

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**ESTUDIO DE LA FIRMA HIPERESPECTRAL DE LA MADERA  
DE 30 ESPECIES DE ÁRBOLES DE COSTA RICA PARA LA  
IDENTIFICACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS  
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TERMOGRAVIMÉTRICAS  
Y COLORIMÉTRICAS**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERÍA FORESTAL  
CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

**KEVIN ALBERTO ARIAS CECILIANO**

**CARTAGO, COSTA RICA, 2019**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**ESTUDIO DE LA FIRMA HIPERESPECTRAL DE LA MADERA  
DE 30 ESPECIES DE ÁRBOLES DE COSTA RICA PARA LA  
IDENTIFICACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS  
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TERMOGRAVIMÉTRICAS  
Y COLORIMÉTRICAS**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERÍA FORESTAL**

**CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

**KEVIN ALBERTO ARIAS CECILIANO**

**CARTAGO, COSTA RICA, 2019**

# **ESTUDIO DE LA FIRMA HIPERESPECTRAL DE LA MADERA DE 30 ESPECIES DE ÁRBOLES DE COSTA RICA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TERMOGRAVIMÉTRICAS Y COLORIMÉTRICAS.**

Kevin Alberto Arias Ceciliano \*

## **RESUMEN**

La espectroscopia de la luz reflejada, es una propiedad fundamental que permite estudiar la reflectancia espectral (la relación de la energía reflejada sobre la energía incidente como una función de la longitud de onda). La reflectancia varía con la longitud de onda para la mayoría de los materiales, debido a que la energía en ciertas longitudes de onda es absorbida. Estas propiedades han sido ampliamente estudiadas en el campo de la vegetación y se ha demostrado que el tipo de especie, el estrés de la planta, y la condición de follaje pueden todos afectar la respuesta de la reflectancia, por lo que ha demostrado ser una herramienta muy útil para el estudio de la vegetación. Más recientemente se han estudiado las aplicaciones de la espectroscopia para la identificación de especies de plantas, la determinación de moléculas presentes en las hojas (clorofila) o presencia de compuestos y elementos químicos en las maderas. El presente trabajo se enfocó en el estudio de muestras de madera de un grupo seleccionado de 30 especies de importancia forestal, para ello se utilizó un espectrorradiómetro en el rango de 325-1075 nm. Esta información se correlacionó con los resultados de laboratorio de sus propiedades químicas, colorimétricas y calóricas de la madera. Con los resultados obtenidos se realizaron procedimientos matemáticos mediante el clasificador k-nearest neighbors (knn) con la métrica dynamic time warping (dtw) para establecer preliminarmente el uso de la firma hiperespectral de la madera en la identificación de especies de forma automática.

**Palabras Claves:** espectroscopia, maderas, colorimetría, identificación de especies.

\*Arias, K. 2019. Estudio de la firma hiperespectral de la madera de 30 especies de árboles de Costa Rica para la identificación y su relación con las características químicas, termogravimétricas y colorimétricas. Tesis de Licenciatura. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 78 p.

## ABSTRACT

The spectroscopy of reflected light is a fundamental property that allows us to study spectral reflectance (the relationship of reflected energy to incident energy as a function of wavelength). Reflectance varies with wavelength for most materials, because energy at certain wavelengths is absorbed. These properties have been extensively studied in the field of vegetation and it has been shown that species type, plant stress, and foliage condition can all affect the reflectance response, so it has proven to be a very useful tool for the study of vegetation. More recently it has been studied the applications of spectroscopy for the identification of plant species, the determination of molecules present in leaves (chlorophyll) or the presence of compounds and chemical elements in wood. The present work focused on the study of wood samples from a selected group of 30 species of forest importance, using a spectroradiometer in the range of 325-1075 nm. This information was correlated with the laboratory results of its chemical, colorimetric and caloric properties of the wood. With the results obtained, mathematical procedures were carried out using the k-nearest neighbors classifier (knn) with the dynamic time warping metric (dtw) to preliminarily establish the use of the hyperspectral signature of wood in the automatic identification of species.

**Keywords:** spectroscopy, woods, colorimetry, species, identification.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No Comercial Sin Derivadas 4.0 Internacional.

# **ACREDITACIÓN**

## **CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Juan Carlos Valverde Otárola, M.Sc. Dorian Carvajal Vanegas y Ph.D. Dagoberto Arias Aguilar como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica

---

**Juan Carlos Valverde Otárola M.Sc.  
Director de Trabajo de Graduación**

---

**Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.  
Lector de Trabajo de Graduación**

---

**Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D.  
Lector de Trabajo de Graduación**

---

**Kevin Arias Ceciliano  
Estudiante**

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mis padres con mucho cariño, por el apoyo brindado durante mi formación académica.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al fondo de becas CeNAT-CONARE por el financiamiento otorgado para realizar el presente estudio. Se agradece especialmente al personal del Laboratorio PRIAS y a su equipo de trabajo por haberme permitido trabajar con sus equipos, formar parte del grupo de investigadores y por la amistad mostrada.

Se agradece a los investigadores y asistentes del Laboratorio ECOPLANT de la Escuela de Ingeniería Forestal por el acompañamiento en los análisis y obtención de nuevos datos.

El reconocimiento al Prof. Geovanni Garro de la Escuela de Matemática por su ayuda en los análisis preliminares del uso de la firma hiperespectral en la identificación automática de especies de madera.

Agradezco a mis padres por depositar la confianza en mí.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ACREDITACIÓN.....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Identificación anatómica de especies maderables.....	1
Identificación de organismos usando visión artificial.....	3
Planteamiento del problema .....	4
OBJETIVOS.....	6
Objetivo general .....	6
Objetivos específicos .....	6



METODOLOGÍA .....	7
Procedencia y características del material utilizado.....	7
Preparación de las muestras .....	9
Respuesta espectral.....	10
Medición de la concentración de elementos químicos de la madera .....	12
Medición de las propiedades calóricas de la madera .....	13
Contenido de Cenizas (C%) .....	13
Análisis estadístico de la información .....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
OE 1. Firmas espectrales .....	15
OE 2. Propiedades químicas de la madera .....	18
OE 3. Análisis termogravimétrico y las correlaciones con valores de reflectancia ..	22
OE 4. Uso de la firma espectral para la identificación de las maderas con técnicas matemáticas.....	24
OE 5. Caracterización de la madera seca de <i>Peltogyne purpurea</i> Pittier procedente de árboles de bosque natural mediante los patrones hiperspectrales y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos. ....	26
CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO .....	47
RECOMENDACIONES .....	49

REFERENCIAS .....	50
ANEXOS.....	59

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Especies de árboles de Costa Rica analizadas para el estudio. ....	8
Cuadro 2. Detalles de las especies estudiadas y sus valores de NDVI según el corte de la madera.....	16
Cuadro 3. Resultados de la composición química de las maderas de las especies estudiadas. ....	19
Cuadro 4. Condiciones instrumentales para la medición de elementos minerales ....	21
Cuadro 5. Densidad y caracterización de la albura y del duramen de madera seca de <i>P. purpurea</i> procedente de bosque natural. ....	36
Cuadro 6. Caracterización colorimétrica y diferencial del color de la albura y duramen de madera seca de <i>P. purpurea</i> procedente de bosque natural. ....	37
Cuadro 7. Análisis de correlación de Pearson de los principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia que mostraron significancia con datos físicos y anatómicos de las secciones de albura y duramen en madera seca de <i>P. purpurea</i> .	41
Cuadro 8. Análisis de correlación de Pearson de los principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia que mostraron significancia con datos Lab de color de las secciones de albura y duramen en madera seca de <i>P. purpurea</i> .....	42

Cuadro 9. Resultados obtenidos de metales y cenizas para las 30 especies de árboles de Costa Rica.....	59
Cuadro 10. Resultados obtenidos mediante termogravimetría en 30 especies de árboles de Costa Rica.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planos de corte usados en la identificación de especies forestales .....	3
Figura 2. Probetas de cocobolo utilizadas para las mediciones con el espectroradiómetro.....	10
Figura 3. Proceso de adquisición de la firma espectral. (1) el instrumento, (2) dificultad con las probetas disponibles del trabajo de campo previo y (3) ajuste de nuevas muestras de madera a la cápsula de medición.....	12
Figura 4. Patrones de reflectancia para 13 especies arbóreas de Brasil según el estudio de Handlich et al. (2018). Forest Ecology and Management 427 (2018) 296–304.....	15
Figura 5. Curvas de reflectancia según el corte en la madera en tres especies .....	18
Figura 6. Curvas de pérdida de masa en función de la temperatura para 30 maderas de Costa Rica. ....	22
Figura 7. Firmas espectrales de tres especies de maderas .....	24

Figura 8. Matriz de confusión para 14 especies basada en las firmas espectrales analizadas como series de tiempo. ....	26
Figura 9. Detalle del proceso de ubicación de puntos de muestreo de los segmentos de fuste de <i>Peltogyne purpurea</i> . ....	32
Figura 10. Reflectancia (a) y segunda derivada de la reflectancia (b) de las secciones de albura y duramen en madera seca de <i>P. purpurea</i> procedente de bosque natural. ....	39
Figura 11. Análisis de componentes principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia de las secciones de albura y duramen mostraron significancia en madera seca de <i>P. purpurea</i> procedente de bosque natural.....	40
Figura 12. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-1.....	64
Figura 13. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-2.....	64
Figura 14. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-3.....	65
Figura 15. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-4.....	65
Figura 16. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-5.....	66
Figura 17. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-6.....	66
Figura 18. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-7.....	67
Figura 19. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-8.....	67
Figura 20. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-9.....	68
Figura 21. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-10.....	68

Figura 22. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-11.....	69
Figura 23. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-12.....	69
Figura 24. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-13.....	70
Figura 25. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-14.....	70
Figura 26. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-15.....	71
Figura 27. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-16.....	71
Figura 28. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-17.....	72
Figura 29. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-18.....	72
Figura 30. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-19.....	73
Figura 31. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-20.....	73
Figura 32. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-21.....	74
Figura 33. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-22.....	74
Figura 34. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-23.....	75
Figura 35. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-24.....	75
Figura 36. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-25.....	76
Figura 37. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-26.....	76
Figura 38. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-27.....	77
Figura 39. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-28.....	77

Figura 40. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-29.....78

Figura 41. Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-30.....78

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Metales y cenizas para las 30 especies de árboles de Costa Rica.....59

Anexo 2. Análisis de Termogravimetría (TGA) en diferentes muestras de maderas.....61

Anexos 3. Graficos de los análisis de termogravimetría en las 30 muestras de madera.....64

## INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de los recursos naturales y en particular de los bosques naturales tropicales y el cambio de uso del suelo que se ha desarrollado durante el siglo XX, ha causado una drástica reducción del área boscosa nacional y ha puesto en riesgo las poblaciones de muchas especies arbóreas (Corea et al., 2014; Rouse et al., 1974). Las especies arbóreas más afectadas han sido las especies de potencial maderable, pues en muchos casos brindan maderas preciosas de valor económico, de alta calidad, trabajabilidad, durabilidad y belleza. Costa Rica cuenta con más de 2000 especies arbóreas, de las cuales 90 especies son catalogadas como amenazadas, 53 están en peligro de extinción y 30 se ubican en la categoría de peligro crítico (Corea et al., 2014), al punto que 18 de ellas han sido declaradas en veda total (Decreto Ejecutivo No 25700-MINAE del 2008). Esto evidencia la gravedad de la problemática si adicionamos el hecho que se trata de especies difíciles de identificar en el campo, con su biología reproductiva poco conocida y un nivel extremadamente complicado de identificación a nivel de sus maderas.

### **Identificación anatómica de especies maderables**

La identificación de algunas especies arbóreas maderables es particularmente compleja y muchas veces constituye el único material disponible en pericias legales. Por otra parte, el reconocimiento de las maderas es importante en la industria maderera para juzgar correctamente las propiedades físicas y los valores económicos de las diferentes especies de madera (Moore y Owen, 2001). Por esta razón, es de extrema utilidad el desarrollo de métodos alternativos de identificación taxonómica con base en muestras de madera, que ayuden a los interesados en el proceso comúnmente usado por los expertos y que sean tan precisos y simples como adquirir una imagen o firma que permita identificar rasgos o patrones únicos. Por lo que la identificación correcta de especies forestales maderables es una necesidad urgente, de gran interés internacional y que vendría a apoyar la

conservación y el manejo sostenible del recurso forestal amenazado (Hermanson y Wiedenhoft, 2011). El reconocimiento anatómico de maderas ha sido la técnica de identificación por excelencia y puede ser microscópico y/o macroscópico. El primero es mucho más confiable que el segundo, pero requiere de equipos y técnicas especiales, las cuales no siempre están disponibles. Las características macroscópicas de la madera, son aquellas que se aprecian a simple vista o con ayuda de un aumento cercano al 20 x. En la mayoría de los casos, este conjunto de características macroscópicas define inequívocamente cada especie, lo cual permite su identificación (Díaz, 1979; Moya y Rodríguez, 2011).

Las características anatómicas son menos afectadas por las condiciones ecológicas y/o climáticas que las características morfológicas externas (v.g., corteza, hojas), por lo que tienen un grado mayor de valor diagnóstico en la identificación de especies, independientemente de su procedencia (Kollmann, 1959). Por otro lado, las características macroscópicas primarias como la presencia o ausencia de poros, radios, vasos y fibras entre otras, son menos variables dentro de cada especie, por lo que son comúnmente usadas como elementos discriminadores (Moya y Rodríguez, 2011).

El procedimiento que realiza usualmente un experto para la identificación de una especie de árbol maderable se basa en la observación de ciertas características macroscópicas de una muestra. Dicha muestra se obtiene al realizar tres cortes: transversal, tangencial y radial de la madera (Figura 1) y la observación se realiza mediante una lupa con un aumento cercano a 20x. Para identificar la especie a la que corresponde una muestra, no es necesario que ésta sea de gran tamaño, basta con que tenga dimensiones de aproximadamente 1 x 1 x 1 cm (Araya y Moya, 2013).



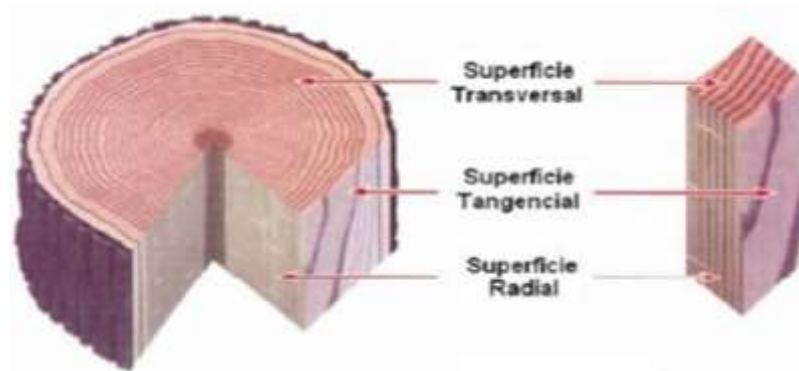


Figura 1. Planos de corte usados en la identificación de especies forestales

### **Identificación de organismos usando visión artificial**

Recientemente, el desafío de identificación de especies se ha enfocado computacionalmente (Bonnet et al., 2015), aplicando técnicas de visión artificial para realzar y extraer la información subyacente (Pajares y De La Cruz, 2008; Gonzalez et al., 2009; Petrou y Petrou, 2010; Nixon y Aguado, 2012) y reconocimiento y clasificación de patrones (Bishop, 2009; Cristianini y Shawe, 2009) para automatizar la clasificación a partir de imágenes digitales. Muchos de los algoritmos usados en este campo ya se han aplicado con éxito al procesamiento de imágenes biomédicas (Jiang et al., 2013) y biológicas (Prendas y Bogantes, 2011) entre otras.

En el caso de las hojas de las plantas, son un factor altamente discriminante (necesario en la mayoría de los casos, aunque no suficiente). La naturaleza prácticamente bidimensional de las hojas, se ha usado en esquemas de visión artificial para identificar plantas. Elementos tridimensionales como las flores, semillas y otros, son más complejos y presentan además el problema de que pueden (y deben) fotografiarse desde múltiples perspectivas para tener una descripción completa del elemento. En el caso de las hojas, una foto del haz y el envés basta. Algunas de las ideas comúnmente usadas tratan de caracterizar o describir el contorno, la venación, la textura y/o el color de las hojas con el fin de poder identificar la especie (Seon-Jong et al., 2011). Otras usan propiedades morfológicas digitales

(v. g., factor de forma y suavidad, rectangularidad) y la detección de puntos claves y/o descriptores invariantes a traslaciones, rotaciones y escala. Algunas otras involucran el uso de herramientas matemáticas avanzadas como técnicas de dimensión fractal, redes neuronales complejas y transformadas especiales como wavelet (WT) y Fourier (FT) (Gu y Wang, 2005). Para maderas es poca la información disponible y hay un creciente interés en aplicar estas técnicas para lograr la automatización de la identificación de las estructuras macroscópicas, en este sentido las firmas espectrales de los cortes de la madera pueden ayudar a la automatización.

### **Planteamiento del problema**

A nivel tropical y específicamente en el trópico americano, son escasos los estudios para lograr por un lado la identificación de las maderas mediante técnicas avanzadas basadas en el reconocimiento automático de las especies, y por otro lado la determinación de sus propiedades físicas y químicas; ambas situaciones en combinación con el uso de las tecnologías más modernas que faciliten la labor, por el ejemplo el uso del espectroradiómetro. En particular, para identificar aquellas especies que tienen prohibición de corta, como es el caso de las especies amenazadas o en peligro de extinción. También para disponer de información para tomar decisiones sobre aspectos de manejo tales como el uso posterior de los residuos o la transformación de la biomasa en energía y subproductos.

En la mayoría de los países tropicales, el personal encargado de aplicar las leyes y ejercer el control del uso apropiado de las maderas, no tiene los conocimientos necesarios para certificar que una determinada pieza pertenece a la especie botánica correcta. No obstante, los nuevos desarrollos de la ciencia y la computación han permitido el reconocimiento automático de patrones, hasta el punto de generar software y hardware funcionales que permiten, por ejemplo, asociar imágenes con la identificación de objetos y organismos. Además, de la creación de algoritmos que

pueden ser utilizados para reconocimiento de patrones. Según (Espinoza y León 2001), la madera tiene en cada una de sus caras, diferentes elementos de macro y micro estructuras que permiten diferenciar patrones en el arreglo de los vasos, las fibras y demás estructuras. Permitiendo generar información muy útil para el entrenamiento de algoritmos y avanzar en la automatización de la identificación de las especies. Más allá del espectro visible (300 – 2500 nm), todos los materiales presentan respuestas espectrales características, que se pueden detectar usando sensores óptico electrónicos, capaces de detectar energía en la región infrarroja reflejada y térmica (Hermanson y Wiedenhoeft, 2011); cuyos resultados puede asociarse con propiedades físicas y químicas, como en el caso de la molécula de la clorofila en las hojas. Estos sensores, pueden ser usados a nivel terrestre, en campo o en laboratorio, o bien en plataformas aéreas o satelitales (Manolakis & Shaw, 2002), facilitando su implementación para diferentes fines, lo cual brinda un campo de desarrollo muy prometedor para los manejadores de recursos naturales.

Para atender el problema inicialmente enunciado, se plantea como solución el desarrollo de un estudio mediante la combinación del uso del registro de la firma espectral en la madera, los análisis químicos a nivel de laboratorio, la aplicación de la colorimetría, con las técnicas de reconocimiento de patrones y uso de algoritmos para la identificación de especies forestales a través de muestras de madera. Adicionalmente, se busca determinar las posibles relaciones entre características de la firma espectral y las propiedades químicas, colorimétricas y calóricas que permitan facilitar el entendimiento de las características fisiológicas de las especies, lo cual será una contribución a la comunidad científica debido a los escasos estudios que establecen correlaciones entre estas características.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Estudiar la respuesta de la reflectancia de la luz en la madera de 30 especies de árboles de Costa Rica para su uso potencial en la identificación de especies y su relación con las características químicas, termogravimétricas y colorimétricas

## Objetivos específicos

- OE 1. Generar la firma espectral de 30 especies maderables de Costa Rica considerando la anisotropía de la madera.
- OE 2. Determinar las propiedades químicas y termogravimétricas de 30 especies maderables de Costa Rica mediante análisis de laboratorio.
- OE 3. Analizar las relaciones existentes entre la firma espectral y las propiedades químicas y calorimétricas de 30 especies forestales maderables de Costa Rica.
- OE 4. Utilizar técnicas matemáticas para verificar el potencial del uso de la información de la firma hiperespectral en la identificación automática de especies a través de muestras de madera.
- OE 5. Caracterizar la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier procedente de árboles de bosque natural mediante los patrones hiperespectrales y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos.

## **METODOLOGÍA**

### **Procedencia y características del material utilizado**

La recolección de las diferentes especies maderables se realizó a nivel de depósitos de madera y aserraderos ubicados en el Valle Central. Se definió como criterio la obtención de al menos 5 piezas de madera estrictamente de árboles diferentes para capturar la mayor variabilidad. La procedencia de las maderas es principalmente de Guanacaste, Zona Sur, Zona Huetar Norte y Caribe. Las muestras se obtuvieron en condiciones de madera seca, sin ningún pretratamiento ni daños. Para las condiciones del proyecto de investigación, fue importante considerar una amplitud de condiciones ambientales y no el control específico de edad del árbol, posición de la muestra, dimensiones y otras características que no es posible obtener a partir de muestras en aserraderos y depósitos.

Para la Zona Norte se encuentran las zonas de vida Bosque Húmedo Tropical y Bosque Muy Húmedo Tropical; registra una temperatura media anual entre 27°C y 32°C (Holdridge, 1987). La precipitación anual varía entre 2500 y 3100 mm registrada en el Atlas de Costa Rica (2004), con una estación seca corta, un máximo de lluvia durante el mes de octubre y un mínimo durante el mes de marzo. El sitio tiene suelos ácidos del orden Inceptisoles (Ortiz y Cordero, 2014).

La Zona Sur se encuentra la zona de vida de Bosque Muy Húmedo Tropical (Holdridge, 1987), con una precipitación media anual de 4686 mm, topografía ondulada, pendientes con promedio de 13%, suelo arcilloso y bajo en potasio, fósforo y zinc. Siempre hay exceso de agua en todos los meses, con mayor abundancia en septiembre y octubre, siendo menos lluvioso de enero a marzo. Los meses de más lluvia son setiembre y octubre (Arguedas et al., 2006).

Para el Caribe, predomina la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano, se encuentran áreas con clima lluvioso, principalmente en las llanuras y en alturas

inferiores a los 60 msnm, áreas con clima de las faldas de la Cordillera Volcánica del Norte del lado Caribe, en alturas de 600 a 1600 msnm (Solano y Villalobos, 1996).

En Guanacaste la precipitación media anual es de 2385 mm, la temperatura máxima y mínima media son de 30°C y 23° respectivamente, presenta un promedio de 99 días con lluvias y un periodo seco de 4 meses (Solano y Villalobos, 1996). La zona de vida se clasifica como Bosque Seco Tropical, transición Bosque Húmedo (Holdridge, 1987) y reporta una biotemperatura media anual de 24°C (Solano y Villalobos, 1996).

En el cuadro 1 se muestran las 30 especies maderables que fueron recolectadas en los diferentes aserraderos y depósitos de maderas para obtener el material a utilizar en el presente estudio.

Cuadro 1. Especies de árboles de Costa Rica analizadas para el estudio.

Número ID	Nombre común	Nombre botánico
1	Almendro	<i>Dipteryx panamensis</i>
2	Canfín	<i>Protium panamense</i>
3	Caoba	<i>Swetennia macrophylla</i>
4	Caobilla	<i>Carapa guianensis</i>
5	Cativo	<i>Prioria copaifera</i>
6	Cedro amargo	<i>Cedrela odorata</i>
7	Cenízaro	<i>Samanea saman</i>
8	Chanco blanco	<i>Vochysia guatemalensis</i>
9	Chilamate	<i>Ficus insipida</i>
10	Ciprés	<i>Cupressus lusitanica</i>
11	Cocobolo	<i>Dalbergia retusa</i>
12	Corteza	<i>Tabebuia guayacan</i>

13	Cristóbal	<i>Platymiscium pinnatum</i>
14	Frijolillo	<i>Cojoba arborea</i>
15	Gavilán	<i>Pentaclethra macroloba</i>
16	Guanacaste	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
17	Jícara	<i>Lecythis ampla</i>
18	Laurel	<i>Cordia alliodora</i>
19	Manglillo	<i>Aspidosperma spruceanum</i>
20	Melina	<i>Gmelina arborea</i>
21	Nazareno	<i>Peltogyne purpurea</i>
22	Níspero chicle	<i>Manilkara chicle</i>
23	Pilón	<i>Hieronyma oblonga</i>
24	Pochote	<i>Bombacopsis quinatum</i>
25	Roble coral	<i>Terminalia amazonia</i>
26	Roble sabana	<i>Tabebuia rosea</i>
27	Ron ron	<i>Astronium graveolens</i>
28	Surá	<i>Terminalia oblonga</i>
29	Tamarindo	<i>Dialium guianense</i>
30	Teca	<i>Tectona grandis</i>

### **Preparación de las muestras**

Cada una de las muestras de madera fueron estandarizadas mediante cortes realizados con una sierra cinta que permitió obtener una probeta de 2 x 2 cm y 4 mm de espesor, medidas mínimas para que la cápsula del espectroradiómetro pueda realizar las mediciones (ver figura 2). Para cada muestra se obtuvieron tres probetas

en cada una de las tres caras de la madera y se llevó el control por especie, número de repetición y cada cara (tangencial, radial y transversal).

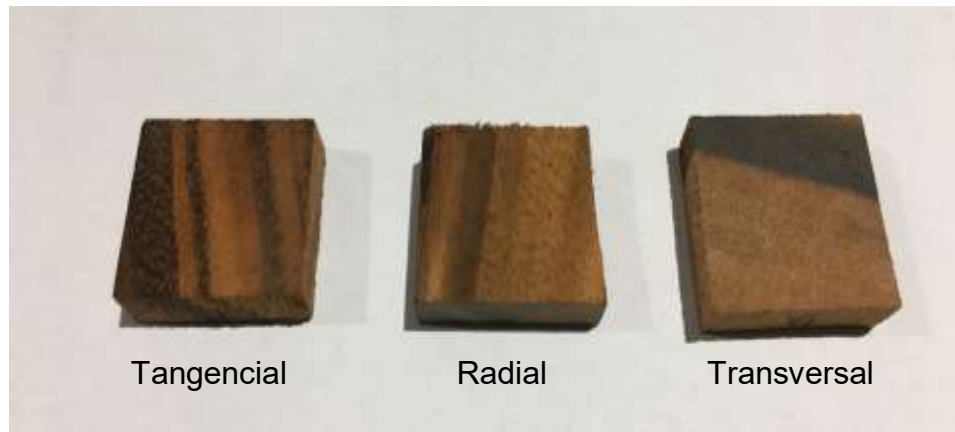


Figura 2. Probetas de cocobolo utilizadas para las mediciones con el espectroradiómetro.

### **Respuesta espectral**

La respuesta espectral mediante la reflectancia se realizó con la ayuda del espectroradiómetro disponible en el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), modelo Field Spec Hand Held 2 de la marca ASD ®, el cual captura longitudes de onda desde los 325 nm hasta los 1075 nm. El espectroradiómetro fue ajustado con una fuente interna de luz, con el fin de garantizar una constancia lumínica y excluir la luz del ambiente. Las mediciones se efectuaron en cada probeta de madera de las diferentes especies y repeticiones, con dos mediciones por probeta (lado A y lado B) y considerando cada una de las tres caras de cada probeta: radial, tangencial y transversal.

La información generada con el espectroradiómetro fue procesada a través de un programa desarrollado en Python, que permite realizar resúmenes de información y generar gráficos individuales. Con esta información codificada por especie, probeta cara de la madera y lado de medición, se obtuvo la información para generar las curvas de reflectancia. La base de datos general fue gestionada en Excel,



considerando el código de identificación de la especie, repetición, cara de la probeta, lado de medición. Para verificar la consistencia de la información se generaron los gráficos individuales y se contrastaron con el resto de los gráficos, seguidamente se incorporaron nuevas columnas con la información de la densidad de madera, los resultados del análisis químico y la información termogravimétrica. La información de los datos de reflectancia consideró los valores individuales en la escala de 400 a 1000 nm para excluir la ocurrencia de fluctuaciones antes de los 400 nm. Para sistematizar toda la información se utilizaron varios índices siguiendo el mismo principio utilizado para generar los índices de vegetación. Por ejemplo, se utilizó la relación matemática del índice de vegetación ampliamente utilizado en las aplicaciones sensores remotos, y que se conoce como NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el cual se obtiene de la relación entre la banda del infrarrojo y la banda del rojo del espectro electromagnético, su definición es:

$$NDVI = \frac{(R800 - R680)}{(R800 + R680)}$$

Adicionalmente se utilizaron los valores de la reflectancia a 550 y 950 nm y la relación 950/550 en cada uno de los cortes de la madera para realizar el análisis de correlación con características químicas de la madera. Estos valores fueron considerados a partir de la observación de las curvas, existiendo una concordancia con cambios en la pendiente de las curvas.

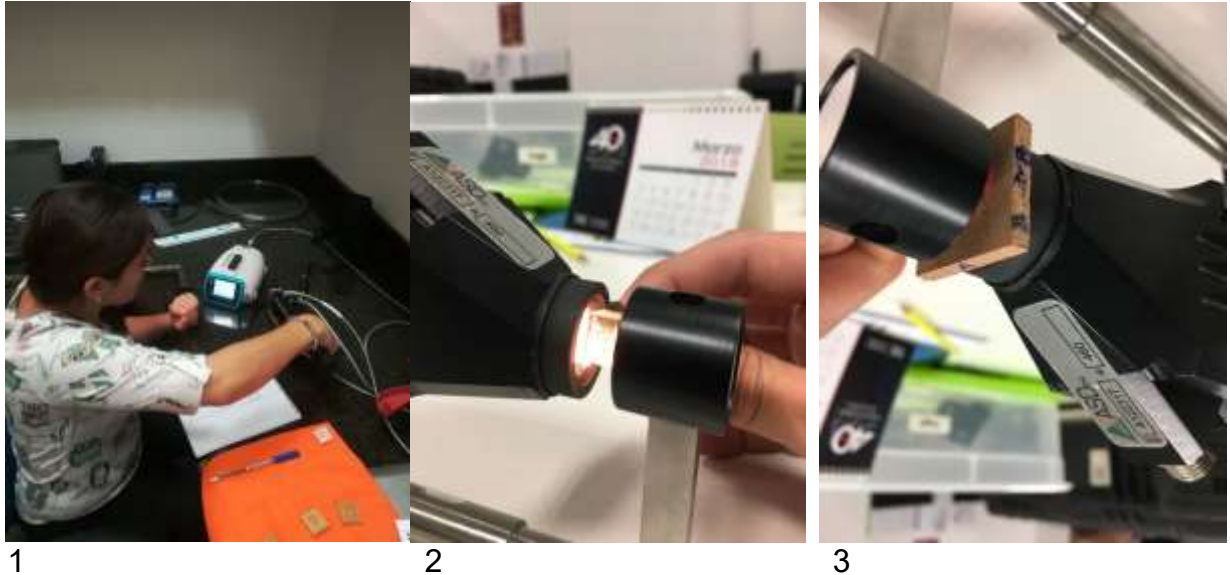


Figura 3. Proceso de adquisición de la firma espectral. (1) el instrumento, (2) dificultad con las probetas disponibles del trabajo de campo previo y (3) ajuste de nuevas muestras de madera a la cápsula de medición.

### **Medición de la concentración de elementos químicos de la madera**

Se formó una muestra compuesta a partir de al menos cinco secciones diferentes de madera en condición seca para una misma especie y considerando diferentes condiciones de edad, dimensiones y posición en el árbol. Estas muestras fueron pulverizadas en un molino disponible en los laboratorios del Centro de Innovación Forestal del TEC. La muestra compuesta fue enviada al laboratorio del CEQIATEC con el respaldo de sus análisis acreditados bajo la norma ISO/INTE-IEC 17025:2005, para la realización de un análisis químico y el análisis termogravimétrico. De cada muestra tamizada, se tomaron tres repeticiones de  $3 \pm 0,1$  g cada una. Estas fueron sometidas a un análisis elemental de metales y cenizas, donde se determinarán las cantidades y porcentajes de Silicio (mg/kg), Potasio (mg/kg), Hierro (mg/kg), Calcio (mg/kg), Magnesio (mg/kg), Manganeso (mg/kg) y Cenizas %.

### **Medición de las propiedades calóricas de la madera**

Las mediciones del análisis termogravimétrico (TGA) se llevaron a cabo utilizando 1 mg del aserrín de cada una de muestras tamizado entre 40 y 60 mesh, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min en una atmosfera de nitrógeno y llegando a una temperatura de 950°C en 17 minutos. Se realizó a partir del equipo SDT Q600. Para ello, se estableció un flujo de gas de 100.00 mL/min, posteriormente, se realizó una rampa de calentamiento de 15.00 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 800.00 °C. Se introdujo una atmosfera de nitrógeno mediante un flujo de 100.00 mL/min. Una vez introducido el gas se realizó una isoterma durante 5.00 min. Finalmente, se introdujo una atmósfera de oxígeno con un flujo de 100.00 mL/min. En dicho análisis se proporciona la temperatura y la pérdida de masa en las diferentes temperaturas (curvas TGA) en donde se puede establecer: (i) la temperatura de inicio de la descomposición ( $T_i$ ) y el porcentaje de masa remanente al punto de inicio de la descomposición ( $W_{ti}$ ), estos valores corresponden a la primera gradiente en la curva del análisis TGA. (ii) la temperatura de deflexión antes del punto de máxima descomposición ( $T_{sh}$ ) y a la masa remanente a este punto ( $W_{tsh}$ ), (iii) la temperatura correspondiente al punto de máxima descomposición ( $T_m$ ), y masa remanente a este punto ( $W_{tm}$ ) y (iv) el punto de temperatura y masa a consumir al final de la descomposición ( $T_f$  y  $W_{tf}$ ), corresponden al punto en que la pérdida de masa comienza a estabilizarse al aumentar la temperatura.

### **Contenido de Cenizas (C%)**

Las muestras fueron molidas para obtener un material granulado (menor a 2 mm) y se tamizaron en una malla 40-60 mesh. El material entre 40 y 60 mesh se secó a un contenido de humedad al 0 %, se colocó 1,5 g en crisoles de porcelana con tres repeticiones por muestra y se llevó a cabo el procedimiento que indica la norma ASTM D 1102-84 (ASTM, 2013 a). Este método describe la determinación de cenizas

expresado como un porcentaje de los residuos remanentes después de la oxidación seca entre (580 a 600°C), de la madera o sus subproductos.

### **Análisis estadístico de la información**

Los datos se analizarán con el programa Infostat y su conectividad con R, versión 2017. Mediante métodos estadísticos multivariados (componentes principales y correlación múltiple), se analizó el comportamiento de los índices en función de las especies y caras de la madera (transversal, tangencial y radial), a partir de los datos de las firmas espectrales de las muestras de madera. También se establecieron las relaciones de los índices con las variables termogravimétricas y químicas de las maderas de las especies. Para ello se utilizaron las técnicas de análisis de correlación y análisis de regresión. Las pruebas de hipótesis sobre el efecto de las especies y caras se realizaron con las técnicas de análisis de varianza para un modelo de efectos fijos con efectos principales en las especies y las caras de los cortes en la madera.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### OE 1. Firmas espectrales

Tal y como se tenía previsto, se logró recopilar la cantidad de 450 firmas para 30 especies arbóreas, con 5 muestras diferentes cada una y considerando las tres caras de la madera. Este resultado permite dar inicio con la biblioteca de firmas espectrales para maderas tropicales de Costa Rica. Las especies mostraron patrones en la firma espectral muy similares a los reportados en la literatura. En la Figura 4 se muestran los patrones de la firma espectral para 13 especies arbóreas de Brasil que fueron tomadas directamente de la zona del floema en árboles en pie, según el estudio de Handlich *et al.* (2018). Nótese el comportamiento de la curva de reflectancia, en cuanto a los valores en el espectro visible y la disminución de reflectancia en las bandas cercanas a 1500 y 1900 nm.

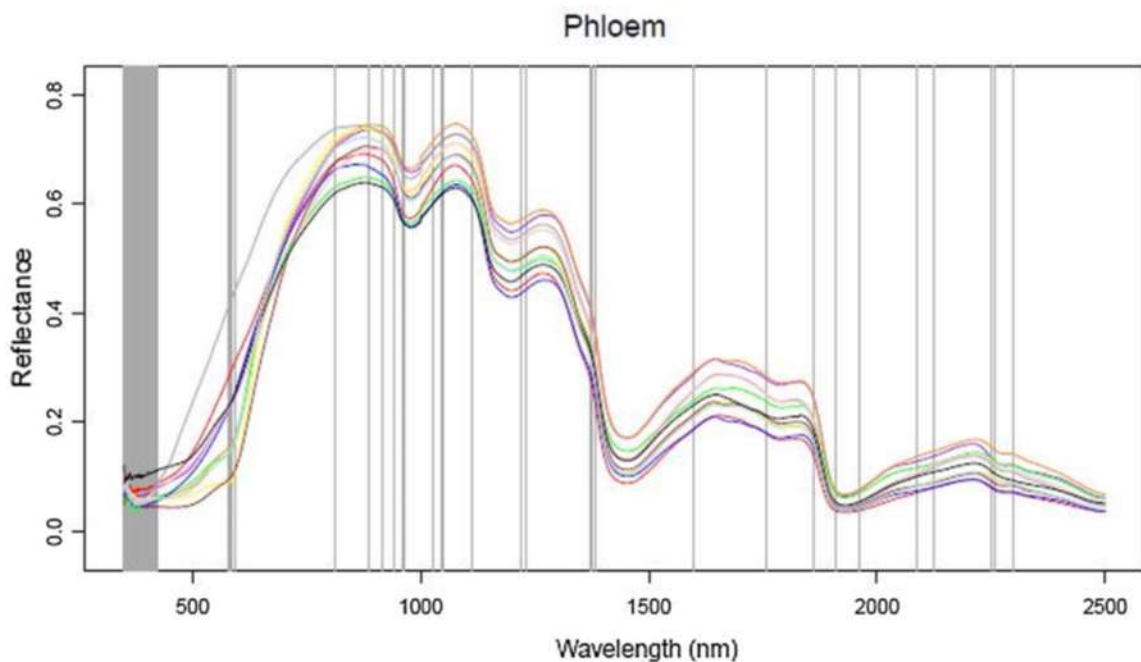


Figura 4. Patrones de reflectancia para 13 especies arbóreas de Brasil según el estudio de Handlich *et al.* (2018). *Forest Ecology and Management* 427 (2018) 296–304.

El instrumento utilizado en el presente estudio cubre el rango desde los 325 nm hasta los 1075 nm, por lo que resulta indispensable para darle continuidad a este estudio, la adquisición de un nuevo equipo que permita cubrir longitudes de onda hasta 2500 nm para cubrir los rangos de detección de actividad de la celulosa y lignina.

En el Cuadro 2 se detallan las especies y los resultados de la estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual considera los valores de R680 y R800, y que fue utilizado en este estudio como referencia para mostrar diferencias entre las especies y la correlación con otras variables de la madera.

Cuadro 2. Detalles de las especies estudiadas y sus valores de NDVI según el corte de la madera.

Número	Nombre común	Densidad de madera	Cara radial	Cara transversal	Cara tangencial
			<b>NDVI</b>		
1	Cedro amargo	0,68	0,15	0,13	0,15
2	Caobilla	0,67	0,14	0,13	0,16
3	Pilón	0,7	0,10	0,10	0,13
4	Melina	0,48	0,13	0,08	0,09
5	Níspero chicle	1,03	0,23	0,20	0,23
6	Corteza	1,07	0,32	0,26	0,25
7	Cristóbal	0,78	0,29	0,28	0,36
8	Gavilán	0,55	0,18	0,13	0,20
9	Roble sabana	0,56	0,13	0,11	0,13
10	Laurel	0,52	0,16	0,14	0,10
11	Cenízaro	0,64	0,19	0,15	0,12
12	Almendro	0,67	0,17	0,14	0,15
13	Ciprés	0,53	0,09	0,08	0,12
14	Manglillo	0,82	0,12	0,13	0,15
15	Cocobolo	1,2	0,17	0,26	0,16

16	Pochote	0,39	0,17	0,15	0,09
17	Tamarindo	0,97	0,21	0,22	0,19
18	Chanco blanco	0,37	0,12	0,07	0,10
19	Cativo	0,46	0,14	0,11	0,18
20	Jícara	0,72	0,27	0,28	0,27
21	Frijolillo	0,65	0,27	0,19	0,42
22	Teca	0,58	0,24	0,22	0,29
23	Canfin	0,5	0,12	0,13	0,17
24	Nazareno	1,03	0,18	0,12	0,17
25	Chilamate	0,43	0,09	0,08	0,08
26	Guanacaste	0,46	0,28	0,23	0,25
27	Caoba	0,6	0,19	0,16	0,16
28	Ron ron	0,7	0,11	0,10	0,20
29	Roble coral	0,54	0,09	0,08	0,11
30	Surá	0,87	0,10	0,14	0,16

Cuando se analiza la firma espectral para cada cara de la madera (entiéndase corte radial, transversal y tangencial), un primer resultado es que dependiendo del corte así se presentan diferencias en la respuesta a la reflectancia. Normalmente para la mayoría de las especies estudiadas (por ejemplo Jícara), los valores de reflectancia son ligeramente mayores en la cara transversal, con la particularidad que las curvas de la cara tangencial y radial muestran el mismo comportamiento. En algunas especies la reflectancia es mayor en el corte radial. De las 30 especies estudiadas solamente tres especies mostraron los mayores valores en la cara transversal (Jícara, Tamarindo y Cocobolo). En la mayoría de los casos, es en el corte tangencial es donde se observan las mayores diferencias con respecto a los otros dos cortes. En la Figura 5 se muestran algunas de estas diferencias.

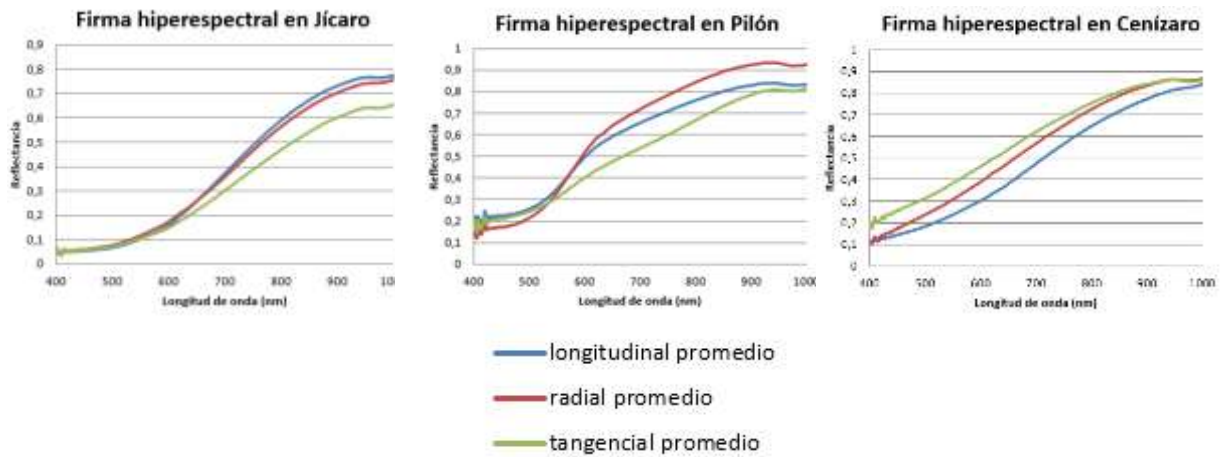


Figura 5. Curvas de reflectancia según el corte en la madera en tres especies

El análisis de correlación entre densidad de la madera y el índice NDVI no mostró ningún tipo de relación, por lo que se puede afirmar que los parámetros de la firma espectral de las especies no guarda relación con la densidad de la madera. Por limitaciones del equipo utilizado no fue posible cubrir el rango de longitud de onda hasta los 2500 nm, lo cual queda para un estudio posterior.

## OE 2. Propiedades químicas de la madera

En el laboratorio de CEQIATEC de la Escuela de Química del TEC se realizaron los análisis sobre composición química de las maderas estudiadas en el proyecto. En el Cuadro 2 se presentan los resultados de la composición química por especie para los elementos: potasio, hierro, calcio, magnesio, manganeso y porcentaje de cenizas. También se analizó el contenido de silicio, encontrando que solamente la especie Júcaro, mostró valores cercanos a  $120 \pm 20$  mg/kg; ya para el resto de las especies mostró valores menores a 10 mg/kg.



Cuadro 3. Resultados de la composición química de las maderas de las especies estudiadas.

Nombre	Potasio mg/kg	Hierro mg/kg	Calcio mg/kg	Magnesio mg/kg	Manganeso mg/kg	Cenizas %
Cedro amargo	155	20	295	96	2,7	0,24
Caobilla	1210	14	8623	52	2	3
Pilón	747	23	5264	41	2,1	1,7
Melina	113	5	1959	154	2	0,35
Nispero chicle	760	37	3208	461	2	1,22
Corteza	1028	16	7130	771	2	1,77
Cristóbal	723	537	330	419	91	1,25
Gavilán	279	8	562	79	5	0,31
Roble sabana	284	5	1322	318	2	0,69
Laurel	531	65	448	437	21	0,6
Cenízaro	444	117	607	250	7	2,6
Almendro	206	17	405	39	2	0,21
Ciprés	449	25	985	228	2	0,42
Manglillo	592	21	8091	281	2	2,6
Cocobolo	231	16	668	109	36,2	0,22
Pochote	496	45	2437	204	5,2	0,78
Tamarindo	187	32	2740	183	4	0,66
Chanco blanco	1572	35	562	1048	397	2,2
Cativo	242	27	4174	87	2	0,48
Jícara	575	18	2462	392	22	1,5
Frijolillo	341	11	6428	121	2	1,12
Teca	700	18	6691	575	2	1,79
Canfín	337	15	845	125	2	0,39
Nazareno	492	9	683	325	4,7	0,52
Chilamate	950	27	1918	51	2	1,21
Guanacaste	3503	21	9289	1319	2	4,3
Caoba	487	5	937	512	2	1,82
Ron ron	181	12	268	38,08	2,1	0,22
Roble coral	537	24	837	275	61	0,54
Surá	389	31	5089	100	2	1,23

Se encontraron algunas diferencias muy significativas en las concentraciones de elementos químicos entre las especies estudiadas. Las especies Caobilla, Corteza, Chanco blanco y Guanacaste presentaron las concentraciones más altas en potasio con valores tan altos como 3503 mg/kg en Guanacaste, que significa 30 veces más concentración en comparación con Melina que presenta tan solo 113 mg/kg. Valores altos en hierro en la madera se presenta en las especies Caobilla, Corteza, Manglillo, Teca y Guanacaste con valores tan altos como 8623 mg/kg obtenidos en Caobilla que representa 32 veces más concentración que el Ron ron. El calcio en la madera presenta también valores altos y diferenciados entre especies, siendo el Guanacaste, la especie con las concentraciones más elevadas alcanzando hasta 9289 mg/kg, que significa casi 35 veces la concentración de calcio en Ron ron. Dos especies mostraron las mayores concentraciones de magnesio (Chanco blanco y Guanacaste con 1048 y 1319 mg/kg, respectivamente). La mayor concentración de manganeso la obtuvo la especie Chanco blanco con 397. La especie con la mayor concentración de ceniza es Guanacaste con 4,3% y coincidentemente es la especie con las concentraciones más altas en potasio, calcio y magnesio; le siguen Chanco blanco y Corteza.

Se realizaron diversos análisis estadísticos que consideraron matrices de coeficientes de correlación, componentes principales y gráficos de dispersión y no se encontraron correlaciones significativas entre el índice utilizado (NVDI) y las concentraciones químicas de elementos en la madera, tampoco con la concentración de cenizas.

También se utilizó la reflectancia a 550 y 950 nm y la relación 950/550 en cada uno de los cortes de la madera para realizar el análisis de correlación con características químicas de la madera. No se encontraron relaciones significativas entre los valores de reflectancia y característica de la madera, lo cual sugiere que para las longitudes de onda utilizadas no se logra identificar actividad de los elementos químicos que componen la madera. Tampoco se logró determinar en la curva de reflectancia

alguna actividad (pico en la curva) relacionada con altas concentraciones de calcio, potasio, magnesio, manganeso, hierro, potasio o relación con alto contenido de cenizas. Estos resultados sugieren que la agrupación de estos elementos en la madera y la matriz de lignina, celulosa y hemicelulosa, no permiten relación la firma espectral con concentración de elementos.

También se utilizaron los valores de referencia de longitud de onda utilizados para la determinación en laboratorio de las concentraciones de elementos. En el Cuadro 4 se muestran los valores de referencia para los principales elementos que constituyen las plantas, citados por Fernández *et al.* (2010).

#### Cuadro 4. Condiciones instrumentales para la medición de elementos minerales

Tomado de Fernández *et al.* (2010). Determination of mineral elements in fresh olive fruits by flame atomic spectrometry. Spanish Journal of Agricultural Research 2010 8(4), 1183-1190

Element	Wavelength (nm)	Band-pass (nm)	Lamp current (mA)	Optimum working range (mg kg <sup>-1</sup> )	Instrument mode
K	766.5	2.0	8	2.0-300.0	Emission
Na	589.0	0.7	8	2.0-50.0	Emission
Ca	422.7	0.7	6	1.0-10.0	Absorbance
Mg	285.2	0.7	4	0.5-3.0	Absorbance
Zn	213.9	0.7	10	0.2-10.0	Absorbance
Cu	324.8	0.7	10	0.1-10.0	Absorbance
Fe	248.3	0.2	30	1.0-40.0	Absorbance
Mn	279.5	0.2	20	0.1-10.0	Absorbance

Flame type: air/acetylene. Gas flow: 3.0/0.7 kg cm<sup>-2</sup>.

Para el caso del Potasio, Calcio, Hierro Magnesio y Manganeso se tomaron los valores de longitud de onda que se utilizan en el espectrómetro de absorción atómica (Cuadro 4) y se relacionaron con los valores de las mismas longitudes de onda según el espectroradiómetro para cada especie y cada tipo de corte en la madera. En análisis no permitió establecer una relación directa entre ambas lecturas. Dos

factores a considerar, por un lado una amplia variación en los valores de concentración de elementos (por ejemplo valores de Calcio en Caobilla de  $8623 \pm 630$  en contraste con valores de  $268 \pm 8$  en Ron ron; y por otra parte la matriz de lignina, celulosa y hemicelulosa en la madera.

### OE 3. Análisis termogravimétrico y las correlaciones con valores de reflectancia

Las muestras de maderas también fueron enviadas al laboratorio para un análisis completo de termogravimetría mediante el uso del equipo SDT Q600. En la mayoría de las muestras, fue posible identificar tres zonas donde se obtuvo una pérdida de masa considerable.

En la figura 6 se muestran los resultados de la pérdida de masa en función de la temperatura.

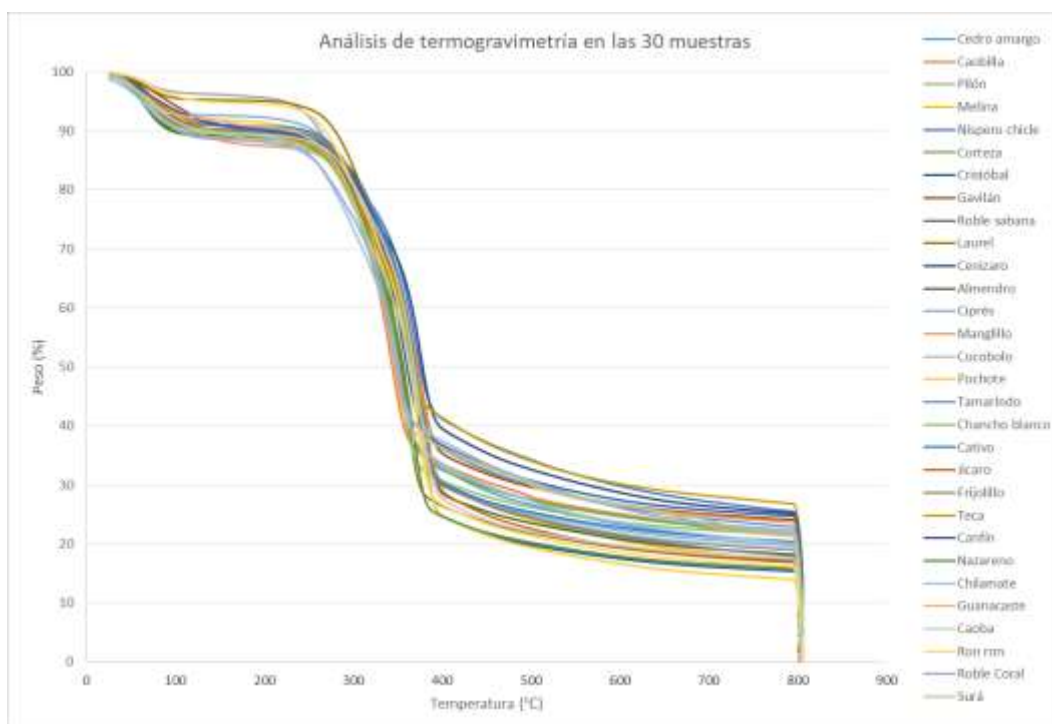


Figura 6. Curvas de pérdida de masa en función de la temperatura para 30 maderas de Costa Rica.

En relación con los diferentes parámetros obtenidos de TGA se tiene que al inicio de la descomposición, la temperatura inicial varió de 50°C a 100°C con una pérdida de masa porcentual del 95% al 90% (una diferencia de 5%). Esta primera pérdida de masa es asociada a la humedad presente en todas las muestras, es decir, a la posibilidad de absorber agua. En esta etapa Pilon es la especie de mayor Ti, seguida de un grupo de especies formado por Ron ron y Laurel, y finalmente un grupo compuesto por Surá y Roble coral con los valores más bajos de Ti. En el rango de temperaturas entre 100 y 240°C la pérdida de masa se mantiene relativamente constante para la mayoría de las especies.

La segunda pérdida de masa identificada, considerada como la etapa intermedia entre el punto de inicio y de máxima descomposición, corresponde a la presencia de un compuesto mezclado por celulosa y hemicelulosa (Holocelulosa) Esta segunda pérdida, cerca de 280 °C, no fue visible en todas las muestras dado que, algunos procesos de degradación son más complejos, donde se ven involucrados otros compuestos cuya degradación tiene lugar en medio de la hemicelulosa y la celulosa (Sebio-Puñal, Naya, López-Beceiro, Tarrío-Saavedra, & Artiaga, 2012). Esta segunda pérdida, genera en todas las especies una pendiente negativa que cambia hasta los 400 °C con pérdida de masa del 85 al 40%. Los valores de pérdida de masa son muy constantes entre las especies.

A partir de los 380 °C es donde se presenta la mayor cantidad de diferencias entre las especies. Las especies Teca y Níspero son las que registraron la menor pérdida de masa (41%) a esta temperatura, en comparación con las especies Pochote, Ron ron y Nazareno con valores cercanos al 25%.

Una tercera zona donde se reflejó una pérdida de masa fue a partir de los 380 °C. Esta pérdida es asociada a la celulosa y aparte de las diferencias entre especies, se observa que la pérdida de masa se mantiene constante entre especies (13-15% de pérdida de masa).

Finalmente, cercano a los 800 °C todas las especies registraron la pérdida de masa hasta llegar al 0%.

Estos puntos fueron utilizados para establecer correlaciones con diferentes valores de reflectancia por especie y tipo de corte, especialmente el valor de pérdida de masa a los 400 °C. No se encontraron relaciones entre los valores del análisis termogravimétrico y los valores de reflectancia de la madera.

#### **OE 4. Uso de la firma espectral para la identificación de las maderas con técnicas matemáticas**

Con la base de datos obtenida se realizó un experimento para ver el potencial que ofrece la firma espectral en las maderas para la identificación automática.

En la Figura 7, se muestran las firmas de tres especies muy contrastantes por su color de la madera.

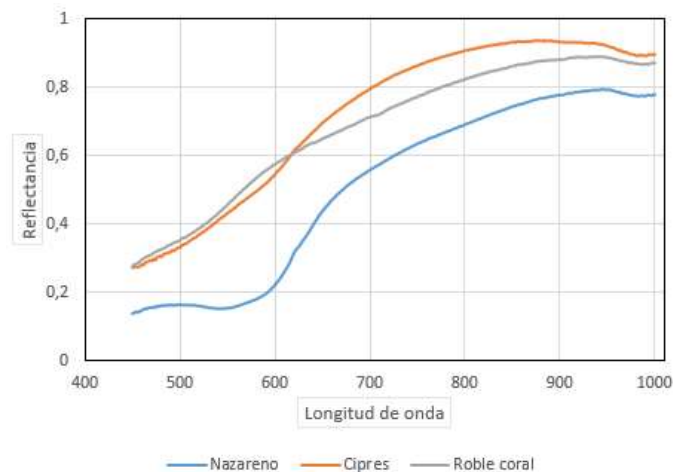


Figura 7. Firmas espectrales de tres especies de maderas

El Ciprés es una madera clara con tono amarillento y por consiguiente muestra los valores de reflectancia mayores en el espectro visible. El Roble Coral es una madera

oscura de color marrón. Por su parte el Nazareno es una madera única ya que su tonalidad es purpurea que lo hace diferente y fácilmente reconocible

Analizando las firmas de las 30 especies, primero se revisaron todas las posibilidades de un análisis y se escogió un manejo de los datos como series de tiempo por lo que el problema de identificación de especies se transforma en un reto de clasificación de series de tiempo (TSC), como el set de datos es relativamente pequeño en cantidad de series por especie (10 series) se usó un enfoque más clásico basado en el clasificador k-nearest neighbors (knn) con la métrica dynamic time warping (dtw). Con más especies y más muestras por especie sería interesante usar un enfoque Deep learning con modelos como RNN o LSTM, para los alcances de este estudio no fue posible. Viendo los resultados todo indica que las firmas tienen potencial para realizar identificación automática de maderas. En la Figura 34 se adjunta una imagen que muestra la matriz de confusión para 14 especies (también se graficó una para las 30 especies pero no logra apreciar bien, pues son muchos datos). De la Figura 4 se observa que una buena predicción se refleja en la diagonal que tiene que tener los valores más grandes. Las especies se identifican con números del 0 al 14. True label corresponde a la verdadera especie y Predicted label a la especie que predijo el algoritmo. Por ejemplo, para la especie 6 (Cenízaro) se probó con 5 series (suma de la fila), el algoritmo acertó en 2, fallo 3, una la clasificó como especie 1 (Canfín), otra como especie 3 (Caobilla) y la otra como especie 12 (Cristóbal). También te adjunto un archivo con la matriz de confusión para las 30 especies.

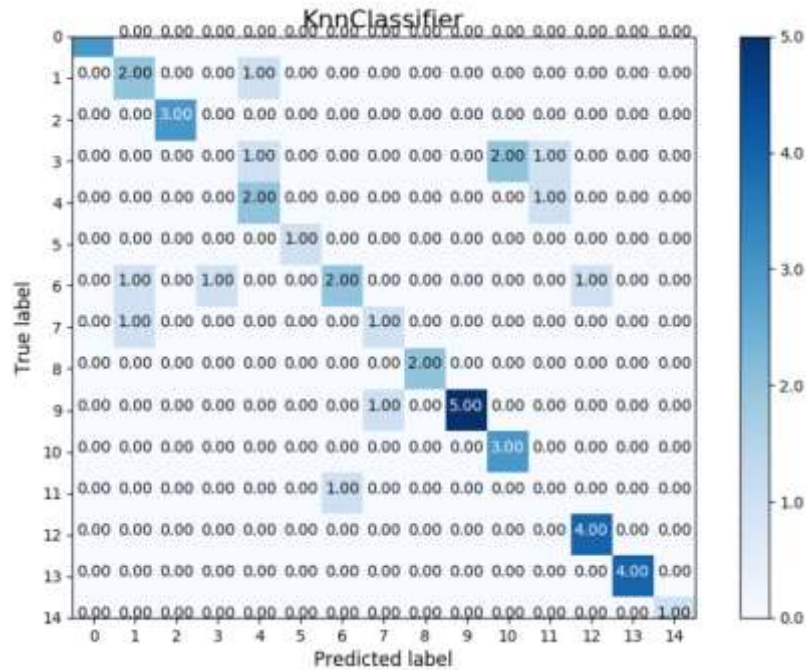


Figura 8. Matriz de confusión para 14 especies basada en las firmas espectrales analizadas como series de tiempo.

**OE 5. Caracterización de la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier procedente de árboles de bosque natural mediante los patrones hiperspectrales y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos.**

Para el cumplimiento de este objetivo, se realizó un estudio específico y detallado para la especie Nazareno.

Los resultados se presentan en formato de artículo científico.



# Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos para la caracterización de la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier

## Resumen

Se utilizaron patrones hiperspectrales y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos para la caracterización de la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier procedente de árboles de bosque natural. Se tomó una muestra de 24 discos de madera de *P. purpurea* y se caracterizaron anatómicamente (densidad y diámetro de vasos, porcentaje de vasos solitario), densidad madera, color (CIELab) y reflectancia hiperspectral en el rango de 310 a 1100 nm; en la madera seca, tanto en la sección de la albura como duramen. Se encontraron diferencias significativas a nivel anatómico entre albura y duramen; encontrando una presencia mayor de vasos solitarios en albura (34,28%) pero con una densidad vasos de 7,07 poros/mm<sup>2</sup> y diámetro de 148,53 µm. En el análisis de la colorimetría, la luminosidad y b\* (amarillamiento) fue mayor en albura, pero con valores significativamente menores en a\* (rojosidad), generando con ello que la diferencia del color sea total (superior a 14,55). En cuanto la reflectancia se encontraron tres puntos de diferenciación significativa entre ambas secciones que fueron a los 460, 580 y 1020 nm; al correlacionar estos tres segmentos, no se encontró correlación alguna con los aspectos anatómicos, pero sí con la densidad de la madera (superiores a 0,69), a nivel de color no se encontraron relaciones con el parámetro de color L\*, mientras que a\* solo mostró correlaciones inversas a los 580 nm y lineales con b\* a 580 nm. En este estudio no se encontró relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

*Palabras claves:* madera tropical, reflectancia, anatomía de la madera, CIELab.

## Introducción

La madera es un material orgánico, producto de procesos fisiológicos de crecimiento de los árboles que posibilita la fijación de carbono en compuestos orgánicos como celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otros [1,2]; es un material que se ha implementado a lo largo de la historia de la humanidad para desarrollo de estructuras habitacionales, herramientas y fuente de energía [3,4]. En la actualidad, la demanda mundial de madera continúa en crecimiento debido a su adaptabilidad a condiciones ambientales [5], bajo requerimiento energético para la transformación del material [6], atractivo estético que varía según la especie [1,7] y bio sostenibilidad lo que simplifica el manejo de los residuos en comparación a otras materias primas [6,7,8]. La región tropical presenta una amplia variedad de especies maderables lo cual infiere que la oferta de maderas sea amplia [9]. Costa Rica cuenta con más de 2000 especies arbóreas identificadas [10], pero con caracterizaciones de la madera limitadas en un reducido número de especies en su conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas [11].

La diversidad de especies maderables en las regiones tropicales, implica que el mercado de venta sea amplio [12], incidiendo que en muchos casos se comercialice una especie simulando ser otra especie, lo cual incide en ventas erróneas de especies, se mezclen las especies por características visuales similares o los precios de venta se sobre o sub estimen [13]. Existe una necesidad de implementar sistemas de identificación de especies que permitan la comercialización justa de madera [14]; tradicionalmente, se implementan características físicas para la identificación de especies [15], aspectos como el color, olor, sabor, textura, tipo de nudo, reventaduras o dureza son implementados para diferenciar las maderas [16]; sin embargo, hay especies que por su alta similitud o por procedencia muestran aspectos muy similares, siendo necesario el análisis macro o microscópico para la diferenciación a partir de elementos anatómicos como el tipo de vaso, densidad de vasos, tipo y características del parénquima, características de las fibras [17]; este procedimiento tradicional, es un sistema lento, que requiere de especialistas, cada

vez menos expertos y que en algunos casos requiere consulta de xilotecas especializadas [18].

Ante tal situación en la última década, se ha iniciado el desarrollo de metodologías alternativas de tipo no destructivas, que sean de rápida evaluación y alto nivel de precisión [19, 20]. Se han implementado metodologías y tecnologías variadas como sensores de olor [21], sistemas de identificación a partir de Deep Learning en aplicaciones portables [22, 23] e identificación de patrones hiperespectrales [24, 25]. Sobre esta última técnica, la hiperespectroscopia consiste en la recopilación y procesamiento de información a lo largo de todo el espectro electromagnético [26]. Su implementación ha sido ampliada a varias temáticas científicas [27], por ejemplo, en el uso en sensores remotos para la identificación de coberturas [28], calidad de alimentos [29], microbiología [30] y ciencias farmacológicas [31]. Además de la identificación de variedades y grados de nutrición en especies agrícolas con fines productivos [32].

En el área de las ciencias naturales, la hiperespectrometría específicamente la reflectancia se ha implementado en los últimos años en varias temáticas entre las que destacan: indicador de grado nutrición [33], diferenciador de efectos condiciones adversas del suelo [34], diferenciador de plantas con presencia de patógenos [35], diferenciador de especies [36]. En todos estos ámbitos se ha trabajado a nivel de hoja, debido a la simplicidad y comprensión en la estimación de dichas variables a partir de la reflectancia, absorbancia, transmitancia y fluorescencia de la hoja, aspectos que afectan directamente la capacidad fotosintética de una planta [33] y que han permitido relacionarlos con variables como color de lámina foliar, contenido de humedad foliar, densidad de nervaduras y tasa de crecimiento [26]. Se ha encontrado que las especies tropicales, tienden a formar puntos de reflectancia específicos dentro del espectro que son únicos y que permiten la utilización de firmas hiperespectrales; en las últimas décadas se ha iniciado la creación de colecciones de firmas para especies arbustivas y arbóreas, encontrando que esta característica puede ser única en cada especie a nivel foliar [12, 23, 24, 30, 33].

Sin embargo, con muestras de maderas, los estudios que se han desarrollado con hiperspectroscopia han sido limitados. Estudios desarrollados por Breen et al. [34] han demostrado relaciones entre la reflectancia entre los 300 y 450 nm con la densidad de la madera en cinco especies arbóreas de clima templado, encontrando diferenciaciones significativas entre especies, pero con homogeneidad de comportamiento dentro de cada especie. Por su parte Laath et al. [35] encontró para diez especies del género *Eucalyptus* sp. que no hay diferencias colorimétricas entre las especies, pero sí con las respectivas firmas hiperspectrales entre los 550 y 710 nm, encontrando puntos de reflectancia únicos para cada especie. Por su parte Colares et al. [36] con la especie *Swetenia macrophylla*, encontró que se pueden dar diferenciaciones en lignina, celulosa y hemicelulosa a nivel macroscópico a partir de los datos del espectro visible y el infrarrojo cercano, permitiendo conocer de forma no destructiva propiedades químicas de la madera. Finalmente Han et al. [37] determinó para cinco especies del género *Pinus* sp. correlaciones entre la reflectancia hiperspectral entre 800 y 1000 nm con la densidad y aspectos anatómicos de la madera, indicando que es una variable no destructiva para proyectar características físicas del material. Considerando esta base científica, el presente estudio tuvo como objetivo identificar patrones hiperspectrales y colorimétricos en función de aspectos anatómicos y físicos para la caracterización de la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier procedente de planes de manejo forestal sostenible en el sur de Costa Rica.

## **Materiales y métodos**

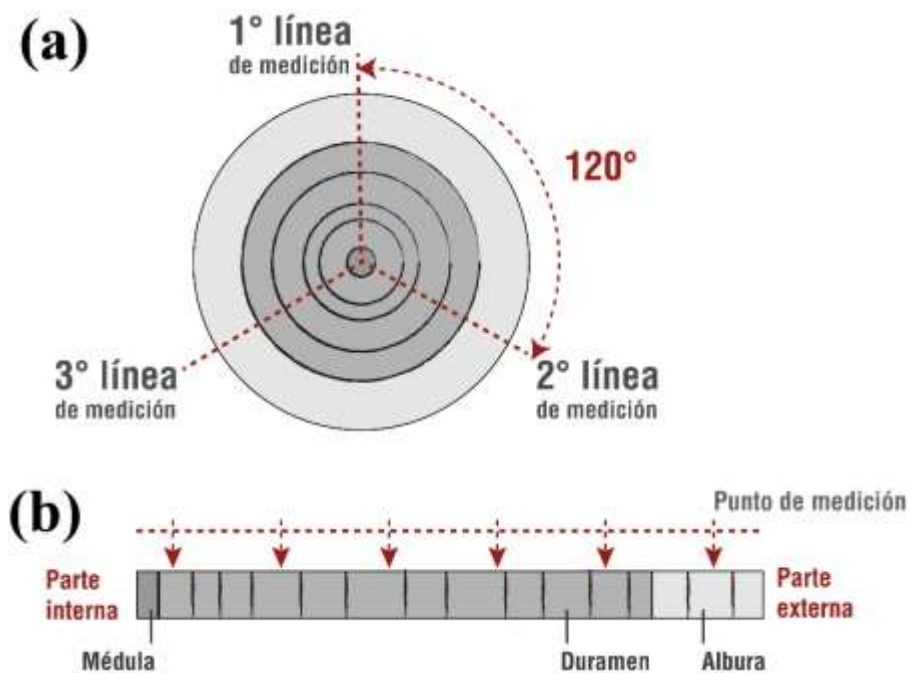
### *Especie en estudio*

Se colectaron y prepararon 24 segmentos de fuste (secciones transversales), de seis árboles de *Peltogyne purpurea* Pittier (cuatro muestras por árbol distanciados a 4,5 m aproximadamente). Las muestras se caracterizaron por provenir de árboles con un diámetro entre 45 a 65 cm y cada muestra con un grosor de 50 mm, con un contenido de humedad inferior al 20% y una clara presencia visual de albura y

duramen. El material se obtuvo a partir de un plan de manejo forestal sostenible de bosque natural en una finca privada ubicada en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica ( $8^{\circ}53'38''\text{N}$   $83^{\circ}30'51''\text{O}$ ); el sitio se caracterizó por tener una altitud de 350 m, con una temperatura media anual de  $32^{\circ}\text{C}$  y precipitación anual de 4500 mm, la topografía del terreno se caracterizó por ser moderadamente ondulada, con pendientes hasta de  $35^{\circ}$  y suelos arcillosos. Los árboles seleccionados se caracterizaron por tener un diámetro medido 1,3 m sobre nivel de suelo, superior a 45 cm.

#### *Procedimiento de medición de variables*

En cada segmento de fuste se evaluó su contenido de humedad con el fin que fuera uniforme y evitara ser una fuente de variación (contenido de humedad final se trabajó entre el 12 al 15%). A cada muestra se le seleccionó la cara más uniforme, que presentara la menor cantidad de defectos naturales (nudos, rajaduras, curvaturas, picaduras de insectos, entre otros) y mínimo deterioro por el proceso de aprovechamiento (marcas de corte, golpes, entre otros). En la cara seleccionada se determinaron tres radios desde el eje central de la muestra (figura 9), cada radio se distanció a  $120^{\circ}$  y se midió desde el inicio de la corteza al centro de la pieza. En cada sesión transversal se midió la longitud de la albura (que para esta especie muestra una coloración amarillo claro), duramen (de una coloración morado oscuro) y la médula (una coloración generalmente morado oscuro).



**Figura 9.** Detalle del proceso de ubicación de puntos de muestreo de los segmentos de fuste de *Peltogyne purpurea*.

En cada línea de medición se colocaron seis puntos de control, en los que se realizaron todas las pruebas del estudio. En cada punto de medición se limpió un área de 1 cm<sup>2</sup>, en la cual se eliminó todo defecto de la madera con un bisturí. Los puntos de medición se distanciaron proporcionalmente y se evitaron colocar en el punto de transición albura-duramen. Tanto el primer como el último punto de medición se distanciaron a 30 mm del borde y médula de la muestra respectivamente.

### *Evaluación hiperespectral*

La evaluación hiperespectral, específicamente de la reflectancia se desarrolló con un espectro radiómetro portable de PP System, tipo UniSpec SC. Se trabajó con un rango de 310 a 1100 nm (espectro visible e infrarrojo cercano), con un intervalo de medición de 10 nm y tiempo de medición programado de 4 ms. El sensor implementado contó con una certificación Estándar “SMA 905 conectores”, acorde

para este tipo de instrumentación, con un área efectiva de 3 mm<sup>2</sup>. El sensor se colocó perpendicular a la superficie mediante un compartimento cerrado con fin evitar sesgos de medición por luz externa. Todas mediciones se desarrollaron en un sitio con una luminosidad homogénea de 600 lux.

### *Evaluación colorimétrica*

El color se evaluó con un espectrofotómetro NIX Pro de cromatografía CIE estandarizado. Analizando la colorimetría entre el rango de los 400 a 700 nm con un punto de medición de 10 mm de diámetro. Para la observación de la reflexión del componente especular (SCI modo) se ajustó a un ángulo de 10, que es normal para la superficie de materiales orgánicos (D65 / 10); y con un D65 (correspondiente a la luz del día en 6500 K). El color se evaluó en formato CIELAB, el cual generó tres parámetros para explicar el color, que consistieron en: L\* (luminosidad, con una escala de 0 a 100, donde 0 es negro y 100 es blanco), a\* (tendencia de color de rojo a verde, con escala infinita, conforme el valor sea más positivo tiende a rojo y más negativo a verde) y b\* (tendencia de color de amarillo a azul, con una escala infinita, conforme el valor tienda a positivo será amarillo y negativo a azul).

A partir de los valores obtenidos, tanto de albura como de duramen, se compararon entre sí mediante el diferencial de color ( $\Delta E^*$ ) se definió como la variación neta del color entre dos escenarios, según lo establecido por la norma ASTM D 2244 (2013) cuya fórmula es detallada en la ecuación 1. El  $\Delta E^*$  se implementó para encontrar diferencias el color entre las fotografías y muestras físicas y con ello identificar el grado de representatividad del color utilizando las categorías de (Cui, Kamdem y Rypstra, 2004), que establece cinco niveles de cambio de color percibido por el ojo humano: si  $0 < \Delta E^* < 1,5$ , el cambio del color no es percibido por el ojo humano; si  $1,5 < \Delta E^* < 3,0$ , el cambio de color apenas se percibe; si  $3,0 < \Delta E^* < 6,0$ , se percibe el cambio; si  $6,0 < \Delta E^* < 12,0$ , el cambio de color es bastante notable por el ojo humano y finalmente si  $\Delta E^*$  es mayor que 12, hay un cambio total de color.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde:  $\Delta E^*$  es el diferencial del color;  $\Delta L^*$  es  $L^*$  del protocolo de fotografía analizado -  $L^*$  muestra física;  $\Delta a^*$  es  $a^*$  del protocolo de fotografía analizado -  $a^*$  muestra física;  $\Delta b^*$  es  $b^*$  del protocolo de fotografía analizado -  $b^*$  muestra física.

### *Caracterización anatómica y densidad*

Anatómicamente se determinó la densidad y diámetro de vasos presentes en cada punto de medición con un área de análisis de 1 cm<sup>2</sup>. La imagen para el análisis se obtuvo mediante un microscopio de conexión electrónica marca Celestron, en modo color y con una resolución de 5 MP, las fotografías se tomaron con un aumento de 40 X, posteriormente se procesaron con el programa de Image J, según el procedimiento de Valverde et al. [38].

Con respecto a la densidad de la madera, de varias secciones transversales se sacaron muestras cúbicas de 1 cm de cara, a las cuales se les aplicó el método de Arquímedes para determinación de la densidad, dividiendo la masa entre el volumen (se usó agua como fluido asumiendo una densidad de 1 g/cm<sup>3</sup>). Para su estimación, las muestras previamente se secaron a un contenido de humedad homogéneo del 12%

### *Análisis estadístico*

Primeramente, se realizó un análisis descriptivo de las características anatómicas, colorimétricas y densidad; para determinar si se dieron diferencias significativas de las propiedades entre albura y duramen, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANDEVA) (previamente se realizó el análisis de supuestos de normalidad de los residuos y homocedasticidad de las varianzas). En aquellos casos de presentar diferencias significativas en los resultados, se aplicó la prueba de Tukey para la comparación de las medias.



En caso de la reflectancia, se generó la curva de reflectancia promedio y se desarrolló un ANDEVA comparativo entre los diferentes puntos con el fin encontrar valores de diferenciación significativa, posteriormente se le aplicó la segunda derivada a la curva según la metodología de Hu et al. [38], con el fin eliminar el ruido de aspectos químicos y físicos no considerados en el estudio y que pudieran generar error en la medición, seguidamente los puntos de la longitud identificados se les aplicó nuevamente un análisis de ANDEVA para validar la reflectancia. Los puntos mostraron diferenciación en ambos análisis y se les aplicó un análisis de componentes principales con el fin de cuantificar el grado de variación existente entre albura y duramen.

Finalmente, los puntos de reflectancia con significancia se correlacionaron con las variables físicas y anatómicas mediante un análisis de correlación de Pearson. Los análisis estadísticos se realizaron con los programas STATISTICA versión 3,1 (Statsoft, 2015), con un nivel de significancia de 0,05.

## **Resultados**

### *Caracterización física y anatómica de la especie*

Se determinó que la madera de *P. purpurea* presenta variaciones significativas de la densidad y características anatómicas diferenciadas entre la albura y el duramen; encontrando que la densidad promedio en la albura es de 0,62 g/cm<sup>3</sup>, siendo significativamente menor a la obtenida en el duramen de 0,78 g/cm<sup>3</sup> (que no mostró variaciones significativas a lo largo del duramen); de igual manera se encontraron variaciones significativas a nivel anatómico, con una presencia mayor de vasos solitarios en la albura (34,28%), con respecto al duramen (27,32%), y con una densidad de 7,07 poros/mm<sup>2</sup> y diámetro promedio de 148,53 µm.

**Cuadro 5.** Densidad y caracterización de la albura y del duramen de madera seca de *P. purpurea* procedente de bosque natural.

Parámetro	Segmento/punto medición					
	Albura		Duramen			
	1	1	2	3	4	5
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,62 <sup>a</sup> (0,04)	0,78 <sup>b</sup> (0,04)	0,74 <sup>b</sup> (0,03)	0,80 <sup>b</sup> (0,04)	0,79 <sup>b</sup> (0,03)	0,79 <sup>b</sup> (0,04)
Porcentaje de vasos solitarios (%)	34,28 <sup>a</sup> (3,09)	27,33 <sup>b</sup> (2,10)	26,20 <sup>b</sup> (2,67)	28,01 <sup>b</sup> (2,44)	27,89 <sup>b</sup> (3,20)	28,00 <sup>b</sup> (2,33)
Densidad de vasos (poros/mm <sup>2</sup> )	6,1 <sup>a</sup> (0,9)	7,1 <sup>b</sup> (0,6)	7,0 <sup>b</sup> (0,6)	7,1 <sup>b</sup> (0,7)	7,0 <sup>b</sup> (0,8)	7,1 <sup>b</sup> (0,8)
Diámetro promedio vasos (µm)	130,02 <sup>a</sup> (10,11)	149,90 <sup>b</sup> (20,20)	148,54 <sup>b</sup> (18,88)	150,05 <sup>b</sup> (10,55)	149,11 <sup>b</sup> (20,20)	149,50 <sup>b</sup> (16,91)

Nota: letras diferentes muestran diferencias significativas al 0,05

#### *Variación colorimétrica*

A nivel colorimétrico (cuadro 5), se encontraron variaciones significativas entre albura y duramen en el parámetro L\* (luminosidad) y b\* (tendencia amarillo-azul), encontrando que la luminosidad de la albura (56,80), es significativamente mayor al duramen (promedio 42,07), caso similar se presentó con a\*, en que el duramen presentó una coloración rojiza elevada (29,40), en comparación a duramen que presentó una tendencia neutra (1,20). En cambio, con el parámetro b\* se encontraron diferencias considerables, la albura mostró una tendencia amarillenta (32,81), en comparación a duramen que en promedio presentó un valor de 1,08 considerado como neutro.

Con respecto al  $\Delta E^*$ , la diferencia entre las mediciones de duramen fue de 0,09; considerado como un cambio no percibido por el ojo humano, mientras la diferenciación entre albura y duramen fue superior a 14,55 y se clasificó como un

cambio total de color, en este caso totalmente perceptible por el ojo humano. Siendo una variable de simple diferenciación a la vista.

**Cuadro 6.** Caracterización colorimétrica y diferencial del color de la albura y duramen de madera seca de *P. purpurea* procedente de bosque natural.

Variable de color	Segmento/punto medición					
	Albura	Duramen				
	1	1	2	3	4	5
L*	56,80 <sup>a</sup> (6,15)	40,54 <sup>b</sup> (5,87)	42,15 <sup>b</sup> (6,00)	44,50 <sup>b</sup> (7,22)	41,71 <sup>b</sup> (5,15)	41,44 <sup>b</sup> (5,89)
a*	1,20 <sup>a</sup> (3,89)	29,12 <sup>b</sup> (2,11)	30,01 <sup>b</sup> (2,01)	29,77 <sup>b</sup> (1,95)	29,91 <sup>b</sup> (2,17)	28,20 <sup>b</sup> (1,55)
b*	1,81 <sup>a</sup> (2,24)	1,06 <sup>b</sup> (0,41)	0,99 <sup>b</sup> (0,88)	1,29 <sup>b</sup> (0,22)	1,60 <sup>b</sup> (0,31)	1,16 <sup>b</sup> (0,28)
$\Delta E^*$ (1)	-	14,55 <sup>a</sup> (2,16)	15,15 <sup>b</sup> (2,99)	16,00 <sup>b</sup> (2,11)	15,47 <sup>b</sup> (2,72)	16,15 <sup>b</sup> (3,02)

Nota: letras diferentes muestran diferencias significativas al 0,05

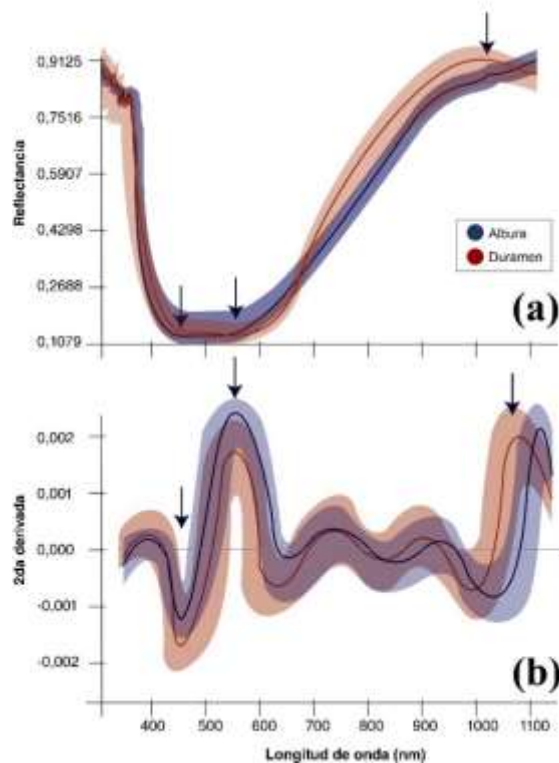
(1) Datos del  $\Delta E^*$  se estimaron entre la albura con respecto a cada valor de duramen de las muestras

#### *Comportamiento de reflectancia de la madera*

Con la reflectancia (figura 10a), se determinó que entre los valores de 310 y 450 nm no se obtuvieron diferencias en la reflectancia de albura y duramen, encontrado entre los 310 y 400 nm, una oscilación de reflectancia de 0,80 a 0,92. Posterior de los 400 nm, la reflectancia mostró patrones uniformes, con un decrecimiento hasta los 450 nm de 0,212. Es a partir de los 460 nm en los que ambos segmentos de madera mostraron diferenciaciones, siendo significativamente mayor en albura que en duramen; comportamiento que se mantuvo constante hasta los 580 nm, en los que se determinó una reflectancia mayor en albura (0,234) con respecto a duramen (0,178). Seguidamente la reflectancia tendió a aumentar hasta los 900 nm,

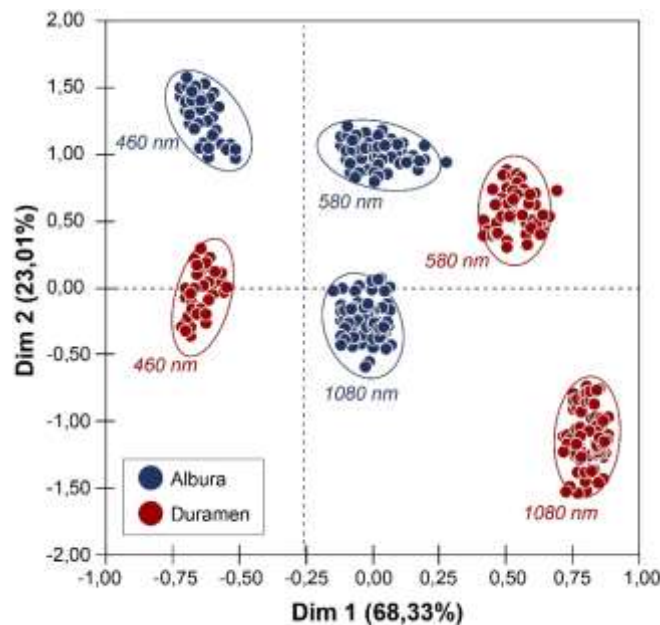
presentando en el proceso un aumento mayor en el duramen que la albura, pero sin presentar diferencia significativa estadística. Es posterior a los 900 nm en que la reflectancia se empieza a estabilizar en valores cercanos de 0,844; pero con una diferenciación estadística en los 1020nm, en la que duramen fue mayor a la albura.

Para eliminar los efectos de la interferencia en la reflectancia generada por compuestos químicos y físicos que podrían estar presentes en la madera dada por los efectos del secado,, se determinó la segunda derivada a partir de la curva de los datos (figura 10b), encontrando con ello las siguientes características: i. la variación de la reflectancia de la segunda derivada es de  $\pm 0,0025$  lo que implica es una variación homogénea. ii. Se evidencia que en el espectro visible a los 460, 580 nm y en el infrarrojo cercano a los 1080 nm, hay diferencias significativas entre albura y duramen, confirmando los patrones dados en la reflectancia. iii. Entre los 590 y 1000 nm, hay oscilaciones comunes entre albura y duramen que no muestran significancia, siendo un comportamiento similar entre ambas secciones. iv. De los 310 a 400 nm y de los 1050 a 1100 nm las variaciones obtenidas no son representativas debido a la gran variación de reflectancia de dichos segmentos que la segunda derivada no es representativa.



**Figura 10.** Reflectancia (a) y segunda derivada de la reflectancia (b) de las secciones de albura y duramen en madera seca de *P. purpurea* procedente de bosque natural.

Al determinar el grado de variación con significancia de la reflectancia espectral (figura 10a) a partir de un análisis de componentes principales (figura 11), se confirmó estadísticamente que a los 460, 580 y 1020 nm las diferencias son significativas, con valores de diferenciación del 65 a 82%, considerados como altos y permisibles a ser considerados como criterios de diferenciación entre ambos segmentos, siendo en el espectro visible, los 460 nm como el punto de mayor variación, mientras en el infrarrojo cercano la diferenciación a los 1020 nm es del 88% entre ambas secciones.



**Figura 11.** Análisis de componentes principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia de las secciones de albura y duramen mostraron significancia en madera seca de *P. purpurea* procedente de bosque natural.

#### *Relación de la reflectancia y variables físicas y anatómicas*

Los análisis de correlación de Pearson que relacionan las características físicas y anatómicas con respecto a los tres puntos de longitud de onda en las que la reflectancia mostró variación (cuadro 7), permiten en primera instancia observar los mismos comportamientos con la albura y el duramen. No presentaron correlaciones significativas con la densidad de vasos, diámetro de vasos y porcentaje de vasos solitarios, encontrando coeficientes de correlación inferiores a 0,22. En cambio se encontraron correlaciones significativas de las relaciones con la densidad de madera, que variaron de 0,55 a 0,60 siendo la longitud del infrarrojo cercano de 1020nm la que presentó la mayor correlación. Con respecto a la correlación entre las tres longitudes de onda, no fueron significativas y variaron entre 0,15 a 0,42. Por su parte,

a nivel anatómico se encontraron correlaciones superiores a 0,85 entre el porcentaje de vasos solos y su diámetro, además de la densidad de la madera con la densidad de vasos. Finalmente, no se encontró correlación ente la densidad y el porcentaje de vasos solitarios.

**Cuadro 7.** Análisis de correlación de Pearson de los principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia que mostraron significancia con datos físicos y anatómicos de las secciones de albura y duramen en madera seca de *P. purpurea*.

Variables	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Porcentaje de vasos solitarios (%)	Densidad de vasos (poros/mm <sup>2</sup> )	Diámetro promedio vasos (µm)	460nm	580nm	1080nm
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1	0,19 ns	0,85*	0,79*	0,69*	0,74*	0,69*
Porcentaje de vasos solitarios (%)	0,16 ns	1	0,80*	0,44 ns	0,33 ns	0,38 ns	0,22*
Densidad de vasos (poros/mm <sup>2</sup> )	0,88*	0,77*	1	0,70*	0,28 ns	0,09 ns	0,08 ns
Diámetro promedio vasos (µm)	0,90*	0,45 ns	0,76*	1	0,30 ns	0,15 ns	0,10 ns
460nm	0,55*	0,23 ns	0,22 ns	0,11 ns	1	0,15 ns	0,33 ns
580nm	0,59*	0,16 ns	0,05 ns	0,19 ns	0,15 ns	1	0,22 ns
1080nm	0,72*	0,30 ns	0,02 ns	0,03 ns	0,33 ns	0,22 ns	1

Nota. Ns: no significativos; \* significancia al 0,05; parte superior de la división gris corresponde a las correlaciones de albura, datos inferiores de la línea gris corresponden al duramen.

La correlación entre las tres longitudes relevantes de reflectancia espectral con el color en formato CIELab (cuadro 8), nuevamente se obtuvo el mismo comportamiento de correlación que el mostrado en albura y duramen; primeramente, entre las tres variables de color se obtuvieron coeficientes de correlación superiores a 0,70. En cambio, con la luminosidad ( $L^*$ ) no se obtuvieron correlaciones significativas con valores inferiores a 0,25; con el valor  $a^*$  únicamente se mostró una correlación inversamente significativa con la longitud de 460nm (de -0,62 en albura y -0,60 en duramen). En las longitudes de 580 nm y 1020 nm no se encontraron correlaciones. Finalmente, con el parámetro  $b^*$ , la única correlación significativa se registró con la longitud de 580 nm y fue mayor a 0,75.

**Cuadro 8.** Análisis de correlación de Pearson de los principales de los tres puntos de longitud de onda, que la reflectancia que mostraron significancia con datos Lab de color de las secciones de albura y duramen en madera seca de *P. purpurea*.

Variables	$L^*$	$a^*$	$b^*$	460nm	580nm	1080nm
$L^*$	1	0,70*	0,73*	0,18 ns	0,06 ns	0,22 ns
$a^*$	0,77*	1	0,83*	-0,60*	-0,03 ns	0,10 ns
$b^*$	0,80*	0,89*	1	0,29 ns	0,81*	0,20 ns
460nm	0,20 ns	-0,62*	0,33 ns	1	0,15 ns	0,33 ns
580nm	0,13 ns	-0,10 ns	0,75*	0,15 ns	1	0,22 ns
1080nm	0,12 ns	0,02 ns	0,40 ns	0,33 ns	0,22 ns	1

Nota. Ns: no significativos; \* significancia al 0,05; parte superior de la división gris corresponde a las correlaciones de albura, datos inferiores de la línea gris corresponden al duramen.



## Discusión

### *Variaciones entre albura y duramen*

Las diferenciaciones de las propiedades anatómicas y físicas identificadas entre la albura y el duramen del *P. purpurea* se explican con una mayor densidad de vasos y diámetro mayor en el albura que se debe a que es el material activo del xilema [16, 20]; estudios desarrollados por Laa et al. [23], encontraron para doce especies tropicales que el tejido xilemático de la albura al ser activo y movilizar agua y nutrientes dentro del árbol, en cambio el duramen es una región de células muertas, que produce una acumulación de extractivos por subprocesos fisiológicos, oxidación de extraíbles que inciden que la coloración de la madera sea mayor y se desarrolle un depósito de agua y sustancias de reserva. Steak et al. [10], mencionan que las disminuciones del diámetro de vasos en el duramen se deben a la acumulación de sustancias orgánicas e inorgánicas en las paredes de los vasos, acumulación de taninos, aceites, gomas, resinas, colorantes, compuestos aromáticos, carbonato de calcio, sílice, entre otros; engrosan la pared incidiendo que su diámetro sea menor y que en algunos casos los vasos se llenen, infiriendo que en el momento de cuantificación de densidad de vasos se disminuya. Por su parte Han y Li [4], consideran que especies de latifoliadas que presenten vasos solitarios, tienden a cerrar cerca del 15% de sus vasos en el xilema por la acumulación de taninos y ceras que inciden que su densidad se disminuya.

Es importante destacar que la inferencia de acumulación de sustancias orgánicas e inorgánicas en las paredes y disminución de la densidad incide que la densidad de la madera aumente y que se den cambios en la coloración de la madera; Mouriño et al. [23], determinaron para tres especies del género *Peltogyne* sp. que el aumento de la densidad de la madera del duramen, se debe a las características de acumulación y movilización de nutrientes de esta familia botánica, que tiende a acumular nutrientes y en especial soluciones orgánicas en el duramen para ser empleadas en el momento que la especie se someta es al estrés hídrico, al presentar vasos más

cerrados, la pérdida de nutrientes y agua por presiones negativas del suelo es menor lo cual infiere una mayor probabilidad de sobrevivencia de la especie. Mientras la diferenciación colorimétrica entre ambas secciones según Luao et al. [30], se debe a la acumulación de taninos y ceras en las partes inactivas de la xilema, que puede ser de 50 a 70% mayor que la parte activa del xilema, eso por la actividad celular, movilidad hidráulica de la especie, que al momento de ser cortada y disminuye su contenido de humedad, comienza un proceso de oxidación y reducción en el duramen que incide que obtenga una coloración más oscura que la albura. Raw et al. [30] mencionan que conforme menor sea la concentración de almidones y mayor la de fenoles y taninos, la coloración se hará más oscura y rojiza.

#### *Implicaciones de las propiedades físicas y anatómicas con la reflectancia hiperespectral*

Los resultados no presentaron una correlación directa con aspectos anatómicos, esto se debió según Lawter et al. [34], a que los aspectos que mayor inferencia tienen en la reflectancia en maderas se deben a la composición química. La lignina, celulosa y hemicelulosa afectan directamente la reflectancia, además de la presencia de extraíbles inciden en que aumente la absorción de luz; Hardman et al. [37], con *Swetenia macrophylla* encontraron que si bien las discrepancias anatómicas entre la albura y duramen son significativas, la diferenciación de la reflectancia se debió a la concentración de lignina, extraíbles y hemicelulosa, que fueron mayores en el duramen que en la albura, lo cual permitió encontrar diferencias a los 490, 700 y 1050 nm; en caso de la densidad madera, los mismos autores mencionan que las correlaciones que se pueden presentar con la reflectancia, se deben a la concentración de compuestos extraíbles que inciden en un cambio en reflectancia en el espectro visible y en el infrarrojo, por cual recomienda para la identificación de patrones espectrales de especies correlacionarlos más con la parte química de la especie.

Según los resultados del presente estudio, se descartó la relación con la anatomía de la madera de esta especie, al analizar el aspecto colorimétrico y encontrar únicamente relaciones con la longitud de 580 nm, que es donde se da la reflectancia de los colores considerados amarillos, aspecto que se denota con la correlación lineal con la variable  $b^*$  y la inversa con  $a^*$ . Según Rander et al. [19], en el sistema CIELab, la coordenada  $b^*$  es la que infiere la coloración amarilla-azul, lo cual produce valores elevados en la longitud de 580 nm que infieren que la coloración amarilla aumente, mientras la coloración en 460 nm tiende a longitudes verduzcas, de ahí que la relación sea inversa con la coordenada de color  $a^*$ . Por otra parte, la poca relación con la luminosidad según Ra et al. [24] se debe a que es una variable que tiene mayor relación con la absorción de la luz por parte de la superficie, en caso maderas es cercana al 55-65% de la luz que incide, mientras la reflectancia es inferior al 30%, de ahí que la luminosidad no tienda a presentar significancia con la longitud de reflectancia obtenida.

#### *Potencialidad de la reflectancia hiperespectral como diferenciador de especies*

Si bien se conoce que la reflectancia es funcional para la identificación y diferenciación de especies a nivel foliar según mencionan [4], [9], [12], [24] y [30]; a nivel de maderas, los estudios han sido limitados, pero la potencialidad de aplicación es amplia. Hardman et al. [37], mencionan que la reflectancia y absorción de la luz en madera no solo permitiría la identificación de especies, posibilitaría estimar de forma no destructiva las concentraciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, a su vez de la potencialidad de coloración de la madera al estar seca; por su parte Wu et al. [22] destacan la potencialidad de la espectrometría como indicador de calidad de la madera para desarrollo de pellets como combustible sólido, el sistema facilitaría la evaluación de la composición química del pellets y estimación mediante modelos de potencial calórico de las especies.

Mentewn et al. [20], destaca que se debe ver la reflectancia más que un indicador de especies o composición química, debe ser entendido como una metodología de evaluación de la calidad de madera, identificación de puntos de falla del material (evidencia espectral de microfallas) y de sistemas de secado de madera. Se debe incentivar este tipo de investigaciones y enfocarlas al entendimiento de la presencia de elementos como calcio, nitrógeno, potasio, fósforo, entre otros; elementos que según los científicos, son de relevancia en el manejo silvicultural de plantaciones y que al momento de extracción de madera se da una pérdida nutricional, que debe ser analizada para el desarrollo de paquetes de fertilización.

## **Conclusiones**

Se encontraron diferencias significativas a nivel anatómico entre albura y duramen; encontrando una presencia mayor de vasos solitarios en albura del 34,28%, además de una densidad vasos de 7,07 poros/mm<sup>2</sup> significativamente mayor y un mayor diámetro vasos, con un valor promedio de 148,53 μm. En cambio, la densidad de madera fue mayor en duramen (0,78 g/cm<sup>3</sup>).

En colorimetría, la luminosidad y b\* fue mayor en albura, pero con valores significativamente menor en a\*, obteniendo un diferencial del color superior a 14,55 (cambio total del color). Con la reflectancia se encontraron tres puntos de diferenciación significativa que fueron a los 460, 580 y 1020 nm; al correlacionar estos tres segmentos, no se encontró correlación alguna con los aspectos anatómicos, pero sí con la densidad de la madera (superiores a 0,69), a nivel de color no se encontraron relaciones con la el parámetro de color L\*, mientras que a\* solo mostró correlaciones inversas y mientras de tipo lineal con b\* a los 580 nm. Finalmente, no se encontraron relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

## CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO

1. Existe una diferenciación clara en los patrones de las firmas espectrales según la especie de madera y según el tipo de corte, que permite profundizar en la identificación automática de maderas.
2. En la mayoría de las especies estudiadas, es en el corte tangencial es donde se observan las mayores diferencias con respecto a los otros dos cortes.
3. El análisis de correlación entre densidad de la madera y el índice NDVI no mostró ningún tipo de relación, por lo que se puede afirmar que los parámetros de la firma espectral de las especies no guarda relación con la densidad de la madera.
4. Se encontraron algunas diferencias muy significativas en las concentraciones de elementos químicos entre las especies estudiadas.
5. No se encontraron correlaciones significativas entre el índice utilizado (NDVI) y las concentraciones químicas de elementos en la madera, tampoco con la concentración de cenizas.
6. No fue posible encontrar relaciones entre las concentraciones químicas de elementos en la madera y sus valores correspondientes de longitud de onda.
7. No se encontraron relaciones entre los valores del análisis termogravimétrico y los valores de reflectancia de la madera de las especies evaluadas
8. En el caso de estudio del Nazareno, se encontraron diferencias significativas a nivel anatómico entre albura y duramen; encontrando una presencia mayor de vasos solitarios en albura del 34,2 8%, además de una densidad vasos de 7,07 poros/mm<sup>2</sup> significativamente mayor y un mayor diámetro vasos, con un valor promedio de 148,53 μm. En cambio, la densidad de madera fue mayor en duramen (0,78 g/cm<sup>3</sup>).
9. Para Nazareno, en colorimetría, la luminosidad y b\* fue mayor en albura, pero con valores significativamente menor en a\*, obteniendo un diferencial del color superior a 14,55 (cambio total del color). Con la reflectancia se encontraron

tres puntos de diferenciación significativa que fueron a los 460, 580 y 1020 nm; al correlacionar estos tres segmentos, no se encontró correlación alguna con los aspectos anatómicos, pero sí con la densidad de la madera (superiores a 0,69), a nivel de color no se encontraron relaciones con la el parámetro de color  $L^*$ , mientras que  $a^*$  solo mostró correlaciones inversas y mientras de tipo lineal con  $b^*$  a los 580 nm. Finalmente, no se encontraron relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

## RECOMENDACIONES

1. Dar continuidad al trabajo de registro de firmas espectrales para maderas de Costa Rica.
2. Se recomienda al TEC o al CENAT, adquirir un espectroradiometro que cubra longitudes de onda superiores a 1000 nm y continuar el trabajo de registro de las firmas, que también podría extenderse a otras áreas como por ejemplo identificación de tipo de plásticos para su clasificación automática.
3. Continuar los análisis generando nueva información entre 1000 y 2500 nm y probando los dos índices para detección de celulosa y lignina. (CAI Cellulose absorption index, según Nagler, 2003) y (NDLI Normalized difference lignin index, según Serrano et al., 2002).

## REFERENCIAS

- Affonso, C., Rossi, A. L. D., Vieira, F. H. A., & De Carvalho, A. C. P. L. F. (2017). Deep learning for biological image classification. *Expert Systems with Applications*, 85, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.039>
- Araya, M. y Moya, R. 2013. «Claves de identificación macroscópica de la madera de 110 especies del Caribe Norte de Costa Rica,» *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 10, nº 24, pp. 34-52.
- Arguedas, M y Mata, R; Herrera, W; Arias, D; Calvo, J; Salas, B. 2006. Síndrome de decaimiento lento de la *Tectona grandis* en Costa Rica, Segunda etapa, Informe Final.
- Azizan, A., Guillon, E., Caraglio, Y., Langbour, P., Paradis, S., Bonnet, P., Brancheriau, L. (2017). Integrated dataset of anatomical, morphological, and architectural traits for plant species in Madagascar. *Data in Brief*, 15, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.09.004>
- Baiano, A. (2017). Applications of hyperspectral imaging for quality assessment of liquid based and semi-liquid food products: A review. *Journal of Food Engineering*, 214, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.012>
- Bishop, C.2009. *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York: Springer.
- Bonifazi, G., Calienno, L., Capobianco, G., Lo Monaco, A., Pelosi, C., Picchio, R., & Serranti, S. (2015). 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*, 113, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.001>
- Bonnet, P., Joly, A., Goëau, H; Champ, J., Vignau, C. 2016. Plant identification: Man vs. Machine. *Multimedia Tools and Applications*, Springer Verlag, LifeCLEF 2014 plant identification challenge, 75 (3), pp.1647-1665. <10.1007/s11042-015-2607-4>.



Cao, X., Ge, Y., Li, R., Zhao, J., & Jiao, L. (2019). Hyperspectral imagery classification with deep metric learning. *Neurocomputing*, 356, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.05.019>

Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., & Ukrainczyk, N. (2019). Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1045–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.321>

Cesprini, E., Resente, G., Causin, V., Urso, T., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2020). Energy recovery of glued wood waste – A review. *Fuel*, 262, 116520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116520>

Chi, G., Ma, J., Shi, Y., & Chen, X. (2016). Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators of the iron nutritional status of cyanobacteria-dominant algal blooms in eutrophic lakes. *Ecological Indicators*, 71, 609–617. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.014>

Colares, C. J., Pastore, T. C., Coradin, V. T., Marques, L. F., Moreira, A. C., Alexandrino, G. L., Braga, J. W. (2016). Near infrared hyperspectral imaging and MCR-ALS applied for mapping chemical composition of the wood specie *Swietenia Macrophylla* King (Mahogany) at microscopic level. *Microchemical Journal*, 124, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.09.022>

Corea, E., Arnáez, E.; Moreira, I., Cordero, R y Castillo, M. 2014. Recurso forestal amenazado: seis especies en peligro crítico de extinción en Costa Rica, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Cristianini, N. y Shawe, J. 2013. An Introduction to Support Vector Machines, New York: Cambridge University Press.

De Sousa Fernandes, D. D., De Almeida, V. E., Fontes, M. M., De Araújo, M. C. U., Vêras, G., & Diniz, P. H. G. D. (2019). Simultaneous identification of the wood types in aged cachaças and their adulterations with wood extracts using digital images and

SPA-LDA. *Food Chemistry*, 273, 77–84.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.035>

Díaz, J. E. 1979. «Claves para la identificación de maderas de árboles nativos y cultivados de Chile» *Bosque*, vol. 3, nº 1, pp. 15-25.

Espinoza, N., León, W. 2001. *Anatomía de la madera*. Mérida, VE, Universidad de Los Andes. Consejo de Publicaciones y Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico. 397 p.

Fernandez, A., Mateos, R., Garcia, J. A., Beltran, G., & Escobar, R. (2010). Determination of mineral elements in fresh olive fruits by flame atomic spectrometry. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(4), 1183. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1206>

Fernández et al. (2010). Determination of mineral elements in fresh olive fruits by flame atomic spectrometry. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2010 8(4), 1183-1190

Ghiyamat, A., Zulhaidi, H., Amouzad, G., Rashid, A., Mansor, S. 2013. Hyperspectral discrimination of tree species with different classifications using single- and multiple-endmember. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, p. 177-191. Recuperado de: [https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00012149\\_100990.pdf](https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00012149_100990.pdf)

Gonzalez, R., Woods, R, y Eddins, S. 2009. *Digital Image Processing Using Matlab*, USA: Gatesmark Publishing.

Gu, X., Du, J. y Wang, X. 2005. «Leaf Recognition Based on the Combination of Wavelet Transform and Gaussian Interpolation,» de *International Conference on Intelligent Computing, Proceedings*, China.

Hadlich, H. L., Durgante, F. M., Dos Santos, J., Higuchi, N., Chambers, J. Q., & Vicentini, A. (2018). Recognizing Amazonian tree species in the field using bark

tissues spectra. *Forest Ecology and Management*, 427, 296–304.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.002>

Hall, E. M., Brady, S. P., Mattheus, N. M., Earley, R. L., Diamond, M., & Crespi, E. J. (2017). Physiological consequences of exposure to salinized roadside ponds on wood frog larvae and adults. *Biological Conservation*, 209, 98–106.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.013>

Hänel, T., Jarmer, T., & Aschenbruck, N. (2019). Using distributed compressed sensing to derive continuous hyperspectral imaging from a wireless sensor network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 104974.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104974>

Hermanson, J. C. and Wiedenhoef A. C., 2011. A brief review of machine vision in the context of automated wood identification systems. *IAWA J.* 32(2): 233–250.

Herrero-Langreo, A., Scannell, A. G., & Gowen, A. (2020). Hyperspectral imaging for food-related microbiology applications. *Data Handling in Science and Technology*, 493–522. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63977-6.00020-1>

Holdridge, L. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica.

Holm, S., Thees, O., Lemm, R., Olschewski, R., & Hilty, L. M. (2018). An agent-based model of wood markets: Scenario analysis. *Forest Policy and Economics*, 95, 26–36.  
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.07.005>

Jiang, X, Dawood, M, Gigengack, F, Risse, B, Schmid, S, Tenbrinck M. y Schäfer, K. 2013. «Biomedical Imaging: A Computer Vision Perspective,» de *Computer Analysis of Images and Patterns*, 15th International Conference, United Kingdom.

Kappel, A., Ottosen, L. M., & Kirkelund, G. M. (2017). Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, 157, 1199–1205.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.157>

- Kiat, P. E., Malek, M., & Shamsuddin, S. (2019). Net carbon stocks change in biomass from wood removal of tropical forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of King Saud University - Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.09.012>
- Knauf, M. (2016). The wood market balance as a tool for calculating wood use's climate change mitigation effect — An example for Germany. *Forest Policy and Economics*, 66, 18–21. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.02.004>
- Kobayashi, K., Hwang, S., Okochi, T., Lee, W., & Sugiyama, J. (2019). Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data. *Journal of Cultural Heritage*, 38, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.001>
- Kollmann, F. 1959. *Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones*, vol. 1, Madrid: Instituto Forestal de Investigación y Experimentación y el servicio de la madera, p. 672.
- Li, F., Lu, H., & Zhang, P. (2019). An innovative multi-kernel learning algorithm for hyperspectral classification. *Computers & Electrical Engineering*, 79, 106456. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106456>
- Liu, Y., Zhou, S., Han, W., Liu, W., Qiu, Z., & Li, C. (2019). Convolutional neural network for hyperspectral data analysis and effective wavelengths selection. *Analytica Chimica Acta*, 1086, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.08.026>
- Machado, J. S., Pereira, F., & Quilhó, T. (2019). Assessment of old timber members: Importance of wood species identification and direct tensile test information. *Construction and Building Materials*, 207, 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.168>
- Manolakis, D. & Shaw, G. (2002). Detection Algorithms for Hyperspectral Imaging Applications. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1): 29–43. <http://dx.doi.org/10.1109/79.974724>.

- Moore, A. K, Owen, N.L. (2001) Infrared spectroscopic studies of solid wood. *Appl Spectrosc Rev* 36(1):65–86.
- Moya, R. y Rodríguez, A. 2011 «Identificación Macroscópica de Árboles Maderables por el corte Transversal de la Corteza y la Madera,» de V Congreso Forestal Latinoamericano, Lima-Perú.
- Mvondo, R. R. N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D. D. S., & Nkeng, E. G. (2017). Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics*, 7, 2096–2103. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.06.025>
- Nabeela, F., Murad, W., Khan, I., Mian, I. A., Rehman, H., Adnan, M., & Azizullah, A. (2015). Effect of wood ash application on the morphological, physiological and biochemical parameters of *Brassica napus* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 95, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.06.017>
- Nagler, P. L., Inoue, Y., Glenn, E., Russ, A., & Daughtry, C. (2003). Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil–plant litter scenes. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3), 310–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.06.001>
- Nixon, M. y Aguado, A. 2012. Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision, New York: Elsevier.
- Ortiz, E., y Cordero, S. (2014). Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Pajares, G. y de la Cruz, J. 2008. Visión por Computadora Imágenes Digitales y Aplicaciones, México: Alfaomega.
- Petrou, M. y Petrou, C. 2010. Image Processing the Fundamentals, Singapore: John Wiley & Sons.
- Powers, J. S., Becknell, J. M., Irving, J., & Pérez-Aviles, D. (2009). Diversity and structure of regenerating tropical dry forests in Costa Rica: Geographic patterns and

environmental drivers. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 959–970. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.036>

Präger, F., Paczkowski, S., Sailer, G., Derkyi, N. S. A., & Pelz, S. (2019). Biomass sources for a sustainable energy supply in Ghana – A case study for Sunyani. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.016>

Prendas, J. Bogantes, M. 2011. Algoritmo para la detección y seguimiento del ácaro varroa destructor en secuencias digitales de video, Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica.

Romero Ramirez, F. J., Navarro-Cerrillo, R. M., Varo-Martínez, M. Á., Quero, J. L., Doerr, S., & Hernández-Clemente, R. (2018). Determination of forest fuels characteristics in mortality-affected Pinus forests using integrated hyperspectral and ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.003>

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Third ERTS-1 Symposium, (3th, 1973, Washington D.C, US). Eds. Fraden, SC; Marcanti, EP; Becker, MA. Symposium. NASA SP-351, Washington D.C NASA. p. 309-317.

Ruffinatto, F., Cremonini, C., Macchioni, N., & Zanuttini, R. (2014). Application of reflected light microscopy for non-invasive wood identification of marquetry furniture and small wood carvings. *Journal of Cultural Heritage*, 15(6), 614–620. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.013>

Schmidt, C., Westermann, H., & Steinhilper, R. (2019). An investigation of buzz saw blade cutting forces depending on tool geometry for cutting frozen wood. *Procedia Manufacturing*, 33, 778–785. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.098>

Schreiner, Sona, B., & Loos, H. (2018). The smell of wood and its impact on physiological responses. *International Journal of Psychophysiology*, 131, 40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.07.123>

Sebio-Puñal, T., Naya, S., López-Beceiro, J., Tarrío-Saavedra, J., & Artiaga, R. (2012). Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1163–1167. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-2133-1>

Seon-Jong, K., Byeong-Wan, K y Dong-Pil, K. 2011. «Tree Recognition for Landscape Using by Combination of Features of its Leaf, Flower and Bark,» de International conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration, Tokyo.

Serrano, L., Peñuelas, J., & Ustin, S. L. (2002). Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 355–364. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00011-1)

Simo-Tagne, M., Rémond, R., Rogaume, Y., Zoulalian, A., & Bonoma, B. (2016). Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. *International Journal of Thermal Sciences*, 109, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.012>

Solano, J. Villalobos, R. (1996). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. Ministerio de Ambiente Y Energía, Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica.

Tan, K., Wang, H., Chen, L., Du, Q., Du, P., & Pan, C. (2020). Estimation of the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 120987. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120987>

Ulrici, A., Serranti, S., Ferrari, C., Cesare, D., Foca, G., & Bonifazi, G. (2013). Efficient chemometric strategies for PET–PLA discrimination in recycling plants using

hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 122, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2013.01.001>

Whitau, R., Dilkes-Hall, I. E., Dotte-Sarout, E., Langley, M. C., Balme, J., & O'Connor, S. (2016). X-ray computed microtomography and the identification of wood taxa selected for archaeological artefact manufacture: Rare examples from Australian contexts. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 6, 536–546. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.03.021>

Wilczyński, S., Koprowski, R., Marmion, M., Duda, P., & Błońska-Fajfrowska, B. (2016). The use of hyperspectral imaging in the VNIR (400–1000 nm) and SWIR range (1000–2500 nm) for detecting counterfeit drugs with identical API composition. *Talanta*, 160, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.06.057>

Yang, F., Li, J., Gan, X., Qian, Y., Wu, X., & Yang, Q. (2010). Assessing nutritional status of *Festuca arundinacea* by monitoring photosynthetic pigments from hyperspectral data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.08.010>

Yang, H., Chao, W., Wang, S., Yu, Q., Cao, G., Yang, T., Li, G. (2019). Self-luminous wood composite for both thermal and light energy storage. *Energy Storage Materials*, 18, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.02.005>

Yuan, L., Yan, P., Han, W., Huang, Y., Wang, B., Zhang, J., Bao, Z. (2019). Detection of anthracnose in tea plants based on hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105039. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105039>



## ANEXOS

### Anexo 1. Metales y cenizas para las 30 especies de árboles de Costa Rica.

**Cuadro 9.** Resultados obtenidos de metales y cenizas para las 30 especies de árboles de Costa Rica.

No. muestra	Silicio mg/kg (**)	Potasio mg/kg (**)	Hierro mg/kg (**)	Calcio mg/kg (**)	Magnesio mg/kg (**)	Manganeso mg/kg (**)	Cenizas % (**)
1	< 10	(155 ± 9)	(20 ± 3)	(295 ± 10)	(96 ± 8)	(2,7 ± 0,2)	(0,24 ± 0,02)
2	< 10	(1 210 ± 171)	(14 ± 1)	(8 623 ± 630)	(52 ± 1)	< 2	(3,0 ± 0,2)
3	< 10	(747 ± 49)	(23 ± 2)	(5 264 ± 679)	(41 ± 2)	(2,1 ± 0,2)	(1,70 ± 0,05)
4	< 10	(113 ± 9)	< 5	(1 959 ± 55)	(154 ± 6)	< 2	(0,35 ± 0,04)
5	< 10	(760 ± 41)	(37 ± 3)	(3 208 ± 59)	(461 ± 18)	< 2	(1,22 ± 0,03)
6	< 10	(1 028 ± 78)	(16 ± 2)	(7 130 ± 564)	(771 ± 14)	< 2	(1,77 ± 0,05)
7	< 10	(723 ± 59)	(537 ± 41)	(330 ± 13)	(419 ± 29)	(91 ± 3)	(1,25 ± 0,04)
8	< 10	(279 ± 41)	(8 ± 1)	(562 ± 31)	(78 ± 9)	(5,0 ± 0,5)	(0,31 ± 0,03)
9	< 10	(284 ± 15)	< 5	(1 322 ± 58)	(318 ± 13)	< 2	(0,69 ± 0,03)
10	< 10	(531 ± 56)	(65 ± 4)	(448 ± 10)	(437 ± 16)	(21 ± 2)	(0,60 ± 0,04)
11	< 10	(444 ± 33)	(117 ± 4)	(607 ± 22)	(250 ± 3)	(7 ± 1)	(2,6 ± 0,1)
12	< 10	(206 ± 14)	(17 ± 2)	(405 ± 18)	(39 ± 2)	< 2	(0,21 ± 0,02)
13	< 10	(449 ± 11)	(25 ± 2)	(985 ± 15)	(228 ± 8)	< 2	(0,42 ± 0,04)
14	< 10	(592 ± 68)	(21 ± 2)	(8 091 ± 580)	(281 ± 11)	< 2	(2,6 ± 0,1)
15	< 10	(231 ± 34)	(16 ± 1)	(668 ± 20)	(109 ± 2)	(36,2 ± 0,6)	(0,22 ± 0,02)
16	< 10	(496 ± 29)	(45 ± 2)	(2 437 ± 77)	(204 ± 6)	(5,2 ± 0,3)	(0,78 ± 0,04)

17	< 10	(187 ± 11 )	(32 ± 3 )	(2 740 ± 58)	(183 ± 5 )	(4,0 ± 0,3)	(0,66 ± 0,03)
18	< 10	(1 572 ± 139)	(35 ± 1)	(562 ± 18)	(1 048 ± 37)	(397 ± 3)	(2,2 ± 0,1)
19	< 10	(242 ± 33)	(27 ± 3)	(4 174 ± 82)	(87 ± 2)	< 2	(0,48 ± 0,03)
20	(125 ± 20)	(575 ± 54)	(18 ± 2)	(2 462 ± 300)	(392 ± 12)	(22 ± 2)	(1,50 ± 0,09)
21	< 10	(341 ± 11 )	(11 ± 1)	(6 428 ± 129)	(121 ± 6)	< 2	(1,12 ± 0,09)
22	< 10	(700 ± 36)	(18 ± 3)	(6 691 ± 650)	(575 ± 10)	< 2	(1,79 ± 0,05)
23	< 10	(337 ± 31)	(15 ± 1)	(845 ± 18)	(125 ± 5)	< 2	(0,39 ± 0,02)
24	< 10	(492 ± 11)	(9 ± 1)	(683 ± 12)	(325 ± 14)	(4,7 ± 0,2)	(0,52 ± 0,02)
25	< 10	(950 ± 42)	(27 ± 1)	(1 918 ± 44)	(51 ± 3)	< 2	(1,21 ± 0,07)
26	< 10	(3 503 ± 300)	(21 ± 6)	(9 289 ± 442)	(1 319 ± 35)	< 2	(4,3 ± 0,3)
27	< 10	(487 ± 70)	< 5	(937 ± 70)	(512 ± 3)	< 2	(1,82 ± 0,08)
28	< 10	(181 ± 9)	(12 ± 2)	(268 ± 8)	(38,08 ± 0,83)	(2,1 ± 0,3)	(0,22 ± 0,02)
29	< 10	(537 ± 18)	(24 ± 4)	(837 ± 52)	(275 ± 1)	(61 ± 6)	(0,54 ± 0,05)
30	< 10	(389 ± 15)	(31 ± 4)	(5 089 ± 122)	(100 ± 1)	(2,0 ± 0,3)	(1,23 ± 0,06)

## Anexo 2. Análisis de Termogravimetría (TGA) en diferentes muestras de maderas.

En el presente informe, se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis de termogravimetría en diferentes muestras de maderas. Se realizó a partir del equipo SDT Q600. Para ello, se estableció un flujo de gas de 100.00 mL / min, posteriormente, se realizó una rampa de calentamiento de 15.00 ° C / min hasta alcanzar una temperatura de 800.00 °C. Se introdujo una atmósfera de nitrógeno mediante un flujo de 100.00 mL / min. Una vez introducido el gas se realizó una isoterma durante 5.00 min. Finalmente, se introdujo una atmósfera de oxígeno con un flujo de 100.00 mL / min.

En el cuadro 1, se muestran los resultados obtenidos en cada muestra. En la mayoría de las muestras, fue posible identificar tres zonas donde se obtuvo una pérdida de masa considerable. Además, se muestra el residuo obtenido al finalizar el proceso y posterior a la oxidación.

La primera pérdida de masa es asociada a la humedad presente en todas las muestras, es decir, a la posibilidad de absorber agua. La segunda pérdida identificada, corresponde a la presencia de un compuesto mezclado por celulosa y hemicelulosa (Holocelulosa). Esta segunda pérdida, cerca de 280 °C, no fue visible en todas las muestras. Dado que, algunos procesos de degradación son más complejo, donde se ven involucrados otros compuestos cuya degradación tiene lugar en medio de la hemicelulosa y la celulosa (Sebio-Puñal, Naya, López-Beceiro, Tarrío-Saavedra, & Artiaga, 2012).

Finalmente, tercera zona donde se reflejó una pérdida de masa fue cerca de los 380 °C. Esta pérdida es asociada a la celulosa.

En la sección de anexos, se incorporan las gráficas adquiridas durante los diferentes análisis.

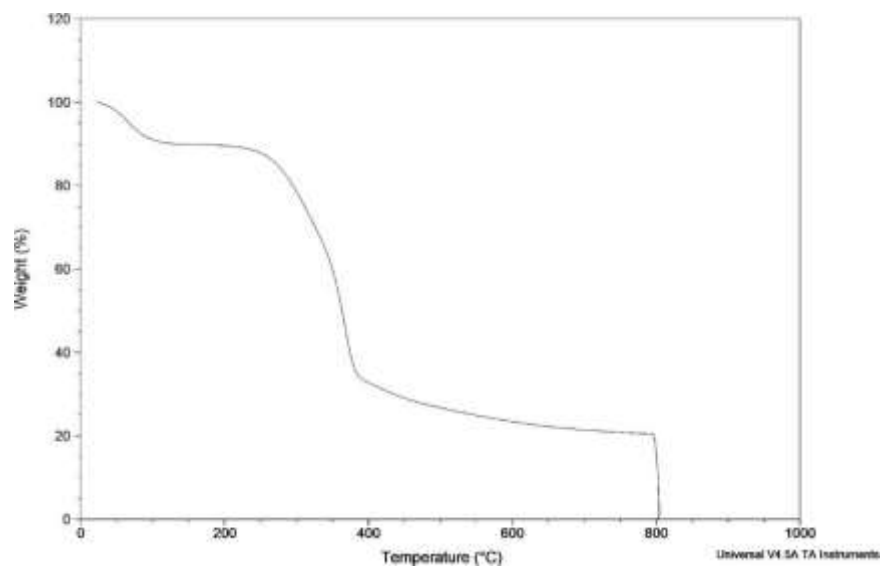
Cuadro 10. Resultados obtenidos mediante termogravimetría en 30 especies de árboles de Costa Rica.

Sample	Onset 1 (°C)	$\Delta$ W1 (%)	Onset 2 (°C)	$\Delta$ W2 (%)	Onset 3 (°C)	$\Delta$ W3 (%)	Residue (%)	Residue Ox. (%)
1670419-1	87.61	9.751	282.4	26.8	381.17	35.13	20.37	0.2056
1670419-2	88.77	8.306	*NR	NR	301.72	61.15	21.67	1.973
1670419-3	89.73	3.149	286.74	34.46	377.84	32.39	21.96	2.286
1670419-4	85.69	10.41	289.6	24.62	387.66	39.16	14.8	3.249
1670419-5	87.86	9.829	296.76	20.97	380.29	32.32	24.3	4.342
1670419-6	83.71	9.935	NR	NR	306.49	60.95	21.56	4.733
1670419-7	84.78	9.723	288.9	30.74	384.93	38.55	15.08	2.722
1670419-8	89.2	7.123	287.31	25.18	385.22	33.22	24.13	6.061
1670419-9	87.58	8.471	287.52	23.47	386.25	41.42	19.17	1.05
1670419-10	88.46	4.164	NR	NR	315.85	72.69	16.15	1.979
1670419-11	88.07	9.315	278.47	20.63	384.84	34.55	24.93	5.426
1670419-12	90.42	9.583	295.44	24.96	388.54	40.57	17.53	2.935
1670419-13	85.98	6.545	287.47	27.59	388.63	38.89	19.84	4.833
1670419-14	86.31	10.62	287.45	21.62	385.11	35.1	23.72	5.839
1670419-15	95.95	9.952	298.8	21.37	388.93	41.85	18.88	2.77
1670419-16	87.74	7.971	279.73	31.35	386.24	39.59	13.96	1.263
1670419-17	87.65	7.904	278.48	24.91	38.36	35.03	22.88	4.134
1670419-18	83.77	9.272	NR	NR	301.39	62.78	20.64	5.81
1670419-19	88.47	8.08	291.71	24.11	386	41.09	20.19	4.498
1670419-	87.58	9.0	277.8	27.	387.1	38.	16.84	0.299

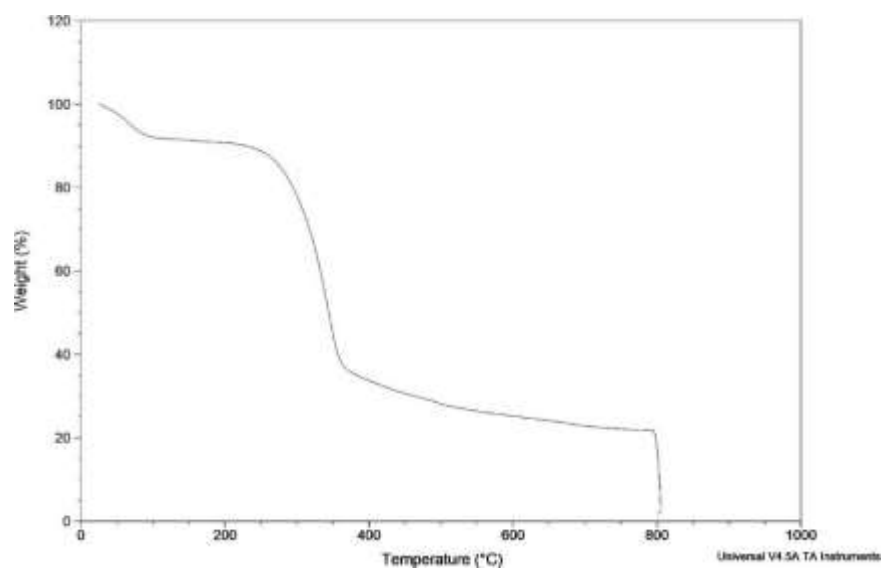
20		28		82	1	77		
1670419-21	85.57	9.1 6	294.5 8	26. 41	383.7 5	38. 43	17.37	1.648
1670419-22	89.73	9.4 74	274.8	23. 92	374.6	30. 25	26.99	6.477
1670419-23	86.51	7.5 36	NR	NR	310.4 8	58. 74	24	4.848
1670419-24	87.21	9.3 01	291.8 5	33. 24	377.6 8	35. 96	15.27	0.143
1670419-25	87.93	8.8 15	290.6 9	36. 98	367.0 5	24. 28	20.29	2.279
1670419-26	88.16	6.7 3	NR	NR	302.5 4	59. 45	21.47	1.688
1670419-27	85.72	8.4 05	289.8 6	23. 2	389.2 9	44. 17	17.63	3.459
1670419-28	88.24	4.7 14	280.9 2	30. 59	386.9 6	41. 62	15.71	4.314
1670419-29	91.47	1.7 9	282.8 7	24. 11	360.5 1	31. 96	22.19	5.608
1670419-30	86.23	9.6 83	28.44	29. 86	377.7 2	27. 42	21.84	2.136

\*NR: No se reportó señal.

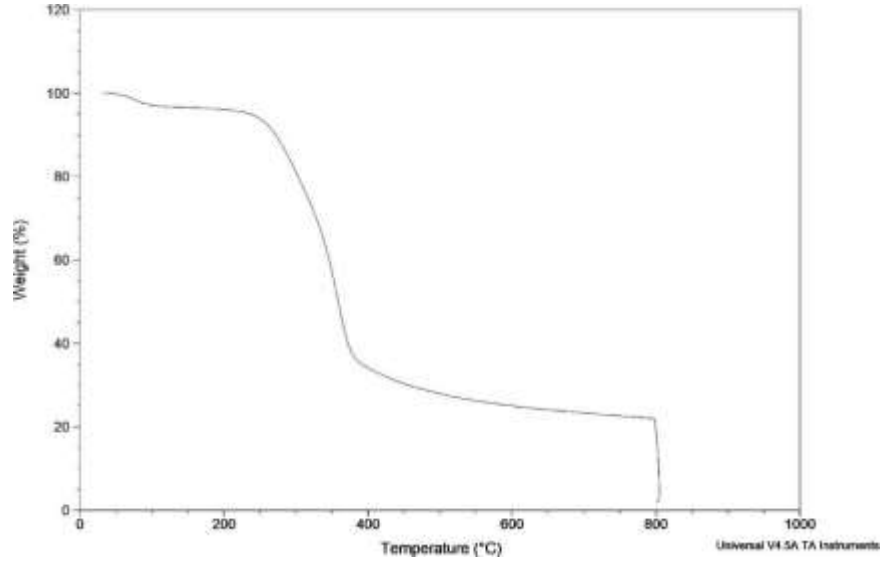
Anexos 3. Gráficos de los análisis de termogravimetría en las 30 muestras de madera



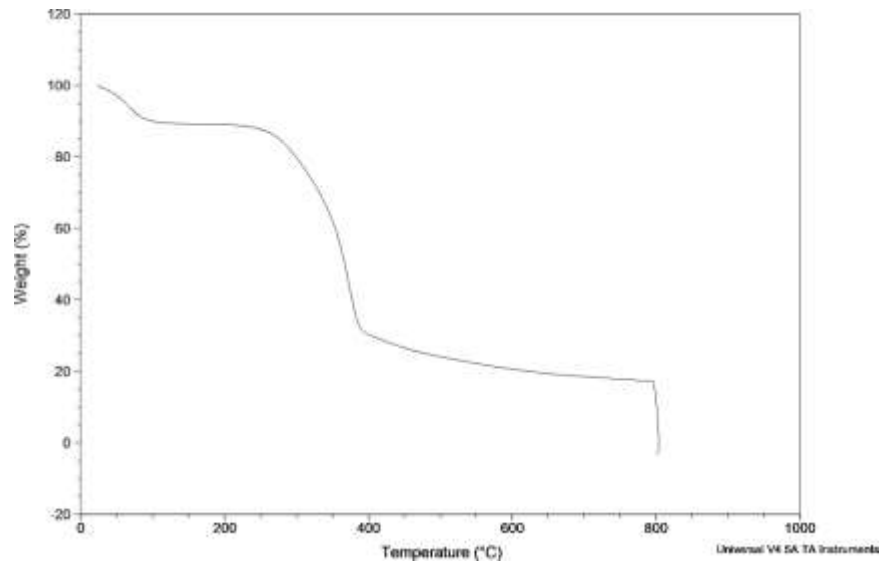
**Figura 12.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-1.



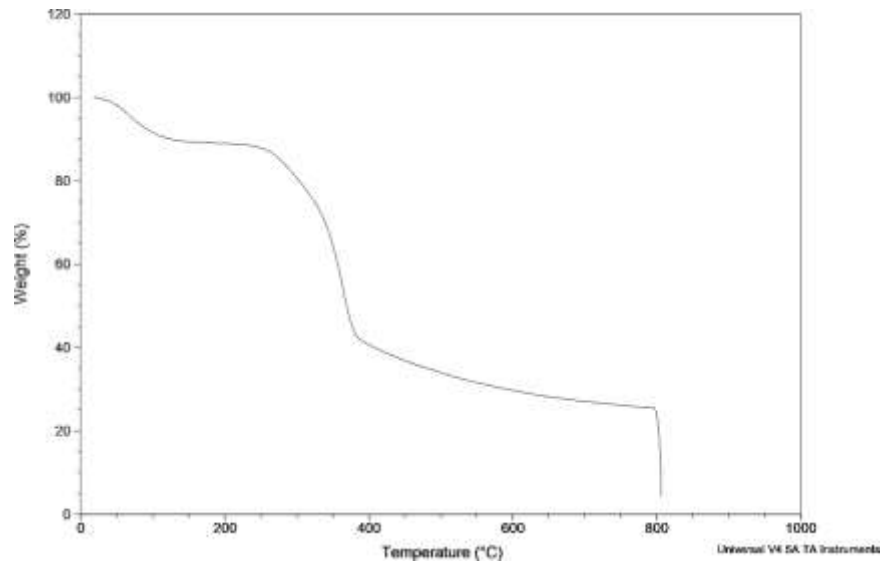
**Figura 13.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-2.



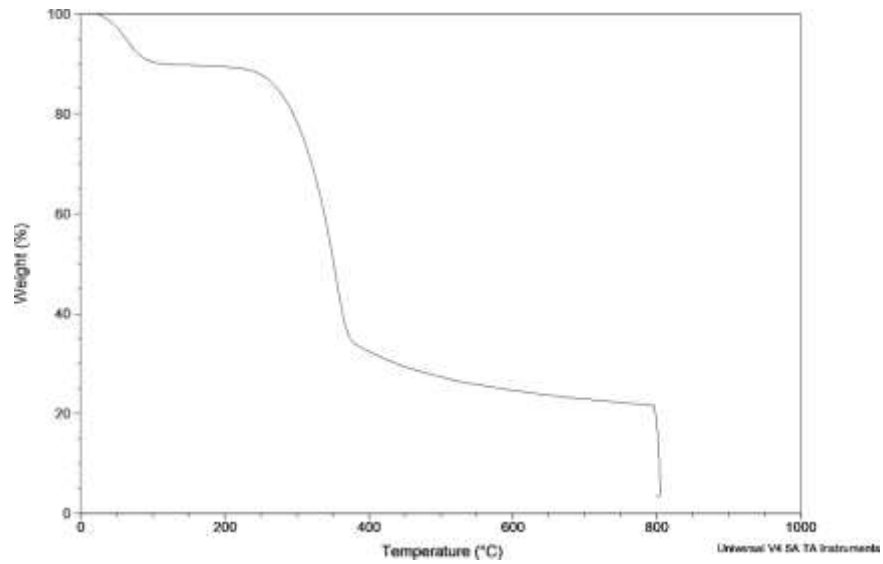
**Figura 14.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-3.



**Figura 15.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-4.

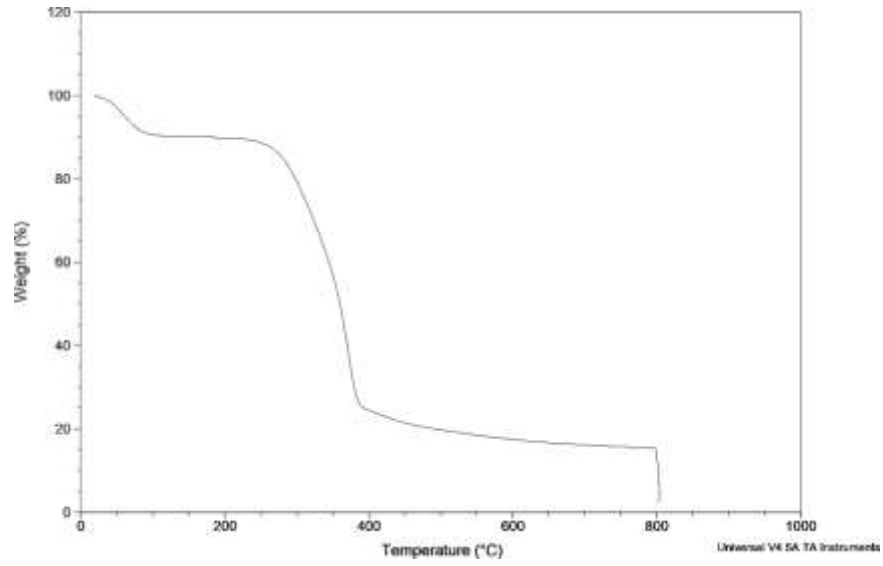


**Figura 16.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-5.

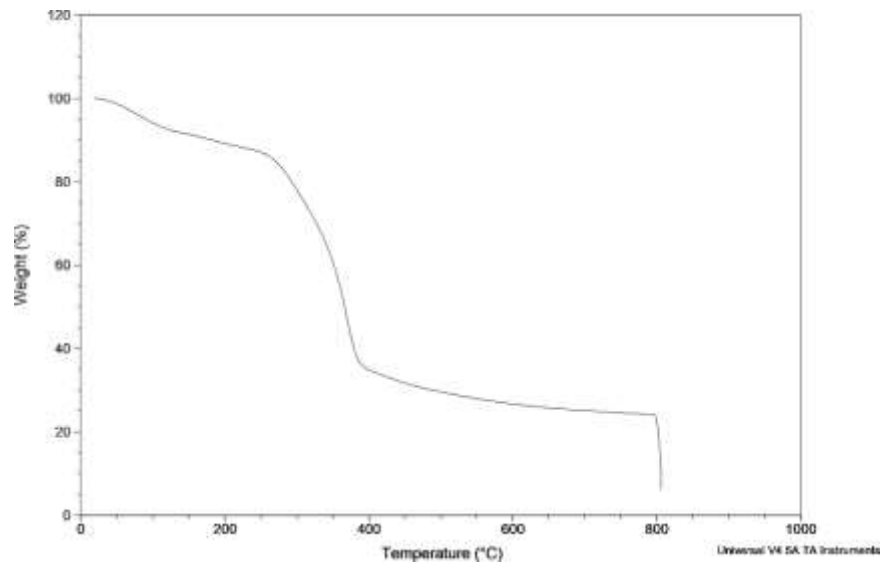


**Figura 17.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-6.

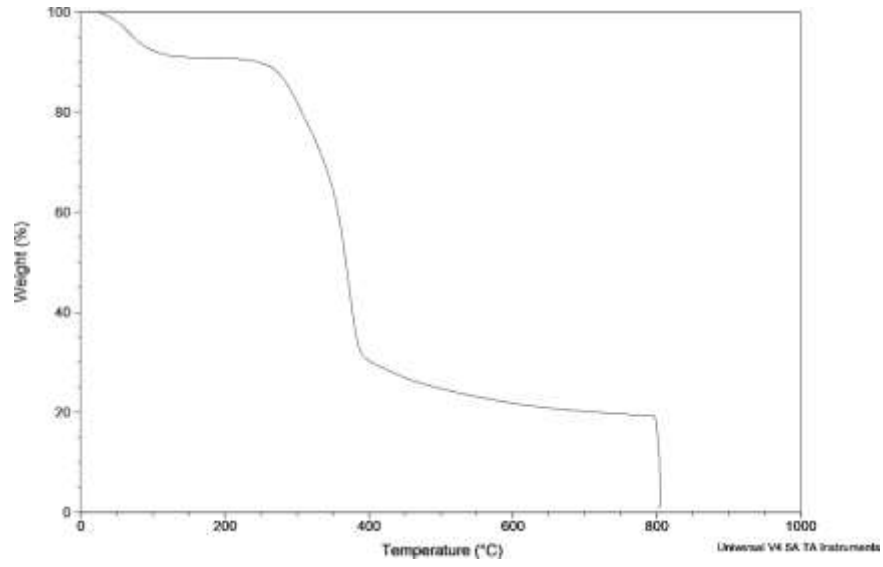




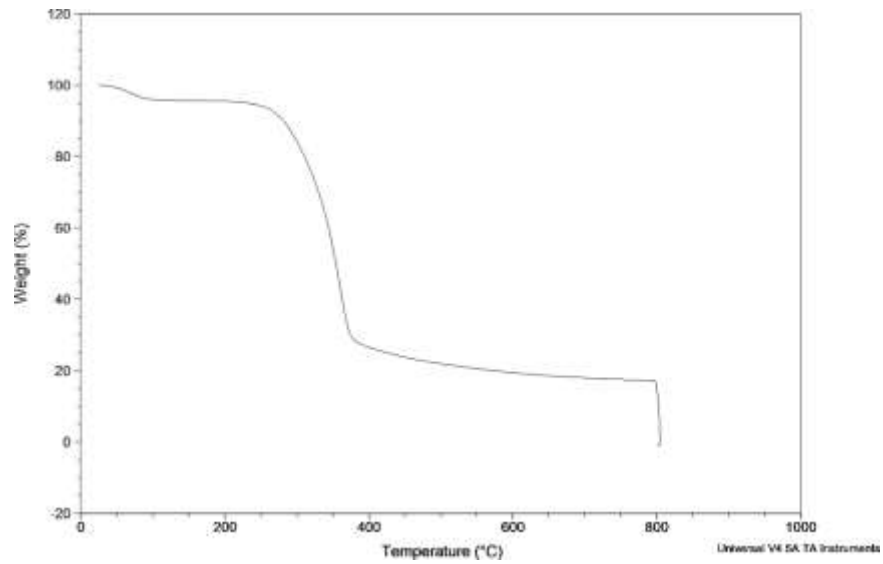
**Figura 18.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-7.



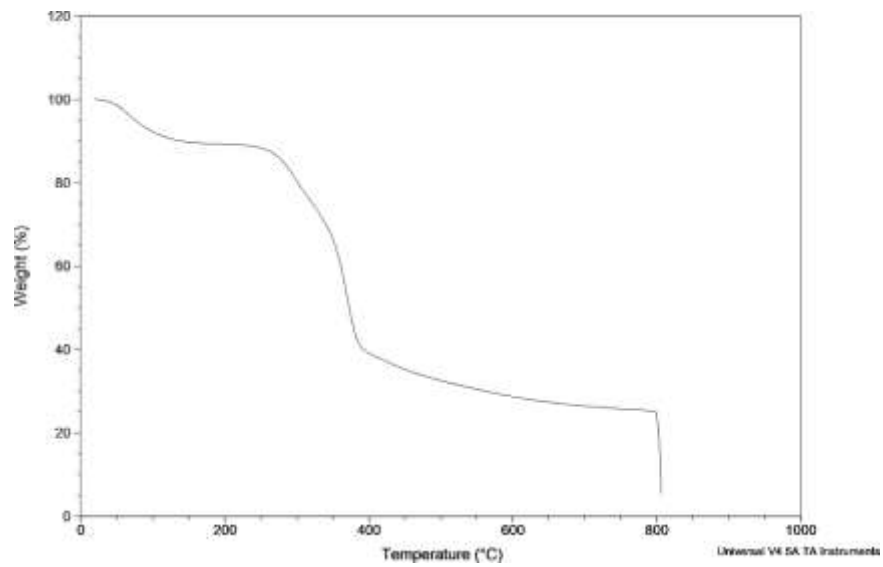
**Figura 19.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-8.



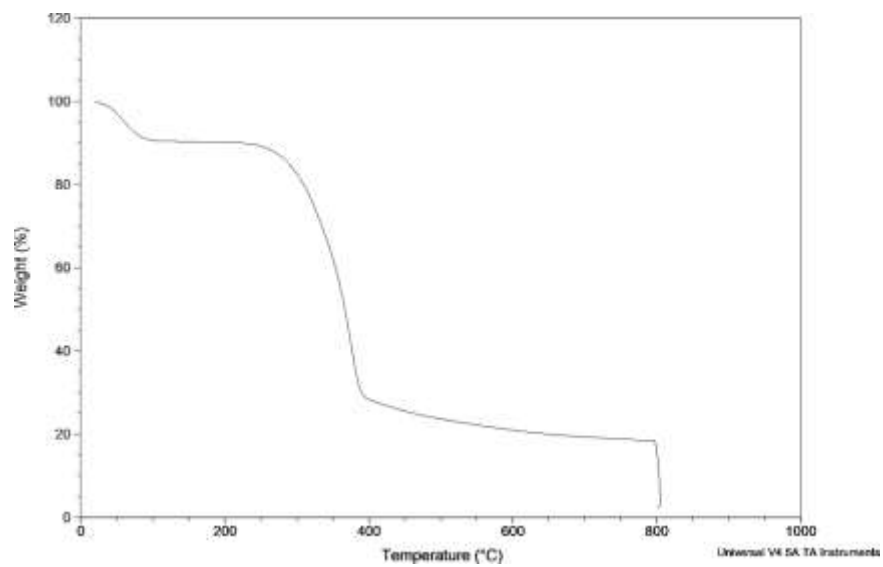
**Figura 20.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-9.



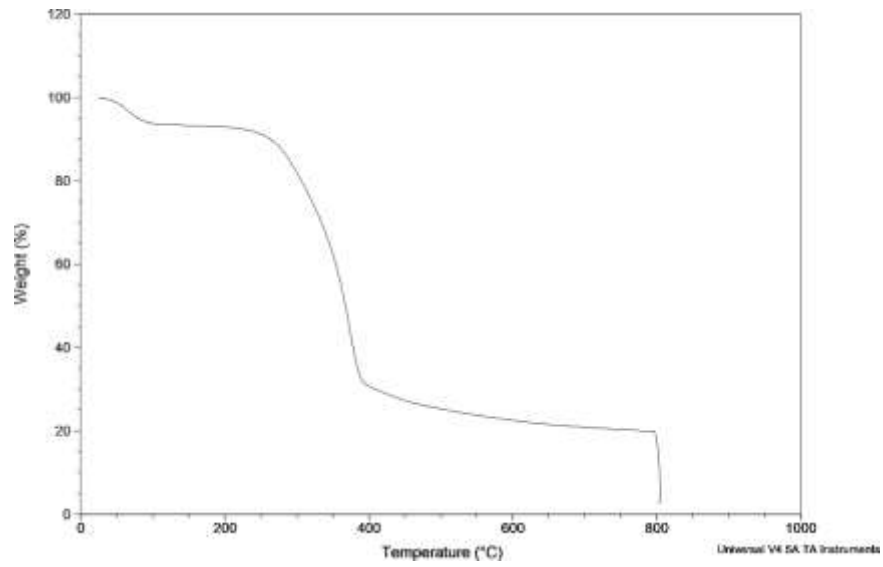
**Figura 21.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-10.



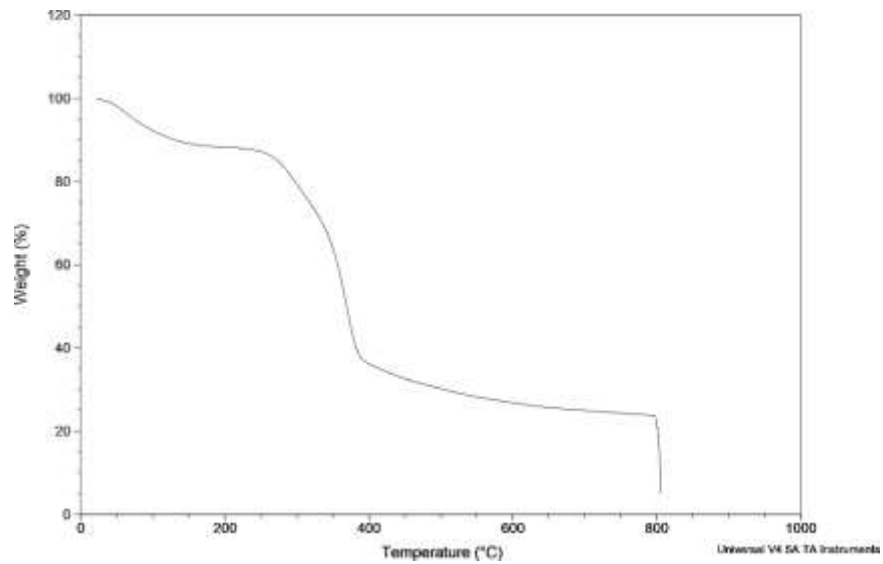
**Figura 22.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-11.



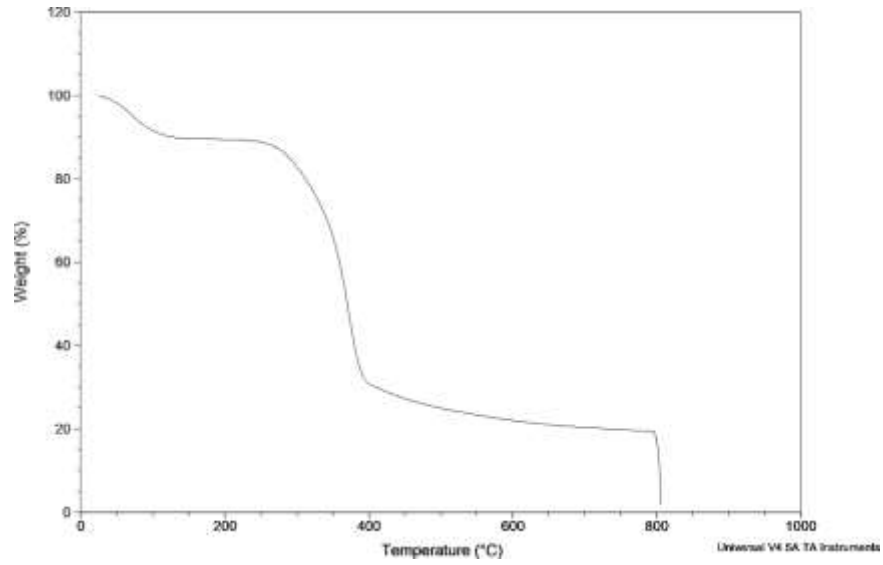
**Figura 23.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-12.



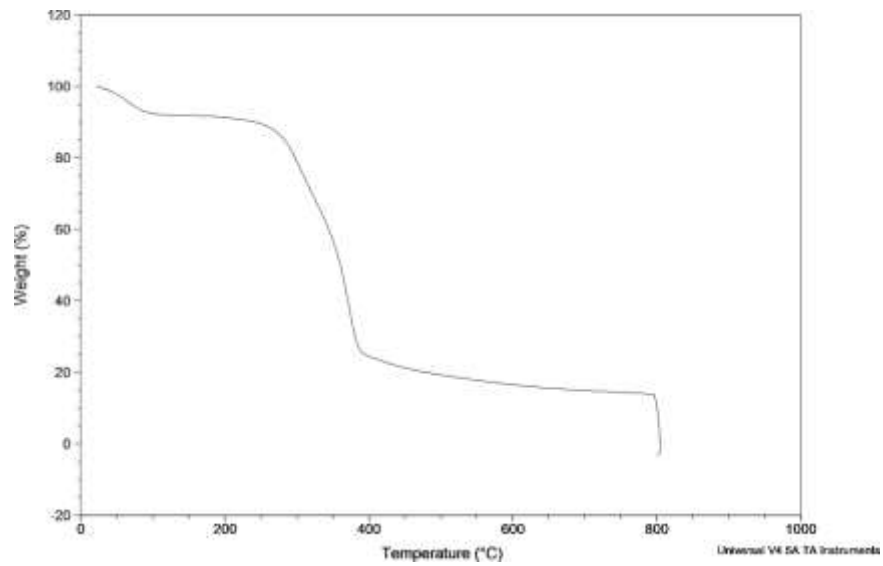
**Figura 24.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-13.



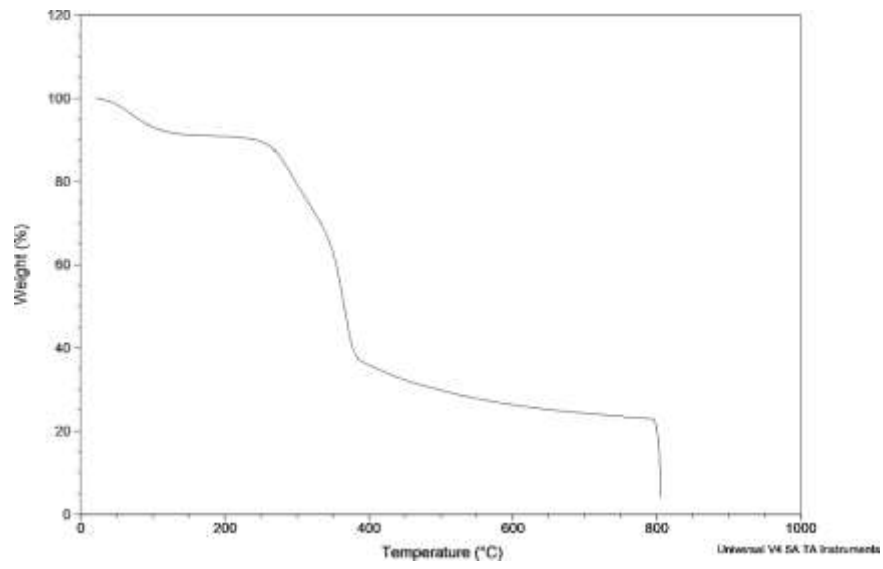
**Figura 25.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-14.



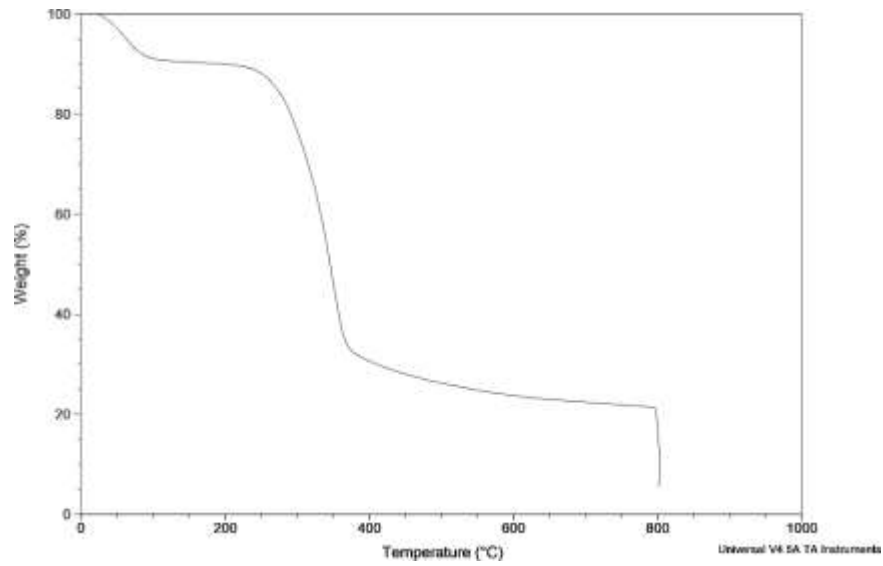
**Figura 26.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-15.



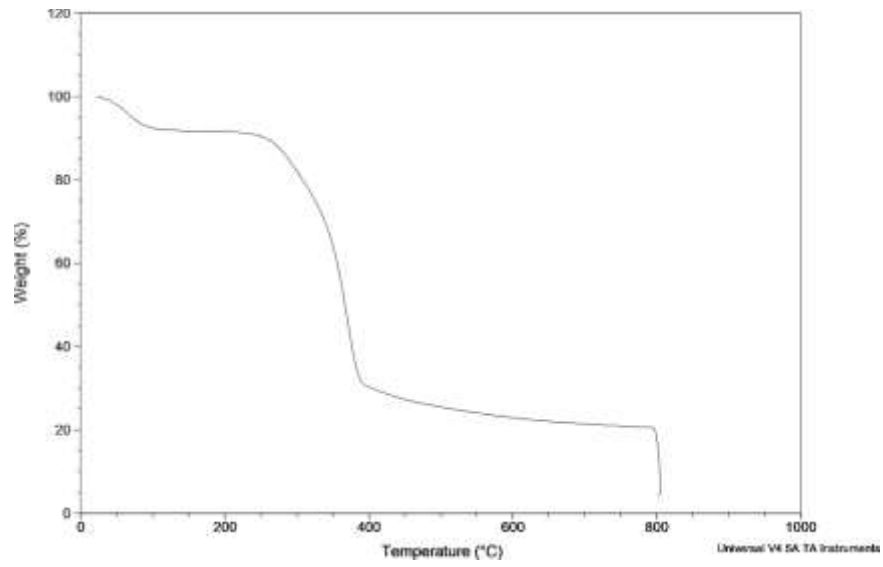
**Figura 27.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-16.



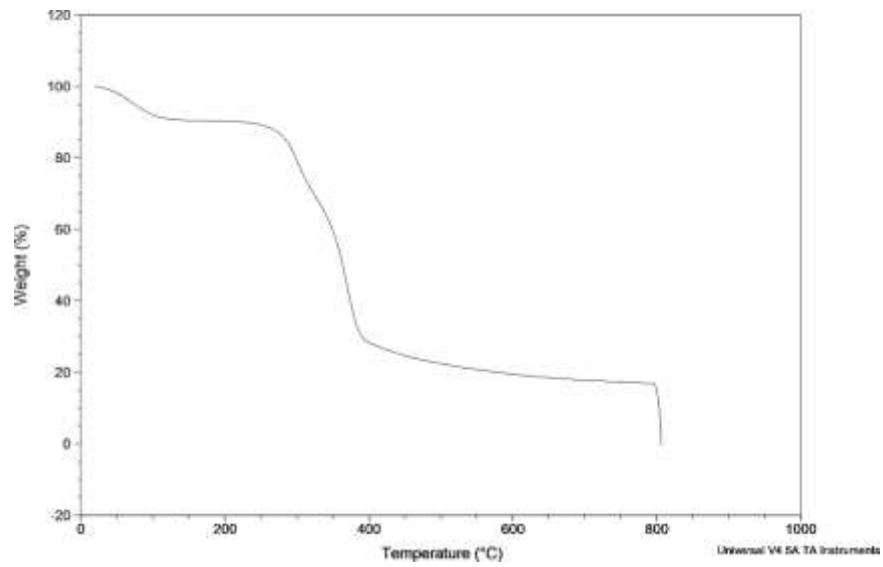
**Figura 28.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-17.



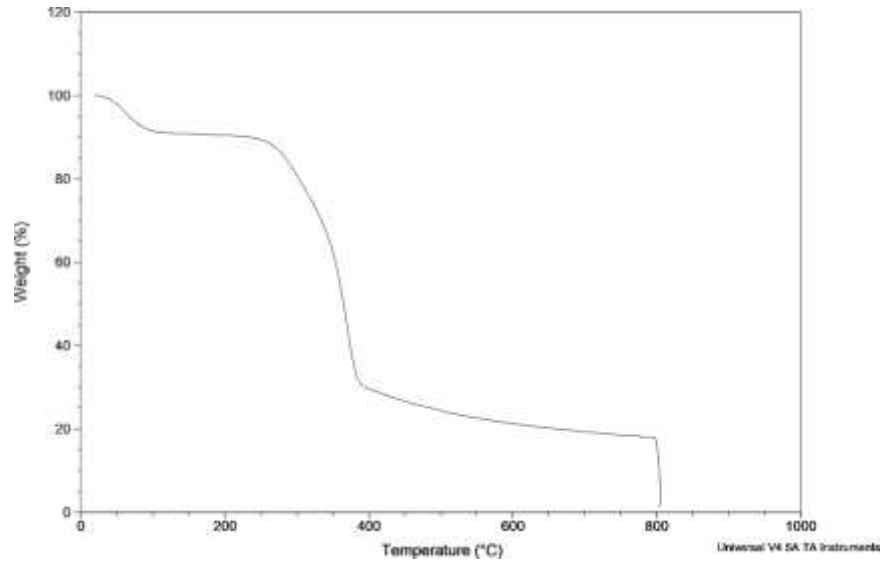
**Figura 29.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-18.



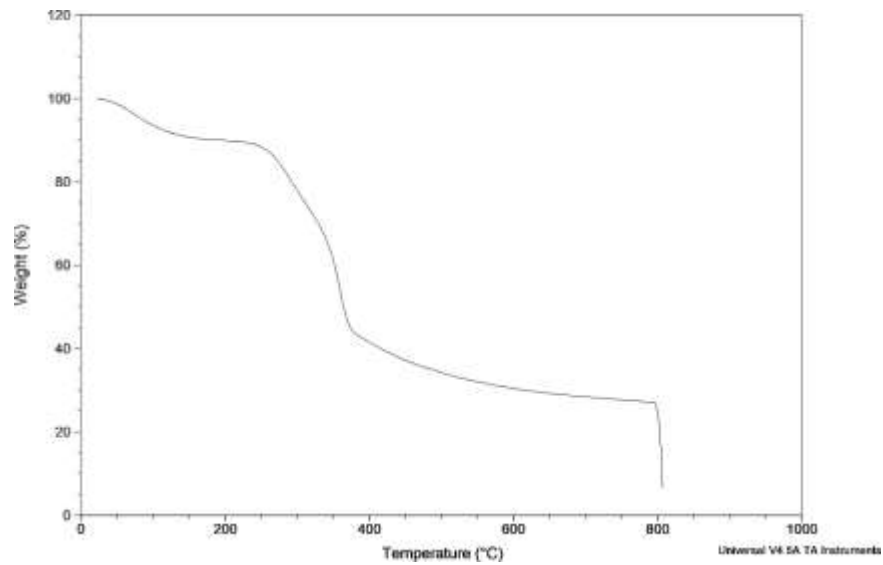
**Figura 30.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-19.



**Figura 31.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-20.

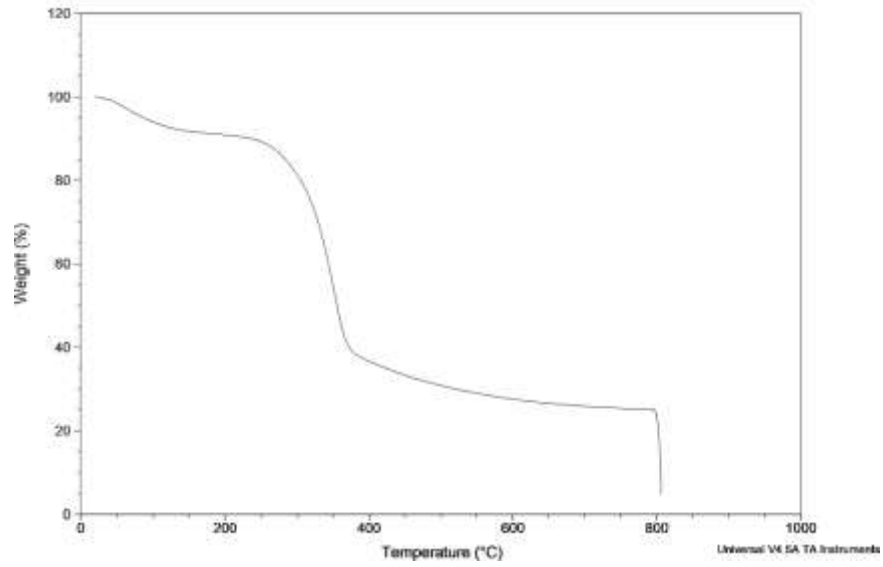


**Figura 32.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-21.

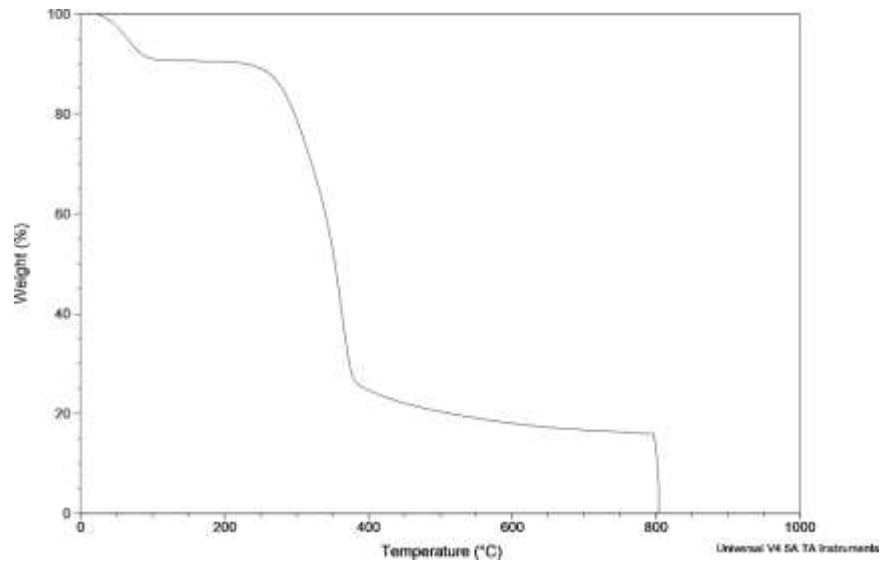


**Figura 33.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-22.

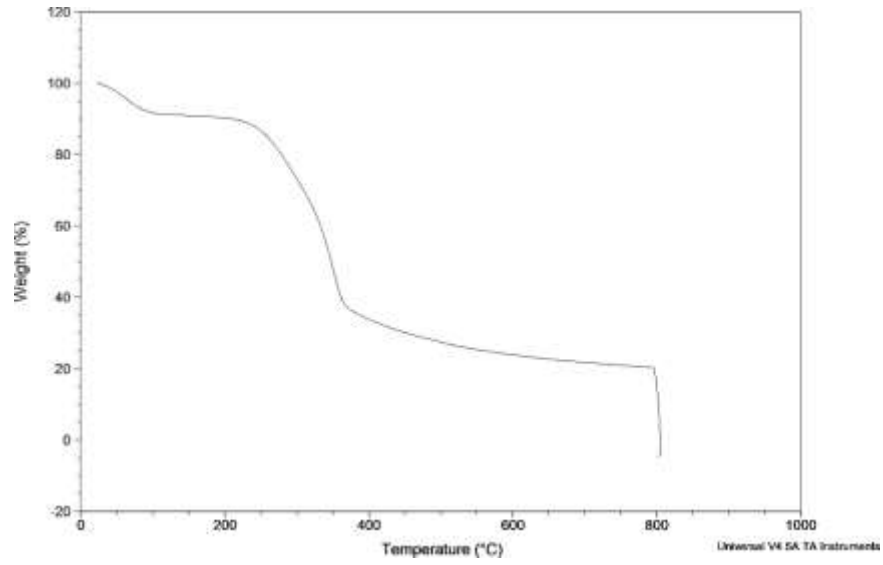




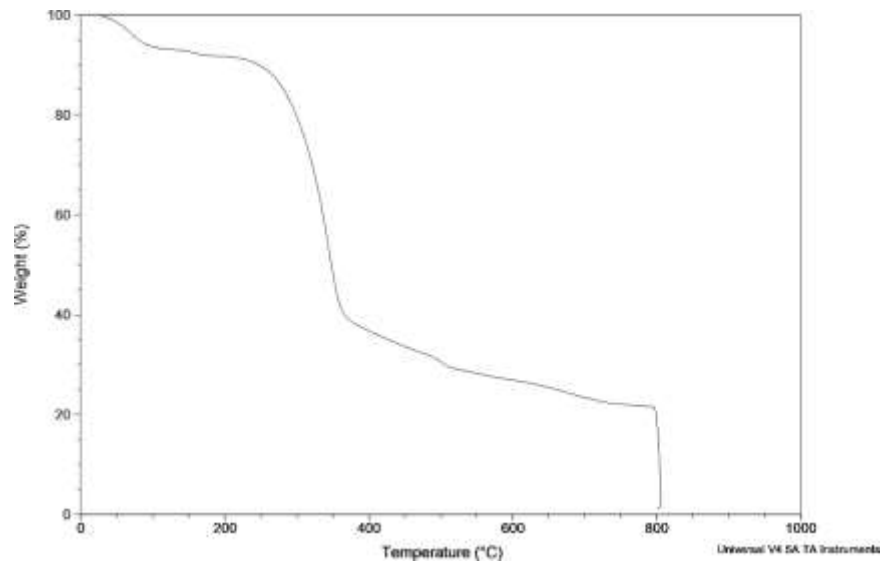
**Figura 34.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-23.



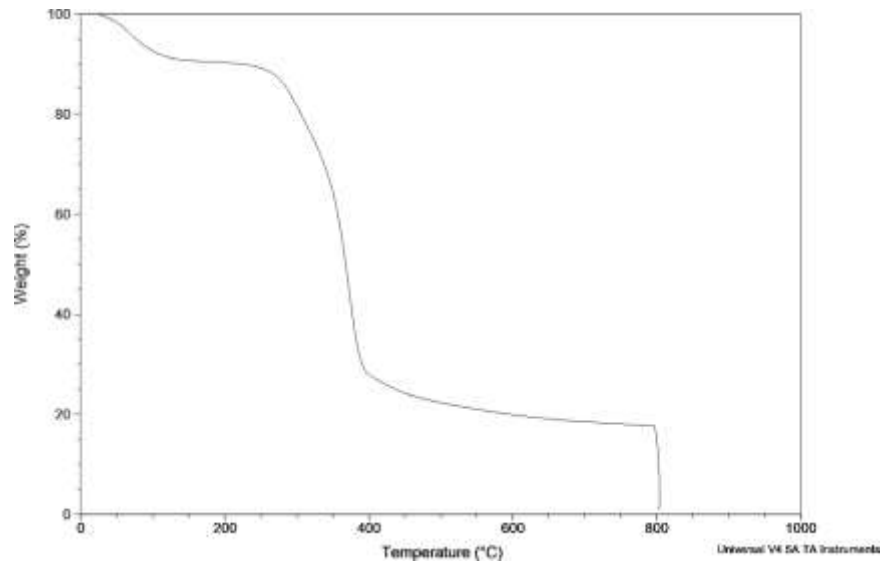
**Figura 35.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-24.



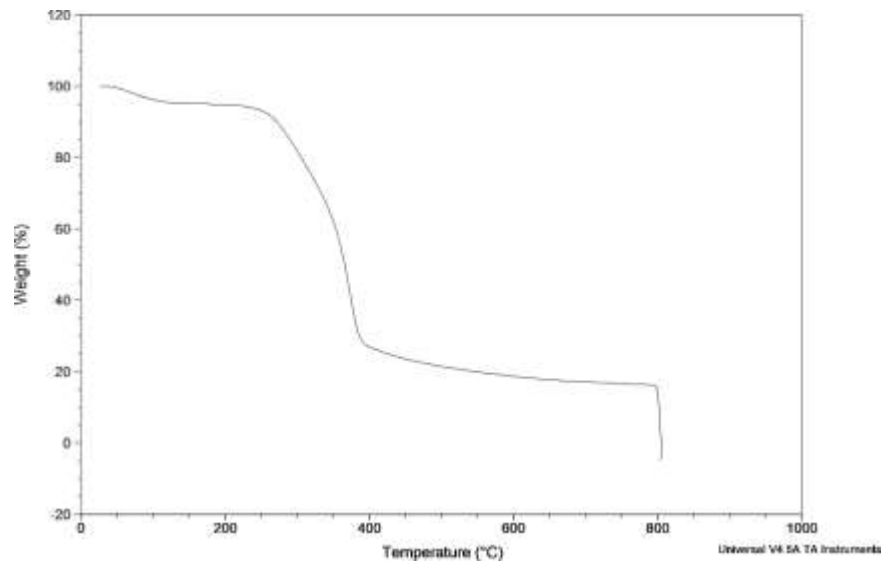
**Figura 36.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-25.



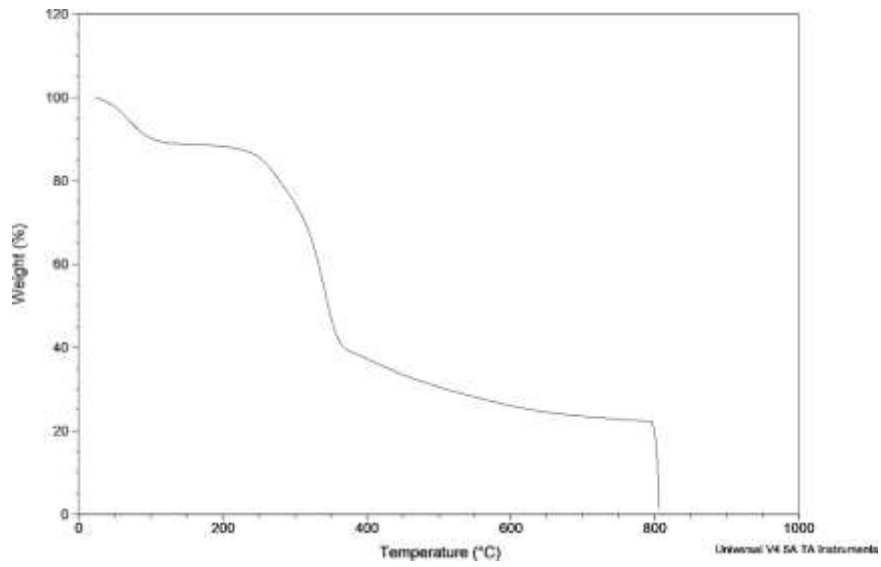
**Figura 37.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-26.



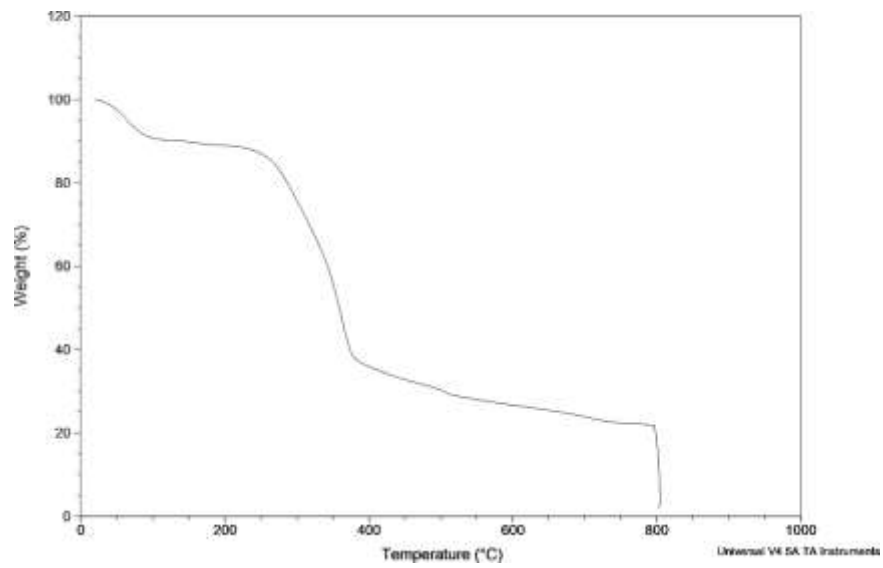
**Figura 38.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-27.



**Figura 39.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-28.



**Figura 40.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-29.



**Figura 41.** Análisis de termogravimetría en la muestra 1670419-30.