



**ESTUDIO TÉRMICO E INFRARROJO DE CINCO
TIPOS DE MADERA COMERCIALIZADAS EN NORTE
DE SANTANDER EN TRES ETAPAS DIFERENTES
DEL PROCESO DE SECADO, PARA SU POSIBLE USO
COMO FUENTE DE ENERGIA**

Yessika Mildred Contreras Valero

**Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Química
Pamplona, Colombia
2016**

**ESTUDIO TÉRMICO E INFRARROJO DE CINCO
TIPOS DE MADERA COMERCIALIZADAS EN NORTE
DE SANTANDER EN TRES ETAPAS DIFERENTES
DEL PROCESO DE SECADO, PARA SU POSIBLE USO
COMO FUENTE DE ENERGIA**

Yessika Mildred Contreras Valero

Proyecto presentado como requisito parcial para optar por el título de:
Ingeniera Química

Directora:

M.Sc Yaneth Cardona Rodríguez

Codirectora:

Dra. Diana Alexandra Torres Sánchez

Grupo de investigación Biocalorimetría

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Química
Pamplona, Colombia

2016

DEDICATORIA

A mi madre Aracely Valero por ser siempre incondicional.
Porque a pesar de tantas dificultades, las supo enfrentar con perseverancia.
A mis hermanos Magally, Maritza, Aníbal, Milton y Miguel, mis cuñados
Y sobrinos, pues de algún modo contribuyeron a mi formación.
Y a esos tres ángeles que desde el cielo me iluminan,
Mi padre José y mis hermanos Jaíro y Gregorio.
A Dios por regalarme la vida y la de mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme fortaleza día a día para levantarme con las ganas de seguir creciendo en tanto personal como profesionalmente

A mi familia por depositar toda su confianza en mí, y brindarme el apoyo moral y físico para lograr este sueño, que fue de todos.

A mis dos madres Aracely y Maritza, gracias por ser siempre mi bastón.

A mis primas Erika, Yulitza y mi sobrino Jheison por sus múltiples colaboraciones.

A mis cuñados, en especial a Gerardo ya que jugo las veces de padre para mi formación.

A mi tío Miguel Valero, quien me facilito las muestras de madera fresca.

Al Profesor Luis Roberto Sánchez, por la identificación de las especies de madera

Infinitas gracias a mi Directora de tesis Msc. Yaneth Cardona, pues sin su inmenso apoyo, este trabajo no hubiese sido posibles. Gracias por su gran dedicación y por todo el ánimo brindado, porque siempre con su buena actitud sabe sacarme una sonrisa.

Al grupo de investigación de Biocalorimetria, Profesor Fernando Pinzón y mi codirectora Dr. Alexandra Torres, por brindarme las herramientas posibles para que este trabajo fuese realizado

A mi alma máter, la Universidad de Pamplona, específicamente al Programa de Ingeniería Química por formarme como Ingeniera Química poniendo a mi disposición las herramientas necesarias, incluida, una planta docente con gran calidad profesional y humana.

A todos mis compañeros de generación por compartir conmigo su amistad y por tantos gratos momentos vividos.

RESUMEN

En el presente trabajo se determinaron las propiedades térmicas de cinco tipos de madera comercializadas en el departamento Norte de Santander, Colombia: cedro (*Cedrela Montana*), pino (*Cupressus lusitánica mil*), eucalipto (*Eucalyptus globulos labill*), guadua (*Guadua angustifolia*) y pardillo (*cordia gerascanthus*); en tres de sus etapas de secado (inicial, intermedia y final), mediante calorimetría de combustión y análisis termogravimétrico (TGA) simultáneo con calorimetría diferencial de barrido (DSC); los cuales, mostraron la presencia de dos pérdidas de masa y tres eventos térmicos (dos endotérmicos y uno exotérmico) en las muestras, relacionados con la evaporación del agua y la degradación de sus componentes químicos. Adicionalmente se llevó a cabo un análisis Infrarrojo de las muestras, encontrando la presencia de celulosa, lignina, hemicelulosa, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas y ácidos alifáticos.

ABSTRACT

In this work, we determined the thermal properties of five types of wood sold in Norte de Santander, Colombia: cedar (*Cedrela Montana*), pine (*Cupressus lusitánica* mil), eucalyptus (*Eucalyptus globulos labill*), guadua (*Guadua angustifolia*) and pardillo (XXX). The analysis was made on three drying stages (fresh, intermediate and dry), using combustion calorimetry and simultaneous thermogravimetric analysis (TGA) / differential scanning calorimetry (DSC). The results showed the presence two loss of weight and three thermal events (2 endothermic and 1 exothermic), this events are due to the moisture and the degradation of chemical composition of the samples. Additionally, we analyzed the different samples using Fourier transform Infrared spectroscopy (FTIR) that showed the presence of cellulose, lignin, hemicellulose, aliphatic and aromatic hydrocarbons, alcohols, phenols, aldehydes, ketones and aliphatic acids.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1 MADERA.	3
3.1.2 Estructura del tallo.....	3
3.2 PROPIEDADES DE LA MADERA.....	5
3.2.1 Propiedades físicas.....	5
3.2.2 Propiedades químicas.....	7
3.2.3 Propiedades mecánicas.....	8
3.3 PRODUCCIÓN DE MADERA.	8
3.4 TIPOS DE MADERA Y USOS.	10
3.4.1 Cedro (<i>Cedrela montana</i>).....	10
3.4.2 Pardillo (<i>cordia gerascanthus</i>)	11
3.4.3 Pino (<i>cupressus lusitánica mil</i>).....	11
3.4.4 Guadua (<i>Guadua angustifolia</i>)	11
3.4.5 Eucalipto (<i>Eucalyptus globulos labill</i>).....	12
3.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL.	12
3.5.1 Análisis termogravimétrico (TGA).....	12
3.5.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).	12
3.5.3 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).....	13
3.5.4 Calorimetría Combustión	14
4. METODOLOGIA	15
4.1. MUESTREO Y ALMACENAMIENTO.....	15

4.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS.....	16
4.2.1 Termogravimetría simultánea con calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC).	16
4.2.2 Calorimetría de combustión.	16
4.3 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).....	17
4.4 Análisis estadístico	17
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	18
5.1 Análisis TGA.....	18
5.2 Análisis DSC	23
5.2 Análisis FT-IR	27
5.3 Análisis de Combustión	30
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES.....	36
BIBLIOGRAFIA.....	37
ANEXOS	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales aplicaciones de la espectrometría en el infrarrojo.....	13
Tabla 2. Resultados Generales de TGA	20
Tabla 3. Resultados generales de DSC	24
Tabla 4. Bandas características de FTIR de las diferentes muestras de madera estudiadas.	28
Tabla 5. Resultados de Combustión	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Macroestructura del tronco.	4
Figura 2. Usos de la madera en Colombia.	10
Figura 3. Cedro	10
Figura 4. Pardillo.....	11
Figura 5. Pino.....	11
Figura 6. Guadua.....	11
Figura 7. Eucalipto	12
Figura 8. Mapas a. Colombia, b. Norte de Santander, c. Municipio Herrán	15
Figura 9. Equipo SDT-Q600 simultáneo TGA-DSC.....	16
Figura 10. Bomba calorimétrica Phillipson	17
Figura 11. Equipo FT-IR SHIMADZU Prestige 21 con ATR.	17
Figura 12. Recopilación de TGA en todas las muestras de madera en sus tres etapas de secado.	18
Figura 13. Valores de porcentaje de pérdida de masa con sus respectivas desviaciones estándar	21
Figura 14. . Recopilación de DSC de todas las muestras de madera en sus tres etapas de secado (<i>exo up</i>).....	25
Figura 15. Valores de entalpia con sus respectivas desviaciones estándar; a. banda 1, b. pico 2, pico 3.	26
Figura 16. Recopilación de FTIR de las maderas a. frescas, b. intermedias y c. secas	27
Figura 17. Representación gráfica de la señal del calorímetro.....	31
Figura 18. Valores de calor de combustión con sus respectivas desviaciones estándar	33

Figura 19. TGA de las cinco clases de madera en su etapa inicial de secado (fresco).....	41
Figura 20. TGA de las cinco clases de madera en su etapa intermedia de secado.	42
Figura 21. TGA de las cinco clases de madera en su etapa final de secado.	42
Figura 22. DSC de las cinco clases de madera en su etapa inicial de secado (fresca).....	42
Figura 23. DSC de las cinco clases de madera en su etapa intermedia de secado.	42
Figura 24. DSC de las cinco clases de madera en su etapa final de secado.....	42
Figura 25. FTIR para cedro en sus tres etapas.....	42
Figura 26. FTIR para Eucalipto en sus tres etapas.....	42
Figura 27. FTIR para el pardo en sus tres etapas.....	42
Figura 28. FTIR para la Guadua en sus tres etapas.....	42
Figura 29. FTIR para el pino en sus tres etapas de secado.....	42

1. INTRODUCCIÓN

La madera es un recurso vital para el ser humano y le ha sido útil desde el descubrimiento del fuego hasta la actualidad, dándole abrigo, construcciones, vehículos, entre otros. Hoy en día, este recurso sigue siendo de gran importancia en la vida tecnológica e industrial; sin embargo, debido a su aprovechamiento, esta materia prima genera cantidades considerables de residuos, los cuales causan contaminación al medio debido a su descomposición. En los aserraderos, los residuos varían entre 0,05 y 0,15 toneladas de sólidos por tonelada de madera en rollo producida; por lo cual, es de suma importancia encontrar una vía factible para el uso de estos desechos [1].

En vista del problema mencionado anteriormente, se han buscado diferentes posibles usos para los residuos madereros en los últimos años, los cuales incluyen: su uso como materia prima para la producción de pastas, papel, tableros de partículas, aserrín para cubrir pisos de pesebreras, madera triturada para jardines o como productos para compost, también se ha estudiado su uso como materia prima para alimento de ganado, obtención de etanol y como fuente potencial de combustible. El aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía ha despertado un gran interés en la comunidad científica y en general, puesto que a pesar de que el calor producido en este caso es inferior al procedente del petróleo o gas, su costo en comparación con los combustibles fósiles, lo hacen una fuente interesante de calor y energía; sin embargo, dentro de los elementos que pueden influir en la viabilidad de este uso, se encuentra el hecho de que los residuos producidos provienen de diferentes tipos de madera utilizadas y no se sabe si estas tienen el mismo potencial para la producción de energía [1-6].

Teniendo en cuenta la importancia de este hecho, este proyecto realizó la caracterización térmica de 5 tipos de madera utilizadas en la región de Norte de Santander, mediante calorimetría de combustión, análisis termogravimétrico (TGA) simultáneo con calorimetría diferencial de barrido (DSC) y espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Estos análisis se llevaron a cabo en muestras de las maderas mencionadas en tres etapas diferentes de su proceso de secado (recién obtenida del árbol, a mitad del proceso de secado y una vez finalizado el mismo).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Caracterizar térmicamente y mediante FTIR cinco tipos de madera plantada y comercializada en el departamento Norte de Santander, en tres etapas de su proceso de secado.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

2.2.1. Caracterizar mediante TGA/DSC cinco tipos diferentes de madera: pino, eucalipto, cedro, pardillo y guadua, en tres etapas diferentes de su proceso de secado (inicio, intermedio y final).

2.2.2. Determinar los calores de combustión de las muestras de madera mediante calorimetría de combustión.

2.2.3. Determinar grupos funcionales presentes en las muestras de madera usando FTIR.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 MADERA.

Uno de los materiales más abundantes en nuestro planeta, es la madera; la cual, ha sido parte fundamental para cubrir las necesidades del ser humano desde el periodo neolítico, pues los refugios naturales ya no le brindaban seguridad suficiente al hombre; por lo cual, él mismo comenzó a fabricar chozas con las ramas secas que caían de los árboles. La madera fue uno de los primeros materiales que se usó para la construcción de albergues, herramientas para cazar y fabricación de utensilios; convirtiéndose con los años, en uno de los materiales predilectos para la construcción de palacios, templos y casas desde el siglo XX a.c, hasta el siglo XIV d.c. El uso de la madera disminuyó en gran medida al descubrirse nuevos materiales para la construcción, tales como el hierro, el vidrio y fibras textiles, entre otros [7].

La madera es un tejido estructural fibroso y poroso que se encuentra en la raíz y tallo de los árboles y otras plantas leñosas; es considerado a nivel mundial como materia prima fundamental, debido a que es indispensable para el estilo de vida del hombre actual; es por ello, que es uno de los recursos naturales más explotados por el hombre para la obtención de material de construcción y papel, entre otros. En este material, la fibra de celulosa esta agrupada en paquetes y unidas entre sí por un pegante natural llamado lignina, el mayor porcentaje de esta (95%) está organizado de forma vertical y el resto a lo ancho formando anillos. Las fibras tienen canales por donde circulan o se almacenan sustancias como: agua, aceites, resinas, colorantes y sales [8, 9].

Una vez cortada y seca, la madera presenta diversas aplicaciones, entre las cuales se destacan la fabricación de pulpa, materia prima de papel, construcción de espacios arquitectónicos y elaboración de muebles. En algunos de estos, se ha reemplazado su uso por metales, plásticos o aleaciones; sin embargo, la madera sigue siendo apreciada y utilizada, no solo como material de construcción, sino como materia para alimentar el fuego; la cual, es una de las formas más simples de biomasa [9-11].

3.1.2 Estructura del tallo.

Tal como se muestra en la figura 1, el tallo del árbol presenta diferentes capas cilíndricas y concéntricas, que se generan desde su centro hacia el exterior, durante el crecimiento del mismo [12].

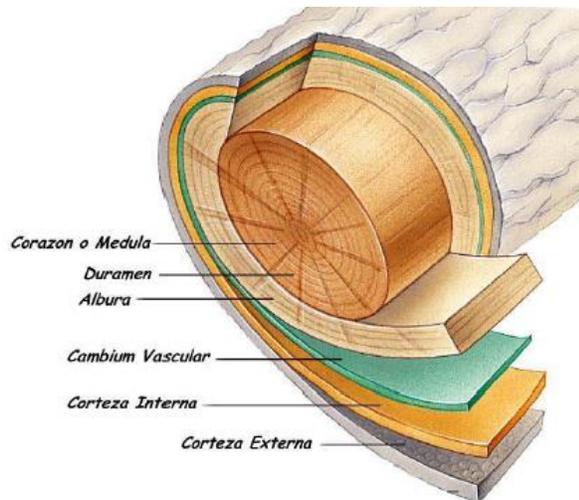


Figura 1. Macroestructura del tronco.
Fuente: Bernal Barajas y colaboradores [9].

Las diferentes partes que conforman el tallo son:

- ✓ **Medula:** ocupa la parte central del tronco, está formada por un tejido esponjoso de color blanco y es difícil distinguirla en los árboles adultos [12].
- ✓ **Duramen:** forma la parte más gruesa, densa y pesada del tronco, se encuentra entre la medula y la albura y se reconoce por su color oscuro [13].
- ✓ **Albura:** es la parte activa del tronco, por ella viajan la mayoría de los vasos de savia; los cuales, transportan esta sustancia azucarada que la hace vulnerable a los ataques de los insectos. Estos vasos tienen similitud con nuestro sistema sanguíneo [12].
- ✓ **Cambium:** Es una capa delgada, responsable del engrosamiento y desarrollo de tallos y raíces, en ella se genera y distinguen dos clases de células: hacia el interior del tronco, células leñosas (xilema), y en dirección al exterior dando lugar a la corteza, células liberianas (floema)[14].
- ✓ **Corteza:** Esta capa es la más extensa, es la encargada de proteger al árbol de cambios atmosféricos bruscos y su espesor varía según la especie [15].

3.2 PROPIEDADES DE LA MADERA.

La madera no es un material homogéneo, está formada por una variedad de células especializadas que conforman los diferentes tejidos, las cuales llevan a cabo las funciones fundamentales de las plantas. Esta heterogeneidad de la madera se refleja en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas; las cuales, en ocasiones son diferentes, no solo dentro de cada familia o especie, sino en cada parte del árbol. Dichas diferencias pueden deberse a la edad del mismo, las condiciones naturales de desarrollo referidas al terreno, clima y otras circunstancias que lo afectan directamente [12, 15].

3.2.1 Propiedades físicas.

Definen el estado físico de la madera; por lo cual, son las más importantes desde el punto de vista comercial:

3.2.1.1 Contenido de humedad.

La humedad es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás, el agua es el vehículo de transporte que utilizan las plantas para su alimento, esto, además de la higroscopicidad de la madera, hace que este material tenga en su interior cierta cantidad de agua, la cual afecta sus usos. Se entiende por humedad la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de masa de la pieza anhidra. El peso anhidro es el peso que se obtiene cuando se coloca la madera en una estufa a 100 o 102°C, hasta que se obtiene un peso constante. El agua en la madera puede estar presente en 3 formas diferentes:

- ✓ Agua de constitución o agua combinada: es aquella q entra a formar parte de los compuestos químicos que conforman la madera.
- ✓ Agua de impregnación o de saturación: es la que impregna las paredes de las células rellenando los espacios sub-microscópicos y microscópicos de la misma.
- ✓ Agua libre: se encarga de llenar el lumen de las células o tubos, es absorbida por la capilaridad, una vez perdida por la madera ya no puede ser recuperada a partir de la humedad atmosférica.

3.2.1.2 Densidad

Se puede definir como el grado de compactación de las fibras de la madera, por lo que presenta una relación directamente proporcional con el peso y la resistencia la misma. En la madera se distingue entre “densidad” y “densidad bruta”. La “densidad bruta” es la comúnmente reportada y se toma de la relación masa-volumen incluyendo el de los espacios huecos (poros), por lo que el contenido de agua influye fundamentalmente en este valor. Por otra parte, la “densidad” se refiere a la relación de masa de una pieza de madera y su volumen sin cavidades celulares, siendo la misma (1.56 g/cm³) en las maderas en general, debido a que no difieren en la composición de su pared celular [9, 12, 14, 16].

3.2.1.3 Conductividad

En general, la madera no es un buen conductor; sin embargo, la magnitud de esta propiedad varía dependiendo del nivel de humedad que presenta la misma. Las maderas ligeras y porosas, son peor conductoras que las densas y pesadas; adicionalmente, se consideran tres tipos de conductividad: térmica, eléctrica y sonora. [12]

3.2.1.4 Color

Es de gran utilidad en la identificación de algunas especies y da una guía acerca de la resistencia y la durabilidad de la muestra, pues las maderas oscuras son más resistentes y durables. El color de la madera se debe a la presencia de aceites, resinas, colorantes y sales y varía entre especies del mismo género como muchas otras características [10-12].

3.2.1.5 Olor

Es característico en todas las maderas, aunque su efusión no es la misma para todos los casos, pues depende de la cantidad de esencias contenidas en las sustancias impregnantes originales de cada especie, que se volatilizan fácilmente y por eso la madera pierde pronto su olor tras el corte. El pino y el cedro poseen olores característicos, debido a su alto contenido de resinas [12].

3.2.1.6 Textura

Indica el tamaño de los elementos anatómicos (poros) de la madera. Es el reflejo sobre el corte superficial de la misma, de los elementos estructurales que producen cavidades de diferentes tamaños. [9, 11]:

3.2.1.7 Contracción o hinchamiento

La madera sufre cambios dimensionales cuando absorbe o cede agua en relación con las variables ambientales del lugar donde se ubica. Cuando pierde agua, se contrae y cuando la absorbe, aumenta el volumen hasta un punto de saturación de 20 a 25 % máximo [9, 10].

3.2.2 Propiedades químicas.

La madera está constituida mayoritariamente de carbono (~50%), oxígeno (~42%), hidrógeno (~6%) y nitrógeno (~2%). Estos elementos, forman en general dos grupos de sustancias: las mayoritarias que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas (celulosa, hemicelulosa y lignina) y las de minoritarias de bajo peso molecular, conocidas también como sustancias extraíbles [5, 15].

3.2.2.1 Componentes de la pared celular de la madera

- ✓ **Celulosa:** este homopolisacárido, es el componente mayoritario de la madera (~ 50%), se encuentra en las paredes celulares y su función principal es absorber y retener la humedad [19].
- ✓ **Hemicelulosas:** heteropolisacáridos de alta masa molar, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de pentosas, hexosas y ácido urónico; enlazadas entre sí, mediante enlaces glicosídicos [10].
- ✓ **Lignina:** es un polímero tridimensional amorfo, catalogado como el segundo en importancia en la composición vegetal (~25%). Esta macromolécula, funciona prácticamente como “relleno” para impartir rigidez al tallo de la planta [11, 13, 17] .
- ✓ **Taninos:** Compuestos fenólicos hidrosolubles, que forman complejos con proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, esteroides y alcaloides generando en las plantas una acción de defensa frente a los insectos. Los taninos se encuentran en gran cantidad en los árboles, siendo el roble muy utilizado para su obtención [10].

3.2.2.2 Componentes extraíbles de la madera

Estos compuestos pueden tener influencia en las propiedades y calidad de la madera, aunque se encuentren en cantidades muy pequeñas. Los compuestos químicos aquí presentes son de diferentes clases y pueden ser divididos a su vez en

componentes orgánicos e inorgánicos. Dentro de los compuestos orgánicos, hay hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados y en los inorgánicos, algunos iones metálicos que son necesarios para el normal desarrollo del árbol [11-13].

3.2.3 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas abarcan las propiedades estructurales de la madera, para ello se deben tomar en cuenta las siguientes características [14, 18]:

3.2.3.1 Dureza

Este término, hace referencia a la oposición que presenta la madera (en este caso), a ser penetrada por un objeto y a la abrasión, depende de la composición de su estructura celular, pudiendo ser blandas, duras, resinosas, finas o prefabricadas [14, 19-23].

3.2.3.2 Durabilidad

Es la resistencia natural que presenta la madera frente al ataque de los distintos agentes degradadores (abióticos y bióticos), depende del contenido de resinas, taninos y aceites, entre otros. [12].

3.2.3.3 Resistencia

Es de vital importancia en la construcción y depende en gran medida de la densidad y en consecuencia de la humedad de la madera [9, 16].

3.2.3.4 Elasticidad

Propiedad que posee la madera para recuperar su posición original después de haber sido sometida a la flexión, la elasticidad se pierde cuando al desaparecer la fuerza de flexión la madera no retorna a su postura original, cuando llega a tal punto se dice que ha alcanzado el límite de elasticidad.

3.2.3.5 Plasticidad

Permite a la madera ser doblada en sentido longitudinal, debido a la aplicación de una fuerza, para que esta propiedad sea visible es necesario que la fuerza permanezca durante un cierto periodo de tiempo.

3.3 PRODUCCIÓN DE MADERA.

Se calcula que la superficie de bosques en el mundo es de aproximadamente 4 millones de hectáreas; siendo el 95% bosques naturales, integrados por árboles

autóctonos y 5% plantaciones forestales, que hacen referencia a bosques plantados y/o sembrados en el proceso de forestación o reforestación [24]. La producción de madera puede hacerse a partir de la explotación tanto de bosques naturales como de plantaciones forestales; las cuales, han aumentado de manera significativa en los últimos años, teniendo actualmente una tasa anual de alrededor de 4,5 millones de hectáreas en todo el mundo, de las cuales 89% corresponden a las de Asia y América del Sur; siendo Colombia uno de los cinco países de América Latina y el Caribe con mayor cobertura forestal. Se estima que la mayoría de estas plantaciones tienen fines industriales y las principales especies utilizadas son las pertenecientes a los géneros *Eucalyptus* y *Acacia*, dado su rápido crecimiento y breve rotación [24-26]. En las zonas templadas y boreales, los pinos y otras especies de coníferas son principalmente utilizados en períodos de rotación media. Las plantaciones forestales proveen cerca del 35% de la madera en rollo comercializada en todo el mundo; sin embargo, se calcula un aumento, llegando posiblemente a 44% en 2020 [25, 27, 28].

El mercado de productos forestales ocupa a nivel mundial el tercer lugar, después del petróleo y gas, con un valor de transacciones que anualmente ronda los 80 billones de dólares [4, 24]. De la producción maderable a nivel mundial, Colombia aporta un 0,1%, para el cual se utiliza el 2,06% del potencial forestal del país, ocupando el puesto 64 como productor de madera en rollo industrial. De los 114 millones de hectáreas de la extensión del país, 350.000 hectáreas cubicas están siendo utilizadas en plantaciones forestales comerciales, que en términos porcentuales, representan el 3% del total de bosques colombianos; ya que 60,7 millones equivalentes al 53,3% de la extensión total del país, están protegidas al estar cubiertas por bosques naturales. De esta forma, se cuenta con un aproximado de 17 millones de hectáreas en las cuales se podrían implementar plantaciones comerciales [24, 29].

El departamento Norte de Santander posee una extensión aproximada de 21.217 km² que equivale al 18,6% de la superficie territorial de Colombia, de donde el 20,6% del departamento (4.466 km²) corresponde a áreas boscosas, 7% (1.254 km²) a bosques intervenidos, 9,1 % (1.952 km²) con vegetación xerofítica y 12,52% (2.721,5 km²) con bosques secundarios [30].

Los principales proyectos de reforestación se consolidaron en el municipio de Pamplona, donde se plantaron aproximadamente 4.000 hectáreas. En el resto del departamento se plantaron 1.345 hectáreas y las especies plantadas, corresponden a *Pinus patula* (4.000 hectáreas), de donde se obtiene madera rolliza; *Eucalyptus*

grandis (230 hectáreas), *Cordia gerascanthus* (30 hectáreas) y 1.085 hectáreas establecidas con otras especies [30].

3.4 TIPOS DE MADERA Y USOS.

Al talar los árboles se obtiene la madera en rollo; de la cual, una parte es destinada como combustible en viviendas y otra es comercializada para diversos usos industriales, que incluyen trozas para chapas, puntales para minas, postes; además de madera para aserrar, la cual a su vez, se utiliza en construcción, muebles, embalajes, guacales, carrocerías, estivas, entre otros. En la figura 2 se puede observar cómo están distribuidos los usos de la madera en la industria Colombiana, resaltando que su mayor utilidad se da en el área de la construcción [27, 31].

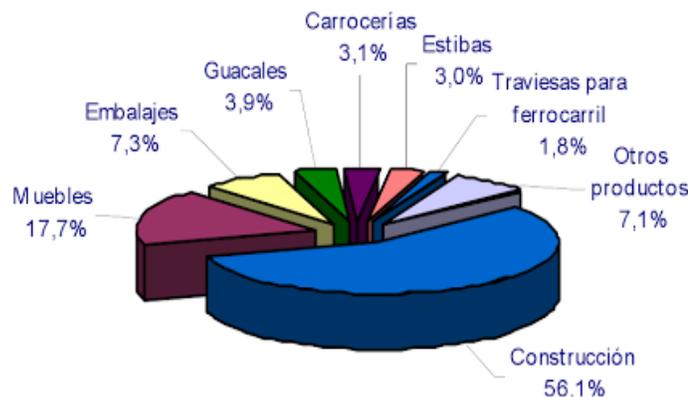


Figura 2. Usos de la madera en Colombia.

Citado de Martines Covalada Héctor y colaboradores [24].

El departamento Norte de Santander cuenta con diferentes pisos térmicos, por lo cual, tiene gran variedad de plantaciones forestales, dentro de las cuales, las más destacadas son: *Pinus patula*, *Eucaliptus grandis*, *Cordia alliodora*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Pachira quinata*, *Guadua angustifolia*, *Cedrela odorata*, *Cordia gerascanthus*. Adicionalmente, debido a las diferentes temperaturas que presentan los municipios del departamento, se usan diferentes tipos de madera, siendo los más destacados: cedro, pardillo, pino, guadua y eucalipto, los cuales se describen brevemente a continuación [30, 32].

3.4.1 Cedro (*Cedrela montana*)

Es uno de los árboles más majestuosos y de mayor porte en los bosques de clima frío, esta especie presente en las tres cordilleras de nuestro país, se destaca por alcanzar



Figura 3. Cedro

Fuente: autor, tomada de finca Los Curos, Municipio Herrán

alturas de 25 a 50 m y diámetros hasta de 2 m (ver Figura 3). Los principales productos de esta especie son muebles, elementos de carpintería para exteriores e interiores y ebanistería, su materia prima también es usada para construcción y como pulpa para papel [33, 34].

3.4.2 Pardillo (*cordia gerascanthus*)

Este árbol alcanza una altura hasta de 20 m. su habitad es en bosques secos del occidente del país se reproduce por semillas o estacas, se adapta fácilmente a alturas desde 0 a 1.900 m.s.n.m. su madera se caracteriza por ser solida resistente y decorativa [35].

El aserrío es su uso principal, para construcción pesada o liviana, construcción de botes y lanchas deportivas, muebles, instrumentos musicales, pisos entre otros.



Figura 4. Pardillo
Fuente: autor, tomada de finca Los Curos, Municipio Herrán

3.4.3 Pino (*cupressus lusitánica mil*)

Crece en regiones montañosas, son árboles de entre 30 a 40 metros de altura y su tronco es de 2 metros de diámetro, puede alcanzar varios siglos de edad sin ninguna dificultad, su madera presenta color amarillo rojizo, con anillos visibles y textura fina, cuando está fresca tiene un olor aromático muy característico y agradable. Es muy usada en construcción, muebles finos, artesanías, postes para cableado de luz eléctrica, de igual modo como árbol ornamental en jardines y parques, así como especie comercial en plantaciones [36, 37].



Figura 5. Pino
Fuente: autor, tomada de finca Buena Vista, Municipio Herrán

3.4.4 Guadua (*Guadua angustifolia*)

Es una de las pocas especies de bambú certificada para el uso estructural, puede alcanzar hasta 25 metros de altura con diámetros que oscilan entre 10 y 18 cm (Figura 6). Ha sido utilizada desde hace siglos en construcciones tradicionales en países como China y Japón, principalmente por su alta relación resistencia-peso, velocidad de crecimiento y flexibilidad arquitectónica; para la creación de diferentes formas geométricas [38, 39].



Figura 6. Guadua.
Fuente: autor, tomada de finca Los Curos, Municipio Herrán

3.4.5 Eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*)

Es el árbol de mayor tamaño que se puede encontrar en climas fríos, alcanza hasta 60 metros de altura y 5 metros de diámetro (Figura 7). La madera aserrada de este árbol, se usa en la fabricación de revestimientos, muebles y carpintería en general, además de postes y mangos de herramientas, es muy utilizada como leña o carbón ya que no se consume tan rápido, arde bien y deja poca ceniza [40-42].



Figura 7. Eucalipto
Fuente: autor, tomada de finca Los Curos, Municipio Herrán.

3.5 TÉCNICAS DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL.

Los métodos instrumentales se basan en la medida de algunas propiedades físicas del analito, denominadas señal analítica, la cual se relaciona con la naturaleza y concentración del mismo [43]. Con la finalidad de conocer información cualitativa sobre la composición de los diferentes tipos de madera contemplados en este estudio, además de sus características térmicas, se utilizarán técnicas tales como calorimetría de combustión, análisis termogravimétrico (TGA) simultáneo con calorimetría diferencial de barrido (DSC) y espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) los cuales se describen a continuación.

3.5.1 Análisis termogravimétrico (TGA)

Mide la cantidad y rapidez de cambio en peso de una muestra, en función del tiempo o temperatura a una atmosfera controlada, con ayuda de una termobalanza. Esta técnica permite realizar medidas que ayudan a determinar la composición de una muestra y a predecir su estabilidad a temperaturas hasta 1.500 °C [44, 45].

Diversas investigaciones han empleado el análisis termogravimétrico para el estudio de materiales, un ejemplo es el artículo publicado por Wang, *et al* en 2016; en el cual, se realizaron mezclas a diferentes proporciones, utilizando residuos de madera y cemento, encontrando que estas mezclas presentan excelentes características para construcción, tales como: alta resistencia, peso ligero y buen aislantes térmico y de ruido [46].

3.5.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Permite el estudio de aquellos procesos en los que se produce una variación entálpica, que puede ser la determinación de calores específicos, puntos de ebullición, pureza de compuestos cristalinos y entalpias de reacción. Es adecuada para medir el flujo de calor en la muestra a estudiar y en un material inerte de

referencia en función del tiempo o la temperatura, cuando ambos se someten a un programa controlado de temperatura. Esta técnica de análisis se emplea para caracterizar aquellos materiales que sufren transiciones térmicas en un amplio rango de temperaturas y estudiar su estabilidad térmica. Entre los diferentes materiales analizados, se encuentran muestras de la especie *Pinus densiflora* y biopolímeros (Arboform ®) de madera líquida [43, 47-50].

3.5.3 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

El espectro infrarrojo tiene tres regiones: lejano (400 cm^{-1} a 10 cm^{-1}), medio (4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1}) y cercano (13300 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}), siendo el infrarrojo medio, el de mayor aplicación en la identificación de un gran número de compuestos [51-53]. En la tabla 1 se exponen las principales aplicaciones de la espectroscopia infrarroja, dependiendo de la región del infrarrojo que se emplee (lejano, medio o cercano), pues debido a la diferencia energética de cada región, las utilidades varían; así, por ejemplo, el infrarrojo lejano es especialmente útil en los estudios inorgánicos debido a que la absorción causada por las vibraciones de extensión y flexión de los enlaces entre átomos metálicos y ligandos orgánicos u inorgánicos, se producen por lo general a frecuencias menores de 600 cm^{-1} [43].

Tabla 1. Principales aplicaciones de la espectrometría en el infrarrojo

Regiones Espectrales	Tipo de medida	Tipo de análisis	Tipo de muestra
Infrarrojo cercano	Reflectancia difusa	Cuantitativa	Materiales comerciales sólidos o líquidos
	Absorción	Cuantitativa	Mezclas gaseosas
Infrarrojo Medio	Absorción	Cualitativa	Compuestos sólidos, líquidos o gaseosos puros
		Cuantitativa	Mezclas complejas de gases, líquidos o sólidos
		Cromatográfico	Mezclas complejas de gases, líquidos o sólidos
	Reflectancia	Cualitativa	Compuestos sólidos puros o líquidos
	Emisión	Cuantitativa	Muestras atmosféricas
Infrarrojo lejano	Absorción	Cualitativa	Especies inorgánicas puras u organometálicas

Fuente: Skoog [43]

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier se basa en el principio de la espectroscopia molecular, el cual consiste en que las moléculas absorben energía de la luz en longitudes de onda específicas, conocidas como frecuencia de

resonancia (vibración), dando como respuesta un espectro, que proporciona información relacionada con las estructuras moleculares que forman el material analizado. Esta técnica se ha utilizado ampliamente en la caracterización química de diversos materiales, entre ellos diferentes tipos de madera, con la finalidad de conocer su contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa [54-58].

3.5.4 Calorimetría Combustión

Es una técnica termoquímica basada en la combustión de una muestra, en atmósfera de oxígeno. La muestra sufre una ruptura total de su estructura molecular, desprendiendo la energía contenida en sus enlaces. Esta técnica sirve para la determinación del contenido energético de los combustibles y por medio de su uso se hace una rápida determinación del contenido calorífico de pequeñas cantidades de muestras (1 mg). El aumento de la temperatura se mide por termopares en contacto con una pequeña bomba de acero inoxidable, mientras un potenciómetro registra el cambio de voltaje, y el calor liberado por la oxidación de la muestra aumenta la temperatura de la bomba [59, 60].

3.6 ANÁLISIS DE VARIANZA MULTIVARIADO (MANOVA).

El análisis multivariado implica el uso de técnicas matemáticas y estadísticas para extraer información de conjuntos de datos complejos, permite establecer las correlaciones entre los datos analizados y comprender sus efectos combinados en la matriz de estudio. El análisis de datos multivariantes en investigaciones experimentales tiene los siguientes objetivos [61]:

- ✓ Resumir el conjunto de variables en unas pocas nuevas variables, construidas como transformaciones de las originales, con la mínima pérdida de información.
- ✓ Encontrar (si existen) grupos en los datos.
- ✓ Clasificar nuevas observaciones en grupos definidos.
- ✓ Relacionar dos conjuntos de variables.

4. METODOLOGIA

4.1. MUESTREO Y ALMACENAMIENTO.

Las muestras de madera de los diferentes tipos (guadua, pardillo, pino, eucalipto y cedro) se recolectaron en tres etapas de secado (inicial, intermedia y final). Las muestras en etapa de secado inicial (recién cortada), fueron recolectadas en el Municipio de Herrán, departamento Norte de Santander (figura 8), debido a la disponibilidad del recurso. Las maderas en etapa de secado intermedio y final fueron proporcionadas por la empresa “Maderas Cúcuta”.

Las muestras se trasladaron a la sede principal de la Universidad de Pamplona y allí, en el Herbario Catatumbo Sarare (HECASA), con la colaboración del docente Luis Roberto Sánchez se llevó a cabo la identificación de las especies recolectadas, encontrando que correspondían a: *Cedrela Montana* (Cedro), *Cupressus lusitánica mil* (pino), *Guadua angustifolia* (guadua), *Eucalyptus globulos labill* (eucalipto) y *Cordia gerascanthus* (pardillo). Posteriormente se llevaron al laboratorio de Biocalorimetría, en donde se procedió a la manipulación de las mismas, extrayendo virutas de diferentes partes de cada madera, las cuales se homogeneizaron para sus correspondientes análisis. Todos los ensayos instrumentales de las muestras se llevaron a cabo por triplicado, con el fin de verificar la repetibilidad de los resultados.

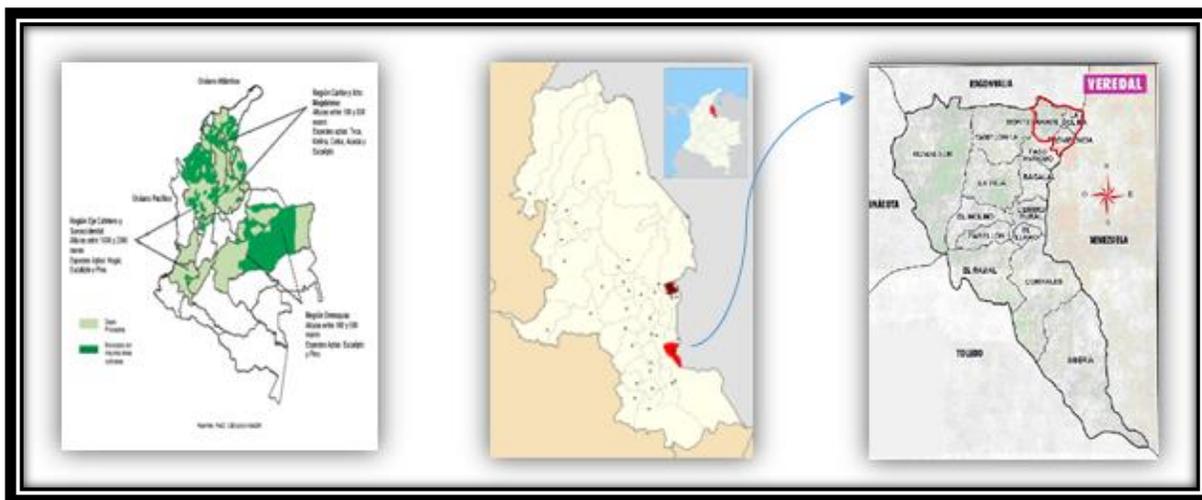


Figura 8. Mapas a. Colombia, b. Norte de Santander, c. Municipio Herrán

Fuente: google maps

4.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS

4.2.1 Termogravimetría simultánea con calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC).

El análisis de las propiedades térmicas de las diferentes muestras, se llevó a cabo mediante un equipo SDT-Q600 de *TA Instruments* (figura 9), de la siguiente forma: una muestra de ~10 mg de madera se analizó en un intervalo de temperatura ambiente hasta 700°C con una rampa de calentamiento de 10°C/min, en atmósfera inerte de nitrógeno (100 mL/min), según la metodología recomendada por Sho-Ichi, 2000 y Rodríguez- Añón, 2007 [50, 62].

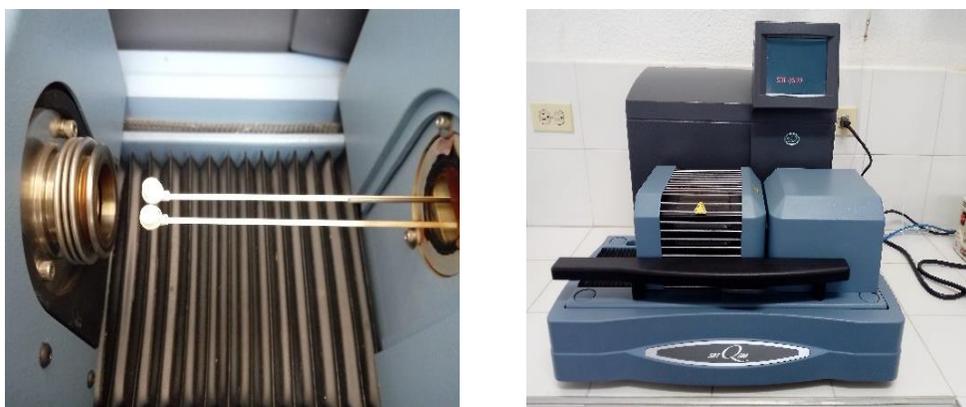


Figura 9. Equipo SDT-Q600 simultáneo TGA-DSC.
Fuente: Laboratorio Biocalorimetría, Universidad de Pamplona.

4.2.2 Calorimetría de combustión.

Se determinó el contenido energético de las muestras de madera mediante una bomba calorimétrica Phillipson (figura 10). Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente, inyectando oxígeno a una presión de 25×10^5 Pa y usando cápsulas de gelatina para la quema de la muestra. La ignición se realizó mediante la descarga de un capacitor de 5000 μ F y un fusible de alambre de níquel de 0,1mm de diámetro. La señal térmica del calorímetro se registró con una interfase UNIDANPLUS (ESYS, Berlín, Alemania).



Figura 10. Bomba calorimétrica Phillipson
Fuente: Laboratorio Biocalorimetría, Universidad de Pamplona

4.3 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

Haciendo uso de un espectrofotómetro infrarrojo FT-IR SHIMADZU Prestige 21 con ATR, se analizaron las muestras, en un intervalo de número de onda desde 600 hasta 4000 cm^{-1} con un total de 40 scan y una resolución de 4 cm^{-1} .

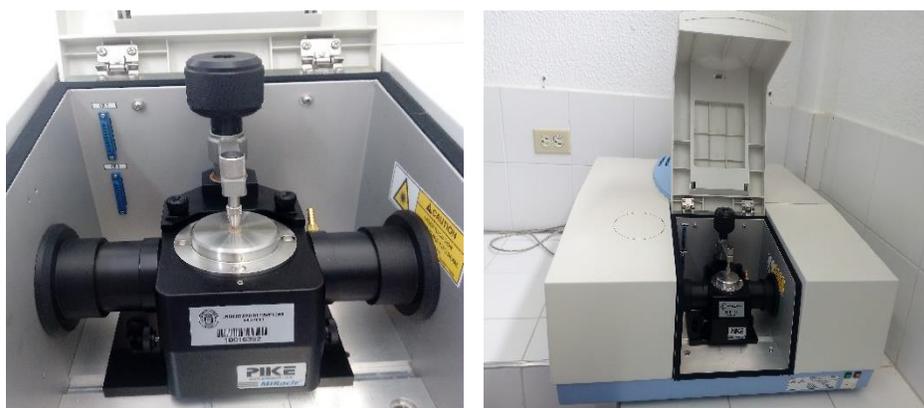


Figura 11. Equipo FT-IR SHIMADZU Prestige 21 con ATR.
Fuente: Laboratorio de Biocalorimetría, Universidad de Pamplona

4.4 Análisis estadístico

Las entalpías y temperaturas del análisis térmico fueron determinadas utilizando el software *TA Universal Analysis 2000* (TA Instruments, Delaware, USA). Los resultados de calorimetría de combustión y del análisis térmico, se analizaron con los paquetes estadísticos *Statgraphics* y *Origin pro* (versión de prueba). Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para encontrar si existían diferencias significativas entre los diferentes valores obtenidos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 Análisis TGA

El análisis termogravimétrico mostró dos pérdidas de masa para las diferentes muestras analizadas, estas se dan a conocer en la figura 12 para las diferentes etapas de secado.

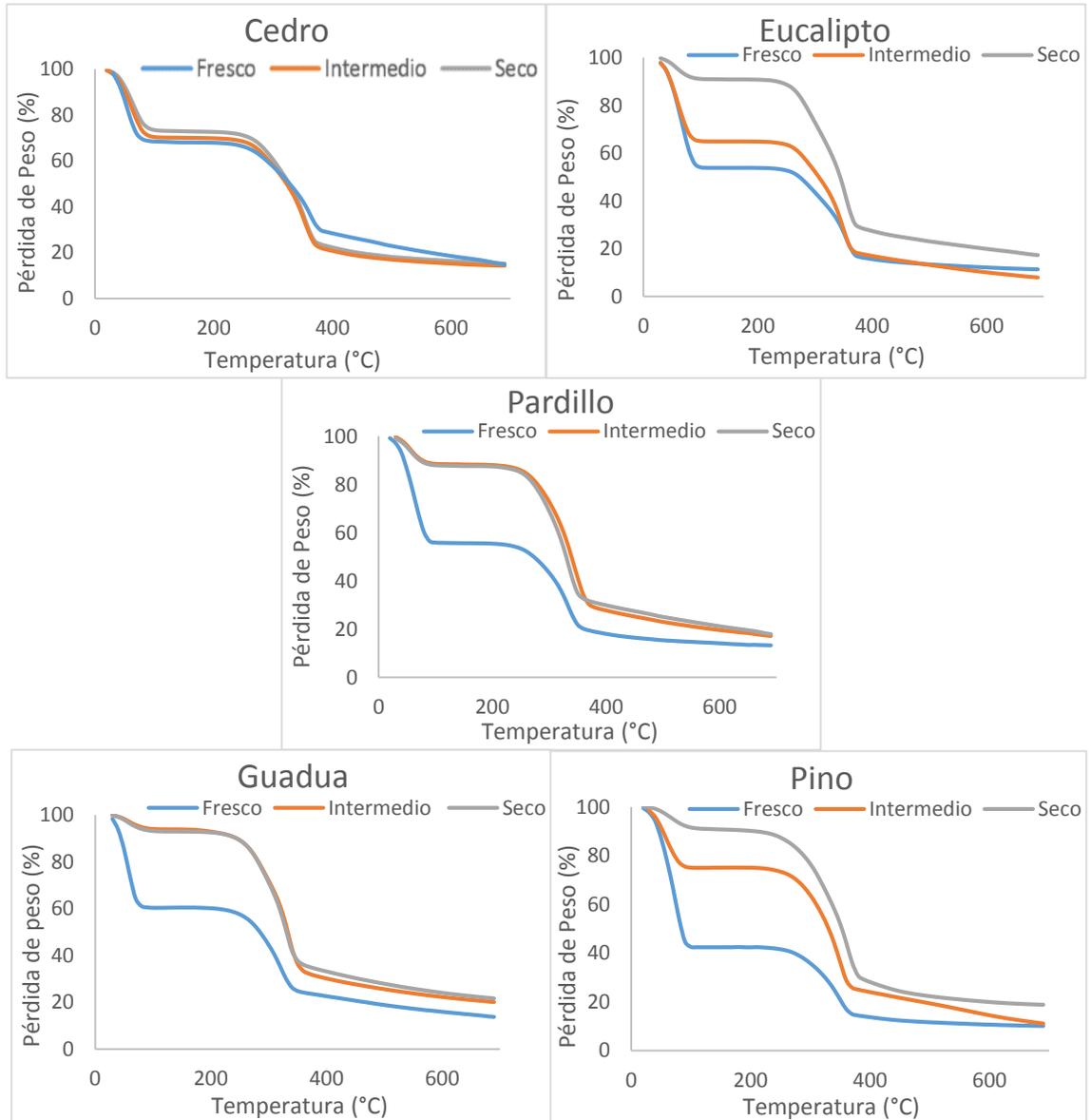


Figura 12. Recopilación de TGA en todas las muestras de madera en sus tres etapas de secado.

Fuente: autor

La primera pérdida, se dio en el rango de temperatura de $23,83 \pm 3,37 - 123,42 \pm 11,6$ °C y es debida a la evaporación del agua y a la descomposición de compuestos de bajo peso molecular. En la tabla 2 se encuentran los diferentes resultados para las muestras analizadas en las tres etapas (fresca, intermedia y seca) y en la figura 13 se da el diagrama de caja y bigotes para los mismos. Al realizar un análisis de varianza multifactorial a los resultados obtenidos, se encontró que los dos factores (especie de la muestra y tiempo de secado) tienen un efecto estadísticamente significativo sobre esta pérdida de masa ($p < 0,05$), con un 95% de confianza.

Tabla 2. Resultados Generales de TGA

Especies		PICO 1				PICO 2			
		T inicial (°C)	Temperatura 1 (°C)	T final (°C)	Pérdida de masa (%)	T inicial (°C)	Temperatura 2 (°C)	T final (°C)	Pérdida de masa (%)
Pino	Fresco	24,61 ± 2,03	77,44 ± 3,04	123,42 ± 11,59	56,46 ± 3,57	232,80 ± 14,26	349,12 ± 2,03	389,34 ± 2,51	28,45 ± 2,70
	Intermedio	25,94 ± 1,38	61,15 ± 4,12	107,28 ± 1,75	30,92 ± 10,94	222,89 ± 5,02	351,99 ± 2,89	386,61 ± 1,92	49,82 ± 0,5
	Seco	23,81 ± 3,37	65,06 ± 5,04	121,43 ± 7,68	9,25 ± 0,26	216,48 ± 5,02	357,96 ± 4,69	397,75 ± 2,39	60,56 ± 1,20
Guadua	Fresco	24,79 ± 0,95	62,43 ± 8,31	108,05 ± 10,39	39,06 ± 4,48	207,64 ± 7,39	232,24 ± 1,56	364,64 ± 2,81	37,03 ± 1,10
	Intermedio	27,82 ± 0,8	55,97 ± 1,97	103,97 ± 5,43	6,59 ± 0,50	208,31 ± 5,56	334,87 ± 0,96	379,84 ± 0,66	60,75 ± 0,86
	Seco	33,74 ± 6,14	58,08 ± 2,05	117,27 ± 5,38	6,29 ± 0,37	218,45 ± 6,88	332,35 ± 1,02	382,83 ± 8,37	57,55 ± 0,33
Eucalipto	Fresco	29,05 ± 2,92	63,22 ± 6,14	113,24 ± 5,85	40,38 ± 8,36	231,62 ± 3,69	354,24 ± 1,02	385,73 ± 3,02	38,80 ± 2,28
	Intermedio	29,69 ± 0,66	57,99 ± 2,13	105,51 ± 0,39	30,42 ± 4,15	243,45 ± 5,40	349,55 ± 1,01	389,57 ± 1,67	48,15 ± 4,49
	Seco	25,90 ± 5,50	53,57 ± 3,31	111,70 ± 8,29	8,79 ± 0,43	233,06 ± 10,78	355,29 ± 2,37	388,89 ± 2,97	64,37 ± 2,67
Cedro	Fresco	26,88 ± 4,75	61,74 ± 6,16	112,37 ± 8,19	31,33 ± 2,48	220,91 ± 5,98	353,97 ± 1,15	392,66 ± 3,27	48,45 ± 0,97
	Intermedio	26,70 ± 2,32	60,86 ± 4,64	111,70 ± 4,98	29,14 ± 3,26	220,25 ± 3,39	349,56 ± 5,07	396,42 ± 12,15	44,42 ± 5,11
	Seco	30,13 ± 5,36	55,78 ± 1,38	114,36 ± 8,91	26,4 ± 0,53	221,4 ± 11,04	364,15 ± 0,77	399,74 ± 1,75	39,21 ± 0,37
Pardillo	Fresco	29,25 ± 3,65	64,84 ± 7,65	106,40 ± 2,68	38,24 ± 5,96	220,68 ± 9,36	334,08 ± 1,99	377,31 ± 3,02	37,98 ± 3,64
	Intermedio	30,36 ± 7,03	55,78 ± 1,01	106,62 ± 3,32	11,14 ± 0,65	223,12 ± 6,91	344,25 ± 1,01	391,34 ± 2,33	59,33 ± 0,73
	Seco	31,24 ± 6,01	53,57 ± 1,75	106,40 ± 1,67	11,07 ± 0,55	205,43 ± 1,76	333,42 ± 2,89	371,45 ± 4,99	54,26 ± 1,30

Fuente: autor

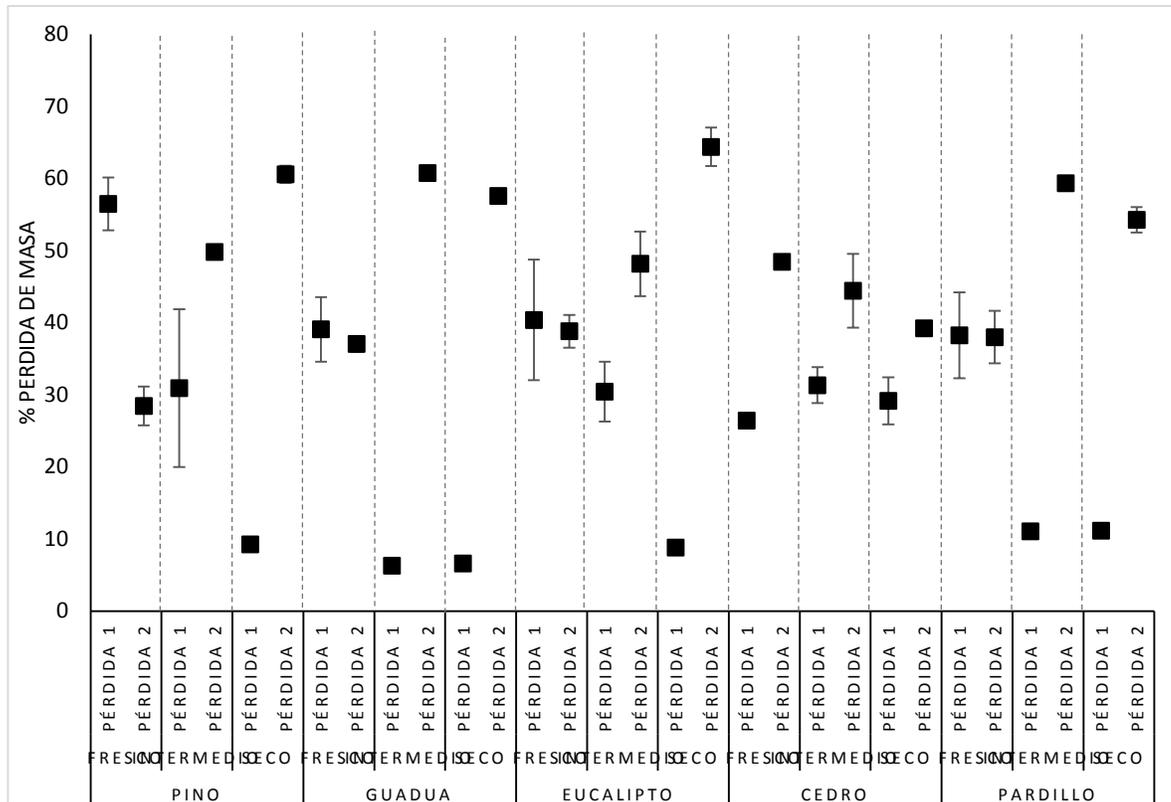


Figura 13. Valores de porcentaje de pérdida de masa con sus respectivas desviaciones estándar
Fuente: autor

Las maderas que presentaron mayor y menor pérdida de masa en sus diferentes etapas de secado, fueron: Pino ($56,46 \pm 3,67$ %) y cedro ($26,40 \pm 0,53$ %) en la etapa inicial, cedro ($31,33 \pm 2,48$ %) y guadua ($6,29 \pm 0,34$ %) en la etapa intermedia y cedro ($29,14 \pm 3,26$ %) y guadua ($6,60 \pm 0,50$ %) en la etapa final. Estas cantidades, y sus cambios debido al tiempo de secado, se ven claramente en la figura 13; en la cual, se observa que el cedro, a pesar de ser él que presenta menor cantidad de agua y compuestos de bajo peso molecular recién cortado, es el que presenta mayores cantidades en las etapas intermedia y final, lo que significa que su pérdida de masa es menor durante el proceso de secado, mientras la guadua es el caso opuesto, presentando mayor pérdida de masa durante su etapa de secado, presentando los menores valores en la etapa intermedia y final.

Al realizar un análisis estadístico a los diferentes resultados, se encontró que en cuanto a la primera pérdida de masa para las muestras frescas existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre cedro-pino y parillo-guadua – eucalipto; las cuales, no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p > 0,05$). Para las muestras en estado intermedio, se encontró que hay diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre guadua-pardillo y eucalipto-pino-cedro que no presentaron diferencia entre ellas ($p > 0,05$). Por último, en la etapa

final de secado, se encontraron 4 grupos homogéneos: guadua-eucalipto-pino, eucalipto-pino, pardillo y cedro, dentro de los cuales, no hay diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) con un 95% de confianza. En anexos, las figuras 19, 20, 21 corresponden a las gráficas de pérdida de peso con su respectiva derivada.

La segunda pérdida de peso encontrada ($205,43 \pm 1,76 - 399,74 \pm 1,75^{\circ}\text{C}$) es debida a la degradación de los componentes de las muestras, como se mencionó en la introducción, los componentes mayoritarios de la madera son celulosa, hemicelulosas y lignina. Las temperaturas teóricas de descomposición térmica son: $260^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$ (celulosa), $220^{\circ}\text{C} - 315^{\circ}\text{C}$, con la mayor pérdida alrededor de 270°C (hemicelulosa) y $200^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ (lignina) [63-66]. Las diferencias entre estas temperaturas de descomposición, se deben a sus diferencias estructurales.

Al observar los resultados obtenidos (tabla 2, figura 13), se observa que las maderas que presentaron mayor y menor pérdida de masa en este rango, en sus diferentes etapas de secado, fueron: cedro ($48,45 \pm 0,97\%$) y pino ($28,45 \pm 2,70\%$) en la etapa inicial, guadua ($60,75 \pm 0,86\%$) y cedro ($44,42 \pm 5,11\%$) en la etapa intermedia y eucalipto ($64,37 \pm 2,67\%$) y cedro ($39,21 \pm 0,37\%$) en la etapa final. El orden decreciente de pérdida de masa en las muestras frescas, fue: cedro (48,45%), eucalipto (38,88%), pardillo (37,98%), guadua (37,03%) y pino (28,45%), registrando temperaturas iniciales de pérdida de $220,91^{\circ}\text{C}$, $231,62^{\circ}\text{C}$, $220,5^{\circ}\text{C}$, $207,64^{\circ}\text{C}$ y $232,8^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Teniendo en cuenta las temperaturas teóricas de degradación de estos compuestos, se podría decir que estos porcentajes de pérdida muestran una diferencia en la composición de las maderas analizadas, que podría estar liderada por el contenido de lignina en la guadua fresca y de hemicelulosas en el cedro y el pardillo. Las diferencias en cuanto a las temperaturas teóricas y a las reportadas en este estudio, se deben en parte a la presencia de otras sustancias en la muestra y al mayor grado de ordenamiento en la celulosa comercial; a la cual corresponde el dato teórico, en comparación con la celulosa presente en la madera [63, 64, 67]. En cuanto a la etapa final de secado, el eucalipto fue el que presentó mayor pérdida de masa ($64,37 \pm 2,67$), seguido de pino ($60,56 \pm 1,20$), guadua ($57,55 \pm 0,34$), pardillo ($54,26 \pm 1,30$) y cedro ($39,21 \pm 0,37$).

Al realizar un análisis multifactorial a los resultados obtenidos en esta segunda pérdida de peso, debida a la degradación de los compuestos de la madera, se observó la presencia de tres grupos homogéneos para la muestra fresca (pino, guadua-pardillo-eucalipto y cedro) y 2 (cedro-eucalipto-pino y pardillo y guadua)

para la intermedia, no presentando diferencias estadísticamente significativas dentro del mismo grupo ($p > 0,05$), pero sí entre grupos ($p < 0,05$), con un 95% de nivel de confianza. En cuanto a las muestras secas, existen diferencias estadísticamente significativas entre todas ($p < 0,05$).

Al realizar un análisis de varianza entre los datos obtenidos para las tres etapas de secado en un mismo tipo de madera, se observó que en los 5 tipos estudiados, no existen diferencias estadísticamente significativa entre la pérdida de masa 1 para las etapas intermedia y final ($p > 0,05$), pero si existe diferencia entre ellas y la etapa inicial ($p < 0,05$).

5.2 Análisis DSC

En la tabla 3 se dan a conocer los resultados correspondientes a la calorimetría diferencial de barrido (DSC); la cual, exhibió en sus termogramas 3 transiciones endotérmicas en todas las muestras de madera analizadas, en sus diferentes etapas de secado. En las figuras 15a, 15b y 15c se dan los valores promedio de entalpia y para cada una de las transiciones, con sus respectivas desviaciones estándar. Adicionalmente, en anexos, en las figuras 22, 23 y 24 se presentan las gráficas de DSC individuales, en cada etapa de secado (fresco, intermedio, seco), para todos los tipos de madera estudiados.

En la figura 14 se muestran los termogramas superpuestos en sus tres etapas de secado, para cada tipo de madera. La primera transición es endotérmica y se atribuye principalmente a la evaporación del agua en las muestras. El rango de temperatura de esta transición ($21,37 \pm 3,52^{\circ}\text{C} - 153,65 \pm 9,36^{\circ}\text{C}$), es acorde a lo reportado en la literatura [58, 63, 68].

Tabla 3. Resultados generales de DSC

Especies		PICO 1				PICO 2				PICO 3			
		T inicial (°C)	Temperatura 1 (°C)	T final (°C)	Entalpía (J/g)	T inicial (°C)	Temperatura 2 (°C)	T final (°C)	Entalpía (J/g)	T inicial (°C)	Temperatura 3 (°C)	T final (°C)	Entalpía (J/g)
Pino	Fresco	27,85 ± 3,81	87,29 ± 3,94	153,65 ± 9,36	6962,67 ± 592,89	-	-	-	-	333,37 ± 3,01	359,74 ± 1,50	390,72 ± 7,41	87,22 ± 15,43
	Intermedio	22,79 ± 3,03	73,05 ± 2,16	135,82 ± 6,54	3882,67 ± 1579,61	181,29 ± 0,50	200,52 ± 0,07	243,08 ± 5,23	56,43 ± 10,96	324,53 ± 5,35	359,69 ± 0,85	407,8 ± 2,62	304,7 ± 22,77
	Seco	30,59 ± 13,56	77,26 ± 2,32	140,21 ± 8,19	1198,97 ± 528,39	174,98 ± 4,86	229,27 ± 25,54	273,22 ± 25,21	104,57 ± 37,32	337,12 ± 2,94	367,66 ± 3,32	405,27 ± 13,02	214,43 ± 53,27
Guadua	Fresco	31,42 ± 2,18	73,14 ± 8,68	134,73 ± 10,32	4266,33 ± 886,56	-	-	-	-	315,90 ± 1,99	339,75 ± 0,57	348,23 ± 3,31	120,77 ± 8,67
	Intermedio	28,31 ± 1,15	66,25 ± 4,42	134,91 ± 1,34	895,2 ± 154,50	166,71 ± 3,24	208,34 ± 13,49	254,41 ± 27,14	161,06 ± 54,66	374,29 ± 2,81	377,43 ± 5,15	411,97 ± 5,21	37,46 ± 3
	Seco	40,16 ± 7,82	74,07 ± 1,35	134,69 ± 9,77	461,67 ± 216,29	165,45 ± 2,52	220,94 ± 10,72	268,92 ± 10,40	247,5 ± 68,95	374,92 ± 0,42	381,61 ± 1,85	416,78 ± 3,69	38,16 ± 6
Eucalipto	Fresco	27,30 ± 5,97	73,77 ± 4,38	136,34 ± 5,85	4523,67 ± 1147,56	178,89 ± 3,49	200,63 ± 0,085	228,67 ± 0,88	51,65 ± 24,79	358,42 ± 8,87	358,07 ± 1,14	382,91 ± 1,97	42,91 ± 7,31
	Intermedio	24,69 ± 1,67	70,75 ± 3,16	125,85 ± 7,02	3597,67 ± 288,09	182,27 ± 3,56	200,45 ± 0,13	221,57 ± 5,15	34,36 ± 24,79	-	-	-	-
	Seco	23,37 ± 4,42	65,02 ± 4,16	123,20 ± 3,69	1300,67 ± 37,00	177,06 ± 5,35	200,44 ± 0,14	234,61 ± 2,81	57,73 ± 22,15	337,59 ± 2,83	365,04 ± 0,33	389,25 ± 2,64	211,95 ± 103
Cedro	Fresco	23,02 ± 4,18	73,20 ± 4,73	140 ± 12,03	3188,67 ± 302,03	187,11 ± 0,36	200,6 ± 0,14	223,11 ± 2,13	16,84 ± 7,22	339,39 ± 8,65	361,96 ± 0,52	382,18 ± 11,26	118,7 ± 72,6
	Intermedio	21,37 ± 3,52	72,98 ± 1,83	135,36 ± 6,27	3845 ± 420,61	186,11 ± 1,70	200,52 ± 0,22	221,57 ± 2,33	24,06 ± 10,89	332,73	363,27	402,39	169,4
	Seco	29,51 ± 5,28	66,48 ± 1,73	122,31 ± 6,67	2882 ± 567,57	185,48 ± 1,01	200,56 ± 0,08	219,14 ± 2,33	25,86 ± 3,17	361,71 ± 3,99	378,75 ± 7,01	396,08 ± 19,22	86,43 ± 35,45
Pardillo	Fresco	21,76 ± 3,35	75,32 ± 5,21	134,91 ± 7,92	4503,67 ± 785,27	187,63 ± 1,22	200,47 ± 0,02	220,68 ± 2,89	20,36 ± 6,29	317,44	345,39	376,56	61,23
	Intermedio	24,33 ± 5,32	67,66 ± 0,65	130,71 ± 5,64	1510,33 ± 210,06	187,6 ± 0,95	200,43 ± 0,29	218,69 ± 5,43	13,47 ± 9,09	384,62 ± 3,1	390,36 ± 4,31	416,64 ± 9,85	19,45 ± 1,49
	Seco	25,05 ± 4,65	64,77 ± 3,76	121,87 ± 2,39	1397,33 ± 220,92	185,32 ± 4,06	200,43 ± 0,28	220,02 ± 1,99	20,63 ± 7,28	369,37 ± 4,66	376,75 ± 0,26	393,43 ± 7,03	17,26 ± 4,52

Fuente: autor

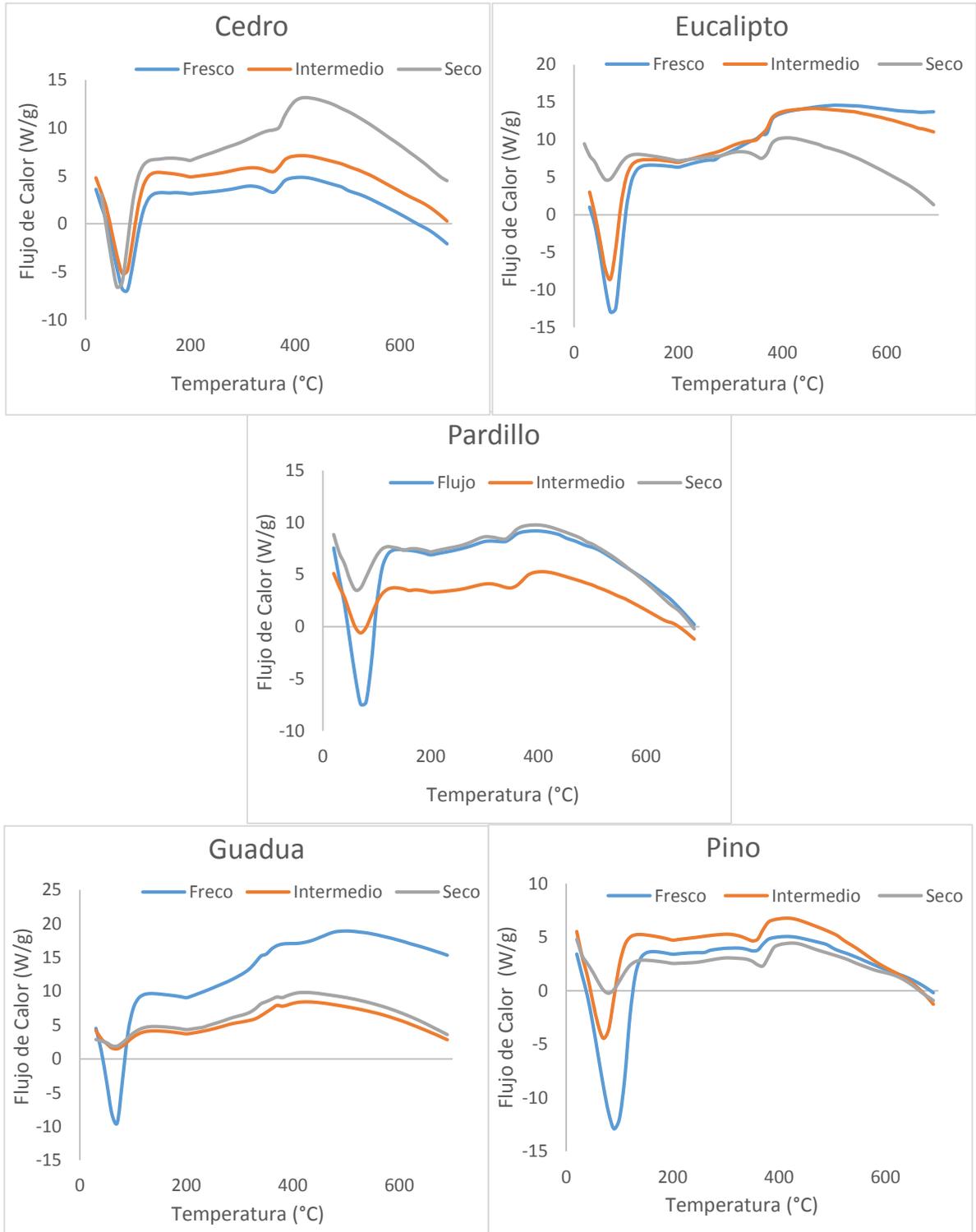


Figura 14. . Recopilación de DSC de todas las muestras de madera en sus tres etapas de secado (exo up)

Fuente: autor

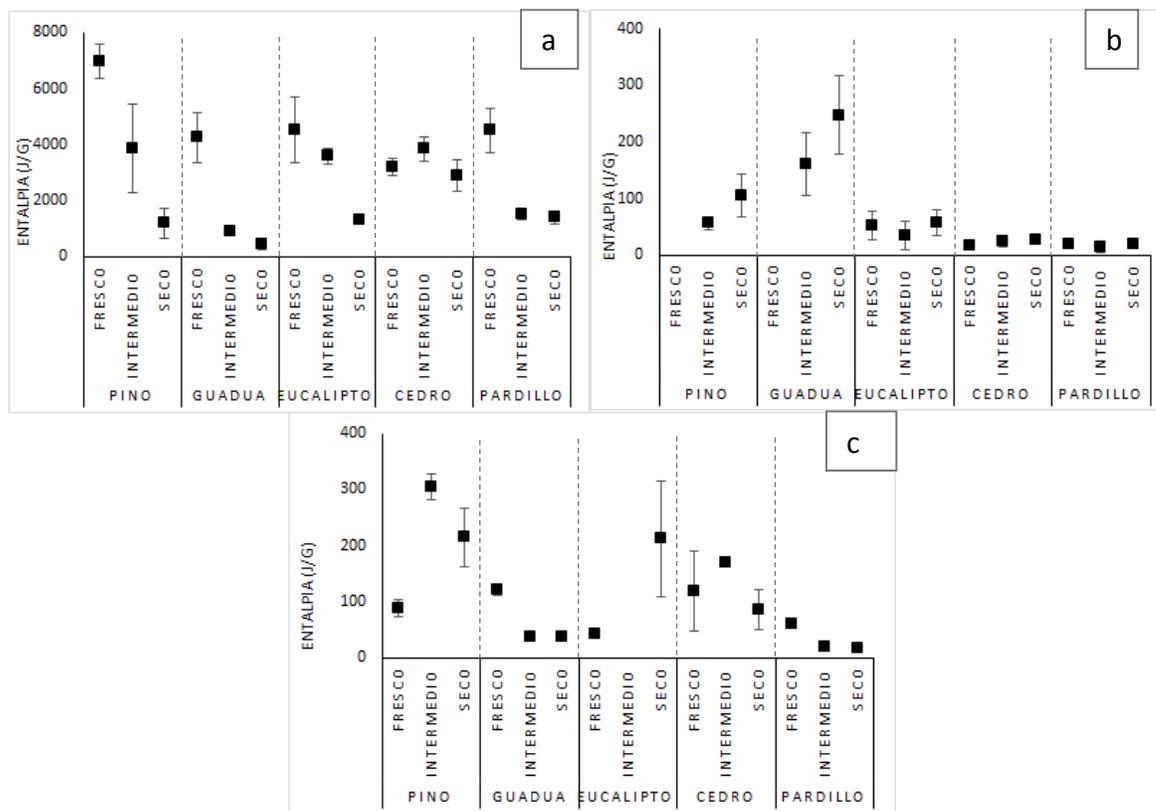


Figura 15. Valores de entalpia con sus respectivas desviaciones estándar; a. banda 1, b. pico 2, pico 3.
Fuente: autor

A $\sim 200^{\circ}\text{C}$ inicia la descomposición de los componentes químicos de la madera, estando las transiciones dos (endotérmica) y tres (exotérmica) relacionadas con la misma. Como se mencionó en el análisis de TGA, la lignina es el primer compuesto en descomponerse, seguido de las hemicelulosas y la celulosa. El pico tres (exotérmico), relacionado con la descomposición térmica corresponde a la formación de productos gaseosos liberados durante la pirolisis y a la degradación de los productos orgánicos formados por la descomposición térmica de la celulosa [50, 68-70].

La transición dos no se presentó en las muestras frescas de pino y guadua y la transición tres, no se presentó en la muestra intermedia de eucalipto. Al realizar un análisis de varianza a los valores de entalpia de las diferentes transiciones, se encontró que la muestra fresca presentó 3 grupos homogéneos para la primera entalpia (cedro-guadua, guadua-pardillo-eucalipto y pino), 2 para la segunda (cedro-pardillo y eucalipto) y 2 para la tercera (eucalipto-pardillo-pino y pardillo-pino-cedro-guadua), no existiendo diferencias estadísticamente significativas ($p <$

0,05) entre las especies que conforman un grupo y sí entre dichos grupos ($p > 0,05$), con un 95% de confianza. Con respecto a las muestras intermedias, se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre las 4 muestras que la presentan (guadua, pardillo, cedro y pino), por lo cual esta transición (exotérmica) es útil para la diferenciación de las muestras de madera analizadas.

5.2 Análisis FT-IR

[63]

En las figuras 25, 26, 27, 28, 29 en anexos, se muestran los espectros IR obtenidos para todas las muestras de madera en sus diferentes etapas de secado, con el análisis de sus respectivas señales; las cuales, se encuentran de forma detallada en la tabla 4. En la figura 16 se dan a conocer los espectros IR superpuestos para las muestras analizadas.

La presencia de algunos grupos como el hidroxilo alifático y el enlace C-C, pueden estar presentes debido a la ruptura de las cadenas laterales de polímeros de lignina. El -OH, puede encontrarse además de la presencia de agua, por la presencia de fenoles y alcoholes. Adicionalmente, las diferentes bandas corroboran la presencia de celulosa, lignina y hemicelulosa, en las muestras, pos sus señales características [62, 66, 71].

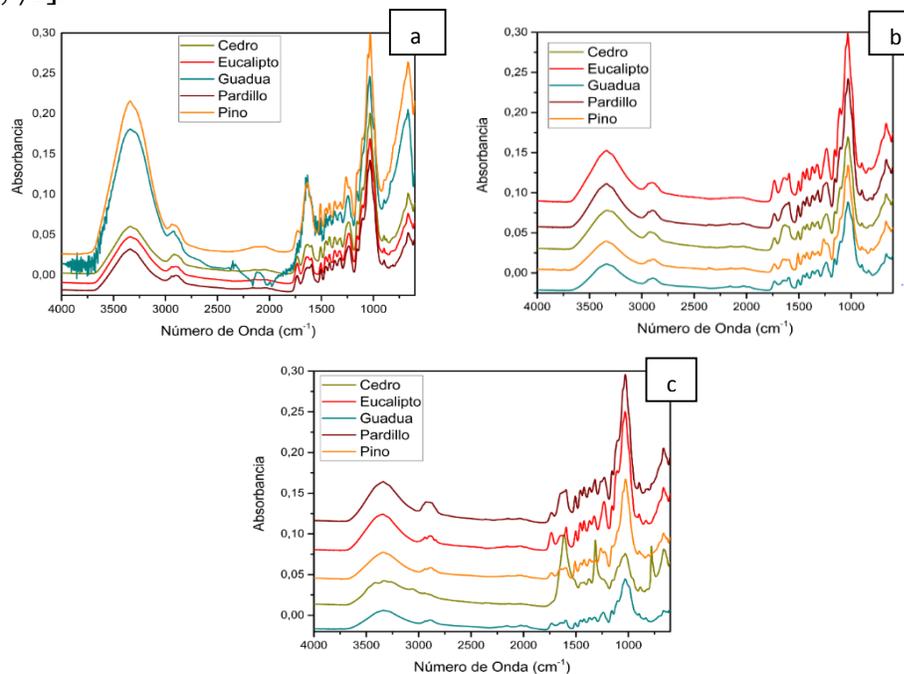


Figura 16. Recopilación de FTIR de las maderas a. frescas, b. intermedias y c. secas

Fuente: autor

Tabla 4. Bandas características de FTIR de las diferentes muestras de madera estudiadas.

Grupo Funcional	N. Pico	Intervalo	Muestra	Número de onda				
				Pino	Eucalipto	Cedro	Guadua	Pardillo
Hidroxilo (-OH)	1	3329-3340	fresco	3340	3336	3339	3338	3339
			intermedio	3338	3337	3336	3336	3338
			seco	3338	3340	3329	3338	3336
C-H	2	2877-3036	fresco	2937	2900	2917	2919	2898
			intermedio	2891	2897	2918	2893	2877
			seco	2882	2889	3060	2896	2902
carbonilo C=O	3	2351-2359	fresco	-	-	-	2351	-
			intermedio	2359	-	-	-	-
			seco	-	-	-	-	-
CO	4	2122-2155	fresco	-	-	-	2122	-
			intermedio	-	-	-	2168	-
			seco	-	-	-	2156	-
CO	5	2024-2027	fresco	-	-	-	-	-
			intermedio	-	-	-	2027	-
			seco	-	-	-	2024	-
Carbonilo C=O	6	1730-1782	fresco	1730	1732	1732	-	1733
			intermedio	1731	1731	1782	1731	1736
			seco	1733	1733	-	1731	1735
C=O	7	1612-1643	fresco	1632	1637	1638	1634	-
			intermedio	1631	1643	1635	-	-
			seco	-	-	1612	-	-
Lignina	8	1591-1602	fresco	-	1595	1593	-	1592
			intermedio	-	1591	-	1595	1594
			seco	1597	1592	-	1602	1592
Lignina	9	1502-1510	fresco	1510	1502	1507	1510	1507
			intermedio	1508	1503	1507	1506	1506
			seco	1507	1502	-	1505	1507
CH ₂	10	1450-1460	fresco	1454	1457	1454	1454	1453
			intermedio	1455	1460	1454	1458	1457
			seco	1450	1459	-	1455	1457
CH	11	1418-1425	fresco	1422	1421	1423	1418	1421
			intermedio	1425	1425	1421	1422	1421
			seco	1422	1421	1422	1420	1421
C-H y OH	12	1366-	fresco	1370	1373	1372	1371	1373

		1373	intermedio	1367	1371	1371	1366	1370
			seco	1368	1369	1372	1369	1371
CH ₂	13	1315-1324	fresco	1318	1322	1317	1318	1318
			intermedio	1318	1324	1317	1319	1322
			seco	1316	1325	1315	1322	1318
Carboxilo C-O	14	1262-1263	fresco	1262	-	-	-	-
			intermedio	1263	-	-	-	-
			seco	1263	-	-	-	-
C=O, C-O y C-C	15	1231-1243	fresco	-	1238	1239	1243	1234
			intermedio	-	1235	1235	1235	1234
			seco	-	1232	-	1239	1231
C-O-C y C=O	16	1154-1160	fresco	1155	1157	1157	1155	1157
			intermedio	1157	1158	1156	1157	1160
			seco	1157	1154	-	1158	1154
C-O-C y C-O	17	1102-1109	fresco	1103	1104	1107	-	1105
			intermedio	1103	1109	1105	1103	1102
			seco	1106	1108	-	1105	1102
C-O	18	1049-1054	fresco	1054	-	-	-	-
			intermedio	1052	-	-	-	-
			seco	1049	-	-	-	-
Deformación C-O	19	1027-1033	fresco	1029	1032	1032	1033	1033
			intermedio	1030	1033	1031	1029	1031
			seco	1027	1032	1029	1030	1029
C-H	20	893-899	fresco	895	896	899	895	898
			intermedio	895	897	898	896	896
			seco	893	896	884	896	896
Anillo aromático trisustituido	21	807-834	fresco	-	-	-	-	829
			intermedio	807	832	822	832	817
			seco	819	831	-	834	834
C-H	22	778	fresco	-	-	-	-	-
			intermedio	-	-	778	-	-
			seco	-	-	-	-	-
C-C	23	661-668	fresco	664	667	666	667	664
			intermedio	668	664	665	661	664
			seco	666	664	662	662	661

Fuente: autor

En la región de la “huella dactilar”, los espectros presentan cierta complejidad debido al solapamiento de algunas de las bandas características de los diferentes compuestos. Los picos 9, 8, 14 y 15 (tabla 4.) se deben a la flexión característica o estiramiento de los diferentes grupos de la lignina, además los picos 10, 11, 12, 16, 17, y 19 se atribuyen a vibraciones de estiramiento de los diferentes grupos de lignina y celulosa. Las bandas 6 y 13 corresponden a vibraciones de tensión de los diferentes grupos de la celulosa [56] y las señales 7, 9 y 19 se presentan por el estiramiento de: C=O, aromáticos y C-O [58], mientras que el pico 7 es característico únicamente del C=O. Lo anterior, indica la presencia de aldehídos, cetonas y ácidos orgánicos en las muestras, los cuales hacen parte de los componentes extraíbles de la madera [72].

La guadua es la única madera que presenta los picos 4 y 5, característicos del $-CO$; cuya presencia, puede deberse a la ruptura de enlaces éter y C=O [68, 72]. En cuanto a la comparación de las diferentes maderas en sus tres etapas de secado, se observa una diferencia en la intensidad de la banda 1, debida a la diferencia en su contenido de humedad.

5.3 Análisis de Combustión

El "calor de combustión" es la cantidad de energía que se disipa durante la combustión completa de una unidad de masa, de una sustancia en la condición de que los productos de combustión se enfrían a la temperatura inicial; es decir, que el calor de condensación del vapor de agua está incluido. Los resultados obtenidos mediante el análisis de FTIR, confirmaron que la madera se compone esencialmente de carbono, hidrogeno y oxígeno, además de algunas sustancias minerales, las cuales son indispensables para la generación de combustión.

Para capturar la señal (mW) de la bomba de combustión, se utilizó una interfase UNIDAN, la cual se graficó como se muestra en la figura 17, haciendo uso del programa OriginPro. Teniendo en cuenta que los cálculos para determinar el calor de combustión deben hacerse gráficamente se exportaron al programa SketchUp, para realizar los trazos necesarios y obtener el valor correspondiente al segmento AB (figura 17) que se requiere en la ecuación 1, para determinar Q y posteriormente, con la ecuación 2 determinar el valor de combustión de cada muestra.

$$Q=AB \cdot F$$

Ecuación. 1

$$(\Delta H_{\text{Comb}}) = (Q - (m_c \cdot (\Delta H_{\text{Comb Cap}}))) / m_s$$

Ecuación. 2

Dónde:

Q: Calor de combustión

m_c: Masa de la cápsula

$\Delta H_{\text{Comb Cap}}$: Calor de combustión de la cápsula

F: Factor de calibración

m_s: Masa de la muestra

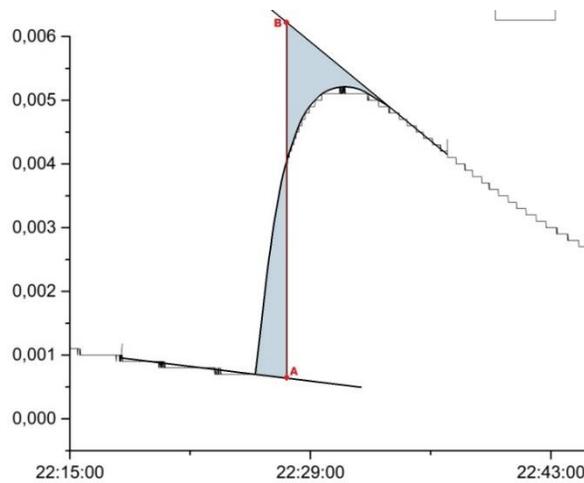


Figura 17. Representación gráfica de la señal del calorímetro.

Fuente: autor

La calibración de la bomba, se hizo mediante la combustión de ácido benzoico y su comparación con el dato teórico. El valor experimental de la combustión del ácido benzoico fue 54.647 KJ/V y el calor de combustión experimental obtenido para la capsula de gelatina empleada fue de 16.9425 KJ/g. Para iniciar la parte experimental de combustión, fue necesario abordar con las maderas frescas, para evitar las pérdidas de humedad causadas por el almacenamiento, posteriormente se realizaron la combustión del pino y el eucalipto en sus tres etapas de secado, y se decidió continuar con cedro del cual se obtuvo la combustión en su estado seco, pero lastimosamente, debido a daños físicos presentados por el equipo no fue posible obtener los resultados para guadua y pardillo.

En la tabla 5 se dan los resultados de los calores de combustión obtenidos para las diferentes maderas en sus tres etapas de secado y en la figura 18 el diagrama de caja y bigotes de los mismos. Al comparar dichos valores, se observa tal y como se

esperaba, mayores valores del calor de combustión en las muestras secas que en las intermedias y húmedas, lo que indica que estas serían una buena opción para obtención de energía, pues un calor de combustión elevado indica que se obtiene un gran valor de energía con la quema de esa muestra.

En la comparación de muestras secas, se observa que el eucalipto presentó mayor calor de combustión (16.27 KJ/g), seguido del pino (15,03 KJ/g) y el cedro (14,74 KJ/g), los cuales tienen un calor de combustión relativamente similar, siendo estos tres recomendados para la obtención de energía, sobre todo el eucalipto y el pino.

En el caso de las maderas frescas, se observa que tienen valores similares (8,04-9,19 KJ/g); a excepción de la guadua, la cual presenta un calor de combustión menor (4,26 KJ/g), lo cual significa que esta sería la menos indicada para la obtención de energía, pero si la más recomendada para la construcción, puesto que con ella habría menos riesgos de quema. Se hace necesario recordar que mediante TGA se encontró que el contenido de humedad en las muestras varió de la siguiente forma: pino (56,46± 3,56), eucalipto (40,38± 8,36), guadua (39,06± 4,48), pardillo (38,24± 5,96) y cedro (26,40± 0,53).

Tabla 5. Resultados de Combustión

Especie		Calor de combustión de la muestra
Pino	Fresco	9,19 ± 1,61
	Intermedio	15,31 ± 2,04
	Seco	15,03 ± 1,77
Guadua	Fresco	4,26 ± 2,77
	Intermedio	-
	Seco	-
Eucalipto	Fresco	8,88 ± 2,27
	Intermedio	11,57 ± 0,91
	Seco	16,27
Cedro	Fresco	8,04 ± 0,74
	Intermedio	-
	Seco	14,74 ± 4,45
Pardillo	Fresco	8,33 ± 3,03
	Intermedio	-
	Seco	-

Fuente: autor

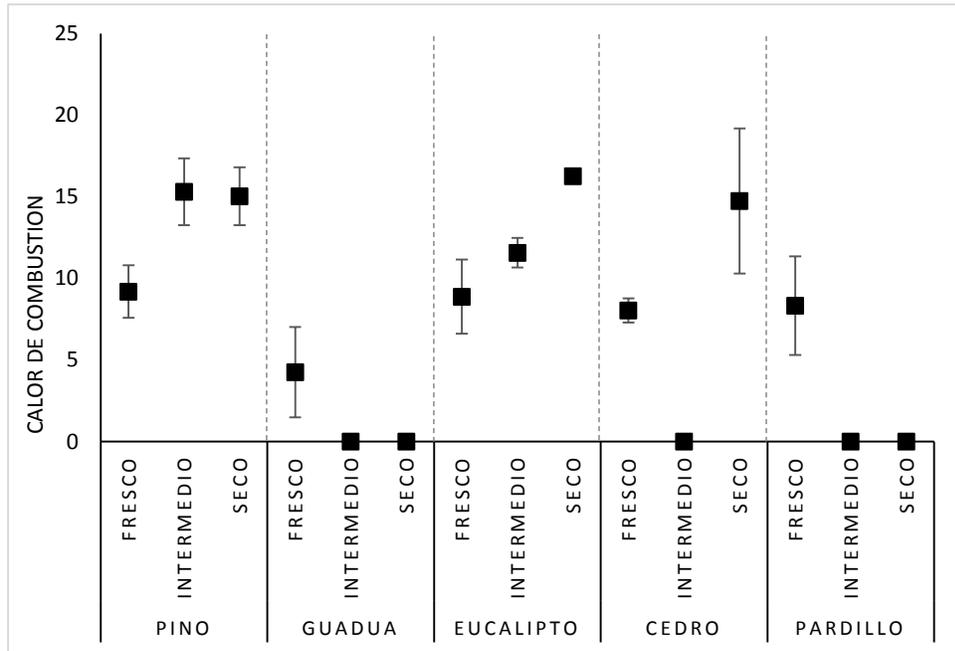


Figura 18. Valores de calor de combustión con sus respectivas desviaciones estándar
 Fuente: autor

CONCLUSIONES

El análisis termogravimétrico, mostró que las maderas analizadas (pino, eucalipto, guadua, pardillo y cedro) en sus tres etapas de secado (inicial, intermedia y final) presentan dos pérdidas de masa, la primera ($23,83 \pm 3,37 - 123,42 \pm 11,6$ °C) se relaciona con la evaporación del agua y la descomposición de compuestos de bajo peso molecular y la segunda ($205,43 \pm 1,76 - 399,74 \pm 1,75$ °C) es debida a la degradación de los componentes de las muestras, que en su mayoría son lignina, celulosa y hemicelulosas.

De las maderas analizadas, el cedro es el que presenta menor cantidad de agua y compuestos de bajo peso molecular recién cortado y a su vez, el que presenta menor pérdida de masa durante el proceso de secado, mientras que la guadua, es la madera que presenta la mayor pérdida de masa durante su etapa de secado.

Los porcentajes de pérdida de masa exhiben una diferencia en la composición de las muestras analizadas, que podría estar liderada por el contenido de lignina en la guadua fresca y de hemicelulosas en el cedro y el pardillo.

Las muestras de pino, eucalipto, guadua, pardillo y cedro en tres etapas de secado (inicial, intermedia y final), exhibieron casi en su totalidad, 3 transiciones térmicas; a excepción de pino y guadua, en su estado intermedio de secado, las cuales no presentaron la transición 2 y eucalipto (intermedio) que no presentó la 3.

La primera transición (endotérmica) puede estar relacionada con la vaporización del agua y algunos compuestos de bajo peso molecular, las transiciones 2 (endotérmicas) y 3 (exotérmica), se relacionan con la descomposición de los componentes químicos de la madera.

Las bandas características de los diversos compuestos, en los espectros IR de las maderas, muestran la presencia de celulosa, lignina y hemicelulosa (componentes mayoritarios de la pared celular), además de hidrocarburos alifáticos y aromáticos,

alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas y ácidos alifáticos (componentes extraíbles de la madera).

Dados los calores de combustión obtenidos para las diferentes maderas en sus tres etapas de secado, se recomienda el uso del eucalipto y el pino (secos) como fuente energética, pero no para la construcción, pues incluso frescos presentan calores de combustión relativamente altos, lo que implicaría un riesgo. En cambio, para este fin (construcción), se recomienda la guadua.

RECOMENDACIONES

En vista de que se encontró que las maderas que generaron mayor energía de combustión, fueron el pino y el eucalipto, se recomienda estudiar las diferentes especies de estas maderas, con la finalidad de analizar si se encuentran diferencias entre ellas.

Realizar análisis de combustión en mezclas de las diferentes maderas y en varias etapas de su proceso de secado, para encontrar si hay diferencias significativas entre ellas o si no es relevante este hecho a la hora de emplearlas para la obtención de energía.

Por último, se recomienda realizar los análisis de combustión a las maderas faltantes, para realizar una comparación global de las mismas.

BIBLIOGRAFIA

1. FAO, *conservación de energía en las industrias mecanicas forestales*. 2004, Roma, Italia.
2. FAO. *Aprovechamiento potencial de los residuos de maderapara la producció de anergia.*; Available from: <http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269S10.htm>.
3. Núñez-Regueira, L., et al., *Determination of calorific values of forest waste biomass by static bomb calorimetry*. *Thermochimica Acta*, 2001. **371**(1–2): p. 23-31.
4. Pedraza, D.B., *Comercio internacional de productos forestales*, ODEPA, Editor. 2011 Santiago de Chile.
5. Ríos, R.D.C., *Aprovechamiento de los residuos de la madera y su posible reutilización en fabricación de biomasa generada en Bogota* in *Facultad tecnológica*. 2014, Universidad distrital Francisco José de Caldas: Bogotá.
6. Jaén, R.L., *Factibilidad del empleo de los residuos de la industria de la madera para la obtención de energía electrica*.
7. Castaño, M., *Historia de la madera*. 2012.
8. Serrano, D.Q., *colección de especies maderables "xiloteca" de al cuenta baja del catatumbo*, in *Facultad de ciencia agraria*. 2008, Universidad de Pamplona: Pamplona, colombia. p. 91.
9. Barajas, S.A.B., *Documentación técnica del uno de maderas en proyectos constructivos de viviendas*, in *Facultad de Fisicomencanica* 2004, Universidad Industrial de Santander: Bucaramenga p. 138.
10. Salinas, F.C., V.J. Piedra, and E.V. Cuzco, *Sistema Constructivo en madera aplicado a un centro de exhibición y venta de muebles*. 2005. p. 301.
11. Peña, S.V. and I.M. Rojas, *Tecnología de la madera*. 2006: Mundi-Prensa Libros.
12. Rodriguez, F.J.V., *La madera como materia de expresión plástica. Análisis estructural y tratamiento en escultura para interior y exterior*. 1997, Universidad de La Laguna.
13. García, C.S., *Determinación de la higroscopicidad y comportamiento termodinámico de la madera juvenil y madura a través de sus isotermas de sorción*.
14. Méndez, P.P.D., *Evaluacion de propiedades físicas y mecánicas de madera de nothofagus glauc (Hualo)provenientes de la zona Cauquenes*. 2005. p. 179.
15. Fong, F.J.P., *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (Gmelina arborea Roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal*, in *Facultad de ingenierias*. 2008, Universidad de San Carlos de Guatemala: Octubre, 2008. p. 122.
16. Nutsch, W., *Tecnología de la madera y del mueble*. 1996: Reverté.
17. Maldonado, M.R.F., *Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (Pinus maximinoides H. E. Moore) procedentes de la finca rio frio, tactic, alta verapaz*, in *Facultad de Ingenierias* 2006, Universidad de san carlos de Guatemala: Guatemala. p. 154.
18. *Propiedades mecánicas de la madera estructural*.
19. Associats, A.G. *Propiedades físicas y mecánicas de la madera*. 2014; Available from: <http://www.aga.cat/index.php/es/articulos/articulos-de-interes/varios/383-propiedades-fisicas-y-mecanicas-de-la-madera>.
20. *Tecnología de la madera*. Available from: <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/propiedades-fisicas>.

21. *La madera*. Available from: <http://www.sabelotodo.org/construccion/madera.html>.
22. Departamento de tecnología, I. *Unidad 6: La madera*. Available from: http://roble.pntic.mec.es/jprp0006/tecnologia/leso_recursos/unidad06_la_madera/teoria/index_teorias2.htm.
23. *Las maderas*. Available from: <http://www.areatecnologia.com/materiales/madera.html>.
24. Covalada, H.J.M., *La competitividad de las cadenas agroproductivas en Colombia*. 2005, Bogota Colombia.
25. FAO, *Plantaciones forestales 2000*.
26. S., D.C.G.C., et al., *Anuario 2003 observatorio agrocadenas*. 2003, Bogotá D.C. Colombia.
27. Gaitán, X.A. and H.M. Cavaleada, *Características y estructuras del sector forestal-madera-muebles en Colombia*. 2003. p. 11.
28. FAO. *Tendencias históricas y la situación actual del sector forestal*.; Available from: <http://www.fao.org/docrep/009/a0470s/a0470s-04.htm>.
29. *Sector forestal en Colombia* Proexport Colombia 2012: p. 17.
30. Guerrero, D.R., E.V. González, and G.H. Chitiva, *Guía para las plantaciones forestales comerciales Norte de Santander*. Vol. 37. 1998, Santa fe de Bogotá: Noviembre de 1998.
31. L., D.C. and N.R. Salinas., *Libro rojo de las plantas de Colombia*. Vol. 4. 2007. 232.
32. Corponor, *Síntesis ambiental de Norte de Santander*, Corponor, Editor. 2011: Norte de Santander. p. 67.
33. ambiental, O.p.l.e.y.p. *Cedro*. 2016; Available from: http://www.opepa.org/index.php?option=com_content&task=view&id=370&Itemid=30.
34. Ecured. *El cedro*. Available from: <https://www.ecured.cu/Cedro>.
35. Nessi, A.d.l.A.M. *Pardillo negro*. Available from: <http://diversidadbiologica.minamb.gob.ve/especies/ficha/6/25551/>.
36. Drooz, A. and A. Bustillo, *Glena bisulca, a serious defoliator of Cupressus lusitanica in Colombia*. Journal of Economic Entomology, 1972. **65**(1): p. 89-93.
37. Penogoa, C.M.O., et al., *El pino cupressus lusitanica mill*. 2011: Manizales. p. 105.
38. Velez, S., *La guadua angustifolia "El bambú colombiano"*.
39. López, L.F. and J.F. Correal, *Estudio exploratorio de los laminados de bambú Guadua angustifolia como material estructural*. Maderas. Ciencia y tecnología, 2009. **11**(3): p. 171-182.
40. Restrepo, R.J.H., et al., *El Eucalipto*. 2006.
41. Nesbitt, K., et al., *Partitioning and distribution of RAPD variation in a forest tree species, Eucalyptus globulus (Myrtaceae)*. Heredity, 1995. **74**(6): p. 628-637.
42. Evtuguin, D., et al., *Characterization of an acetylated heteroxylan from Eucalyptus globulus Labill*. Carbohydrate Research, 2003. **338**(7): p. 597-604.
43. Skoog, D.A., F.J. Holler, and T.A. Nieman, *Principios de análisis instrumental*. Vol. 5. 2001, Aravaca (Madrid).
44. Madrid, U.a.d. *Unidad de análisis térmico*. 2008; Available from: https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668322022/1242666562032/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Analisis_Termico.htm.
45. Benito, J.G., *Análisis Térmico*. p. 36.
46. Wang, L., et al., *Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards*. Construction and Building Materials, 2016. **125**: p. 316-325.

47. Aldana, A.S. and E.R. Sandoval, *Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón* 2004.
48. *Prácticas análisis térmico por DSC*. p. 10.
49. Nedelcu, D., et al., *Thermal behaviour and stability of the Arboform® LV3 nature liquid wood*. Composites Part B: Engineering, 2016. **103**: p. 84-89.
50. Tsujiyama, S.-i. and A. Miyamori, *Assignment of DSC thermograms of wood and its components*. Thermochemica Acta, 2000. **351**(1–2): p. 177-181.
51. Lyons, G., et al., *A preliminary evaluation of the use of mid infrared spectroscopy to develop calibration equations for determining faecal composition, intake and digestibility in sheep*. Animal Feed Science and Technology, 2016. **221, Part A**: p. 44-53.
52. *Espectroscopia biológica de absorción*. (): p. 28.
53. Rubison, K.A. and J.F. Rubinson, *Análisis instrumental*. 2001, Madrid
54. Bonifazi, G., et al., *Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflectance spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging*. Polymer Degradation and Stability, 2015. **113**: p. 10-21.
55. Gelbrich, J., C. Mai, and H. Militz, *Evaluation of bacterial wood degradation by Fourier Transform Infrared (FTIR) measurements*. Journal of Cultural Heritage, 2012. **13**(3, Supplement): p. S135-S138.
56. Chen, H., et al., *Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis*. Carbohydrate Polymers, 2010. **82**(3): p. 772-778.
57. Sandak, A., J. Sandak, and O. Allegretti, *Quality control of vacuum thermally modified wood with near infrared spectroscopy*. Vacuum, 2015. **114**: p. 44-48.
58. Chen, J.-b., Q. Zhou, and S.-q. Sun, *Direct chemical characterization of natural wood resins by temperature-resolved and space-resolved Fourier transform infrared spectroscopy*. Journal of Molecular Structure, 2016. **1115**: p. 55-62.
59. Mattos, E.Y.T., *Determinación de calores de combustión de seis especies de abejas nativas de Colombia*, in *Facultad de ciencias basicas*. 2010, Universidad de Pamplona: 2010. p. 51.
60. Rocasolano, I.d.q.y.f. *Calorimetria de combustión* 2016; Available from: <http://icr.iqfr.csic.es/index.php/ultimas-publicaciones?id=51>.
61. Peña, D., *Análisis de Datos Multivariantes*. 2002: p. 515.
62. Rodríguez-Añón, J.A., et al., *Development of an experimental procedure for energy evaluation of forest communities by calorimetry and thermal analysis*. Thermochemica Acta, 2007. **458**(1–2): p. 5-10.
63. Yang, H., et al., *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. Fuel, 2007. **86**(12–13): p. 1781-1788.
64. Morán, J., *Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra de sisal-caracterización*. Asociación Argentina de Materiales, 2008.
65. Leal, S.R., *Degradación química de la madera y PET reciclado y su aplicación en la síntesis de resinas poliésteres*, in *Facultad de Ciencias Químicas* 2011, Universidad Autónoma de Nuevo León. p. 77.
66. Alvarez, V.A. and A. Vázquez, *Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(10): p. 1672-1680.

67. Liodakis, S., et al., *Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants*. *Thermochimica Acta*, 2013. **568**: p. 156-160.
68. Fu, P., et al., *Study on the gas evolution and char structural change during pyrolysis of cotton stalk*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012. **97**: p. 130-136.
69. Liao, Y., *Mechanism study of cellulose pyrolysis*. HangZhou, China: ZheJiang University, 2003.
70. Pandey, K.K. and A.J. Pitman, *FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003. **52**(3): p. 151-160.
71. Liu, Q., et al., *Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG–FTIR analysis*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008. **82**(1): p. 170-177.
72. Chen, D., et al., *Bamboo pyrolysis using TG–FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields*. *Fuel*, 2015. **148**: p. 79-86.

ANEXOS

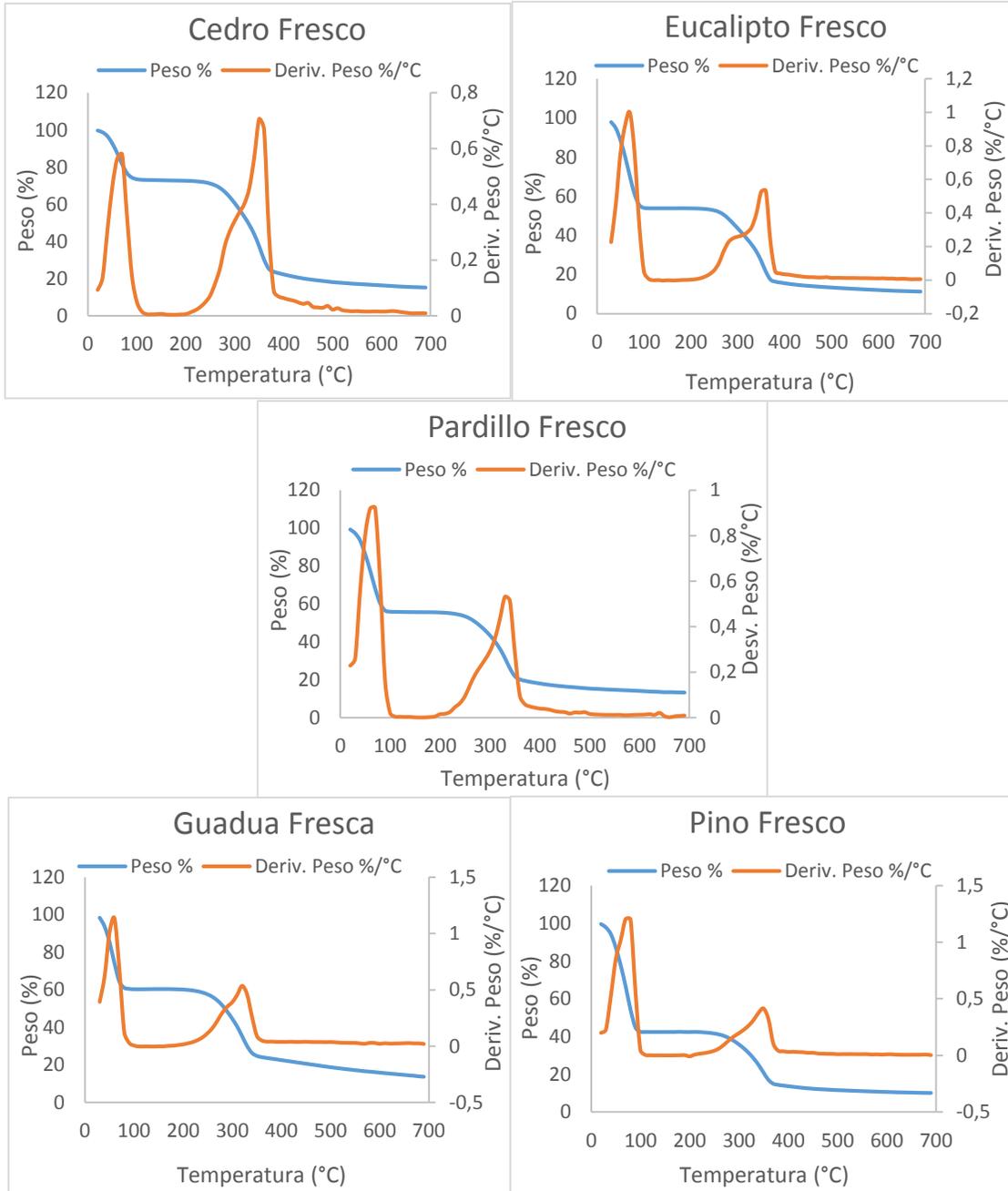


Figura 19. TGA de las cinco clases de madera en su etapa inicial de secado (fresco)

Fuente: autor

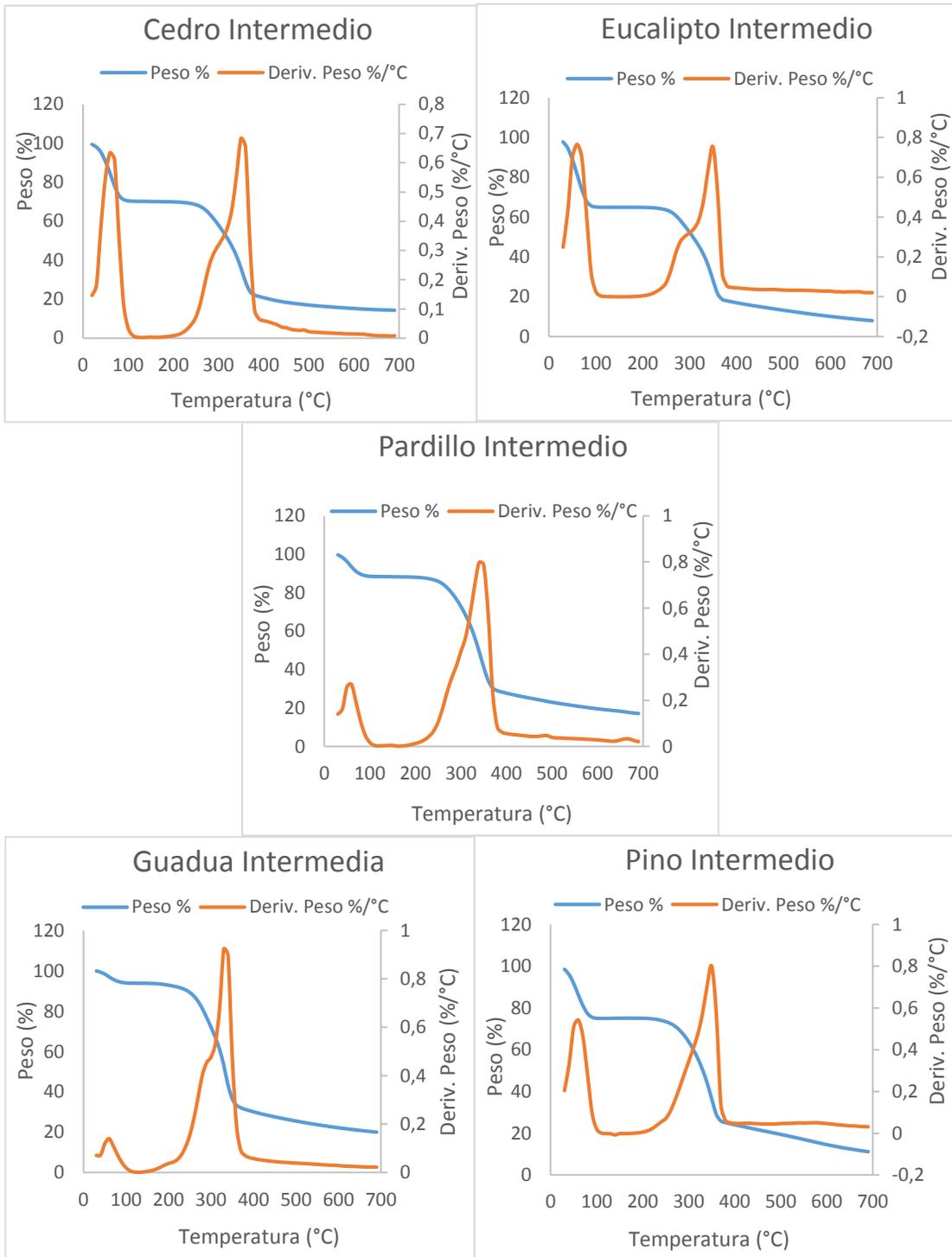


Figura 20. TGA de las cinco clases de madera en su etapa intermedia de secado.
Fuente: autor

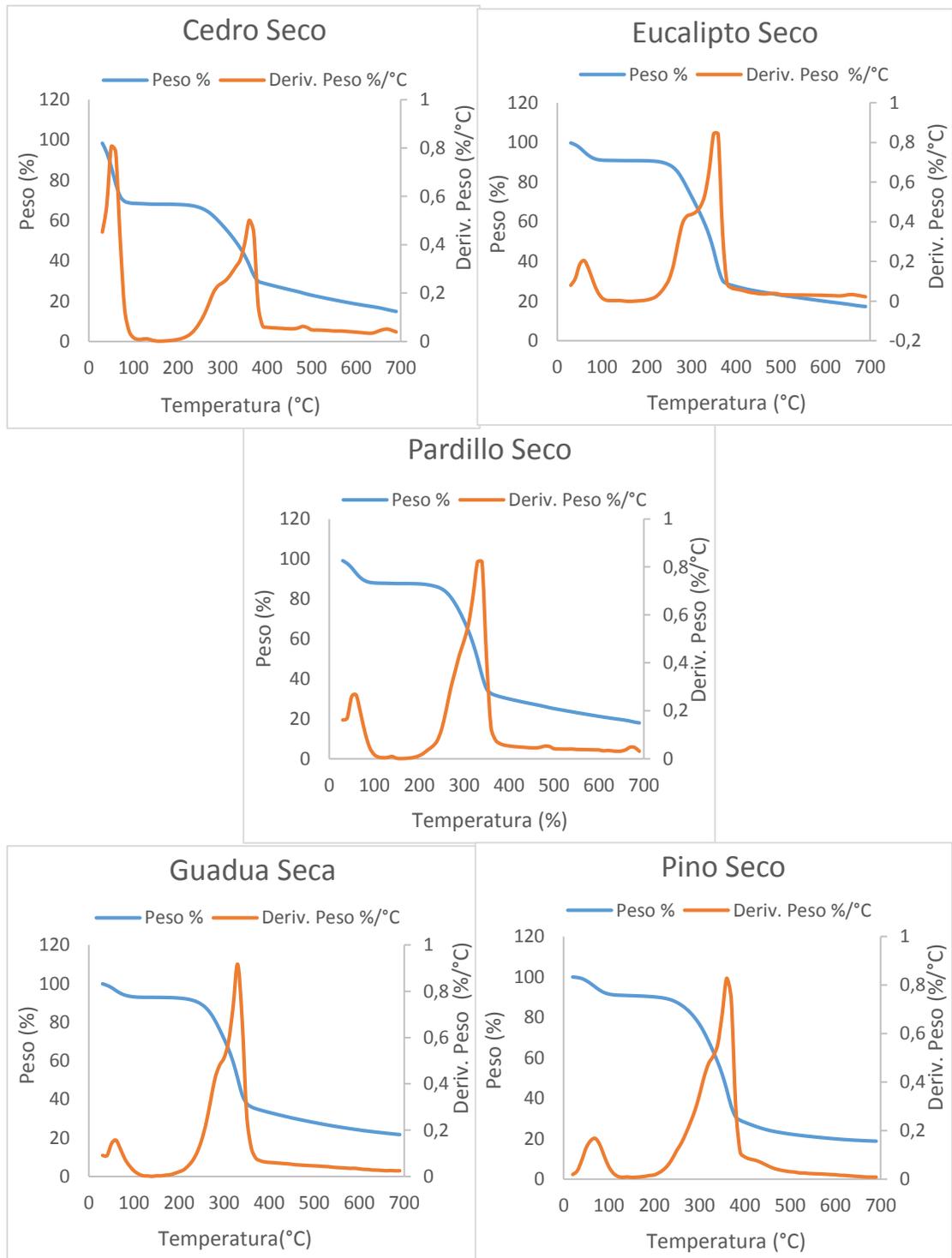


Figura 21. TGA de las cinco clases de madera en su etapa final de secado.
Fuente: autor

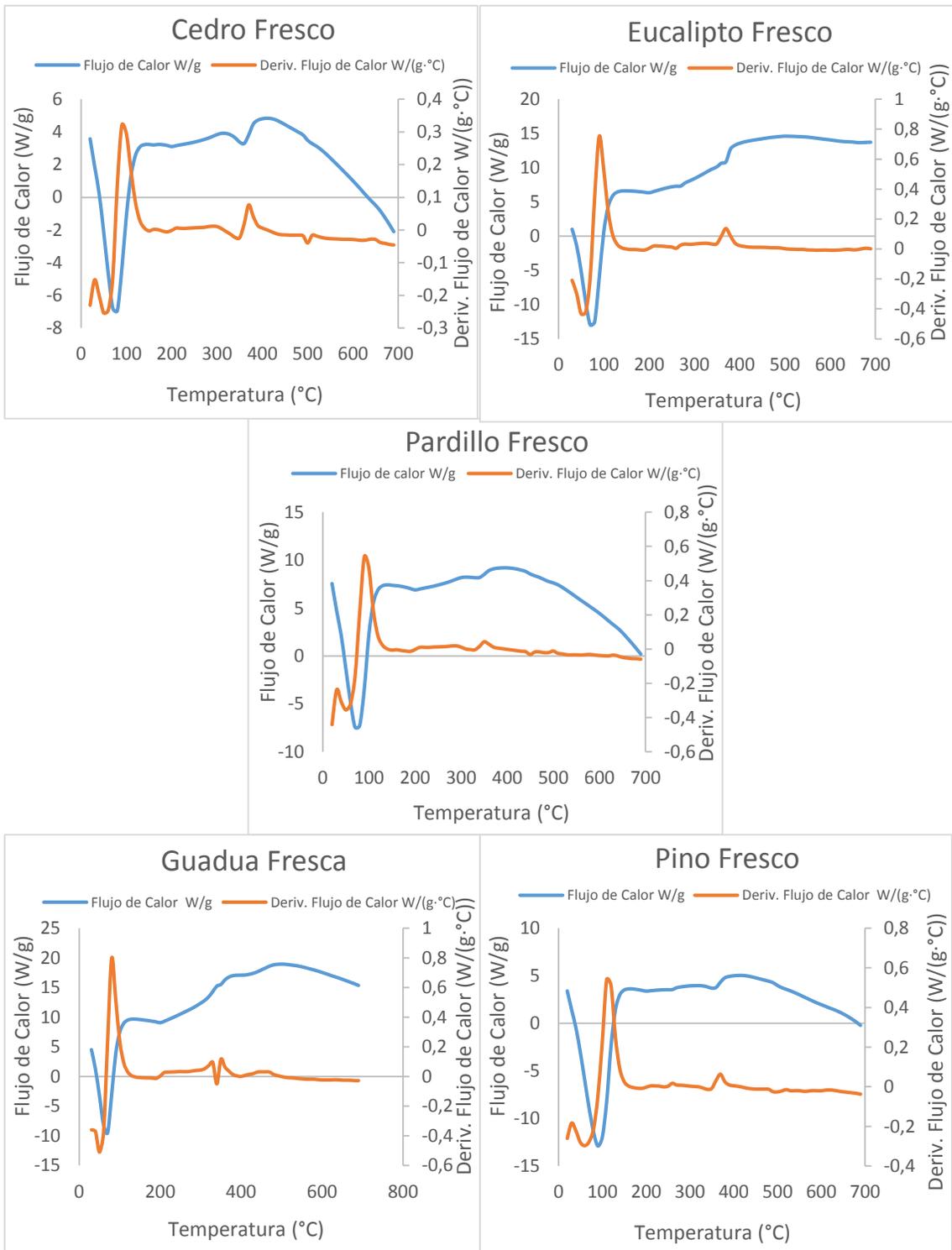


Figura 22. DSC de las cinco clases de madera en su etapa inicial de secado (fresca).
Fuente: autor

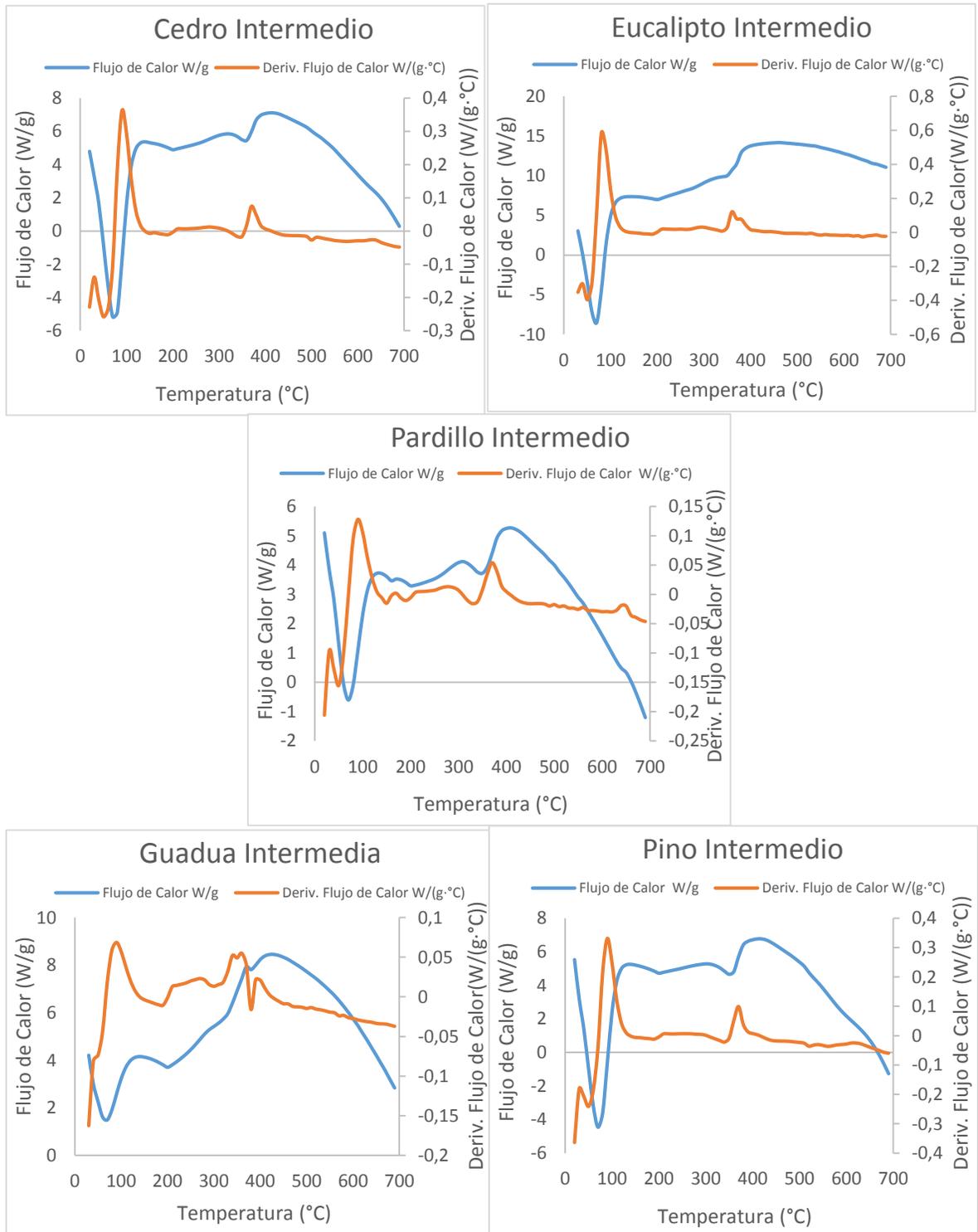


Figura 23. DSC de las cinco clases de madera en su etapa intermedia de secado.
Fuente: autor

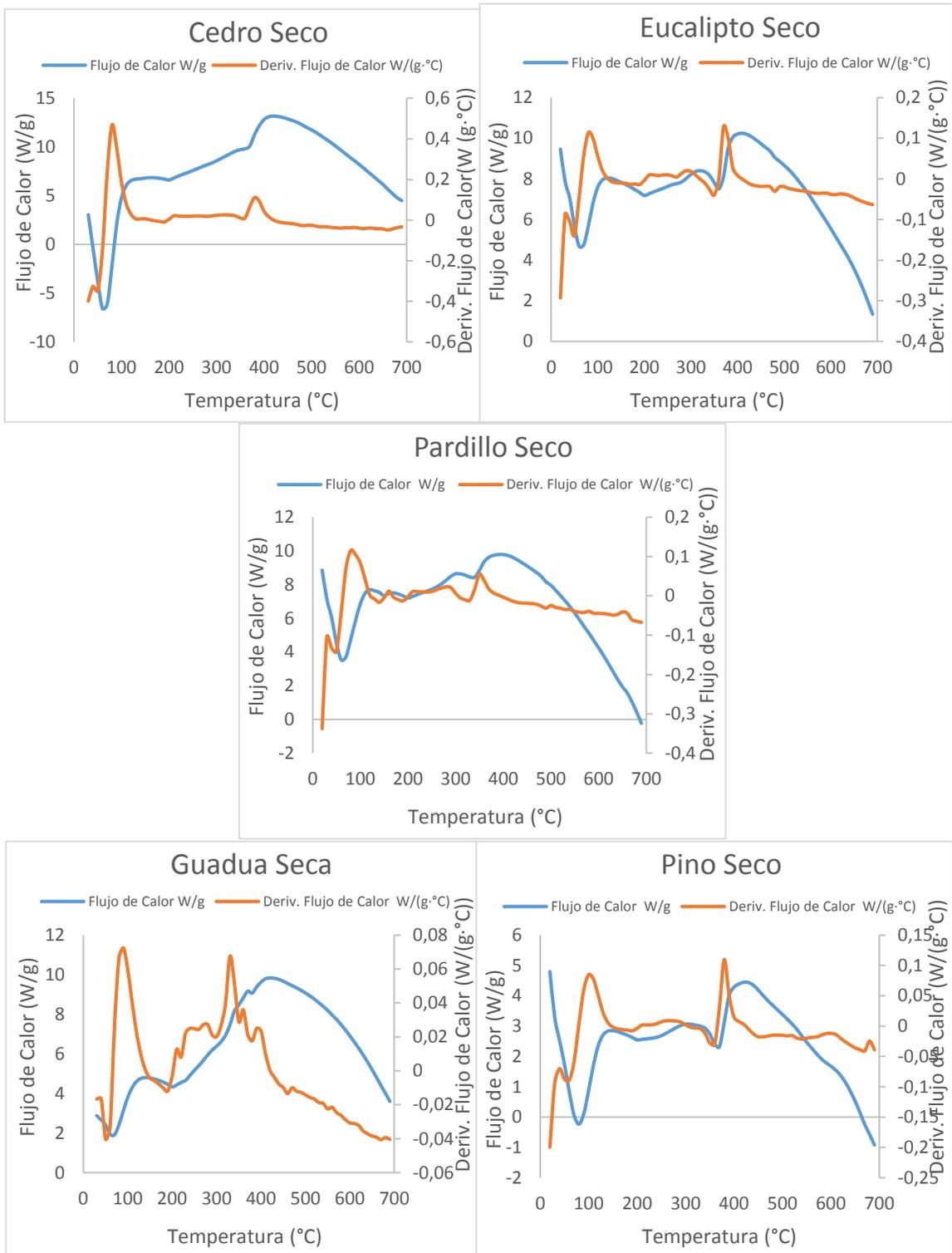


Figura 24. DSC de las cinco clases de madera en su etapa final de secado.

Fuente: autor

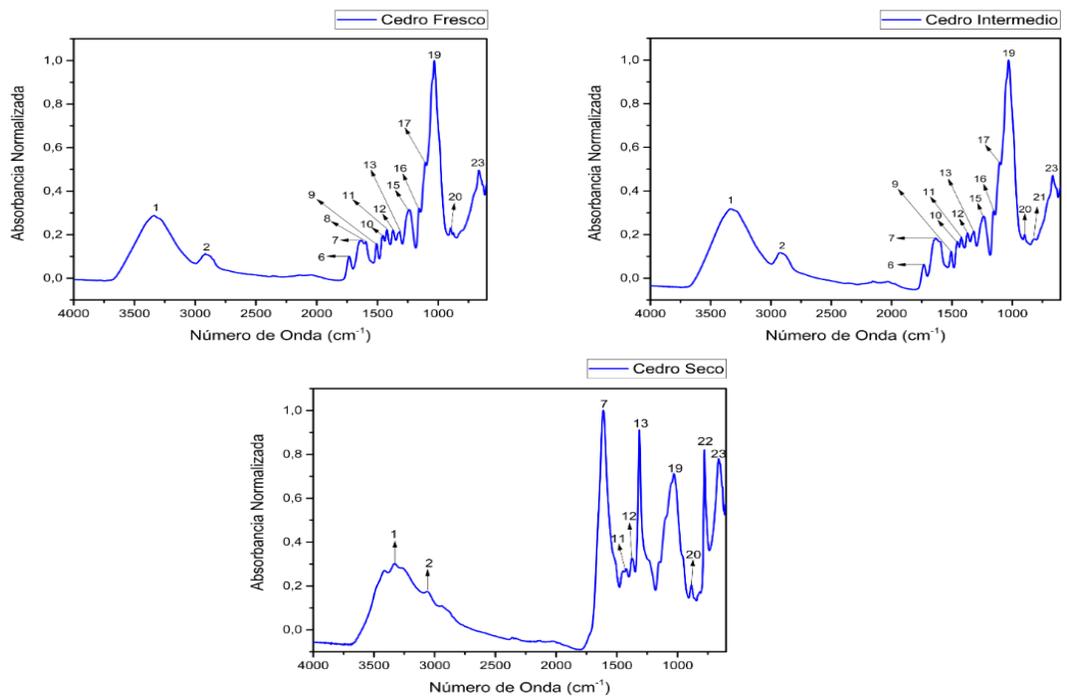


Figura 255. FTIR para cedro en sus tres etapas
Fuente: autor

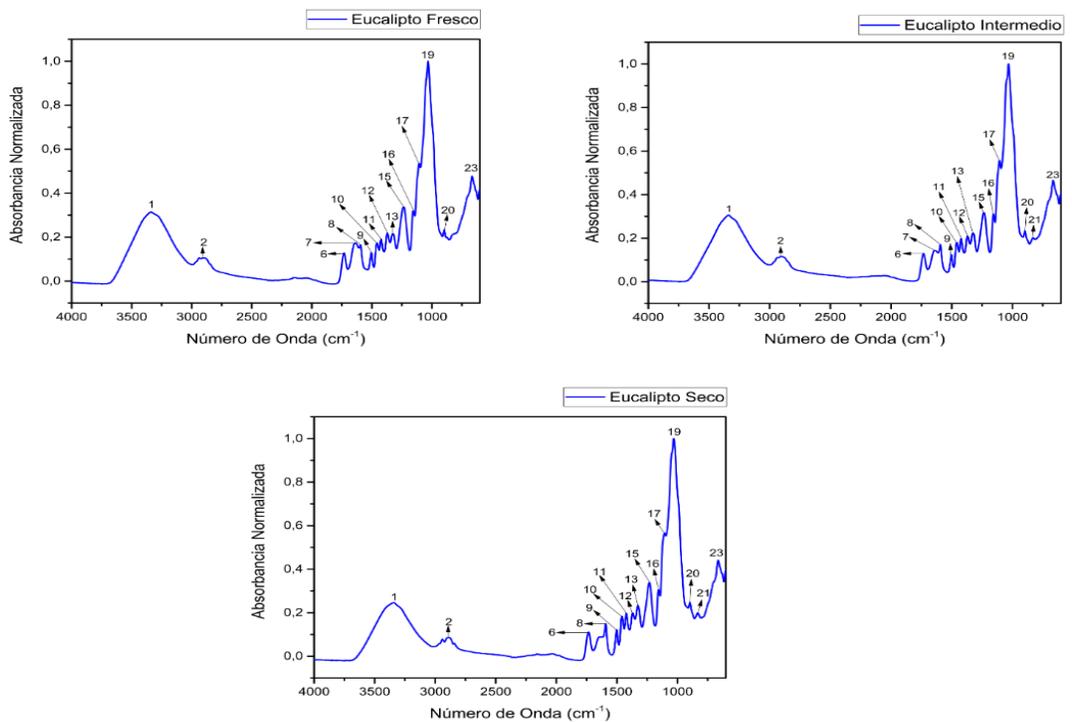


Figura 26. FTIR para Eucalipto en sus tres etapas
Fuente: autor

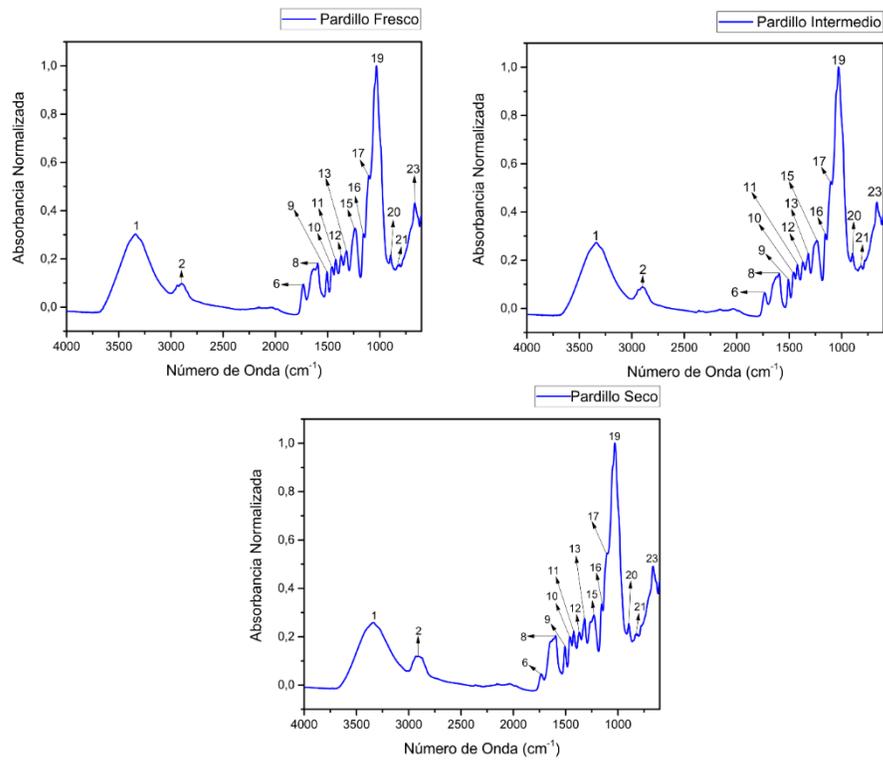


Figura 277. FTIR para el pardillo en sus tres etapas
Fuente: autor

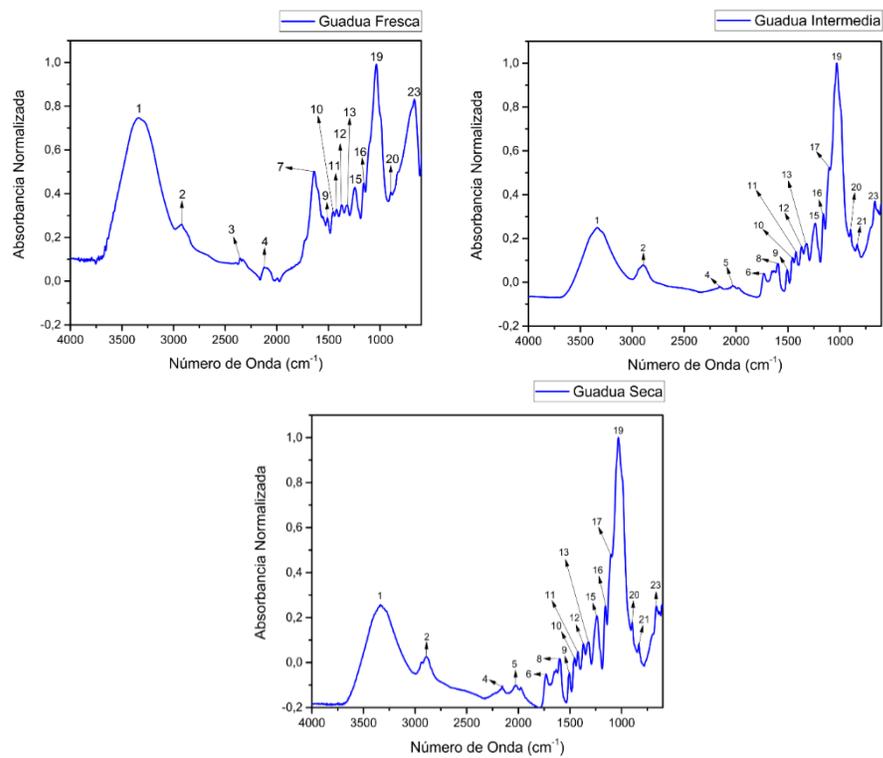


Figura 28. FTIR para la Guadua en sus tres etapas
Fuente: autor

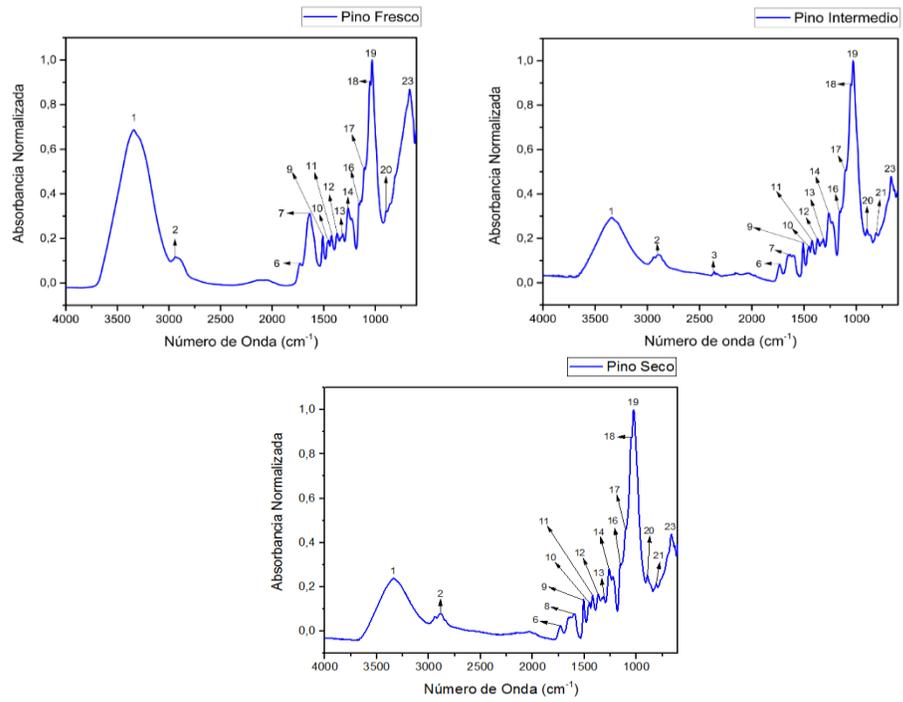


Figura 29. FTIR para el pino en sus tres etapas de secado
Fuente: autor