ MIER, Nubia Lizeth y VELANDIA ROJAS, Diego Fernando. Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos - caracterización y modelado matemático del proceso. Ingenieros mecánicos. Bucaramanga, Santander. 2018. pp. 23-25. [Cedido por autores].

DIAS JÚNIOR, A. F, et al. Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. [en línea]. 2016, vol. 22, n. 4. pp. 423–430. [consultado el 1 de Julio de 2022]. ISSN 2317-6342. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/01047760201622032175>.

DONELIAN, A. et al. Comparison of extraction of patchouli (*Pogostemon cablin*) essential oil with supercritical CO<sub>2</sub> and by steam distillation. En: The Journal of Supercritical Fluids. [en línea]. 2009, vol 48(1). pp. 15, 16. [consultado el 1 de Julio de 2022]. ISSN 0896-8446. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.09.020>.

GINTING, Zainuddin, et al. Thermal and Physical Properties of Patchouli Essential Oil Industry Residue as Renewable Feedstock for Bioenergy. En: Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering, [en línea]. 2022, vol 2(1). pp. 14, 15.

[consultado el 1 de Julio de 2022]. <https://doi.org/10.29103/jreece.v2i1.6644>. e-ISSN: 2776-0049. Disponible en: <https://ojs.unimal.ac.id/jreece/article/view/6644/3347>

KALTSCHMITT, Martin. Biomass as Renewable Source of Energy, Possible Conversion Routes. En: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology [Libro electrónico]. New York: Springer. 2018. M. Kaltschmitt, & R. S. A. Meyer. pp. 1206–1207. [consultado el 1 de Julio de 2022]. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6>. ISBN: 978-1-4939-2493-6. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11420/4511>.

MORALES TOSCANO, A. C. y SOLANO GONZALEZ, A. F. Certificación de los aceites esenciales de Palma rosa (*Cymbopogon Martinii*) y Citronela (*Cymbopogon Nardus*) Ingenieros Químicos. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. 2017. pp. 19-21.

MUNICIPIO DE BUCARAMANGA SECRETARIA DE PLANEACION; BOHORQUEZ PEDRAZA, L. F.; MEJIA ABELLO, M. y PRADILLA NAVAS, G. E. PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BUCARAMANGA, SEGUNDA GENERACION. [en línea]. Bucaramanga, Santander. 2014. Nro 6. pp. 29. (Documento No. 06). [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://www.concejodebucaramanga.gov.co/pot-2012-2027/tomo06.pdf>.

ÖZYUĞURAN, Ayşe y YAMAN, Serdar. Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. En: Energy Procedia. [en línea]. 2017, vol 107. pp. 130-133, 135. [consultado el 1 de Julio de 2022]. ISSN 1876-6102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149>.

PANDE, Maneesha y BHASKARWAR, Ashok N. (2012). Biomass Conversion to Energy, En: Biomass Conversion. [en línea]. Springer, Berlin, Heidelberg: askar, C. y Baskar, S., Dhillon, R. (eds), 2012. pp. 4, 7. [consultado el 1 de Julio de 2022]. ISBN 978-3-642-28418-2. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2_1).

PARIKH, Jigsha; CHANNIWALA, S.A; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials [en línea]. En: FUEL. Vol., 86, (2017). Pag 1710-1719. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/244067708\\_A\\_correlation\\_for\\_calculating\\_elemental\\_composition\\_from\\_proximate\\_analysis\\_of\\_biomass\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/244067708_A_correlation_for_calculating_elemental_composition_from_proximate_analysis_of_biomass_materials)

RUEDA ORDOÑEZ, Yesid J. Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods. Universidade Estadual de Campinas. 2016. [Cedido por autor].

SAPUTRA, N. A., et al. (2020). Chemical composition of *Cymbopogon nardus* essential oil and its broad-spectrum benefit. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [en línea]. vol 415, Nro 1, 2019. pp. 11, 15. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/415/1/012017>. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/415/1/012017/pdf>.

TERESITA GARCÍA, Rosita. Obtención de aceite esencial de citronela (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la calidad del aceite. [en línea]. Maestría Ingeniería Química. Resistencia: Universidad Tecnológica Nacional. Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica (QUIMOBIO). Facultad Regional Resistencia. 2014. pp. 3, 5, 9, 11. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/847/Tesis%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

VILLACRÉS DELGADO, Yesenia Marisol. (2018). Estudio comparativo de la composición química de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon cf. martini*, *Cymbopogon cf. nardus* aplicado en perfumería. Trabajo de titulación. [en línea]. Bioquímica Farmacéutica. Ecuador, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias. Escuela de bioquímica farmacéutica. 2018. pp. 6, 13-

16. [consultado el 1 de Julio de 2022]. Disponible en:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8837>.

## ANEXOS

### Anexo A. Desarrollo de prueba B-Yzoon para humedades

Cuadro 31. Humedad contenida en Patchouli.

Contenido de humedad Patchouli					
Petri	Muestra	Final	%perdida	Horas	Promedio %
B2	0.505	0.4581	9.287128713	1	9.233633641
B4	0.5196	0.4719	9.180138568		
B10	0.5056	0.458	9.414556962	2	9.402759817
B9	0.509	0.4612	9.390962672		
B7	0.5021	0.4551	9.360685122	3	9.197717079
B1	0.518	0.4712	9.034749035		
B6	0.5053	0.4586	9.242034435	4	9.191117915
B3	0.5164	0.4692	9.140201394		
B8	0.5228	0.4734	9.449120122	24	9.317814029
B5	0.504	0.4577	9.186507937		

Contenido de humedad		
Promedio total	Desviación	Desviación porcentual
9.268608496	0.008167846	0.086866478

Cuadro 32. Humedad contenida en Citronela.

Contenido de humedad de Citronela					
Petri	Muestra	Final	%perdida	Horas	Promedio humedad %
A8	0.5057	0.464	8.24599565	1	8.170944376
A7	0.5089	0.4677	8.095893103		
A6	0.5064	0.4621	8.748025276	2	8.850431503
A5	0.5004	0.4556	8.95283773		
A4	0.5004	0.4584	8.393285372	3	8.508497854
A3	0.5137	0.4694	8.623710337		
A2	0.5031	0.4597	8.626515603	4	8.569415437
A1	0.5075	0.4643	8.512315271		
A9	1.8046	1.6541	8.339798293	24	8.305796865
A10	1.8146	1.6645	8.271795437		

Contenido de humedad		
Promedio total	Desviación	Desviación porcentual
8.481017207	0.260637618	2.911229105

Cuadro 33. Humedad contenida en Palma rosa.

Humedad Palmarosa					
Petri	Muestra	Final	%perdida	Horas	Promedio %
C1	0.5017	0.4586	8.59079131	1	8.603672344
C2	0.5002	0.4571	8.616553379		
C3	0.5039	0.4577	9.168485811	2	9.277312212
C4	0.505	0.4576	9.386138614		
C5	0.5129	0.4664	9.066094755	3	9.025234878
C6	0.512	0.466	8.984375		
C7	0.5022	0.4558	9.239346874	4	9.256489357
C8	0.5025	0.4559	9.273631841		
C9	0.5147	0.4681	9.053817758	24	9.053698085
C10	0.5114	0.4651	9.053578412		

Contenido de humedad		
Promedio total	Desviación	Desviación porcentual
9.043281375	0.07347959	0.792035327

**Anexo B. Pruebas B-zyoon para determinar la humedad, volatiles y cenizas contenidas.**

Cuadro 34. Humedad contenida en muestras de Citronela en operación de pre-secado.

Pre-secado Citronela				
Crisol	Muestra	Masa final	Masa perdida	% Perdida
A1	1.8046	1.6541	0.1505	8.339798293
A2	1.8146	1.6645	0.1501	8.271795437
A3	1.8299	1.6777	0.1522	8.317394393

Promedio	Varianza	Varianza porcentual
8.309662708	0.00120093	0.014400005

Cuadro 35. Volátiles contenidos en muestras de Citronela.

Volatiles Citronela				
Crisol	Masa inicial seca	Masa final	Perdida volatiles	% Perdida volatiles
A1	1.6541	0.4288	1.2253	74.07653709
A2	0	0	0	0
A3	1.6777	0.4322	1.2455	74.23854086

Promedio	Varianza	Varianza porcentual
74.15753897	0.01312261	0.017676278

Lamentablemente, durante la prueba de volátiles, el contenedor designado como A2 estallo debido a un pequeño escape de aire durante el manejo de este.

Cuadro 36. Contenido de cenizas en Citronela.

Cenizas Citronela					
Crisoles	Completo	Masa inicial	Final 3h	Muestra perdida 3h	Masa remanente 3h
A1	39.4774	0.4288	39.1442	0.3332	0.0956
A3	39.5294	0.4322	39.1903	0.3391	0.0931
Crisoles	Final 1h (4)	Muestra perdida 1h (4)	Masa remanente (4)		
A1	39.1428	0.3346	0.0942		
A3	39.1903	0.3391	0.0931		
Crisoles	Final 1h (5)	Muestra perdida 1h (5)	Masa remanente (5)		
A1	39.1435	0.3339	0.0949		
A3	39.1908	0.3386	0.0936		
Crisoles	Final 1h (6)	Muestra perdida 1h (6)	Masa remanente (6)	% Masas remanentes desde volátiles	
A1	39.1435	0.3339	0.0949	5.737258932	
A3	39.1907	0.3387	0.0935	5.573106038	
			Promedio	Varianza	Varianza porcentual
			5.655182485	0.124015368	0.560356057

Cuadro 37. Humedad contenida en muestras de Patchouli operación de pre-secado.

Pre-secado Patchouli				
Crisol	Muestra	Masa final	Masa perdida	% Perdida
B1	1.8278	1.6495	0.1783	9.754896597
B2	1.8014	1.6257	0.1757	9.753525036
B3	1.806	1.6279	0.1781	9.861572536
B4	1.8303	1.6503	0.18	9.834453368
Promedio	Varianza	Varianza porcentual		
9.801111884	0.003055835	0.030987302		

Cuadro 38. Volátiles contenidos en muestras de Patchouli.

Volatiles Patchouli				
Crisol	Masa inicial seca	Masa final	Perdida volatiles	% Perdida volatiles
B1	1.6495	0.4816	1.1679	70.80327372
B2	1.6257	0.4772	1.1485	70.64649074
B3	1.6279	0.4701	1.1578	71.12230481
B4	1.6503	0.4769	1.1734	71.10222384
Promedio	Varianza	Varianza porcentual		
70.91857328	0.054185653	0.076186582		

Cuadro 39. Contenido de cenizas en Patchouli.

Cenizas Patchuli						
Crisoles	Completo	Masa inicial	Final 3h	Muestra perdida 3h	Masa remanente 3h	
B1	38.5584	0.4816	38.7313	0.3087	0.1729	
B2	40.8261	0.4772	41.02	0.2833	0.1939	
B3	32.4181	0.4701	32.5902	0.298	0.1721	
B4	36.4281	0.4769	36.6	0.305	0.1719	
Crisoles	Final 1h (4)	Muestra perdida 1h (4)		Masa remanente (4)		
B1	38.7309	0.3091		0.1725		
B2	40.9975	0.3058		0.1714		
B3	32.5897	0.2985		0.1716		
B4	36.5999	0.3051		0.1718		
Crisoles	Final 1h (5)	Muestra perdida 1h (5)		Masa remanente (5)		
B1	38.7291	0.3109		0.1707		
B2	40.9959	0.3074		0.1698		
B3	32.5882	0.3		0.1701		
B4	36.5982	0.3068		0.1701		
Crisoles	Final 1h (6)	Muestra perdida 1h (6)		Masa remanente (6)		% Masas remanentes desde volátiles
B1	38.7299	0.3101		0.1715		10.39709003
B2	40.996	0.3073		0.1699		10.4508827
B3	32.5885	0.2997		0.1704		10.46747343
B4	36.5985	0.3065		0.1704		10.32539538
Promedio				Varianza		Varianza porcentual
10.41021038				0.004099674		0.039165841

Cuadro 40. Humedad contenida en muestras de Palma rosa operación de pre-secado.

Pre-secado Palmarosa				
Crisol	Muestra	Masa final	Masa perdida	% Perdida
C1	1.8046	1.6579	0.1467	8.129225313
C2	1.8119	1.6676	0.1443	7.964015674
C3	1.807	1.6579	0.1491	8.251245158
C4	1.8015	1.6533	0.1482	8.226477935
Promedio		Varianza		Varianza porcentual
8.14274102		0.016970147		0.205667716

Cuadro 41. Volátiles contenidos en muestras de Palma rosa.

Volatiles Palamarosa				
Crisol	Masa inicial seca	Masa final	Perdida volatiles	% Perdida volatiles
C1	1.6579	0.4649	1.193	71.95850172
C2	1.6676	0.457	1.2106	72.59534661
C3	1.6579	0.4562	1.2017	72.48326196
C4	1.6533	0.4453	1.208	73.06598923
Promedio		Varianza		Varianza porcentual
72.52577488		0.20675932		0.282976146

Cuadro 42. Contenido de cenizas en Palma rosa.





Cenizas Palma rosa					
Crisoles	Completo	Masa inicial	Final 3h	Muestra perdida 3h	Masa remanente
C1	41.7147	0.4649	41.4035	0.3112	0.1537
C2	32.8762	0.457	32.5744	0.3018	0.1552
C3	36.8827	0.4562	36.5797	0.303	0.1532
C4	32.4616	0.4453	32.1709	0.2907	0.1546
Crisoles	Final 1h (4)	Muestra perdida 1h (4)	Masa remanente (4)		% Masas remanentes desde volátiles
C1	41.4034	0.3113	0.1536		9.264732493
C2	32.5743	0.3019	0.1551		9.300791557
C3	36.5798	0.3029	0.1533		9.246637312
C4	32.1707	0.2909	0.1544		9.338897962
Promedio			Varianza		Varianza porcentual

9.287764831	0.001668751	0.017868825
-------------	-------------	-------------

### Anexo C. Historial de torrefacciones.

Para las tablas se usaron código de colores en orden de dar una guía visual para interpretar los resultados.

Figura 27. Código de colores para los resultados de las torrefacciones.

	Resultado favorable y dato aceptable.
	Resultado favorable y muestra usada para mezclarse con otras muestras.
	Resultado no favorable.
	Resultado perdido y rechazado.

En las siguientes tablas se despliegan los valores manejados en pérdidas de cada nivel, así como los promedios obtenidos para cada tratamiento térmico respecto a la cantidad de masa perdida durante cada proceso, teniendo en cuenta que la falta de un valor simboliza que dicha prueba no se realizó; por el contrario, un guion (-) indicaría que, como grupo, las muestras de dicho colectivo fallaron en alcanzar los estándares para ser usadas posteriormente.



Historial de pruebas 200°C y 30 minutos				
	Primera prueba	Segunda prueba	Combinatoria	Tercera prueba
Citronela	12.39407473	12.51559425	-	13.13021629
Patchouli	12.21978345	12.16365112	12.19171729	-
Palmarosa	10.79164709	11.15439281	-	10.55596379

La primera y segunda prueba presentaron problemas para las especies Citronela y Palma rosa, esto se debió a que la segunda fue mezclada con la primera en un periodo anterior al desarrollo de las reglas de control explicadas anteriormente. En la tercera prueba se consideró tener suficientes masas de las biomásas faltantes para no requerir futuras repeticiones.

Cuadro 45. Promedios de torrefacción 250°C y 15 minutos.

Citronela	% Perdida 1	Desviacion	citronela	% Perdida 2	Desviacion	Citronela	% Perdida 3	Desviacion	Citronela	% Perdida 4	Desviacion
1A	15.8895825	2.96337285	1A	18.5243894	1.26908974	1A	20.449295	6.83646999	1A	19.7739666	0.46113521
2A	20.5106015	Porcentual	2A	21.6209538	Porcentual	2A	34.4932405	Porcentual	2A	20.3659601	0.56477298
3A	23.0479515	12.857424	3A	20.3095597	5.86972132	3A	19.572303	19.8197383	3A	19.2368588	Porcentual
Patchouli		Desviacion	Patchouli		Desviacion	Patchouli	%perdida 3	Desviacion			2.26424486
1B	17.8365938	1.87962479	1B	15.1960362	2.31300404	1B	23.0858424	1.55946646			2.77312228
2B	20.8864936	Porcentual	2B	19.8305821	Porcentual	2B	20.3485596	Porcentual	Patchouli	% Perdida 4	Desviacion
3B	22.3485213	8.41051077	3B	20.3356633	11.3741264	3B	19.4097841	6.75507714	1B	19.9469664	0.65634221
Palma rosa		Desviacion	Palma rosa		Desviacion	Citronela	% Perdida 4	Desviacion	2B	19.1655802	0.80385176
1C	15.658363	1.98918054	1C	15.5415583	1.36768368	1A	19.7739666	0.46113521	3B	18.3394702	Porcentual
2C	19.4205084	Porcentual	2C	18.4628394	Porcentual	2A	20.3659601	0.56477298			3.29043626
3C	20.2209414	9.83723011	3C	18.4224457	7.4077646	3A	19.2368588	Porcentual			4.02994493
									Palma rosa	% Perdida 4	Desviacion
											2.26424486
											2.77312228
									1C	17.3060934	0.74857158
									2C	17.6475279	0.9168092
						Patchouli	% Perdida 4	Desviacion	3C	15.9166234	Porcentual
						1B	19.9469664	0.65634221			4.24179287
						2B	19.1655802	0.80385176			5.19511406
						3B	18.3394702	Porcentual			
											3.29043626
											4.02994493
						Palma rosa	% Perdida 4	Desviacion			
						1C	17.3060934	0.74857158			
						2C	17.6475279	0.9168092			
						3C	15.9166234	Porcentual			
											4.24179287
											5.19511406

Historial de pruebas 250°C y 15 minutos				
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	Cuarta prueba
Citronela	19.81604516	20.15163427	24.83827952	19.79226186
Patchouli	20.35720291	18.45409385	20.94806203	19.15067228
Palmarosa	18.43327093	17.47561448	-	16.95674823

En este nivel del tratamiento térmico se puede evidenciar por primera vez la importancia de tener las condiciones para aceptar los resultados, además de requerir de una menor cantidad de contenedores en la mufla al mismo tiempo para obtener así un mejor comportamiento respecto al calentamiento. En general se determinó que los contenedores con mayor cercanía a la puerta de la mufla presentaban mayores

desviaciones respecto a sus contrapartes, de manera que al rediseñar la manera en que estas eran distribuidas y separando cada etapa en experimentos para cada una de las especies se empezaron a tener mejores resultados a pesar de requerir 3 veces más tiempo para completar cada fase.

Cuadro 46. Promedios de torrefacción 250°C y 30 minutos.

Citronela	% Perdida 1	Desviacion	Citronela	% Perdida 2	Desviacion	Citronela	% Perdida 3	Desviacion
1A	16.2662663	4.39226621	1A	18.0258624	3.44473787	1A	26.5371914	0.26772077
2A	24.7108199	Porcentual	2A	25.9078236	Porcentual	2A	27.1354599	0.32788964
3A	26.2618564	16.7248886	3A	24.575291	13.2961299	3A	26.603751	Porcentual
Patchouli		Desviacion	Patchouli		Desviacion			0.98660857
1B	17.5528979	4.27320714	1B	20.024355	3.57473024			1.20834379
2B	25.1166278	Porcentual	2B	27.3179292	Porcentual	Patchouli	% Perdida 3	Desviacion
3B	27.6008493	15.4821582	3B	27.8672074	12.8277304	1B	28.9187185	1.38967505
Palma rosa		Desviacion	Palma rosa		Desviacion	2B	27.2498328	1.70199739
1C	17.5061582	3.64087795	1C	18.411146	2.36945229	3B	25.5149371	Porcentual
2C	24.2715875	Porcentual	2C	24.2033867	Porcentual			4.8054517
3C	25.9211377	14.0459805	3C	21.6263736	9.78975511			5.88545232
						Palma rosa	% Perdida 3	Desviacion
						1C	21.285952	1.11444422
						2C	23.2851553	1.36490984
						3C	20.675794	Porcentual
								4.78607165
								5.8617167

<b>Historial de pruebas 250°C y 30 minutos</b>			
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba
Citronela	22.41298086	22.83632566	26.75880078
Patchouli	23.42345831	25.06983054	27.22782947
Palmarosa	22.56629445	21.41363547	21.7489671

Al igual que las restantes fases, esta presento el problema derivado de la distribución y cantidad de muestras. La tercera prueba fue valida gracias a los hallazgos realizados en el nivel anterior.

Cuadro 47. Promedios de torrefacción 275°C y 15 minutos.

Citronela	% Perdida 1	Desviación	Citronela	% Perdida 2	Desviación	Citronela	% Perdida 3	Desviación
1A	23.5904794	3.78590443	1A	20.7406415	3.82980778	1A	32.2087969	0.87767681
2A	31.633249	Porcentual	2A	28.260675	Porcentual	2A	31.6306717	1.07493017
3A	31.6098911	11.9681176	3A	29.3576374	13.0453542	3A	30.1264822	Porcentual
Patchouli		Desviación	Patchouli		Desviación			2.72495993
1B	23.1585518	4.28207614	1B	23.0805781	3.07882436			3.33738069
2B	32.0822808	Porcentual	2B	28.0670017	Porcentual	Patchouli	% Perdida 3	Desviación
3B	32.3941034	13.2186901	3B	30.4735758	10.1032592	1B	31.007081	0.89999344
Palma rosa		Desviación	Palma rosa		Desviación	2B	30.6998187	1.10226236
1C	21.0106865	4.79767021	1C	23.2627579	1.98835721	3B	28.9629105	Porcentual
2C	30.7549792	Porcentual	2C	27.8236655	Porcentual			2.90254166
3C	31.5719406	15.195994	3C	27.0229519	7.1462806			3.55487301
						Palma rosa	% Perdida 3	Desviación
						1C	28.5188847	0.67348944
						2C	27.3892319	0.82485274
						3C	26.9128765	Porcentual
								2.36155602
								2.89230363

Combinatoria 3 y 4 prueba			Citronela	Higrometría	Desviación
Patchouli	% Perdida 3	Desviación	1A	33.4883906	1.11247731
1B	31.007081	0.78293796	2A	32.1878217	1.36250088
2B	30.6998187	0.87535126	3A	30.7643134	Porcentual
3B	28.9629105	Porcentual			3.32197901
Patchouli	% Perdida 4	2.52502957			4.06857676
2B	29.5613653	2.82306888	Patchouli	Higrometría	Desviación
3B	29.4389176		2B	32.3984294	2.45046094
Palma rosa	% Perdida 3	Desviación	3B	27.4975075	3.4654751
1C	28.5188847	0.75389585			Porcentual
2C	27.3892319	0.84288119			7.56351771
3C	26.9128765	Porcentual			10.6964293
Palma rosa	% Perdida 4	2.64349697	Palma rosa	Higrometría	Desviación
2C	26.254996	2.95551946	1C	29.5462679	0.75146632
3C	27.6399745		2C	28.7591882	0.92035452
			3C	27.7117088	Porcentual
					2.54335445
					3.11496032

Citronela	%perdida 3, 4 y higrometría	desviación
A1	32.20879691	1.08354002
A2	31.63067169	1.18695862
A3	30.12648221	porcentual
HA1	33.48839059	3.2355691
HA2	32.18782168	3.54438836
HA3	30.7643134	
Patchouli	%perdida 3, 4 y higrometría	desviación
1B	31.00708104	1.46749324
2B	30.69981874	1.58507386
3B	28.96291047	porcentual
2B.2	29.56136534	4.52951971
3B.2	29.43891763	4.89244045
HB2	32.39842936	
HB3	27.49750748	
Palma rosa	%perdida 3, 4 y higrometría	desviación
1C	28.51888471	0.99049082
2C	27.38923185	1.05887923
3C	26.91287654	porcentual
2C.2	26.254996	3.35233819
3C.2	27.63997448	3.58380027
HC1	29.54626794	
HC2	28.75918824	
HC3	27.71170884	

#### Historial de pruebas 275°C y 15 minutos

	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	Cuarta prueba
Citronela	28.94453981	26.11965127	31.3219836	-
Patchouli	29.21164532	27.20705187	30.22327008	30.77655108
Palma rosa	27.77920208	26.03645842	27.6069977	24.78425012

#### Historial de pruebas 275°C y 15 minutos

	Combinatoria 1	Higrometría	Combinatoria prueba higrometría, 3 y 4 prueba
Citronela	-	32.14684189	31.73441274
Patchouli	29.93401864	29.94796842	29.93800429
Palma rosa	27.34319272	28.67238834	27.84164108

La tercera prueba fue válida para todas las especies, en posteriores análisis se demostró que este nivel presentaba el mejor comportamiento para ser usado como posible fuente de energía y por tanto se requirió hacer una repetición de esta torrefacción para tener masa disponible para el experimento de higrometría así como de otras pruebas. Finalmente se hace una combinatoria de los resultados satisfactorios para un análisis como grupo. Además, se debe mencionar que los

Cuadro 48. Promedios de torrefacción 275°C y 30 minutos.

Citronela	% Perdida 1	Desviacion	Citronela	% Perdida 2	Desviacion
1A	21.2800928	6.9417563	1A	31.7620738	2.09405753
2A	35.6250645	Porcentual	2A	35.6043318	Porcentual
3A	36.3590477	19.092239	3A	32.2399354	5.88146842
Patchouli		Desviacion	Patchouli		Desviacion
1B	24.4385733	6.12452617	1B	29.2595078	3.74860694
2B	36.3126116	Porcentual	2B	36.4487048	Porcentual
3B	38.3159706	15.9842647	3B	37.800906	9.9167119
Palma rosa		Desviacion	palma rosa		Desviacion
1C	30.8071239	3.2874571	1C	31.8336032	1.95456133
2C	36.1564105	Porcentual	2C	35.7568581	Porcentual
3C	38.6944473	8.4959402	3C	31.4187946	5.4662558
Citronela	% Perdida 3	Desviacion		% Perdida 4	
1A	33.01259206	0.74044067			
2A	33.65929592	0.90685091			
3A	34.80341335	Porcentual			
		2.12749439	Patchouli	% Perdida 4	Desviacion
		2.60563785	1B	40.44532803	2.08798728
Patchouli	% Perdida 3	Desviacion	2B	38.86391662	Porcentual
1B	37.94348265	1.95636911	3B	35.44238273	5.16249312
2B	33.18417614	Porcentual	palma rosa	% Perdida 4	Desviacion
3B	35.07910107	5.15600828	1C	33.49984015	1.20046661
palma rosa	% Perdida 3}	Desviacion	2C	36.29614847	1.47026532
1C	31.78973221	1.34807895	3C	34.11025376	Porcentual
2C	34.8277769	1.65105278			3.30742147
3C	34.42930766	Porcentual			4.05074749
		3.87070055			
		4.74062065			
<b>Combinatoria 3 y 4 prueba</b>					
palma rosa	% Perdida 3	Desviacion			
1C	31.78973221	1.06361096			
2C	34.8277769	1.1891532			
3C	34.42930766	Porcentual			
palma rosa	% Perdida 4	Desviacion			
1C.1	33.49984015	3.41438158			
3C.1	34.11025376				

	%perdida 5			%perdida 6		promedio
						citronela 33.8251004
						patchouli 35.1145888
Patchouli	% Perdida 5	Desviacion	Patchouli	% Perdida 6	Desviacion	
1B	33.1759197	0.80776507	1B	36.3470174	1.86605968	palmarosa 33.7313821
2B	34.7073142	0.98930612	2B	36.31604	2.07807617	
3B	35.0266529	Porcentual	3B	40.1282051	Porcentual	
		2.30614404	4B	39.7089232	4.65024457	
		2.82443808			5.17859237	

Combinatoria patchuli 5 y 6 prueba					
Patchouli	% Perdida 5	Desviacion	pachuli	% Perdida 5	Desviacion
1B	33.1759197	2.58041128	1B	33.1759197	1.3128603
2B	34.7073142	2.58041128			1.3128603
3B	35.0266529	Porcentual	2B	34.7073142	Porcentual
Patchouli	% Perdida 6	6.43041789	3B	35.0266529	3.61201658
1B	36.3470174	7.09937559	pachuli	% Perdida 6	3.61201658
2B	36.31604		1B	36.3470174	
3B	40.1282051		2B	36.31604	
4B	39.7089232				

Historial de pruebas 275°C y 30 minutos				
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	
Citronela	31.08806835	33.20211363	33.82510045	
Patchouli	33.02238517	34.50303951	35.40225329	
Palma rosa	35.21932723	33.00308531	33.68227226	
	Cuarta prueba	Quinta prueba	Sexta prueba	Combinatoria 1
Citronela	-	-	-	-
Patchouli	38.25054246	34.30329557	38.12504643	35.11458883
Palma rosa	34.63541413	-	-	33.73138214

Las primera y segunda pruebas no fueron validas según los estándares establecidos, la tercera prueba fue válida para las biomásas excepto el Patchouli, la cuarta prueba solo fue válida para la Palma rosa, las pruebas 5 y 6 solo se realizaron para el Patchouli de manera que se tuviera la masa necesaria para otras pruebas. Como se puede observar, para conservar la validez de la combinatoria, se hizo necesario el eliminar algunas de las instancias de Patchouli de manera que se no se excedieran los límites establecidos.



Cuadro 50. Promedios de torrefacción 300°C y 30 minutos.

Citronela	% Perdida 1	Desviación	Citronela	% Perdida 2	Desviación	Citronela	% Perdida 3	Desviación
1A	37.8697729	4.69786689	1A	40.5158248	2.54204014	1A	47.1437589	0.79335638
2A	47.4708952	Porcentual	2A	46.3582461	Porcentual	2A	47.6786625	0.97165915
3A	48.1638418	9.7539289	3A	41.5719774	5.48346918	3A	49.0291641	Porcentual
Patchouli		Desviación	Patchouli		Desviación			1.61813156
1B	41.6666667	3.19724659	1B	38.9207712	3.75904298			1.98179833
2B	48.3261238	Porcentual	2B	47.8558968	Porcentual	Patchouli		Desviación
3B	48.5656331	6.58335202	3B	41.4623363	7.8549212	1B	47.9061188	0.86229165
Palma rosa		Desviación	Palma rosa		Desviación	2B	46.0352685	1.05608727
1C	42.7386979	3.30846912	1C	56.9179311	6.16215533	3B	46.1216351	Porcentual
2C	50.1241979	Porcentual	2C	45.5743349	Porcentual			1.7999614
3C	49.3206775	6.60054278	3C	42.6225125	10.8263867			2.2044935

Citronela	% Perdida 4	Desviación
1A	42.9012346	0.83665624
2A	44.6159921	1.02469043
3A	44.730558	Porcentual
		1.95019151
		2.38848706
Patchouli		Desviación
1B	45.8928358	0.7643048
2B	47.5521973	0.93607839
3B	47.4732615	Porcentual
		1.66541202
		2.03970482
Palma rosa		Desviación
1C	44.376924	0.53647903
2C	44.5560338	0.65704994
3C	43.3390555	Porcentual
		1.23786507
		1.51606889

Combinatoria		
Citronela	% Perdida 3	Desviación
1A	47.1437589	1.73002319
2A	47.6786625	2.29911242
3A	49.0291641	Porcentual
citronela	% Perdida 4	4.03257203
1A.2	42.9012346	5.35908218
2A.2	44.6159921	
3A.2	44.730558	
Patchouli	% Perdida 3	Desviación
1B	47.9061188	0.84882212
2B	46.0352685	0.90609506
3B	46.1216351	Porcentual
Patchouli	% Perdida 4	1.84957435
1B.2	45.8928358	1.89139734
2B.2	47.5521973	
3B.2	47.4732615	
Palma rosa	% Perdida 3	Desviación
1C	45.8709805	1.47302338
2C	47.8361269	1.61361627
3C	46.3259038	Porcentual
Palma rosa	% Perdida 4	3.39883591
1C.2	44.376924	3.72323819
2C.2	44.5560338	
3C.2	43.3390555	

Palma rosa		Desviación
1C	45.8709805	0.83994245
2C	47.8361269	1.0287152
3C	46.3259038	Porcentual
		1.75587469
		2.24262746

Historial de pruebas 300°C y 30 minutos					
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba	Cuarta prueba	Combinatoria
Citronela	44.50150331	42.81534945	47.95052849	44.08259489	46.63962711
Patchouli	46.18614119	42.74633479	46.68767411	46.97276486	46.83021949
Palma rosa	47.3945244	48.37159285	46.67767038	44.09067108	45.38417073

Del último nivel se hicieron tres pruebas, las dos primeras no aportaron resultados que cumplieran con los requisitos establecidos, la tercera y cuarta prueba todos los resultados probaron ser satisfactorios, desafortunadamente la muestra 1A.2 se perdió durante la recolección de biomasa por lo que su valor es válido, pero no se tuvo en cuenta

## Anexo D. Prueba de poder calorífico.

Cuadro 51. Secado de biomásas torrefactadas antes de las pruebas.

Citronela							
Especimen	Conjunto	Muestra	Final	Remanente	Humedad	%Humedad	%Promedio
X1	19.0398	4.1079	23.0383	3.9985	0.1094	2.663161226	2.382414868
X1.2	17.8399	2.1938	19.984	2.1441	0.0497	2.265475431	
X2	18.4561	2.3979	20.8008	2.3447	0.0532	2.218607949	2.201924339
X2.2	17.6028	3.7431	21.2651	3.6623	0.0808	2.158638562	
X3	17.2691	2.9257	20.1296	2.8605	0.0652	2.228526506	2.147265398
X3.2	18.8936	2.8339	21.6648	2.7712	0.0627	2.212498677	
X4	18.9093	2.594	21.4514	2.5421	0.0519	2.00077101	2.197994434
X4.2	18.1325	2.735	20.8174	2.6849	0.0501	1.831809872	
X7	18.1057	2.9007	20.9263	2.8206	0.0801	2.76140242	2.650170908
X7.2	18.1314	2.0562	20.1426	2.0112	0.045	2.188503064	
X8	19.0311	4.7757	23.6635	4.6324	0.1433	3.000607241	2.888375818
X8.2	17.8206	2.371	20.1319	2.3113	0.0597	2.517924926	
X5	12.4577	3.6611	16.0036	3.5459	0.1152	3.146595286	3.608913824
X5.2	18.8999	4.6474	23.3919	4.492	0.1554	3.343805138	
X6	10.6956	3.8235	14.3533	3.6577	0.1658	4.336341049	4.089134416
X6.2	17.9035	2.6393	20.4414	2.5379	0.1014	3.841927784	

Patchouli							
Especimen	Conjunto	Muestra	Final	Remanente	Humedad	%Humedad	%Promedio
Y1	20.373	3.5904	23.7695	3.3965	0.1939	5.400512478	5.595719801
Y1.2	19.0312	3.9355	22.7532	3.722	0.2135	5.424977766	
Y2	18.1059	3.6785	21.5651	3.4592	0.2193	5.961669159	5.041329553
Y2.2	17.752	3.0638	20.6326	2.8806	0.1832	5.979502578	
Y3	18.3084	2.37117	20.6041	2.2957	0.07547	3.182816922	3.226870107
Y3.2	17.7791	2.1446	19.8524	2.0733	0.0713	3.324629302	
Y4	18.8697	2.7575	21.5397	2.67	0.0875	3.173164098	2.99061217
Y4.2	18.8222	1.9468	20.7076	1.8854	0.0614	3.153893569	
Y7	18.7508	3.9474	22.5938	3.843	0.1044	2.644778842	2.612435031
Y7.2	14.2537	3.2698	17.4483	3.1946	0.0752	2.299834852	
Y8	18.2651	3.5123	21.6758	3.4107	0.1016	2.892691399	3.321014095
Y8.2	-	-	-	-	-	-	
Y5	18.2831	3.3926	21.5485	3.2654	0.1272	3.749336792	3.906757503
Y5.2	-	-	-	-	-	-	
Y6	17.4772	4.5249	21.8182	4.341	0.1839	4.064178214	4.064178214
Y6.2	-	-	-	-	-	-	

Palma rosa							
Especimen	Conjunto	Muestra	Final	Remanente	Humedad	%Humedad	%Promedio
Z1	19.4422	3.414	22.7019	3.2597	0.1543	4.519625073	4.22766474
Z1.2	18.4181	4.0297	22.2758	3.8577	0.172	4.268307814	
Z2	18.0755	3.1142	21.0684	2.9929	0.1213	3.895061332	3.835539767
Z2.2	18.2888	2.3573	20.5566	2.2678	0.0895	3.796716583	
Z3	17.2605	3.2059	20.3441	3.0836	0.1223	3.814841386	3.664538739
Z3.2	17.8392	2.5557	20.3097	2.4705	0.0852	3.333724616	
Z4	17.7518	3.485	21.1028	3.351	0.134	3.845050215	3.095202123
Z4.2	17.6024	1.954	19.4917	1.8893	0.0647	3.311156602	
Z7	19.3547	3.1793	22.4663	3.1116	0.0677	2.129399553	2.494838028
Z7.2	-	-	-	-	-	-	
Z8	18.9081	3.4647	22.2737	3.3656	0.0991	2.860276503	2.705312071
Z8.2	-	-	-	-	-	-	
Z5	17.8391	3.3368	21.0908	3.2517	0.0851	2.550347638	2.550347638
Z5.2	-	-	-	-	-	-	
Z6	-	-	-	-	-	-	
Z6.2	-	-	-	-	-	-	

Cuadro 52. Comparación entre humedad absorbida durante contención para biomásas torrefactadas.

%Humedad				
Especimen	Tratamiento	Citronela	Patchouli	Palma rosa
1	200°C 15 minutos	2.382414868	5.595719801	4.22766474
2	200°C 30 minutos	2.201924339	5.041329553	3.835539767
3	250°C 15 minutos	2.147265398	3.226870107	3.664538739
4	250°C 30 minutos	2.197994434	2.99061217	3.095202123
7	275°C 15 minutos	2.650170908	2.612435031	2.494838028
8	275°C 30 minutos	2.888375818	3.321014095	2.705312071
5	300°C 15 minutos	3.608913824	3.906757503	2.550347638
6	300°C 30 minutos	4.089134416	4.064178214	-

Cuadro 53. Poderes caloríficos de biomásas torrefactadas en MJ/Kg.

Poderes caloríficos de biomásas torrefactadas en MJ/Kg.					
CITRONELA		PATCHOULI		PALMA ROSA	
ESPECIMEN	PODER	ESPECIMEN	PODER	ESPECIMEN	PODER
X1	18.59806667	Y1	17.6113	Z1	18.25745
X2	18.8438	Y2	17.91345	Z2	18.29765
X3	19.77975	Y3	19.03915	Z3	19.04025
X4	20.1825	Y4	19.6382	Z4	19.5885
X7	20.884	Y7	20.1011	Z7	19.9155
X8	21.0714	Y8	20.6214	Z8	20.7216
X5	22.4978	Y5	21.3105	Z5	21.4126

X6	23.1389	Y6	Z6
----	---------	----	----

## Anexo E. Pruebas de higrometría, resultados organizados.

Cuadro 54. Secado de biomásas sin tratamiento.

Secado de biomásas					
Citronela					
	Muestra inicial	Muestra final	Perdida masa	% Humedad	Promedio
A1	1.5031	1.3753	0.1278	8.502428315	8.598318302
A2	1.5056	1.3747	0.1309	8.694208289	
Patchouli					
B1	1.5102	1.3632	0.1278	8.502428315	8.598318302
B2	1.507	1.3619	0.1309	8.694208289	
Palmarosa					
C1	1.5016	1.3654	0.1362	9.070324987	9.131345548
C2	1.5143	1.3751	0.1392	9.19236611	

Cuadro 55. Primera etapa de prueba de higrometría para biomásas sin tratamiento térmico.

Prueba de higrometría de biomasa							
Citronela							
	Biomasa	Agua inicial	Agua final	Perdida por absorcion	Perdida por absorcion%	Agua absorbida por biomasa	Agua absorbida por biomasa%
A1	1.0918	61.0855	51.3768	8.7804	14.37395127	7.564446685	12.38337524
A2	1.0264	60.3822	50.8301	8.6238	14.28202351	7.429533429	12.3041781
Patchouli							
B1	1.1572	60.379	50.1618	9.2889	15.38432236	8.002527084	13.25382514
B2	1.1306	60.5128	49.5711	10.0134	16.54757341	8.626694733	14.25598342
Arbitros para perdida de agua							
#1		65.0722	64.1286	0.9436			
#2		60.4541	59.5411	0.913			
			Promedio	0.9283			
Palmarosa							
C1	1.0323	60.6112	50.3209	9.67875	15.96858336	8.338388724	13.75717479
C2	1.0342	59.3178	49.3945	9.31175	15.69807039	8.022212703	13.52412379
Arbitros para perdida de agua							
#1		60.599	59.9752	0.6238			
#2		60.2386	59.6393	0.5993			
			Promedio	0.61155			

Cuadro 56. Secado de biomásas con tratamiento de 275°C y 15 minutos.

Secado de biomásas torrefactadas 275 y 15 minutos					
Citronela					
	Muestra inicial	Muestra final	Perdida masa	% Humedad	Promedio
X1	1.4977	1.4652	0.0325	2.169993991	2.034004547
X2	1.4963	1.4679	0.0284	1.898015104	
Patchouli					
Y1	1.5053	1.4996	0.0057	0.378662061	0.46033374
Y2	1.5498	1.5414	0.0084	0.54200542	
Palmarosa					
Z1	1.4931	1.4839	0.0092	0.616167705	0.606156317
Z2	1.5097	1.5007	0.009	0.596144929	

Cuadro 57. Primera etapa de prueba de higrometría para biomásas con tratamiento de 275°C y 15 minutos.

Prueba de higrometría de biomasa torrefactada 275 y 15 minutos							
Citronela							
	Biomasa	Agua inicial	Agua final	Perdida por absorcion	Perdida por absorcion%	Agua absorbida por biomasa	Agua absorbida por biomasa%
X1	1.0306	60.5854	51.7627	8.37165	13.81793303	7.212302411	11.90435717
X2	1.0245	60.4298	51.272	8.70675	14.4080404	7.500996102	12.41274355
Patchouli							
Y1	1.1587	60.2805	51.0488	8.78065	14.56631912	7.564662064	12.54910305
Y2	1.1704	60.5531	51.8575	8.24455	13.61540532	7.102803849	11.7298765
Arbitros para perdida de agua							
#1		60.1089	59.655	0.4539			
#2		60.2887	59.8405	0.4482			
				0.45105			
Palmarosa							
Z1	1.0496	60.715	51.1233	8.70285	14.33393725	7.497636193	12.34890257
Z2	1.0633	60.821	51.5433	8.38885	13.79268674	7.22712047	11.88260711
Arbitros para perdida de agua							
#1		60.0142	59.1382	0.876			
#2		60.7468	59.8451	0.9017			
			Promedio	0.88885			

Finalmente, los contenedores fueron abiertos para someter a las muestras a una prueba de verificación en la cual se toman alrededor de 2 gr de biomasa sobresaturada y se somete a un proceso de secado a 105 °C por al menos 10 horas en orden de identificar la máxima cantidad de agua absorbida.

Cuadro 58. Segunda etapa de prueba de higrometría para biomásas sin tratamiento térmico.

Prueba 2 absorcion de agua					
Citronela					
	Muestra	Muestra final	Perdida	% Humedad	Promedio
A1	1.9929	0.4586	1.5343	76.9883085	77.69039156
A2	2.1474	0.464	1.6834	78.39247462	
Patchouli					
B1	2.0021	0.5076	1.4945	74.64662105	75.73890236
B2	2.1011	0.4868	1.6143	76.83118367	
Palmarosa					
C1	2.052	0.3768	1.6752	81.6374269	80.6920361
C2	1.9972	0.4045	1.5927	79.7466453	

Cuadro 59. Segunda etapa de prueba de higrometría para biomásas con tratamiento de 275°C y 15 minutos.

Prueba 2 absorcion de agua para biomásas torrefactadas a 275 y 15 minutos					
Citronela					
	Muestra	Muestra final	Perdida	% Humedad	Promedio
X1	2.1542	0.5716	1.5826	73.46578776	73.88419353
X2	1.9967	0.5131	1.4836	74.30259929	
Patchouli					
Y1	1.9947	0.5544	1.4403	72.20634682	71.67192158
Y2	2.0466	0.5907	1.4559	71.13749634	
Palmarosa					
Z1	2.0177	0.5515	1.4662	72.66689795	71.8484008
Z2	2.0031	0.5803	1.4228	71.02990365	