

## Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier

### Identification of spectral and colorimetric reflectance patterns of dry wood of *Peltogyne purpurea* Pittier

### Identificação de padrões de refletância espectral e colorimétrica em madeira seca de *Peltogyne purpurea* Pittier

Juan Carlos Valverde<sup>1\*</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>

Dagoberto Arias Aguilar<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

Kevin Arias<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9911-4515>

Marvin Castillo<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1214-7029>

Cornelia Miller<sup>3</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6875-6910>

Heileen Aguilar<sup>3</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5838-3225>

Daniel Flores<sup>3</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5010-0083>

<sup>1</sup>Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (ECOPLANT), Costa Rica.

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

<sup>3</sup>Laboratorio PRIAS, Centro Nacional de Alta Tecnología. Costa Rica.

\*Autor para la correspondencia: [jcvalverde@itcr.ac.cr](mailto:jcvalverde@itcr.ac.cr)

**Recibido:** 12 de mayo de 2020.

**Aprobado:** 10 de junio de 2020.

## RESUMEN

Se determinaron los patrones hiperespectrales y colorimétricos a partir 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 solitarios), densidad madera, color (CIELab) y reflectancia hiperespectral en el rango de 310 a 1100 nm en la madera seca, tanto en la sección de la albura como del 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 de vasos de 27,07 poros  $\text{mm}^{-2}$  y diámetro de 148,53  $\mu\text{m}$ . En el análisis de la colorimetría, la luminosidad y  $b^*$  (amarillamiento) fue mayor en albura, pero con valores significativamente menores en  $a^*$  (enrojecido), 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 1 020 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  $L^*$  (luminosidad), mientras que  $a^*$  solo mostró correlaciones inversas a los 580 nm y lineales con  $b^*$  a 580 nm. En este estudio no se encontraron relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

**Palabras clave:** Madera tropical; Espectroradiometría; Anatomía de la madera; CIELab.

## ABSTRACT

Hyperspectral and colorimetric patterns were determined from anatomical and physical aspects for the characterization of dry *Peltogyne purpurea* Pittier wood from natural forest trees. A sample of 24 *P. purpurea* wood discs was taken and anatomical characteristics (density and diameter of vessels, percentage of solitary vessels), wood density, colour (CIELab) and hyperspectral reflectance in the range of 310 to 1 100 nm in the dry wood, both in sapwood and heartwood section, were determined. Significant anatomical differences were found between sapwood and heartwood; a higher presence of solitary vessels was found in sapwood (34.28%) but with a vessel density of 27.07 pores  $\text{mm}^{-2}$  and diameter of 148.53  $\mu\text{m}$ . In the colorimetry analysis, brightness and  $b^*$  (yellowing) were higher in sapwood, but with significantly lower values in  $a^*$  (redness), thus generating a total color difference (higher than 14.55). As regards reflectance, three significant differentiation points were found between both sections, which were at 460, 580 and 1 020 nm; when correlating these three segments, no correlation was found with the anatomical aspects, but with the density of the wood (higher than 0.69), at the color level no relationship was found with the color parameter  $L^*$  (brightness), while  $a^*$  only showed inverse correlations at 580 nm and linear ones with  $b^*$  at 580 nm. In this study no colorimetric relationships with anatomical aspects were found.

**Keywords:** Tropical wood; Spectroradiometry; Wood anatomy; CIELab.

## RESUMO

Os padrões hiper-espectrais e colorimétricos foram determinados a partir de aspectos anatómicos e físicos para a caracterização da Púrpura *Peltogyne* seca Madeira Pittier a partir de árvores florestais naturais. Foi colhida uma amostra de discos de madeira de 24 *P. purpúrea* e foram determinadas características anatómicas (densidade e diâmetro dos vasos, percentagem de vasos solitários), densidade da madeira, cor (CIELab) e refletância hiper-espectral na gama de 310 a 1 100 nm na madeira seca, tanto na secção de borne como de cerne. Foram encontradas diferenças anatómicas significativas entre o borne e o cerne; foi encontrada uma maior presença de vasos solitários no borne (34,28%), mas com uma densidade de vasos de 27,07 poros/ $\text{mm}^2$  e um diâmetro de 148,53  $\mu\text{m}$ . Na análise colorimétrica, o brilho e  $b^*$  (aparelhamento) foram maiores no borne, mas com valores significativamente menores em  $a^*$  (avermelhamento), gerando assim uma diferença de cor total (superior a 14,55). No que respeita à refletância, foram encontrados três pontos de diferenciação significativos entre as duas secções, que se situavam a 460, 580 e 1



020 nm; ao correlacionar estes três segmentos, não foi encontrada qualquer correlação com os aspectos anatómicos, mas com a densidade da madeira (superior a 0,69), ao nível da cor não foi encontrada qualquer relação com o parâmetro de cor L\* (brilho), enquanto a\* apenas apresentou correlações inversas a 580 nm e lineares com b\* a 580 nm. Neste estudo não foram encontradas relações colorimétricas com aspectos anatómicos.

**Palavras-chave:** Madeira tropical; Espectroradiometria; Anatomia da madeira; 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 (Nabeela *et al.*, 2015; Hallet *et al.*, 2017); es un material que se ha implementado a lo largo de la historia de la humanidad para el desarrollo de estructuras habitacionales, herramientas y fuente de energía (Kiat *et al.*, 2019; Präger *et al.*, 2019). En la actualidad, la demanda mundial de madera continúa en crecimiento debido a su adaptabilidad a condiciones ambientales (Cesprini *et al.*, 2020), bajo requerimiento energético para la transformación del material (Yang *et al.*, 2019), atractivo estético que varía según la especie (Nabeela *et al.*, 2015), y biosostenibilidad que simplifica el manejo de los residuos en comparación a otras materias primas (Hall *et al.*, 2017; Careviac *et al.*, 2019; Kiat *et al.*, 2019).

La región tropical presenta una amplia variedad de especies maderables, lo cual infiere en que la oferta de maderas sea amplia (Simo-Tagne *et al.*, 2016). Costa Rica cuenta con más de 2 000 especies arbóreas identificadas (Powers *et al.*, 2009), pero con caracterizaciones de la madera limitadas a un reducido número de especies en lo que respecta al conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas (Raässa *et al.*, 2014).

La diversidad de especies maderables en las regiones tropicales implica que el mercado de venta sea amplio (Holm *et al.*, 2018), incidiendo que en muchos casos se comercialice una especie mal identificada, lo cual genera en ventas erróneas de especies, se mezclen las especies por características visuales similares o los precios de venta se sobre o subestimen (Schmidt *et al.*, 2019). Existe la necesidad de disponer de sistemas de identificación de especies que permitan la comercialización justa de madera (Knauf, 2016); tradicionalmente, se utilizan características físicas para la identificación (Machado *et al.*, 2019), aspectos como el color, olor, sabor, textura, tipo de nudo, reventaduras o dureza son implementados para diferenciar las maderas (Kobayashi *et al.*, 2019). Sin embargo, hay especies que por su alta similitud o 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; este procedimiento tradicional es un sistema lento, que requiere de especialistas y que en algunos casos precisa de consulta de xilotecas especializadas (Fernández *et al.*, 2019).

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 (Ruffinatto *et al.*, 2014; Whitau *et al.*, 2016). Se han implementado metodologías y tecnologías variadas como sensores de olor (Schreiner *et al.*, 2018), sistemas de identificación a partir de DeepLearning en aplicaciones portables (Affonso *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2019) e identificación de patrones hiperespectrales (Bonifazi



*et al.*, 2015). Esta última técnica, la hiperespectroscopía, consiste en la recopilación y procesamiento de información a lo largo de todo el espectro electromagnético (Li *et al.*, 2019). Su implementación ha sido ampliada a varias temáticas científicas (Hänel *et al.*, 2019), por ejemplo, en el uso en sensores remotos para la identificación de coberturas (Yuan *et al.*, 2019), calidad de alimentos (Baiano, 2017), microbiología (Herrero-Langreo, 2020) y ciencias farmacológicas (Wilczyński *et al.*, 2016). Además de la identificación de variedades y grados de nutrición en especies agrícolas con fines productivos (Yang *et al.*, 2010).

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 (Chi *et al.*, 2016), diferenciador de efectos de condiciones adversas del suelo (Tan *et al.*, 2020), diferenciador de plantas con presencia de patógenos (Ulrici *et al.*, 2013), diferenciador de especies (Liu *et al.*, 2019). 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 (Chi *et al.*, 2016) y que han permitido relacionarlos con variables como color de lámina foliar, contenido de humedad foliar, densidad de nervaduras y tasa de crecimiento (Li *et al.*, 2019). 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 (Chi *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2019).

Sin embargo, con muestras de maderas, los estudios que se han desarrollado con hiperespectroscopía han sido limitados. Estudios desarrollados por Tan *et al.*, (2020) 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, Kobayashi *et al.*, (2019) encontró para diez especies del género *Eucalyptus* spp. que no hay diferencias colorimétricas entre ellas, pero sí las respectivas firmas hiperespectrales entre los 550 y 710 nm, hallando puntos de reflectancia únicos para cada especie. Por su parte, Colares *et al.*, (2016) con la especie *Swetenia macrophylla*, determinó 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 Mvondo (2017). Finalmente, Schmidt *et al.*, (2019) determinó para cinco especies del género *Pinus* spp. correlaciones entre la reflectancia hiperespectral entre 800 y 1 000 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 hiperespectrales 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.



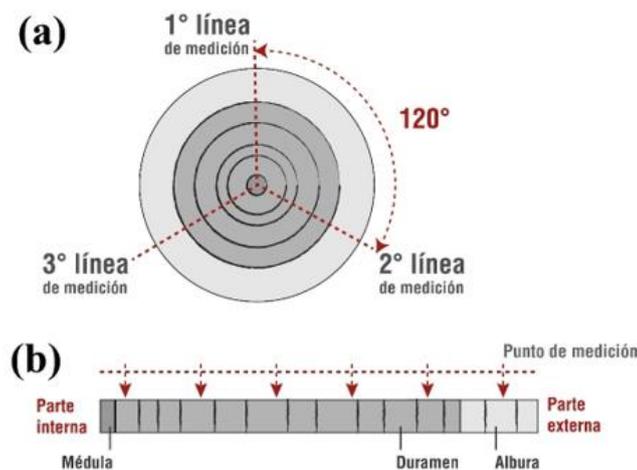
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Especie y sitio de estudio

Se colectaron y prepararon 24 segmentos de fuste (secciones transversales, la cantidad de muestras seleccionadas se basó en disponer una potencia estadística del 95 %) de seis árboles de *Peltogyne purpurea* Pittier (cuatro muestras por árbol distanciadas a 4,5 m aproximadamente). Los segmentos de madera provenían 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°53'38" N y 83°30'51" O). El sitio se caracterizó por tener una altitud de 350 m, con una temperatura media anual de 32 °C y precipitación anual de 4 500 mm; la topografía del terreno fue moderadamente ondulada, con pendientes hasta de 35° y suelos arcillosos. La densidad de árboles con más de 10 cm de diámetro en el bosque fue de 245 árboles. Los árboles seleccionados se distinguieron por tener un diámetro a 1,3 m sobre nivel de suelo, superior a 45 cm y estar en un mismo rango de edad, condición fistosanitaria y condiciones ambientales.

### Procedimiento de medición de variables

En cada segmento de fuste se midió su contenido de humedad con el fin de que fuera uniforme y evitara ser una fuente de variación (el 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 1), cada radio se distanció a 120° 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 1.** - 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 de la 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 1 100 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 connectors", 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 el fin de evitar sesgos en la medición por efecto de la luz externa. Todas las 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. Analiza 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 6 500 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 ( $\Delta E^*$ ) que 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 de color entre las fotografías y muestras físicas y con ello identificar el grado de representatividad del color, utilizando las categorías de **Cuiet al. (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 (Ecuación 1).

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

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 y 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.*, (2018).

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 caso de presentar diferencias significativas en los resultados, se aplicó la prueba de Tukey para la comparación de las medias.

En el 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 Romero-Ramírez *et al.*, (2015), 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, a 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 (ACP) 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 significación 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 27,07 poros mm<sup>-2</sup> y diámetro promedio de 148,53 μm (Tabla 1).



**Tabla 1.** - Densidad y caracterización anatómica 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
<b>Densidad (g cm<sup>-3</sup>)</b>	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)
<b>Porcentaje de vasos solitarios</b>	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)
<b>Densidad de vasos (poros mm<sup>-2</sup>)</b>	25,1 <sup>a</sup> (0,9)	27,1 <sup>b</sup> (0,6)	27,0 <sup>b</sup> (0,6)	27,1 <sup>b</sup> (0,7)	27,0 <sup>b</sup> (0,8)	27,1 <sup>b</sup> (0,8)
<b>Diámetro promedio vasos</b>	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 ( $P < 0,05$ ); valores entre paréntesis corresponden a desviación estándar.

### Variación colorimétrica

A nivel colorimétrico (Tabla 2) 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.



**Tabla 2.-** 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
<b>L*</b>	56,80 <sup>a</sup>	40,54 <sup>b</sup>	42,15 <sup>b</sup>	44,50 <sup>b</sup>	41,71 <sup>b</sup>	41,44 <sup>b</sup>
	(6,15)	(5,87)	(6,00)	(7,22)	(5,15)	(5,89)
<b>a*</b>	1,20 <sup>a</sup>	29,12 <sup>b</sup>	30,01 <sup>b</sup>	29,77 <sup>b</sup>	29,91 <sup>b</sup>	28,20 <sup>b</sup>
	(3,89)	(2,11)	(2,01)	(1,95)	(2,17)	(1,55)
<b>b*</b>	1,81 <sup>a</sup>	1,06 <sup>b</sup>	0,99 <sup>b</sup>	1,29 <sup>b</sup>	1,60 <sup>b</sup>	1,16 <sup>b</sup>
	(2,24)	(0,41)	(0,88)	(0,22)	(0,31)	(0,28)
<b>ΔE* (1)</b>	-	14,55 <sup>a</sup>	15,15 <sup>b</sup>	16,00 <sup>b</sup>	15,47 <sup>b</sup>	16,15 <sup>b</sup>
		(2,16)	(2,99)	(2,11)	(2,72)	(3,02)

**Nota:** letras diferentes muestran diferencias significativas ( $P < 0,05$ ); valores entre paréntesis corresponden a desviación estándar. <sup>(1)</sup> Datos del  $\Delta E^*$  se estimaron entre la albura con respecto a cada valor de duramen de las muestras

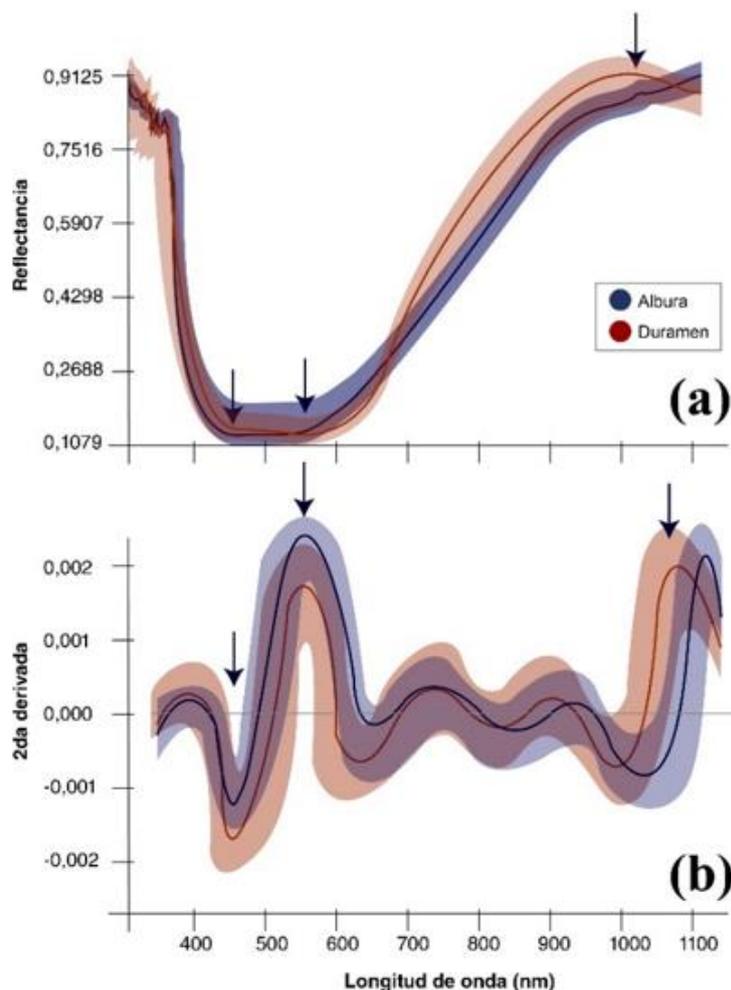
### Comportamiento de reflectancia de la madera

Con la reflectancia (Figura 2a) 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 a 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 fue en aumento 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 1 020 nm, en la que el 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 2b), encontrando con ello las siguientes características: la variación de la reflectancia de la segunda derivada es de  $\pm 0,0025$ , lo que implica que es una variación homogénea; 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; entre los 590 y 1 000 nm hay oscilaciones comunes entre albura y duramen que no muestran significancia, siendo un comportamiento similar entre ambas secciones; de los 310 a 400 nm y de los 1 050 a 1 100 nm las variaciones obtenidas no son representativas debido a la gran variación de reflectancia de dichos segmentos que la segunda derivada no es representativa.

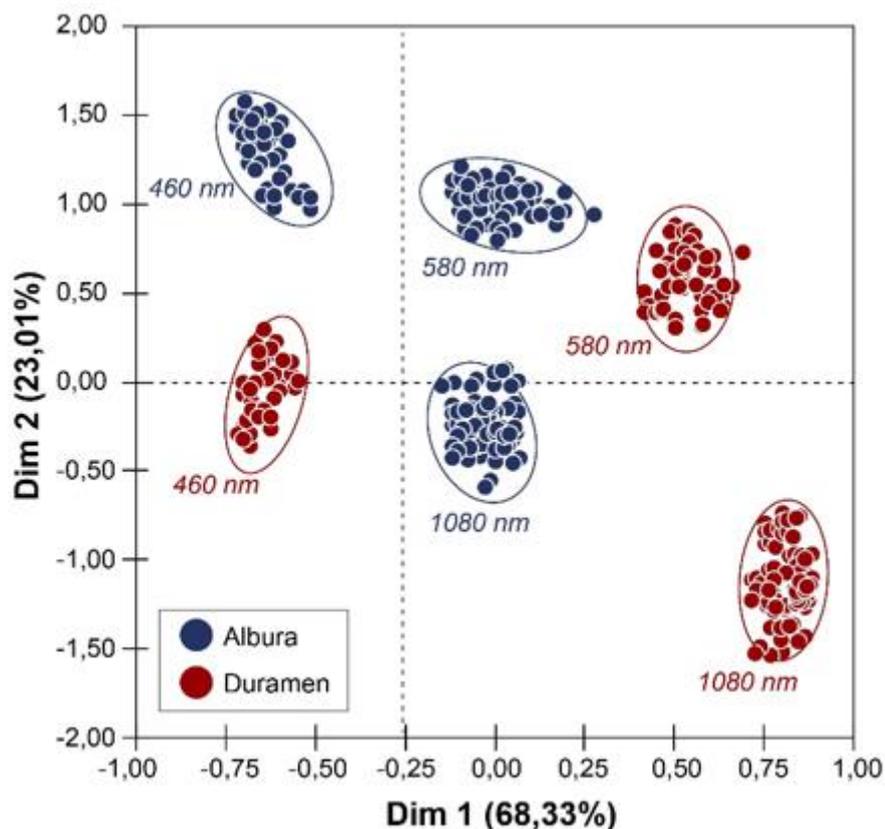


Al determinar el grado de variación con significancia de la reflectancia espectral (Figura 2 a) se confirmó estadísticamente que a los 460, 580 y 1 020 nm las diferencias son significativas, con valores de diferenciación del 65 a 82 %, considerados como altos y permisibles a ser considerados como criterios 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 1 020 nm es del 88 % entre ambas secciones. Con respecto al análisis de componentes principales (Figura 3) se encontraron agrupaciones de los datos de albura y duramen de las tres longitudes de reflectancia analizadas que tendieron a mostrar agrupaciones diferenciadas.



**Figura 2.** - 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





**Figura 3.** - ACP de los tres puntos de longitud de onda; la reflectancia de las secciones de albura y duramen mostraron diferencias 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 (Tabla 3), 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 1 020 nm 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.



**Tabla 3.** - Análisis de correlación de Pearson de los principales tres puntos de longitud de onda, en los que la reflectancia mostró significancia con datos físicos y anatómicos de las secciones de albura y duramen en madera seca de *P. purpurea*

Variables	Porcentaje Densidad de Diámetro			Reflectancia 460 nm	Reflectancia 580 nm	Reflectancia 1 080 nm	
	Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	de vasos solitarios (%)	vasos (poros mm <sup>-2</sup> )				promedio vasos (µm)
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )		0,19 NS	0,85*	0,79*	0,69*	0,74*	0,69*
Porcentaje de vasos solitarios (%)	0,16 NS		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*		0,70*	0,28 NS	0,09 NS	0,08 NS
Diámetro promedio vasos (µm)	0,90*	0,45 NS	0,76*		0,30 NS	0,15 NS	0,10 NS
Reflectancia 460 nm	0,55*	0,23 NS	0,22 NS	0,11 NS		0,15 NS	0,33 NS
Reflectancia 580 nm	0,59*	0,16 NS	0,05 NS	0,19 NS	0,15 NS		0,22 NS
Reflectancia 1 080 nm	0,72*	0,30 NS	0,02 NS	0,03 NS	0,33 NS	0,22 NS	

**Nota:** NS: diferencias no significativas ( $P < 0,05$ ); parte superior de la diagonal corresponde a las correlaciones de albura, parte inferior al duramen

En la correlación entre las tres longitudes relevantes de reflectancia espectral con el color en formato CIELab (Tabla 4), nuevamente se evidenció 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.



**Tabla 4.** - Análisis de correlación de Pearson de los principales puntos de reflectancia y datos de color Lab en las secciones de albura y duramen en madera seca de *P. purpurea*

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

**Nota:** NS: diferencias no significativas ( $P < 0,05$ ); parte superior de la diagonal corresponde a las correlaciones de albura, parte inferior 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 la albura, región que se caracteriza por ser la parte activa del xilema (Cao *et al.*, 2019). Estudios desarrollados por Colares *et al.*, (2016) encontraron para doce especies tropicales que el tejido xilemático de la albura es activo y moviliza entre un 10 y 20 % más de 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 en que la coloración de la madera sea mayor (mayor oscuridad del color). Colares *et al.*, (2016) 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 en que su diámetro sea menor y que en algunos casos los vasos se llenen, provocando que en el momento de cuantificación de la densidad de vasos se disminuyan. Por su parte, Machado *et al.*, (2019) 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 en 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 en que la densidad de la madera aumente y que se den cambios en la coloración de la madera; Fernández *et al.*, (2019) determinaron para tres especies latifoliadas que el aumento de la densidad de la madera del duramen se debe a las características de acumulación y movilización de nutrientes de latifoliadas, que tiende a almacenar nutrientes y en especial soluciones orgánicas en el duramen para ser empleadas en el momento en que la especie se someta al estrés hídrico, pues al presentar vasos más cerrados, la pérdida de nutrientes y agua por presiones negativas del suelo es menor, lo cual le permite una mayor probabilidad de sobrevivencia de la especie. Mientras, la



diferenciación colorimétrica entre albura y duramen, según Yang *et al.*, (2019), 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, debido a la actividad celular, movilidad hidráulica de la especie, que al momento de ser cortada y disminuir 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. Chi *et al.*, (2016) mencionan que, según sea menor 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 hiperspectral**

Los resultados no presentaron una correlación directa con aspectos anatómicos, esto se debió según Chi *et al.*, (2016), 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 que la presencia de extraíbles incide en que aumente la absorción de luz. Corales *et al.*, (2016), 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, sustancias extraíbles y hemicelulosa, que fueron mayores en el duramen que en la albura, lo cual permitió encontrar diferencias a los 490, 700 y 1 050 nm; en caso de la densidad de la 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 la reflectancia en el espectro visible y en el infrarrojo, por lo 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 de que 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 a la inversa con  $a^*$ . Según Hall *et al.*, (2017), en el sistema CIELab la coordenada  $b^*$  es la que infiere en 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 Holm *et al.*, (2018) se debe a que es una variable que tiene mayor relación con la absorción de la luz por parte de la superficie, en caso de 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 hiperspectral 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 Kiat *et al.* (2018), a nivel de maderas, los estudios han sido limitados, pero la potencialidad de aplicación es amplia. Liu *et al.*, (2019) 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, y a su vez la potencialidad de coloración de la madera al estar seca. Por su parte, Schmidt *et al.* (2019) 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.

*Powers et al.*, (2009) destacan que se debe ver la reflectancia como 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.

Se encontraron diferencias significativas a nivel anatómico entre la sección maderable de albura y duramen.

La albura presentó una mayor cantidad de vasos solitarios (38,4 %), una densidad de vasos mayores con 27,07 poros  $\text{mm}^{-2}$  y un diámetro de vasos promedio de 148,53  $\mu\text{m}$ .

El duramen presentó una densidad de madera significativamente mayor (0,78  $\text{g cm}^{-3}$ ).

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 1 020 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 y de tipo lineal con  $b^*$  a los 580 nm. Finalmente, no se encontraron relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFONSO, C., ROSSI, A.L.D., VIEIRA, F.H.A. y DE CARVALHO, A.C.P. de L.F., (2017). Deep learning for biological image classification. *Expert Systems with Applications* [en línea], vol. 85, pp. 114-122. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0957-4174. DOI 10.1016/j.eswa.2017.05.039. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417417303627>.
- BAIANO, A., (2017). Applications of hyperspectral imaging for quality assessment of liquid based and semi-liquid food products: A review. *Journal of Food Engineering* [en línea], vol. 214, pp. 10-15. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0260-8774. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.012. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417302546>.



- BONIFAZI, G., CALIENNO, L., CAPOBIANCO, G., LO MONACO, A., PELOSI, C., PICCHIO, R. y 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* [en línea], vol. 113, pp. 10-21. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0141-3910. DOI 10.1016/j.polyimdegstab.2015.01.001. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391015000129>.
- CAO, X., GE, Y., LI, R., ZHAO, J. y JIAO, L., (2019). Hyperspectral imagery classification with deep metric learning. *Neurocomputing* [en línea], vol. 356, pp. 217-227. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0925-2312. DOI 10.1016/j.neucom.2019.05.019. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231219306800>.
- CAREVIÆ, I., SERDAR, M., ŠTIRMER, N. y UKRAINCZYK, N., (2019). Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 229, pp. 1045-1064. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.321. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619314180>.
- CESPRINI, E., RESENTE, G., CAUSIN, V., URSO, T., CAVALLI, R. y ZANETTI, M., (2020). Energy recovery of glued wood waste A review. *Fuel* [en línea], vol. 262, pp. 116520. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/j.fuel.2019.116520. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119318745>.
- CHI, G., MA, J., SHI, Y. 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* [en línea], vol. 71, pp. 609-617. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1470-160X. DOI 10.1016/j.ecolind.2016.06.014. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16303144>.
- COLARES, C.J.G., PASTORE, T.C.M., CORADIN, V.T.R., MARQUES, L.F., MOREIRA, A.C.O., ALEXANDRINO, G.L., POPPI, R.J. y BRAGA, J.W.B., (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* [en línea], vol. 124, pp. 356-363. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0026-265X. DOI 10.1016/j.microc.2015.09.022. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X15002234>.
- DE SOUSA FERNANDES, D.D., DE ALMEIDA, V.E., FONTES, M.M., DE ARAÚJO, M.C.U., VÉRAS, G. y DINIZ, P.H.G.D., (2019). Simultaneous identification of the wood types in aged cachacas and their adulterations with wood extracts using digital images and SPA-LDA. *Food Chemistry* [en línea], vol. 273, pp. 77-84. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0308-8146. DOI 10.1016/j.foodchem.2018.02.035. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618302620>.



- FENG, Y., JIANLONG, L., XIAOYU, G., YURONG, Q., XIAOLING, W. y QI, Y., (2010). Assessing nutritional status of *Festuca arundinacea* by monitoring photosynthetic pigments from hyperspectral data. *Computers and Electronics in Agriculture* [en línea], vol. 70, no. 1, pp. 52-59. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0168-1699. DOI 10.1016/j.compag.2009.08.010. Disponible en: <https://europepmc.org/article/agr/ind44306392>.
- HALL, E.M., BRADY, S.P., MATTHEUS, N.M., EARLEY, R.L., DIAMOND, M. y CRESPI, E.J., (2017). Physiological consequences of exposure to salinized roadside ponds on wood frog larvae and adults. *Biological Conservation* [en línea], vol. 209, pp. 98-106. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0006-3207. DOI 10.1016/j.biocon.2017.02.013. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320716304517>.
- HERRERO-LANGREO, A., SCANNELL, A.G.M. y GOWEN, A., (2020). Chapter 3.5 - Hyperspectral imaging for food-related microbiology applications. En: J.M. AMIGO (ed.), *Data Handling in Science and Technology* [en línea]. S.I.: Elsevier, Hyperspectral Imaging, pp. 493-522. [Consulta: 13 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444639776000201>.
- HOLM, S., THEES, O., LEMM, R., OLSCHESKI, R. y HILTY, L.M., (2018). An agent-based model of wood markets: Scenario analysis. *Forest Policy and Economics* [en línea], vol. 95, pp. 26-36. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1389-9341. DOI 10.1016/j.forpol.2018.07.005. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138993411830234X>.
- KIAT, P.E., MALEK, M.A. y SHAMSUDDIN, S.M., (2020). Net carbon stocks change in biomass from wood removal of tropical forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of King Saud University - Science* [en línea], vol. 32, no. 1, pp. 1096-1099. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1018-3647. DOI 10.1016/j.jksus.2019.09.012. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364719317835>.
- 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* [en línea], vol. 66, pp. 18-21. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1389-9341. DOI 10.1016/j.forpol.2016.02.004. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934116300156>.
- KOBAYASHI, K., HWANG, S.-W., OKOCHI, T., LEE, W.-H. y SUGIYAMA, J., (2019). Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data. *Journal of Cultural Heritage* [en línea], vol. 38, pp. 88-93. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1296-2074. DOI 10.1016/j.culher.2019.02.001. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207418306927>.
- LI, F., LU, H. y ZHANG, P., (2019). An innovative multi-kernel learning algorithm for hyperspectral classification. *Computers & Electrical Engineering* [en línea], vol. 79, pp. 106456. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0045-7906. DOI 10.1016/j.compeleceng.2019.106456. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790619309693>.



- LIU, Y., ZHOU, S., HAN, W., LIU, W., QIU, Z. y LI, C., (2019). Convolutional neural network for hyperspectral data analysis and effective wavelengths selection. *Analytica Chimica Acta* [en línea], vol. 1086, pp. 46-54. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0003-2670. DOI 10.1016/j.aca.2019.08.026. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267019309675>.
- MACHADO, J.S., PEREIRA, F. y QUILHÓ, T., (2019). Assessment of old timber members: Importance of wood species identification and direct tensile test information. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 207, pp. 651-660. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.168. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819304635>.
- MVONDO, R.R.N., MEUKAM, P., JEONG, J., MENESES, D.D.S. y NKENG, E.G., (2017). Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics* [en línea], vol. 7, pp. 2096-2103. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 2211-3797. DOI 10.1016/j.rinp.2017.06.025. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379717304862>.
- NABEELA, F., MURAD, W., KHAN, I., MIAN, I.A., REHMAN, H., ADNAN, M. y AZIZULLAH, A., (2015). Effect of wood ash application on the morphological, physiological and biochemical parameters of *Brassica napus* L. *Plant Physiology and Biochemistry* [en línea], vol. 95, pp. 15-25. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0981-9428. DOI 10.1016/j.plaphy.2015.06.017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942815300462>.
- POWERS, J.S., BECKNELL, J.M., IRVING, J. y PÉREZ-AVILES, D., (2009). Diversity and structure of regenerating tropical dry forests in Costa Rica: Geographic patterns and environmental drivers. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 258, no. 6, pp. 959-970. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/j.foreco.2008.10.036. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112708008165>.
- PRÄGER, F., PACZKOWSKI, S., SAILER, G., DERKYI, N.S.A. y PELZ, S., (2019). Biomass sources for a sustainable energy supply in Ghana A case study for Sunyani. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 107, pp. 413-424. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2019.03.016. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301492>.
- RUFFINATTO, F., CREMONINI, C., MACCHIONI, N. y ZANUTTINI, R., (2014). Application of reflected light microscopy for non-invasive wood identification of marquetry furniture and small wood carvings. *Journal of Cultural Heritage* [en línea], vol. 15, no. 6, pp. 614-620. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1296-2074. DOI 10.1016/j.culher.2013.11.013. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413002227>.
- SCHMIDT, C., WESTERMANN, H.-H. y STEINHILPER, R., (2019). An investigation of buzz saw blade cutting forces depending on tool geometry for cutting frozen wood. *Procedia Manufacturing* [en línea], vol. 33, pp. 778-785. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 2351-9789. DOI 10.1016/j.promfg.2019.04.098. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919305797>.



- SCHREINER, B., SONA, B. y LOOS, H., (2018). The smell of wood and its impact on physiological responses. *International Journal of Psychophysiology* [en línea], pp. 131:S40. [Consulta: 13 mayo 2020]. DOI. 10.1016/j.ijpsycho.2018.07.123. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/328060187\\_The\\_smell\\_of\\_wood\\_and\\_its\\_impact\\_on\\_physiological\\_responses](https://www.researchgate.net/publication/328060187_The_smell_of_wood_and_its_impact_on_physiological_responses).
- SIMO-TAGNE, M., RÉMOND, R., ROGAUME, Y., ZOULALIAN, A. y BONOMA, B., (2016). Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. *International Journal of Thermal Sciences* [en línea], vol. 109, pp. 299-308. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 1290-0729. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.012. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072916307232>.
- TAN, K., WANG, H., CHEN, L., DU, Q., DU, P. y 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* [en línea], vol. 382, pp. 120987. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.120987. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389419309410>.
- ULRICI, A., SERRANTI, S., FERRARI, C., CESARE, D., FOCA, G. y BONIFAZI, G., (2013). Efficient chemometric strategies for PETPLA discrimination in recycling plants using hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* [en línea], vol. 122, pp. 31-39. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0169-7439. DOI 10.1016/j.chemolab.2013.01.001. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169743913000129>.
- WHITAU, R., DILKES-HALL, I.E., DOTTE-SAROUT, E., LANGLEY, M.C., BALME, J. y 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* [en línea], vol. 6, pp. 536-546. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 2352-409X. DOI 10.1016/j.jasrep.2016.03.021. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352409X1630089X>.
- WILCZYŃSKI, S., KOPROWSKI, R., MARMION, M., DUDA, P. y BŁOŃSKA-FAJFROWSKA, B., (2016). The use of hyperspectral imaging in the VNIR (4001000nm) and SWIR range (10002500nm) for detecting counterfeit drugs with identical API composition. *Talanta* [en línea], vol. 160, pp. 1-8. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0039-9140. DOI 10.1016/j.talanta.2016.06.057. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914016304830>.
- YANG, H., CHAO, W., WANG, S., YU, Q., CAO, G., YANG, T., LIU, F., DI, X., LI, J., WANG, C. y LI, G., (2019). Self-luminous wood composite for both thermal and light energy storage. *Energy Storage Materials* [en línea], vol. 18, pp. 15-22. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 2405-8297. DOI 10.1016/j.ensm.2019.02.005. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829718313850>.



---

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

**Contribución de los autores:**

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-  
NoComercial 4.0 Internacional.

Copyright (c) 2020 Juan Carlos Valverde, Dagoberto Arias Aguilar, Kevin Arias,  
Marvin Castillo, Cornelia Miller, Heileen Aguilar, Daniel Flores

