

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA DE LA  
MADERA Y EL CARBÓN DE CINCO  
ESPECIES FORESTALES PARA SU  
IDENTIFICACIÓN**

Presentado por:

**Karina Giovanna Bustamante De los Ríos**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO FORESTAL

---

Lima - Perú  
20167

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por la ex-alumna de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **KARINA GIOVANNA BUSTAMANTE DE LOS RÍOS**, intitulado “**CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA DE LA MADERA Y EL CARBÓN DE CINCO ESPECIES FORESTALES PARA SU IDENTIFICACIÓN**”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de .....

En consecuencia queda en condición de ser considerada APTA y recibir el título de **INGENIERO FORESTAL**.

La Molina, 26 de diciembre de 2016

.....  
Mg. Sc. Florencio Trujillo Cuellar  
Presidente

.....  
Mg. Sc. Moisés Acevedo Mallque  
Miembro

.....  
Mg. Sc. Julio Canchucaya Rojas  
Miembro

.....  
Mg. Sc. Manuel Chavesta Custodio  
Asesor

Dr. Héctor Gonzales Mora  
Coasesor

## *DEDICATORIA*

*Gracias mamá por siempre haber estado a mi lado dándome tu apoyo incondicional desde que tengo uso de razón, durante el colegio, pre, universidad. No hay momento importante de mi vida en el que no hayas estado presente, acompañándome y dándome palabras de aliento para salir adelante y no rendirme al primer obstáculo. Gracias por haber hecho de mí, una mujer con principios y valores tal como tú lo eres.*

*Este es uno de los primeros logros profesionales que consigo de la mano contigo y deseo sean muchos más a tu lado, porque eres mi fuente de inspiración y mi empuje día tras día.*

*Te amo Mamá Lucy.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Manuel Chavesta, por haber confiado en mí y permitirme realizar esta investigación bajo su asesoría y por mostrar disposición para que mi tema de estudio salga adelante. Asimismo, por haber compartido parte de sus conocimientos y consejos, además de brindarme las facilidades para trabajar en el laboratorio de Anatomía de la Madera.*

*De la misma manera, quiero agradecer al Dr. Héctor Gonzales por su especial dedicación para poder mejorar la calidad de la investigación, además de sus sabios consejos y también por haberme abierto las puertas del laboratorio de Transformación Química de la Madera.*

## *RESUMEN*

El presente estudio tiene como finalidad describir y caracterizar la estructura anatómica de la madera y carbón de las especies capirona (*Calycophyllum spruceanum*), copaiba (*Copaifera officinalis*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), mango (*Mangifera* sp.) y naranjo (*Citrus* sp.) y comparar las características antes y después del proceso de carbonización. Adicionalmente se realizó un análisis físico-químico al carbón y se verificó a través del microscopio electrónico de barrido, si el carbón molido conserva las características anatómicas, que permitan su diferenciación de otros tipos de carbones. Las muestras de madera empleadas en la investigación se carbonizaron en una mufla a 450°C durante una hora. Luego se tomaron macrofotografías del carbón para compararlas con las macrofotografías de la madera e identificar las características anatómicas que se conservan. Después de la evaluación se determinó que el tipo y distribución de poros, así como el parénquima se mantienen post-carbonización; no obstante el parénquima vasicéntrico de copaiba no se identificó. Las cinco especies en estudio presentaron contracción tangencial de vasos y como consecuencia incremento en el número de poros/mm<sup>2</sup>; asimismo, presentaron grietas en dirección tangencial y perpendicular a los radios; sin embargo, ello no impidió la caracterización, siendo posible la diferenciación de especies e identificación del carbón a través de la descripción anatómica e incluso fragmentos entre 850um a 1500um de carbón molido conservan parte de su estructura anatómica, permitiendo su diferenciación con otros tipos de carbones.

Palabras claves: Carbón vegetal, carbonización, anatomía de la madera, identificación, microscopia de barrido

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Revisión de Literatura</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Identificación de la madera</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Antecedentes de las especies en estudio a nivel madera</b> .....	<b>5</b>
2.1. <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	5
2.2. <i>Copaifera officinalis</i> .....	5
2.3. <i>Dipteryx odorata</i> .....	6
2.4. <i>Mangifera indica</i> .....	7
2.5. <i>Citrus</i> .....	7
<b>3. Antracología</b> .....	<b>11</b>
<b>4. Carbón vegetal en Perú</b> .....	<b>11</b>
<b>5. Antecedentes en identificación del carbón vegetal</b> .....	<b>12</b>
<b>6. Carbón vegetal</b> .....	<b>17</b>
6.1. Propiedades físicas .....	18
6.2. Componentes químicos .....	19
6.3. Proceso de carbonización.....	21
6.4. Usos del carbón vegetal.....	23
<b>III. Materiales y Métodos</b> .....	<b>24</b>
<b>1. Lugar de ejecución</b> .....	<b>24</b>
<b>2. Materiales y equipos de laboratorio</b> .....	<b>24</b>
2.1. Muestras de madera.....	24
2.2. Materiales de laboratorio .....	25
2.3. Equipos de laboratorio .....	26
2.4. Materiales de oficina.....	26
<b>3. Metodología a nivel de madera</b> .....	<b>27</b>
3.1. Selección y colección de muestras .....	27
3.2. Estudio anatómico .....	27
3.3. Preparación de muestras para el estudio anatómico.....	27
3.4. Microtecnica.....	27
3.5. Registros de imágenes .....	29
3.6. Evaluación de resultados.....	29
3.7. Preparación de la clave de identificación.....	29
<b>4. Metodología a nivel de carbón</b> .....	<b>29</b>
4.1. Análisis macroscópico del carbón.....	30
4.2. Medición de elementos xilemáticos.....	30
4.3. Evaluación de resultados.....	30
4.4. Análisis físico-químico del carbón.....	30
4.5. Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) a carbón molido.....	31
<b>IV. Resultados y discusión</b> .....	<b>33</b>
<b>1. Descripción anatómica de la madera</b> .....	<b>33</b>
<b>2. Descripción macroscópica del carbón</b> .....	<b>53</b>
<b>3. Discusión de resultados</b> .....	<b>57</b>
3.1. Características generales, organolépticas y macroscópicas de la madera.....	57
3.2. Características microscópicas de la madera.....	58
3.3. Análisis estadísticos de las dimensiones de los elementos xilemáticos.....	61

3.4.	Análisis comparativo entre la estructura anatómica de la madera y carbón .....	63
3.5.	Características físicas – químicas del carbón vegetal.....	73
3.6.	Análisis de carbón molido .....	77
3.7.	Claves de identificación microscópica.....	81
<b>V.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>VI.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>84</b>
<b>VII.</b>	<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>85</b>
<b>VIII.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>91</b>

## *Índice de tablas*

	Página
Tabla 1: Características macroscópicas y microscópicas de las maderas en base a literatura consultada .....	9
Tabla 2: Especies estudiadas y lugar .....	24
Tabla 3: Características generales y macroscópicas de las cinco especies en estudio .....	59
Tabla 4: Características microscópicas de las cinco especies en estudio.....	60
Tabla 5: Valores estadísticos de las mediciones de elementos leñosos .....	62
Tabla 6: Características macroscópicas del carbón de las cinco especies en estudio.....	66
Tabla 7: Valores estadísticos de las mediciones de diámetro tangencial y frecuencia de poros mm <sup>2</sup> para madera y carbón.....	67



## Índice de figuras

	Página
Figura 1: Madera de <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	35
Figura 2: Sección transversal de <i>Calycophyllum spruceanum</i> a 10x .....	35
Figura 3: Elementos leñosos de <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	35
Figura 4: Sección transversal de <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	36
Figura 5: Sección tangencial de <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	36
Figura 6: Sección radial de <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	36
Figura 7: Madera de <i>Copaifera officinalis</i> .....	39
Figura 8: Sección transversal de <i>Copaifera officinalis</i> (10x) .....	39
Figura 9: Elementos leñosos de <i>Copaifera officinalis</i> .....	39
Figura 10: Sección transversal de <i>Copaifera officinalis</i> .....	40
Figura 11: Sección tangencial de <i>Copaifera officinalis</i> .....	40
Figura 12: Sección radial de <i>Copaifera officinalis</i> .....	40
Figura 13: Madera de <i>Dipteryx odorata</i> .....	43
Figura 14: Sección transversal de <i>Dipteryx odorata</i> (10x).....	43
Figura 15: Elementos leñosos de <i>Dipteryx odorata</i> .....	43
Figura 16: Sección transversal de <i>Dipteryx odorata</i> .....	44
Figura 17: Sección tangencial de <i>Dipteryx odorata</i> con radios estratificados .....	44
Figura 18: Sección radial de <i>Dipteryx odorata</i> .....	44
Figura 19: Madera de <i>Mangifera</i> sp. ....	47
Figura 20: Sección transversal de <i>Mangifera</i> sp. (10x) .....	47
Figura 21: Elementos leñosos de <i>Mangifera</i> sp. ....	47
Figura 22: Sección transversal de <i>Mangifera</i> sp. ....	48
Figura 23: Sección tangencial de <i>Mangifera</i> sp. ....	48
Figura 24: Sección radial de <i>Mangifera</i> sp.....	48
Figura 25: Madera de <i>Citrus</i> sp. ....	51
Figura 26: Sección transversal <i>Citrus</i> sp. (10x) .....	51
Figura 27: Elementos leñosos de <i>Citrus</i> sp. ....	51
Figura 28: Sección transversal de <i>Citrus</i> sp. ....	52
Figura 29: Sección tangencial de <i>Citrus</i> sp. con parénquima septado .....	52
Figura 30: Sección radial de <i>Citrus</i> sp.....	52

Figura 31:	Sección transversal de carbón de <i>Calycophyllum spruceanum</i> (40x) .....	54
Figura 32:	Sección transversal de carbón de <i>Copaifera officinalis</i> (40x) .....	55
Figura 33:	Sección transversal de carbón de <i>Dipteryx odorata</i> (40x).....	55
Figura 34:	Sección transversal de carbón de <i>Mangifera</i> sp.(40x) .....	56
Figura 35:	Sección transversal de madera de <i>Citrus</i> sp. (40x) .....	56
Figura 36:	Sección transversal de la madera de <i>Calycophyllum spruceanum</i> (40x) .....	68
Figura 37:	Sección transversal de carbón de <i>Calycophyllum spruceanum</i> (40x) .....	68
Figura 38:	Sección transversal de madera de <i>Copaifera officinalis</i> (40x) .....	69
Figura 39:	Sección transversal de carbón de <i>Copaifera officinalis</i> (40x) .....	69
Figura 40:	Sección transversal de madera de <i>Dipteryx odorata</i> (40x).....	70
Figura 41:	Sección transversal de carbón de <i>Mangifera</i> sp. (40x) .....	70
Figura 42:	Sección transversal de madera de <i>Mangifera</i> sp.(40x) .....	71
Figura 43:	Sección transversal de carbón de <i>Mangifera</i> sp.(40x) .....	71
Figura 44:	Sección transversal de madera de <i>Citrus</i> sp. (40x) .....	72
Figura 45:	Sección transversal de madera de <i>Citrus</i> sp. (40x) .....	72
Figura 46:	Comparación entre la densidad básica de la madera y la densidad aparente del carbón .....	74
Figura 47:	Contenido de humedad de las cinco especies en estudio .....	75
Figura 48:	Contenido de material volátil de las cinco especies en estudio .....	75
Figura 49:	Contenido de cenizas de las cinco especies en estudio .....	76
Figura 50:	Contenido de carbono fijo en las cinco especies en estudio .....	76
Figura 51:	<i>Calycophyllum spruceanum</i> a 400x en microscopio SEM. ....	77
Figura 52:	Sección tangencial de <i>Calycophyllum spruceanum</i> a 1500x en microscopio SEM. ....	78
Figura 53:	Sección transversal de <i>Calycophyllum spruceanum</i> a 800X en microscopio SEM. ....	78
Figura 54:	<i>Calycophyllum spruceanum</i> a 400x en microscopio SEM. ....	79
Figura 55:	Punteaduras intervasculares en <i>Calycophyllum spruceanum</i> a 6 000x en microscopio SEM.....	79
Figura 56:	Sección tangencial de <i>Dipteryx odorata</i> a 1500x en microscopio SEM. ....	80
Figura 57:	Células de radio uniseriado de <i>Dipteryx odorata</i> a 6000x en microscopio SEM.....	80

## *Índice de anexos*

	Página
Anexo 1 Balance nacional energético .....	91
Anexo 2 Producción nacional de carbón vegetal.....	93
Anexo 3 Lista de características microscópicas para la identificación de maderas duras - IAWA (1989) .....	98
Anexo 4 Clasificación de los elementos leñosos en base a sus dimensiones .....	103
Anexo 5 Coeficiente de variabilidad establecida por rubio (2002).....	104
Anexo 6 Medición de elementos anatómicos de la especie capirona .....	105
Anexo 7 Medición de elementos anatómicos de la especie copaiba.....	107
Anexo 8 Medición de elementos anatómicos de la especie shihuahuaco .....	109
Anexo 9 Medición de elementos anatómicos de la especie mango .....	111
Anexo 10 Medición de elementos anatómicos de la especie naranjo .....	113
Anexo 11 Propiedades físicas y químicas del carbón de las cinco especies en estudio .....	115

## I. INTRODUCCIÓN

Las estadísticas demuestran que en la última década los bosques secos del norte han sido los principales productores de carbón vegetal en el Perú, abasteciendo mayormente con carbón de algarrobo (*Prosopis* sp.) especie en veda desde 1974; cuya extracción mayormente se realiza de manera ilegal; sin embargo, a partir del año 2012, la situación cambió, ya que Ucayali incrementó su producción de carbón a consecuencia del mayor aprovechamiento de los residuos generados en los aserraderos, principalmente de especies duras como shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y copaiba (*Copaifera officinalis*) (MINAG-2013).

Encuestas realizadas a carboneros de Pucallpa, confirman la preferencia de las pollerías (principales consumidores) por adquirir carbón de especies como algarrobo (*Prosopis* sp.) y shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), pues resaltan entre sus características mayor tiempo de combustión, bajos niveles de cenizas, aroma y sabor particular a los alimentos (Bennett-Curry et al 2013). Ante la preferencia del consumidor por estas especies, los carboneros realizan denodados esfuerzos para poder cubrir la demanda, sin importar que el aprovechamiento se realice de forma ilegal, incluso se comercializan otras especies con el nombre de algarrobo, siendo perjudicado el consumidor final, ya que no recibe el producto con las características deseadas.

Ante la situación de comercio desleal, explotación excesiva de algunas especies preferidas por el consumidor y el ingreso al mercado de nuevas especies frutales como el carbón de mango (*Mangifera* sp.) y naranjo (*Citrus* sp.), es que se vuelve esencial determinar la identificación del carbón para diferenciar las especies de aquella que se encuentra en estado vulnerable. Además será de gran ayuda a la autoridad forestal encargada de supervisar e identificar los cargamentos de carbón que se transportan a diario, por lo cual es de interés contar con patrones que permitan la identificación del tipo de madera empleada, creando una colección que sirva de referencia para auxiliar en la identificación del carbón.

El presente estudio caracterizó la estructura anatómica de la madera y carbón de las especies capirona (*Calycophyllum spruceanum*), copaiba (*Copaifera officinalis*), shihuahuaco

(*Dipteryx odorata*), mango (*Mangifera* sp.) y naranjo (*Citrus* sp.), identificando las características anatómicas de la madera que se conservan después del proceso de carbonización. Además se evaluaron algunas propiedades anatómicas, físicas y químicas del carbón, que permitieron diferenciarla de otros tipos de carbón.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1. Identificación de la madera

La identificación de la madera tiene por objetivo determinar el taxón y conocer el árbol que lo produce, mediante el análisis de la estructura anatómica de la pieza en estudio (Detienne, citado por León y Espinoza 2001). Idealmente la identificación de la pieza podría llegar a nivel de especie; sin embargo, la existencia de muchas especies con estructuras anatómicas similares de un mismo género dificultaría tal acción (Wilson y White, citados por León y Espinoza 2001).

Para la identificación de la madera según García *et al.* (2003), se emplea la técnica macroscópica y microscópica. La primera se caracteriza por ser subjetiva al estar en función del observador, mientras que la segunda es más precisa y aporta datos histológicos suficientes para poder situar a la muestra de madera en el grupo adecuado.

Pérez (1984), menciona que el proceso de identificación se inicia con la evaluación de las características macroscópicas, detalles evidentes con poco o ningún aumento, hasta llegar a detalles microscópicos, aquellos que son visibles sólo con aumentos que pueden ser obtenidos a través de un microscopio compuesto. Las características macroscópicas de la madera son en general de dos clases: aquellas atribuibles a su estructura celular y las propiedades físicas o químicas como el color, olor, peso y dureza. En algunos casos el color y apariencia del grano, pueden aportar toda la información necesaria para la identificación de la muestra, mientras que en otros casos estas observaciones deben ser complementadas con detalles sobre estructura de la madera que pueden ser obtenidos con lentes de 10x. Las propiedades físicas macroscópicas de la madera son a menudo menos confiables para propósitos de identificación que las características estructurales, es decir, las características anatómicas. Debido a que las primeras exhiben una mayor fluctuación que las últimas. No obstante, una identificación precisa rara vez puede lograrse sobre la base de solo una característica; más bien se debe considerar todo un conjunto de características xilemáticas. Cuando la identificación no es posible con ayuda de las características xilemáticas anatómicas y físicas, se debe recurrir a características anatómicas microscópicas.

Espinoza de Pernía, citado por León y Espinoza (2001), menciona a los cristales y sílice como otras de las características útiles para la identificación de maderas a nivel de género y familia. Los cristales son compuestos inorgánicos generalmente formados por oxalato de calcio, sulfato de calcio y carbonato de calcio. Se desarrollan comúnmente en el lumen de las células, aunque algunas veces se pueden formar en las paredes celulares. Presentes frecuentemente en células parenquimáticas axiales y radiales, algunas veces en fibras y escasos en vasos. Además según Jane, citado por los mismos autores, cuando los cristales están en los radios tienden a ser más comunes en ciertas filas horizontales de células y cuando el radio es heterocelular, se encuentran más en las células cuadradas y erectas que en las procumbentes. En el parénquima axial los cristales pueden estar presentes en cada una de las células de la serie parenquimática o pueden estar presentes en algunas células y ausentes en otras.

Para visualizar las características microscópicas es necesario hacer secciones lo suficientemente delgadas que permitan el paso de la luz para la mejor observación de los tejidos vegetales a través del microscopio óptico. Siendo la microtomía según Sandoval (2005) la técnica utilizada para cortar secciones de tejidos que incluidos o no, tienen la suficiente dureza después del corte como para conservar todos sus detalles estructurales que permitan su identificación y estudio al microscopio.

Además del uso del microscopio compuesto para la identificación, también existen otros equipos más complejos. Para García *et al.* (2003) la microscopía electrónica de barrido (SEM=scanning electron microscope) es una técnica que se basa en la obtención de imágenes gracias al bombardeo de electrones sobre la muestra. La utilización del microscopio electrónico de barrido en anatomía e identificación de maderas aporta una imagen tridimensional de los elementos xilémicos, no disponible en microscopía óptica. La muestra a trabajar orientada en sus tres planos (transversal, tangencial y radial) es fijada a un soporte porta-muestras metálico, utilizando adhesivos recomendados por los fabricantes. El conjunto porta-muestra y pieza es sometido a vacío e inmediatamente después a un recubrimiento superficial de oro o carbono en un metalizador. El recubrimiento afecta la superficie, pero no lo suficiente como para penetrar al interior del lumen celular de cualquier elemento del xilema. La muestra recubierta es introducida en la cámara de observación, donde tras realizar el vacío es bombardeada por un haz de electrones, obteniendo así la imagen.

León y Espinoza (2001), señalan como técnica de identificación en laboratorio, el uso de clave, herramienta que presenta una serie de características que se comparan con las de la muestra a identificar. El proceso de comparación permite avanzar en la clave hasta llegar al nombre del género o especie al cual pertenece la pieza de madera. La identificación es posible sólo si la especie correspondiente a dicha muestra está registrada en la clave. Es por ello que según García *et al.* (2003), desde el comienzo de la anatomía de la madera los investigadores han concentrado sus esfuerzos en generar y definir caracteres analíticos diferenciadores, para establecer claves dicotómicas y abiertas (fichas perforadas y programas informáticos) facilitando notablemente la identificación.

## **2. Antecedentes de las especies en estudio a nivel madera**

### **2.1. *Calycophyllum spruceanum***

Chavesta (2005), indica que en condición seca al aire la albura es de color blanco cremoso, y el duramen blanco pardo con vetas de color negro. Anillos de crecimiento no diferenciados. Presenta grano recto a ligeramente entrecruzado, textura fina y brillo medio. Entre sus propiedades físicas presenta una densidad básica de  $0.76 \text{ g/cm}^3$ .

A nivel macroscópico la madera es de porosidad difusa, poros visibles con lupa 10x; poros solitarios y múltiples radiales de 2 a 3, muy pequeños y numerosos. Parénquima no visible con lupa 10x.

A nivel microscópico los poros son numerosos, en promedio 24 por  $\text{mm}^2$ . Diámetro tangencial pequeño, en promedio  $58 \mu\text{m}$ . Platina de perforación poco a muy inclinada con perforación simple. El parénquima es difuso y escaso. Los radios son tipo II; moderadamente numerosos, en promedio 6/mm, con altura promedio de  $320 \mu\text{m}$ . En algunos casos existe la presencia de radios fusionados.

Usos: el mismo autor menciona que esta especie se utiliza en pisos, machihembrados, tarugos, construcciones pesadas, mangos de herramientas, ebanistería y artículos para productos lácteos.

### **2.2. *Copaifera officinalis***

Acevedo y Kikata (1994), indican que en condición seca al aire, la albura presenta color crema rojizo y el duramen rojo. Anillos de crecimiento diferenciados por bandas oscuras.



Presenta grano recto, textura media y homogénea; brillo medio. Entre sus propiedades físicas presenta una densidad básica de  $0.61 \text{ g/cm}^3$ .

Macroscópicamente la madera es de porosidad difusa, poros ligeramente visibles a simple vista, solitarios de forma oval y múltiples radiales. Parénquima visible a simple vista, predominantemente terminal con canales resiníferos y paratraqueal vasicéntrico.

A nivel microscópico, el diámetro tangencial de los vasos varía de  $144$  a  $172 \text{ }\mu\text{m}$  y la longitud entre  $239$  y  $427 \text{ }\mu\text{m}$ , con  $3$  a  $8$  poros/ $\text{mm}^2$ . Platina de perforación horizontal con perforación simple, punteado intervascular alterno con puntuaciones de forma redonda a oval y abertura inclusa. Presencia de inclusiones gomosas. El parénquima es vasicéntrico y marginal con canales resiníferos, no estratificado. Los radios son heterogéneos tipo III multiseriados, no estratificados, cuya altura va de  $309$  a  $691 \text{ }\mu\text{m}$ .

Usos: según Aróstegui (1982) la especie *Copaifera officinalis* presenta cualidades para ser usada en estructuras, obras de carpintería, ebanistería, carrocería, cajonería pesada, parquet, encofrados y laminado.

### **2.3. *Dipteryx odorata***

Chavesta (2015), indica que en condición seca al aire, la albura es de color crema y duramen de color marrón, con anillos de crecimiento diferenciados por bandas oscuras de forma regular. Presenta grano entrecruzado, textura media y brillo medio. Entre sus propiedades físicas presenta una densidad básica de  $0.87 \text{ g/cm}^3$ .

Macroscópicamente la madera es de porosidad difusa, los poros son visibles con lupa de  $10\times$ , mayormente solitarios y escasos múltiples radiales. El parénquima es visible con lupa de  $10\times$ , paratraqueal vasicéntrico y aliforme.

Microscópicamente los poros son pocos, en promedio  $5$  por  $\text{mm}^2$ . Diámetro tangencial mediano en promedio  $114 \text{ }\mu\text{m}$ . Presenta platina de perforación simple. Parénquima paratraqueal vasicéntrico y aliforme. Radios homogéneos, muy numerosos en promedio  $11/\text{mm}$ . Altura promedio de  $239 \text{ }\mu\text{m}$ , exclusivamente uniseriados, estratificados. Presencia de gomas en los vasos.

Usos: el mismo autor menciona que la especie es usada en la construcción (vigas, columnas), pisos, durmientes, construcción naval, carrocerías, mangos de herramientas y parihuelas o pallets.

#### **2.4. *Mangifera indica***

León (2014), describe anatómicamente la madera de *Mangifera indica* de la siguiente manera:

Macroscópicamente la madera es de color amarillo pálido (2.5YR 8/4), sin transición entre albura y duramen. Olor y sabor ausente. Grano recto a entrecruzado. Textura media. Madera blanda y liviana a moderadamente dura y pesada. Entre sus propiedades físicas Richter y Dallwitz (2009) mencionan que la densidad básica del género oscila entre 0.52 a 0.7 g/cm<sup>3</sup>.

A nivel microscópico los anillos de crecimiento están definidos por parénquima marginal; sin embargo, para Richter y Dallwitz (2009) los límites de anillos de crecimiento son indistintos o ausentes. Presenta porosidad difusa. Poros sin patrón definido de disposición, solitarios y múltiples radiales de 2-3, algunos arracimados, 2-5 poros por mm<sup>2</sup>, diámetro tangencial 155-213 µm. Platina de perforación simple. Punteaduras intervasculares alternas, circulares a ovaladas, medianas a grandes, diámetro de 8,75-11,25 µm. Punteaduras radiovasculares distintas a las intervasculares: aparentemente simples, redondeadas o alargadas. Tíldes presente.

Parénquima paratraqueal vasicéntrico, aliforme de ala corta, confluyente; en series de 2-4 células.

Radios homocelulares y heterocelulares con 1-2 hilera de células marginales, predominantemente una hilera de células marginales, 5-9 radios/mm, 1-3 células de ancho, predominantemente biseriados, altura 277-326 µm. Cristales prismáticos en las células parenquimáticas radiales, 1 a 2 cristales por células. Fibras ocasionalmente septadas, paredes delgadas a medianas, longitud 739-956 µm, punteaduras indistintamente areoladas.

Usos: según Parrotta citado, por León (2014) se tienen reportes de utilización en carpintería, muebles, pisos, construcción, cajas, carretas y contrachapado.

#### **2.5. *Citrus***

En general, el género *Citrus* presenta árboles de tipo perenne, de mediana altura y con diámetro de fuste muchas veces mayor a 10 cm (Sánchez, citado por Brenes *et al.* 2012). Las numerosas especies de este género provienen de las zonas tropicales y subtropicales de Asia y del archipiélago Malayo. Entre sus propiedades físicas la densidad básica del género oscila entre 0.49 a 0.78 g/cm<sup>3</sup>.

Según Brenes *et al.* (2012), la madera del género *Citrus* es de textura fina a mediana, color amarillo a amarillo pálido, sin veteado, sabor u olor característico. De porosidad difusa y poros solitarios, pequeños y numerosos. El parénquima axial va desde paratraqueal hasta el apotraqueal, y en bandas formando anillos falsos o bien anillos anuales. Radios homocelulares, de 1 a 3 células de ancho y de 10 a 25 células en altura. Presencia de canales traumáticos y cristales.

Usos: frutal; sin embargo, el mismo autor menciona que la madera es fuente importante de biomasa para la producción de energía.

En base a la literatura consultada en la Tabla 1 se presenta un resumen de las características macroscópicas y microscópicas de las maderas en estudio.

Tabla 1: Características macroscópicas y microscópicas de las maderas en base a literatura consultada

ESPECIES	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS										CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS																												
	Poros				Canales intercelulares						Parénquima						Vasos/poros				Parénquima			Radios					Fibras										
																	Visibilidad		Agrupamiento		Elemento vascular		Agrupamiento		Apotraqueal	Paratraqueal		En bandas	Homocelulares	Heterocelulares	Uniseriados	Multiseriados	Tipo de radio		Estratificación	Fusionados	Septadas		
	No visible a simple vista	Ligeramente visible a simple vista	Solitarios	Múltiples	Visible a simple vista	No visible aún con lupa de 10x	Visible con lupa de 10x	Vasocéntrico	Aliforme	Aliforme confluyente	Marginal	Simple	Pocos	Numerosos	Pequeños	Medianos	Solitarios	Múltiples radiales	Arracimados	Difuso o ausente	Vasocéntrico	Aliforme	Aliforme confluyente	Marginal															
Capirona <sup>1</sup>	x		x	x		x					x	x	x						x									x											
Copaiba <sup>2</sup>		x	x	x	x	x		x		x	x									x				x			x												
Shihuahuaco <sup>3</sup>	x		x	x			x	x	x			x			x					x	x			x			x												
Mango <sup>4</sup>											x					x	x	x		x	x	x	x	x	x	x												x	
Naranjo <sup>5</sup>			x		x								x	x						x	x	x	x	x	x														

FUENTE:

<sup>1</sup>Chavesta (2005)

<sup>2</sup>Acevedo y Kikata (1994)

<sup>3</sup>Chavesta (2015)

<sup>4</sup>León (2014)

<sup>5</sup>Brenes et al. (2012)



### **3. Antracología**

Según Rodríguez-Ariza (2005), la antracología (de la raíz griega *anthrax*, *-akos*, carbón ardiente) tiene de material de estudio los carbones vegetales encontrados en contextos arqueológicos y en sedimentos naturales. El antracoanálisis es la determinación botánica de los carbones vegetales. La antracología arqueológica tiene como objetivo el estudio de los usos de la madera, así como de la vegetación desaparecida y su evolución a lo largo del tiempo. Estos dos aspectos son complementarios y se interrelacionan. Los usos de la madera conciernen directamente a las actividades, las tecnologías, la economía, pero no definen la vegetación pasada. Los carbones vegetales utilizados como leña, especialmente como combustibles domésticos, son a menudo un excelente registro de la composición precisa de los bosques, punto de partida para comprender las causas de su transformación en el tiempo.

La metodología para el estudio de un fragmento de carbón vegetal requiere previamente, la realización de tres planos orientados: transversal, tangencial y radial. Cada sección permite la identificación de elementos de la estructura interna de la madera, donde la forma, talla y disposición varía según la especie a la que pertenece el carbón. Para la identificación de los carbones normalmente se comparan las características encontradas con las reportadas en los atlas de anatomía de la madera (Huber y Rouschal; Jacquot; Greguss; Schweingruber citados por Rodríguez-Ariza 2005) y también con la colección de maderas carbonizadas (antracoteca).

### **4. Carbón vegetal en Perú**

El carbón vegetal tiene varios usos, siendo el energético el más conocido y difundido desde el siglo pasado en el Perú. En sus inicios el carbón vegetal y la leña fueron altamente demandados por el sector rural y por los grupos menos favorecidos, debido a su bajo precio. Según Gonzales (2013), a fines de los años 80, el consumo total de madera se estimó en cuatro millones de m<sup>3</sup> rollizos, de los cuales alrededor tres millones fueron destinados para leña y carbón; mientras que a fines de los años 90, se estimó de un total de ocho millones de madera el 3 por ciento fue destinado para carbón. Sin embargo, con el transcurrir de los años y el acceso a energías como el gas y electricidad, hizo que el consumo disminuyera, tal como lo reporta el Balance Nacional Energético (MEM-2016) (Anexo 1).

Mientras el consumo doméstico de carbón vegetal está en proceso de reducción, el consumo industrial aumenta, siendo las pollerías de Lima las principales consumidoras en nuestro país, las cuales incrementan en número motivadas por el “boom gastronómico” acompañado por el crecimiento poblacional, reflejado en los 10 millones de habitantes en Lima (INEI 2016). En cuanto a las principales fuentes de carbón el 49 por ciento procede de la selva amazónica, 48 por ciento de los bosques secos del norte (Piura, Lambayeque y Tumbes) y 3 por ciento de otras regiones; siendo el 96,7 por ciento del carbón producido en Ucayali destinado a los principales mercados de Lima (Bennett-Curry et al 2013).

Si bien la producción de carbón vegetal de los bosques secos ha disminuido desde el año 2012 (Anexo 2), esta ha sido reemplazada por la producción de carbón procedente de la selva, específicamente Ucayali. En este departamento se concentra la mayor cantidad de aserraderos y como consecuencia se genera mayor cantidad de residuos, los cuales son aprovechados para producir carbón en su mayoría de especies duras. Los resultados de una encuesta realizada por Bennett-Curry *et al.* (2013) a los carboneros, reporta que después de algarrobo, la segunda especie con mayor demanda por las pollerías es shihuahuaco, debido a las buenas características que presenta.

Cabe resaltar que la información de producción y consumo de carbón vegetal, proporcionada por los ministerios e instituciones competentes es incompleta y deficiente debido a que es calculada con metodologías ineficientes para las condiciones actuales del Perú, sin considerar la producción informal, la cual incrementaría por mucho, los valores que actualmente se reportan (La Torre- Cuadros y Menton -2016; Bennett-Curry et al 2013). Asimismo, Bennett-Curry et al (2013) señala que el método de recolección de información usando cuestionarios en lugar de mediciones en los mercados y centros de producción es una limitante para la veracidad de los datos usados para estimar los índices de producción y consumo.

## **5. Antecedentes en identificación del carbón vegetal**

Rivera *et al.* (1994), identificaron a las especies *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Prosopis kuntzei*, *Celtis tala* y *Prosopis alba* a partir de un cargamento de carbón comercial. Las muestras carbonizadas fueron analizadas con lupa de 15 aumentos para hacer la primera diferenciación en base a la porosidad, demarcación de anillos, presencia y tipo de parénquima. Con el microscopio electrónico de barrido (MEB) que posee una amplia gama

de aumentos, desde 12x hasta 140 000x, caracterizaron los carbones en sus tres secciones (transversal, tangencial y radial). Utilizaron las xilotecas como colecciones de comparación, afirmando que el proceso de carbonización produce cambios físicos, mecánicos y químicos; no obstante, las características anatómicas generalmente se conservan y permiten su identificación.

El primer estudio de identificación de carbón vegetal en Perú fue realizado por Pipa (2004), quién validó una metodología de identificación del carbón vegetal del género *Prosopis* (algarrobo) a partir de su estructura anatómica. En dicho estudio se carbonizó muestras del género *Prosopis* y especies testigos como aguano masha (*Machaerium inundatum*), quinilla (*Manilkara bidentata*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y olivo (*Olea europea*). Pipa demostró que el tipo y distribución de poros, así como el parénquima son características que perduran después del proceso de carbonización y permiten la identificación del carbón; mientras que la presencia de inclusiones como gomas y tilosis son características que no pueden ser utilizadas para identificar, ya que se pierden post-carbonización.

Gonçalves (2010), al estudiar la madera y carbón de diez especies con tipos anatómicos distintos reportó, que las características cualitativas de la madera se conservan después de un proceso de carbonización a 400°C, permitiendo su identificación; no obstante, algunas especies presentaron reducción significativa del diámetro tangencial de poros y como consecuencia aumento de frecuencia por mm<sup>2</sup>. Asimismo, el grosor de los radios varió considerablemente, siendo mayor la contracción de los radios más anchos.

Gonçalves (2012), menciona a partir del estudio realizado a *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum* y *Pouteria torta*, que el tamaño de los vasos de la madera son los más afectados por la carbonización a 400°C, encontrando reducción del diámetro tangencial de vasos en cuatro de las cinco especies. La reducción no fue significativa en la frecuencia de vasos ni en el diámetro tangencial de las punteaduras intervasculares entre la madera y carbón. En el análisis cualitativo de las fibras no se presentaron cambios notables. Las especies con canales radiales y traumáticos se mantuvieron después de la carbonización; asimismo, los cristales y cuerpos con sílice fueron más fáciles de detectar en el carbón por la reflexión de la luz. Concluye que las fuertes similitudes anatómicas entre la madera y carbón, permiten la identificación de las especies evaluadas.



Muñiz *et al.* (2012a), realizaron un estudio con *Cedrelinga cateniformis* Ducke y *Enterolobium schomburgkii* Benth, para comparar la estructura anatómica de fragmentos carbonizados a 450°C; encontrando que si es posible la identificación del carbón de ambas especies en base a las estructuras constituyentes al estado de madera. Sin embargo, encontraron diferente comportamiento dimensional de las estructuras anatómicas para un mismo proceso de carbonización; el cual se debió a la variación en el espesor de la pared de las fibras, cantidad de parénquima axial y ancho de radios, indicando que para una correcta identificación a nivel de especie, es necesario la comparación con una muestra de referencia.

Muñiz *et al.* (2012b), estudiaron las especies *Araucaria angustifolia*, *Bertholletia excelsa*, *Vatairea guianensis*, *Ocotea porosa*, *Mezilaurus itauba*, *Calophyllum brasiliense*, *Manilkara huberi*, *Qualea cf. acuminata*, *Simarouba amara* y *Pinus taeda* con la finalidad de controlar el comercio ilegal de carbón de especies prohibidas en Brasil. Si bien, la mayoría mantuvo la estructura anatómica post-carbonización, especies como *Vatairea guianensis*, *Mezilaurus itauba* y *Qualea cf. Acuminata* presentaron mayor contracción de vasos, mientras que, *Calophyllum brasiliense* aumentó en diámetro como consecuencia de la carbonización. También encontraron que en el carbón de las coníferas *Araucaria angustifolia* y *Pinus taeda* se podía diferenciar los anillos de crecimiento, radios finos y canales resiníferos.

El mismo autor menciona que entre las angiospermas, algunas especies presentaron grietas en los radios y en las líneas del parénquima que dificultaron la visualización de las características anatómicas en el plano transversal. No obstante, analizando el comportamiento general de las especies en evaluación, determinaron que las grietas fueron constantes y causadas por el calor, debido a la rápida descomposición superficial de la madera y la influencia ejercida por la orientación del grano. Estas variaciones también fueron observadas por Byrne e Nagle, citado por Muñiz *et al.* (2012b). La distribución anatómica y los tipos de células fueron evidentes usando sólo aumentos de 10 y 25x en un estereomicroscopio con luz reflectada, permitiendo así la identificación de las diez especies en evaluación carbonizadas a 450°C.

Nigoski *et al.* (2012), reportaron en la madera y carbón de *Dipteryx odorata* características anatómicas como porosidad difusa, vasos predominantemente solitarios y escasos múltiples radiales, parcialmente obstruidos, parénquima axial aliforme y confluyente y radios finos. Las pequeñas dimensiones celulares impidieron la visualización del leño carbonizado con

menores aumentos, siendo detallados con el microscopio electrónico de barrido. Comparando imágenes de madera y carbón, la muestra de carbón presentó contracción tangencial de diámetro de poros, distinción de fibras y parénquima axial como consecuencia del distinto espesor de pared celular en el plano transversal; contracción mayor de radios uniseriados y estratificados en altura y ancho aumentando visualmente la frecuencia en el plano tangencial; presencia de puntuaciones intervasculares alternas y los cristales en células de parénquima radial presentaron pequeñas grietas causadas por la acción de la temperatura de carbonización.

Resultado similar reportó Albuquerque (2012), en la evaluación del carbón de *Dipteryx odorata*, señalando que a causa de la carbonización los elementos xilemáticos presentaron variaciones dimensionales, como contracción del diámetro tangencial (de 165  $\mu\text{m}$  promedio en madera a 146  $\mu\text{m}$  en carbón) y longitud de vasos y altura de radios en aproximadamente 4 por ciento, mientras que la del ancho de radios 9 por ciento y el diámetro de puntuaciones 14 por ciento. Asimismo, para el carbón de *Copaifera* sp. reportó que el elemento xilemático con mayor contracción volumétrica producto de la carbonización a 400°C fue la longitud de vasos con 17 por ciento, seguido del diámetro de vasos y altura de radios con 12 por ciento. No obstante, ambas especies pudieron ser diferenciados e identificadas.

El mismo autor comparó la anatomía de la madera y carbón de 75 especies pertenecientes a 21 familias; afirmando que el proceso de carbonización a 400°C por un periodo de 40 minutos induce a la contracción de elementos anatómicos de la madera como vasos y puntuaciones, parénquima axial y fibras en diferentes porcentajes, con variación entre especies; sin embargo, la contracción volumétrica no impidió la identificación de las 75 especies, ya que después de la carbonización mantuvieron la estructura original de la madera.

Muñoz et al (2013), reportaron durante el proceso de carbonización a 450°C de las especies *Pouteria macrophylla* y *Micropholis guianensis*, que todas las estructuras celulares sufrieron alteraciones dimensionales de manera significativa. El diámetro de los poros disminuyó, aumentando como consecuencia la frecuencia por  $\text{mm}^2$ . Los radios se contrajeron tanto en altura como en ancho, aumentando la cantidad por milímetro lineal. Sin embargo, las alteraciones no perjudicaron el aspecto cualitativo de las características anatómicas, lo que permitió la distinción de especies y la identificación del carbón.

Afonso *et al.* (2015), realizaron un estudio anatómico al carbón de nueve especies nativas de Mozambique; *Afzelia quanzensis*, *Combretum imberbe*, *Khaya nyasica*, *Millettia stuhlmannii*, *Pterocarpus angolensis*, *Swartzia madagascariensis*, *Dalbergia melanoxylon*, *Guibourtia conjugata* y *Amblygonocarpus andongensis*, las cuales están prohibidas para fines energéticos, ya que son especies con un alto valor comercial. Como resultado reportan que las muestras de carbón presentaron rajaduras en dirección paralela y perpendicular a los radios; sin embargo, no impidió la identificación del tipo de madera utilizada, ya que los carbones mantuvieron una buena definición de las características anatómicas de las células después del proceso de carbonización a 450°C por una hora.

Según Nigoski *et al.* (2015), las especies *Brosimum acutifolium*, *Ficus citrifolia*, *Hieronyma laxiflora* y *Sapium glandulatum* presentaron variación del diámetro de poros y frecuencia por mm<sup>2</sup> a 450°C de carbonización. La contracción de los elementos vasculares estuvo en función de las características intrínsecas de cada especie ante el calor. Asimismo, en la dimensión radial, mencionaron que todas las especies presentaron disminución en la altura de radios y en consecuencia aumentó en frecuencia. La variación no impidió el reconocimiento de las cuatro especies en evaluación.

Souza *et al.* (2015), analizaron la anatomía a nivel de carbón de las especies *Vouacapoua americana*, *Hymenolobium cf. petraeum*, *Bertholletia excelsa*, *Inga alba*, *Hymenaea sp.*, *Manilkara sp.*, *Caryocar cf. glabrum* y *Peltogyne cf. maranhensis*, comercializadas en la Amazonia brasileña. Reportando que el parénquima y vasos de algunas especies era difícilmente visible con lupa de 10x después de la carbonización, como consecuencia de la contracción volumétrica. En algunos casos los canales secretores axiales traumáticos, la obstrucción de vasos, tipo de anillo de crecimiento se mantuvieron después del proceso, permitiendo la identificación a nivel de especie. La presencia de grietas se dio en la orientación de los radios en la mayoría de especies y algunas otras en la dirección del parénquima axial, atribuidas a baja densidad, descomposición rápida de la superficie de la madera por acción del calor y por la presión que causa la liberación de gases por pirolisis. Dichos gases combinados con la fragilidad de las estructuras celulares, en particular del tejido parenquimático, ocasionan el colapso en la madera; no obstante, afirman la posibilidad de identificar el carbón a nivel de familia y género con lupa de 10x y con ayuda de un estereomicroscopio de luz reflejada con aumentos de 10 a 25x.

Gonçalves *et al.* (2015), a través del estudio macroscópico realizado a 25 especies de Brasil, mencionan que las principales características anatómicas que se utilizan para identificar el género del carbón vegetal se encuentra en la sección transversal, características como el parénquima axial, el diámetro y distribución de vasos y ancho de radios. No obstante, Metcalfe y Chalk, citados por Gonçalves *et al.* (2015) mencionan que la característica más importante para la identificación de la madera es el parénquima axial, aunque en el carbón no siempre sea fácil visualizarlo, como es el caso del parénquima escaso y/o difuso. Mientras, que el parénquima en bandas y los diferentes tipos de paratraqueal son por lo general más fáciles de distinguir por el contraste con las fibras. El estudio resaltó el uso práctico que representa la evaluación macroscópica del carbón a través de los patrones dispuestos para los supervisores forestales, que normalmente usan lupas portátiles cuyo aumento no permite llegar a muchos detalles y se enfoca en los elementos xilemáticos de la sección transversal.

Muñiz *et al.* (2016), en el análisis a *Diploptropis purpurea*, *Hymenolobium petraeum*, *Parkia pendula*, *Vatairea guianensis* y *Vatairea paraensis*, mostraron que las características cualitativas de la madera permanecieron en el carbón y se pueden aplicar para el reconocimiento entre especies. Asimismo, determinaron que las principales alteraciones anatómicas causadas por la degradación térmica fueron la contracción de vasos y la menor distinción del parénquima, esto como consecuencia de la alteración del espesor de pared de las células.

## **6. Carbón vegetal**

Earl (1975), señala que el carbón vegetal puede obtenerse de muchas sustancias orgánicas, pero la más abundante y frecuentemente utilizada, es la madera. Todas las especies de madera dan un carbón vegetal que puede utilizarse como combustible en el hogar o en la industria, para usos generales. Las propiedades físicas y químicas del carbón vegetal dependen de la materia prima original y de las condiciones del proceso de carbonización. Por ello la Organización Internacional del Trabajo (1986) menciona que la carbonización rápida a bajas temperaturas genera carbón vegetal con 60-80 por ciento de carbono fijo y alto porcentaje de compuestos volátiles, caracterizando al carbón por un encendido rápido preferido para el uso doméstico. La carbonización lenta a altas temperaturas produce un carbón con 80-90 por ciento de carbono fijo y menor cantidad de componentes volátiles, valorado para usos industriales. Mientras que la carbonización lenta a baja temperatura

permite un rendimiento más elevado de carbón vegetal, pero puede aumentar el costo de producción.

## **6.1. Propiedades físicas**

### **a. Contenido de humedad**

Según FAO (1983), el carbón vegetal recién salido del horno, contiene muy poca humedad, generalmente menos del 1 por ciento; pero conforme transcurre el tiempo, aún sin presencia de lluvia, el carbón absorbe rápidamente humedad del aire alcanzando valores entre 5 a 10 por ciento, a pesar de estar bien quemado. A diferencia del carbón que no se ha quemado correctamente o cuando los ácidos piroleñosos y alquitranes solubles han sido retomados por el carbón vegetal a causa de la lluvia, tal como ocurre en los métodos de fosas o parvas, aumentando la higroscopicidad del carbón y su contenido de humedad en equilibrio puede subir al 15 por ciento o más. Asimismo, las especificaciones de calidad limitan generalmente el contenido de humedad alrededor del 5-15 por ciento del peso bruto del carbón vegetal.

Siddique, citado por Carrillo-Parra (2013) reporta que a consecuencia de la transformación térmica de la biomasa, el carbón vegetal es un material con bajo porcentaje de humedad y poca higroscopicidad, cuando los valores de humedad son mayores a 8 por ciento se consumirá mayor material para evaporar el exceso de agua.

### **b. Densidad**

Earl (1975), indica que la densidad del carbón es directamente proporcional a la densidad de la materia prima y depende también en menor grado, de la temperatura máxima alcanzada en el proceso de carbonización. El carbón obtenido a bajas temperaturas suele ser más denso, debido que a altas temperaturas el material volátil disminuye.

Brito y Barrichelo (1980), determinaron en un estudio realizado a diez especies de eucalipto, un valor alto de correlación ( $r=0.97$ ) entre valores de densidad básica de la madera y densidad aparente del carbón vegetal, obtenido del proceso de carbonización a una temperatura máxima de 450°C.

Trugilho y Silva (2001), señalan que las propiedades del carbón vegetal están directamente relacionadas con las características físicas, químicas y anatómicas de la madera utilizada en la carbonización. Entre las características físicas de la madera, la densidad básica es la de mayor influencia en la calidad del carbón vegetal. En el estudio realizado a la albura y duramen de *Himenea courbaril* L. las densidades relativas aparentes disminuyeron aproximadamente a 660°C y subieron nuevamente con el aumento de temperatura final. Ese hecho está de acuerdo con Blankhorn y Oliveira y Almeida, citados por Trugilho y Silva (2001), que encontraron un resultado semejante en *Prunus serotina* y *Eucalyptus grandis* respectivamente. El cambio de pérdida de masa ocurre como consecuencia de la liberación del material volátil; de 300-500°C, la pérdida de masa es mayor a la reducción de las dimensiones del carbón, lo que provoca una disminución de la densidad aparente. A partir de 600°C, la pérdida de masa es menor que la reducción de las dimensiones del carbón, provocando un aumento de la densidad aparente; esa reducción puede estar relacionada con la posible reorganización estructural del carbono residual.

Rivera y Uceda (1984), indican que varios autores (Aguimelio y Batista, 1980; Brito y Barrichelo, 1984; Martins, 1980; Petroff y Doat, 1978; FAO, 1983) han establecido una correlación entre la densidad aparente del carbón y la densidad de la madera que dio origen. A partir de 79 pares de valores de densidad de las maderas y carbón resultantes, encontraron un valor significativo de coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0.87.

## **6.2. Componentes químicos**

### **a. Material volátil**

Según FAO (1983), el material volátil diverso del agua está comprendido por residuos líquidos y alquitranosos que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización. Cuando el proceso de carbonización es prolongado y a alta temperatura, el contenido de material volátil es bajo. Asimismo, un carbón vegetal con mucho material volátil se caracteriza por un encendido rápido con producción de humo, mientras que un carbón con pocos volátiles produce una combustión limpia.

Siddique, citado por Carrillo-Parra (2013), menciona que niveles altos de material volátil en el carbón es consecuencia de un proceso de carbonización realizado a bajas

temperaturas y en forma heterogénea, lo que evita la despolimerización y recombinación de los compuestos carbonílicos y aromáticos, fenoles y otras sustancias constituyentes del alquitrán, los cuales serán emitidos durante la combustión del carbón en forma de humo.

Según Couto *et al.* (2015), a través del estudio de calidad al carbón de Eucalyptus y Corymbia, señala que la temperatura es un factor importante en la calidad del carbón y en la composición química del mismo, puesto que a mayor temperatura final de carbonización, mayor será la cantidad de material volátil liberado. Este hecho refleja el incremento del contenido de compuestos inorgánicos y carbono fijo en la fase sólida durante el proceso de carbonización. Es así, que procesos de carbonización que utilizan temperaturas altas de carbonización darán origen a un carbón con menor contenido de compuestos volátiles y mayores contenidos de carbono fijo y minerales.

**b. Cenizas**

Según FAO (1983), las cenizas son sustancias minerales, como la arcilla, sílice y óxidos de calcio y de magnesio, etc., presentes en la madera y en otros casos son recogidos como contaminantes del suelo, durante el proceso de carbonización. El contenido de cenizas varía de 0,5 a más de 5 por ciento, dependiendo de la especie maderable. Un buen pedazo de carbón vegetal tiene alrededor de 3 por ciento de cenizas.

Briane y Doat, citados por Rivera y Uceda (1984), sostienen que la composición del carbón depende de la técnica de carbonización, en particular, de la temperatura aplicada y el tiempo de carbonización; además el carbón está compuesto principalmente por carbono; materias volátiles (carbono, hidrógeno y oxígeno) y materias minerales (sílice, fierro, calcio, metales alcalinos, a veces fósforo, un poco de nitrógeno y en general un poco de azufre). Los minerales existentes en la madera de origen permanecen en el carbón, pero producto del rendimiento de la carbonización, representan en porcentaje el triple o cuádruple que cuando estaban en la madera.

Pimenta y Barcelos, citados por Damásio *et al.* (2013), señalan que el contenido de cenizas es inherente a la especie, el cual puede estar influenciado por los niveles de

fertilización o puede indicar contaminación del carbón con residuos del suelo. Asimismo, señalan que la ceniza es un residuo mineral que proviene de componentes minerales de la madera y corteza y cuanto mayor sea su proporción en la madera, mayor será la cantidad de ceniza que se encuentre en el carbón.

Kargbo, citado por Carrillo-Parra (2013), indica que la ceniza es un residuo de la combustión, está constituida principalmente por elementos inorgánicos. La generación de altos valores de ceniza representa un desafío para la industria química y la producción de energía, debido al incremento de costos y logística para su acopio, transporte, manipulación y almacenamiento.

Según Couto *et al.* (2015), reporta que el carbón de Eucalyptus y Corymbia producidos conformado por madera más próxima a la médula, presentó mayor contenido de minerales a diferencia del carbón producido con madera más próxima al cambium vascular.

#### **c. Carbono fijo**

Según FAO (1983), el carbono fijo varía de 50 a 95 por ciento, el cual está compuesto principalmente por carbono; este componente es el más importante para el carbón para la metalurgia, puesto que es el responsable de la reducción de los óxidos de hierro en el hierro fundido durante su producción. En la industria; sin embargo, para obtener una operación óptima de fundición, el carbón vegetal debe tener un balance entre el carácter quebradizo por el elevado contenido de carbono fijo y la mayor fuerza de un carbón vegetal con contenido inferior en carbono fijo y superior en material volátil.

Brito y Barrichelo (1977), mencionan que la celulosa de la madera se degrada rápidamente sin contribuir al contenido de carbono fijo del carbón; no obstante, la lignina por su mayor estabilidad puede soportar mayores niveles de carbonización contribuyendo a la concentración de carbono fijo en el carbón vegetal. Lo antes mencionado es demostrado por el valor de correlación entre el contenido de lignina de la madera y el contenido de carbono fijo del carbón.

### **6.3. Proceso de carbonización**

Oliveira, citado por Loffredo *et al.* (2010), menciona que el carbón vegetal consiste en someter la madera a un tratamiento térmico bajo condiciones controladas. El proceso de



carbonización ocurre a través de la relación entre temperatura y tiempo. Esos dos factores deben estar en sintonía para que se obtenga carbón de calidad.

Gonzales (2010), señala que independientemente del método que se utilice para producir carbón, la madera debe pasar de temperatura ambiente hasta una temperatura final, esta elevación permite que sucedan los cambios físicos y químicos necesarios para el procesamiento de la madera. Eliminar el agua contenida en la madera es un importante proceso que se realiza en las primeras etapas como se menciona a continuación:

Etapa I: Llamada endotérmica o de secado, con una temperatura de la madera alrededor de 100°C. Aquí la madera se seca, además que se eliminan los extractivos volátiles con menor punto de ebullición a 100°C. Sin embargo, la temperatura externa a la madera dentro del sistema puede ser de 280°C.

Etapa II: Etapa endotérmica donde la temperatura de la madera asciende hasta 275°C, eliminando el agua fuertemente retenida y extractivos volátiles de la madera. Se inicia el proceso de descomposición térmica en ausencia del oxígeno a partir de los 200°C, donde se degradan los carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente las hemicelulosas dando lugar a la formación de ácido acético y agua de reacción, estos últimos forman parte del licor piroleñoso. Durante la descomposición se genera cierta cantidad de gases no condensables como CO y CO<sub>2</sub>. Durante esta etapa la lignina se transforma en brea primaria (hidrocarburos pesados).

Etapa III: La temperatura se eleva hasta 350°C, la descomposición térmica se desarrolla más rápido como resultado de las reacciones exotérmicas que se generan al interior de la madera. Los componentes celulosa y lignina se degradan con mayor rapidez; sin embargo, la lignina en menor proporción a la celulosa, ya que pasa a formar parte del carbón vegetal. En esta etapa se forma más licor piroleñoso el cual contiene ácido acético, alcohol metílico y alquitrán. Asimismo, la brea primaria formada en la etapa II se transforma en brea secundaria o también llamada coquificada (carbón vegetal). También continúa la formación de los gases no condensables: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

Etapa IV: La temperatura interna llega hasta 500°C, mientras que la externa alrededor de 550°C completando el proceso de carbonización, además continúa la formación de alquitranes pesados los que son evacuados hasta que alcancen su punto de ebullición. La

destilación de los alquitranes pesados es mínima; sin embargo, el carbón vegetal obtenido contiene hasta 85 por ciento de carbono fijo.

Etapa V: Es endotérmica, donde la temperatura llega hasta 700°C. Este nivel de procesamiento del carbón permite eliminar la mayor parte de alquitranes pesados obteniendo un carbón vegetal, de buena calidad, con 90 a 95 por ciento de carbono fijo; sin embargo, esta etapa es opcional ya que encarece el producto final y disminuye el rendimiento de la carbonización.

#### **6.4. Usos del carbón vegetal**

Gonzales (2010), señala que el principal componente que conforma el carbón vegetal y determina su utilidad es el carbono fijo. Se considera un buen carbón el que posee valores altos de carbono fijo y bajas cantidades de otros componentes; sin embargo, en ciertos casos la influencia de los componentes volátiles resulta favorable. Los usos más comunes del carbón vegetal son:

##### **En sólido**

- Como combustible: para gasógenos, usos domésticos (cocinas, parrilladas) y restaurantes (pollerías).
- Como materia prima: carburo de calcio, cianuros, cal, cemento, etc.
- En metalurgia: para fabricación de acero y aleaciones de metales

##### **En polvo**

- Como aditivo en pienso para animales
- Pigmento

##### **En aglomerados**

- Briquetas o pellets, para uso energético

##### **Derivados**

Carbón activado, utilizado como depurador, decolorante o filtro en fase líquida o gaseosa, adsorbente de gases, purificador de agua y licores, etc.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1. Lugar de ejecución

El estudio anatómico de la madera y carbón se realizó en el Laboratorio de Anatomía de la Madera, la carbonización y análisis químico del carbón en el Laboratorio de Transformación Química de la madera del Departamento de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM y la obtención de microfotografías de fragmentos de carbón en el laboratorio de Equipamiento Especializado de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM.

#### 2. Materiales y equipos de laboratorio

##### 2.1. Muestras de madera

Las especies forestales empleadas para el estudio, así como su procedencia se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2: Especies estudiadas y lugar**

<b>Nombre científico</b>	<b>Nombre común</b>	<b>Familia</b>	<b>Lugar de procedencia</b>
<i>Calycophyllum spruceanum</i> <sup>1</sup>	Capirona	Rubiaceae	Ucayali
<i>Copaifera officinalis</i> <sup>2</sup>	Copaiba	Fabaceae	Ucayali
<i>Dipteryx odorata</i> <sup>3</sup>	Shihuahuaco	Fabaceae	Ucayali
<i>Mangifera sp.</i> <sup>4</sup>	Mango	Anacardiaceae	Ucayali
<i>Citrus sp.</i> <sup>5</sup>	Naranja	Rutaceae	Lima

FUENTE:

<sup>1</sup> Chavesta (2005)

<sup>2</sup> Acevedo y Kikata (1994)

<sup>3</sup> Chavesta (2015)

<sup>4</sup> León (2014)

<sup>5</sup> Brenes et al. (2012)

## **2.2. Materiales de laboratorio**

- Vaso de precipitación de 100 ml
- Placa Petri
- Porta objeto tamaño estándar
- Cubre objeto de 18x18 mm
- Cubre objeto de 22x22 mm
- Crisol
- Mortero y pilón
- Bisturí
- Pinza
- Pincel pelo de Martha N°5
- Cuchilla descartable para micrótopo
- Cuchilla de mano
- Lupa 10x
- Agujas y jeringas descartables
- Solución de alcohol de 30°, 60° y 90°
- Solución de ácido nítrico al 33 por ciento
- Solución de hidróxido de sodio al 3 por ciento
- Glicerina químicamente pura
- Xilol

- Merkglass
- Safranina 1% en alcohol de 90°
- Abrasivo fino para micrótopo
- Abrasivo grueso para micrótopo

### **2.3. Equipos de laboratorio**

- Microscopio electrónico de barrido SEM FEI Inspect S50
- Microscopio binocular LEICA
- Estereoscopio Olympus
- Micrótopo de deslizamiento horizontal
- Afilador de cuchillas
- Mufla
- Plataforma eléctrica
- Balanza analítica
- Desecador de humedad
- Tamiz N°20 y N°100

### **2.4. Materiales de oficina**

- Computadora
- Útiles de escritorio

### **3. Metodología a nivel de madera**

#### **3.1. Selección y colección de muestras**

Las muestras de madera de las especies capirona (*Calycophyllum spruceanum*), copaiba (*Copaifera officinalis*) y shihuahuaco (*Dipteryx odorata*); fueron proporcionadas por el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales en tanto que el mango (*Mangifera* sp.) provino de la ciudad de Pucallpa y el naranjo (*Citrus* sp.) del campus de la UNALM.

#### **3.2. Estudio anatómico**

Para el estudio anatómico de las cinco especies se utilizó la Norma de procedimientos en estudios de anatomía de Madeira: I. Angiospermae del IBAMA (1992) y la “List of Microscopic Features For Hardwood Identification” (IAWA, 1989) (Anexo 3).

#### **3.3. Preparación de muestras para el estudio anatómico**

Las muestras de madera de 2x10x15 cm y 3x3x5 cm debidamente orientadas se emplearon para describir las siguientes características: color, visibilidad de anillos de crecimiento, olor, sabor, brillo, textura, veteado, poros, parénquima y radios. El color se determinó con la tabla Munsell (1990). Para determinar el grano se utilizaron cubos de 5cm de lado debidamente orientados.

#### **3.4. Microtecnia**

##### **a. Preparación de láminas histológicas**

De cada especie, se preparó tres cubitos de 1cm. de lado debidamente orientados para obtener láminas histológicas para la descripción microscópica que conformó los siguientes pasos:

**Ablandamiento de cubos:** Los cubos se ablandaron en agua a 180°C por un periodo seis horas al día durante tres semanas; sin embargo, especies como shihuahuaco y capirona necesitaron adicionalmente ser ablandadas con hidróxido de sodio (NaOH) al 3 por ciento por ser especies más duras. Se determinó el ablandamiento con el marcado de los cubos a través de la presión ejercida con la uña del dedo.

Corte de láminas: Los cubos ablandados se cortaron con el micrótopo de deslizamiento horizontal obteniendo láminas de 20-25  $\mu\text{m}$  de espesor en las secciones transversal, radial y tangencial, las cuales después fueron colocadas en placas petri con alcohol de 30°.

Deshidratado: Se realizó de forma secuencial con alcoholes de 30°, 60° y 90°. En cada grado de alcohol las láminas permanecieron por 15 minutos, al término se retiró y agregó un grado superior de alcohol.

Coloración: Después del deshidratado, se agregó cinco gotas de safranina a la placa que contiene las láminas buscando un coloreado uniforme durante 15 a 20 minutos. Luego se lavaron las láminas con alcohol de 90°, para eliminar el exceso de colorante. Finalmente se incorporó xilol para fijar el colorante.

Montaje: Los tejidos coloreados fueron recortados con un bisturí sobre una superficie de vidrio, posteriormente se colocaron en placas portaobjetos agregando una gota de merkoglass antes de cubrirlas con cubreobjetos de 18x18 mm. El pegamento es de secado instantáneo.

**b. Preparación de láminas de tejido macerado**

Se prepararon pequeños pedazos de maderas similares a palitos de fósforos para la obtención de fibras y vasos como se explica en los siguientes pasos:

Maceración: Los palitos de madera se colocaron en un vaso pirex de 100 ml, donde se agregó una solución de ácido nítrico al 33 por ciento hasta cubrirlos completamente, luego el vaso fue puesto en la cocina eléctrica a una temperatura de 180°C por un periodo de tiempo de 10 a 15 minutos. Cuando los palitos estaban decolorados y presentaban una consistencia ligeramente blanda estaban listos para trabajar.

Lavado, coloración y montaje: El tejido se lavó con abundante agua para eliminar el ácido, seguido se agregó alcohol de 90°; asimismo, se incorporó tres a cuatro gotas de safranina. Luego parte del tejido macerado se colocó en una placa petri y se agregó xilol para fijar el colorante. Posteriormente se comenzó con la separación y selección de fibras y vasos con ayuda de una aguja hipodérmica y un microscopio. Los vasos y

fibras seleccionados se colocaron en portaobjetos, donde se agregó una gota de merkoglass y se cubrió con cubreobjetos de 22x22 mm.

**c. Medición de elementos xilemáticos**

De cada especie se realizó cincuenta mediciones por elemento anatómico, que incluyó diámetro de poros y longitud de vasos; altura y ancho de radios; diámetro, espesor y longitud de fibras. Asimismo, se determinó el número de poros/mm<sup>2</sup>, número de células en ancho y altura que conforman los radios y el número de radios /mm.

**3.5. Registros de imágenes**

La estructura anatómica de cada especie se registró mediante la toma de macrofotografías con el estereoscopio Olympus y microfotografías mediante una cámara digital Canon Power Shot S50 acoplada al microscopio y conectada a una computadora con el software LAS EZ de LEICA.

**3.6. Evaluación de resultados**

Los parámetros estadísticos de los elementos anatómicos se calcularon conforme a lo indicado en la norma COPANT N° 30:1-12. Se calculó el promedio, desviación estándar, coeficiente de variabilidad e intervalo de confianza y se clasificaron los elementos leñosos en base a sus dimensiones (Anexo 4).

**3.7. Preparación de la clave de identificación**

Se elaboró la clave de identificación microscópica según la lista de características y parámetros dados por IAWA, para cada una de las especies en estudio.

**4. Metodología a nivel de carbón**

Para la producción de carbón se emplearon las mismas probetas de 3x3x5 cm que se utilizaron para la caracterización anatómica de la madera. Con ayuda de una cuchilla se cortó parte de la sección transversal de la probeta y dicha sección se demarcó con un lápiz y codificó de tal forma que después del proceso de carbonización se pudiera identificar. La carbonización se realizó en una mufla del laboratorio de Transformación Química de la Madera a una temperatura máxima de 450°C por un periodo no mayor a una hora.



#### **4.1. Análisis macroscópico del carbón**

De las muestras carbonizadas con ayuda del estereoscopio se obtuvieron macrofotografías en las secciones antes demarcadas con lápiz, para realizar la comparación entre la madera y carbón y poder caracterizar e identificar la especie de procedencia del carbón basándose en la estructura anatómica.

#### **4.2. Medición de elementos xilemáticos**

De cada especie de carbón se realizó cincuenta mediciones del diámetro tangencial de poros y frecuencia de poros/mm<sup>2</sup> con el software Image Pro Plus v4.5.

#### **4.3. Evaluación de resultados**

Los parámetros estadísticos de las características evaluadas se calcularon conforme a lo indicado en la norma COPANT N° 30:1-12. Se calculó el promedio, desviación estándar, coeficiente de variabilidad e intervalo de confianza y se clasificaron según sus dimensiones (Anexo 4).

#### **4.4. Análisis físico-químico del carbón**

Para la evaluación físico-química del carbón vegetal de las cinco especies en estudio, las muestras fueron sometidas a pruebas para determinar la densidad, contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo según la Norma ASTM - D1762.

Según la Norma para determinar el contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo es necesario trabajar con carbón molido, por lo que las probetas se pusieron a secar al aire. Seguido se molieron y tamizaron, para trabajar con el material retenido entre el tamiz N°100 (150  $\mu$ m) y el N°20 (850  $\mu$ m).

- Densidad: Se empleó el método de Arquímedes para determinar la densidad de las probetas carbonizadas.
- Contenido de Humedad: En la mufla precalentada a 750°C se pusieron los crisoles vacíos con sus respectivas tapas por un período de 10 minutos para eliminar impurezas. Luego los crisoles se enfriaron en el desecador por una hora, se pesaron, se les agregó a cada uno, un gramo de muestra molida y fueron llevados a la mufla

por dos horas a 105°C. Posteriormente los crisoles se enfriaron en el desecador por una hora y pesaron.

$$\text{CH}(\%) = \frac{\text{Peso seco al aire} - \text{Peso seco a } 105^{\circ}\text{C}}{\text{Peso seco al aire}} \times 100$$

- Material volátil: Con la mufla precalentada a 950°C los crisoles utilizados en la prueba de contenido de humedad con tapa y con el contenido de muestra se pusieron sobre la puerta de la mufla alcanzando una temperatura de 300°C por dos minutos, luego se introdujeron a la mufla y con la puerta abierta los crisoles estuvieron a 500°C por tres minutos. La puerta se cerró y las muestras estuvieron por seis minutos. Finalmente los crisoles se enfriaron en el desecador por una hora y se pesaron.

$$\text{mv}(\%) = \frac{\text{Peso seco a } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso seco a } 950^{\circ}\text{C}}{\text{Peso seco a } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$$

- Cenizas: Los crisoles con la muestra de la prueba de material volátil se pusieron en la mufla a 750°C por seis horas. Finalmente se enfriaron en el desecador por una hora y pesaron.

$$\text{c}(\%) = \frac{\text{Peso de residuo}}{\text{Peso seco al aire}} \times 100$$

- El carbono fijo se determinó como la diferencia de los resultados obtenidos de las pruebas antes mencionadas como se presenta continuación:

$$\text{Carbono fijo}(\%) = 100\% - (\% \text{CH} + \% \text{mv} + \% \text{c})$$

#### **4.5. Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) a carbón molido**

Para este análisis se tomó parte del carbón molido de las especies capirona y shihuahuaco retenido en la malla del tamiz N°20 (850 µm), es decir fragmentos de 850 a 1 500 µm, los cuales fueron montados en porta-muestras cilíndricos de acero de 1 cm de diámetro y 0,5 cm de altura pegados con adhesivo sintético no líquido, para evitar su ascenso por capilaridad en el carbón y luego fueron metalizados con oro para su observación.

El proceso de preparación de las muestras y captura de microfotografías con el microscopio SEM electrónico de barrido FEI Inspect S50 duró aproximadamente una hora y estuvo a cargo de personal especializado del laboratorio de Equipamiento Especializado de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Descripción anatómica de la madera

*Calycophyllum spruceanum*

Capirona

Rubiaceae

#### Características generales

En condición seca al aire, el duramen es de color marrón muy pálido 10YR 7/4 (Figura 1), no hay transición de albura a duramen. Anillos de crecimiento no diferenciados. Olor y sabor no distintivos. Grano recto a ligeramente entrecruzado, textura fina y brillo ausente. Madera de resistencia dura al ser cortada por la cuchilla en sentido transversal a las fibras.

#### Descripción macroscópica

Poros: No visibles a simple vista, madera de porosidad difusa con arreglo radial. Poros solitarios y múltiples radiales de 2, líneas vasculares irregulares sin obstrucción.

Parénquima: No visible con lupa de 10x. (Figura 2)

Radios: Visibles con lupa de 10x, sin contraste en la sección radial y no estratificados.

#### Descripción microscópica

Poros/Elementos vasculares: Poros solitarios de forma ovalada y múltiples radiales de 2, ocasionalmente de 3. Diámetro tangencial promedio 59  $\mu\text{m}$  (48-90), clasificados como pequeños. En promedio hay 43 poros/ $\text{mm}^2$  (30-59), clasificados como numerosos. Longitud promedio de elementos vasculares 489  $\mu\text{m}$  (193-785), clasificados como medianos (Figura 3). Platina de perforación simple y poco inclinada; punteaduras intervasculares alternas de forma redonda, con diámetro promedio de 4  $\mu\text{m}$  (3-5), clasificadas como muy pequeñas;

apertura incluida de forma alargada. Presencia de apéndices en uno o ambos extremos del elemento vascular.

Parénquima: En la sección transversal es ausente o extremadamente raro (Figura 4)

Radios: En sección tangencial altura promedio de 420  $\mu\text{m}$  (233-841) clasificados como extremadamente bajos, constituidos por 19 (10-47) células en promedio. Multiseriados con 39  $\mu\text{m}$  (25-70) de ancho en promedio, clasificados como muy finos, conformados por 3 células (3-7) en promedio (Figura 5). En sección radial, heterocelulares formados por células procumbentes con una o 2 a 4 hileras de células erectas en sus márgenes (Figura 6). En promedio 8 radios/mm (6-10), clasificados como poco numerosos; heterogéneo tipo II, escasos fusionados, no estratificado. Punteaduras radiovasculares con bordes distintivos similar a la puntuación intervascular en tamaño y modelo.

Fibras: Libriformes, longitud promedio de 1 649  $\mu\text{m}$  (1 323-2 073) clasificadas como largas. Diámetro de 16  $\mu\text{m}$  (11-27) en promedio, clasificadas como angostas; de paredes delgadas con espesor promedio de 4,4  $\mu\text{m}$  (2,6-7,3); no estratificadas (Figura 3). Fibras con punteaduras notoriamente areoladas.

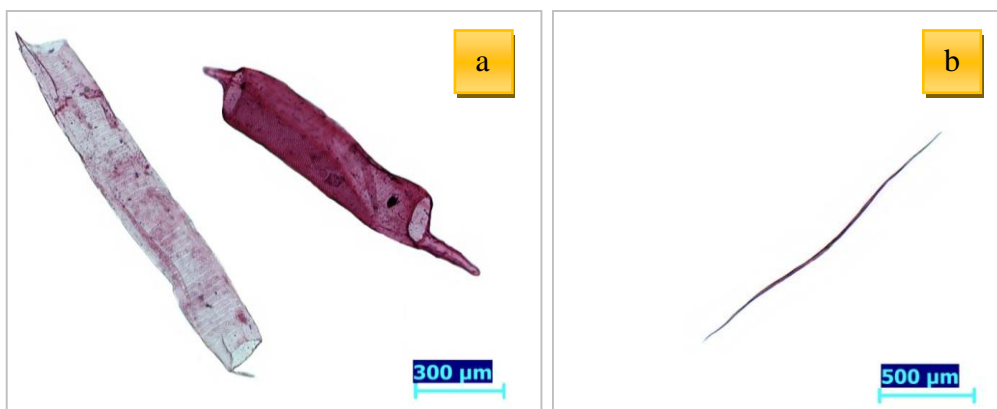


a) Sección tangencial, b) Sección radial

**Figura 1:** Madera de *Calycophyllum spruceanum*



**Figura 2:** Sección transversal de *Calycophyllum spruceanum* a 10x



a) Elementos vasculares, b) Fibras

**Figura 3:** Elementos leñosos de *Calycophyllum spruceanum*

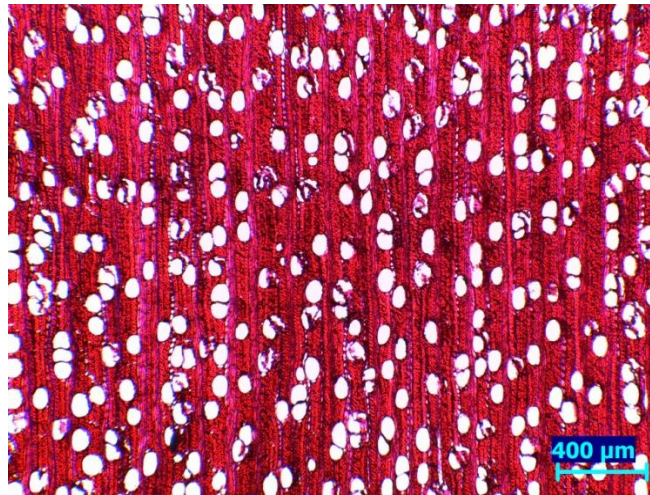


Figura 4: Sección transversal de *Calycophyllum spruceanum*

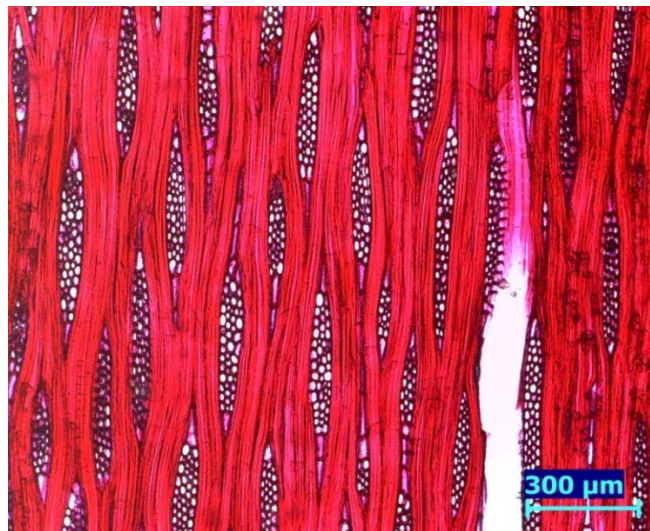


Figura 5: Sección tangencial de *Calycophyllum spruceanum*



Figura 6: Sección radial de *Calycophyllum spruceanum*

**Características generales**

En condición seca al aire, la albura es de color blanco rosáceo 7.5YR 8/2 y el duramen marrón rojizo claro 5YR 6/4 (Figura 7), presenta cambio abrupto en la transición de albura a duramen. Anillos de crecimiento poco diferenciados. Decoloración por abundantes gomas. Olor y sabor no distintivos. Grano recto, textura media, brillo medio y veteado de arcos superpuestos causado por el parénquima marginal. Madera de resistencia dura al ser cortada por la cuchilla en sentido transversal a las fibras.

**Descripción macroscópica**

Poros: Ligeramente visibles a simple vista, madera de porosidad difusa con arreglo radial. Poros predominantemente solitarios con presencia de múltiples radiales de 2 y 3, líneas vasculares rectilíneas obstruidas con gomas.

Parénquima: Visible con lupa de 10x, vasicéntrico y marginal. Más claro que contrasta con las fibras. Presencia de canales intercelulares en parénquima marginal. (Figura 8)

Radios: Visibles con lupa de 10x, pocos contrastados en la sección radial y no estratificados.

**Descripción microscópica**

Poros/Elementos vasculares: Predominantemente poros solitarios de forma ovalada y múltiples radiales de 2 y 3. Diámetro tangencial promedio 152  $\mu\text{m}$  (81-212), clasificados como medianos. En promedio hay 4 poros/ $\text{mm}^2$  (2-7), clasificados como muy pocos. Longitud promedio de elementos vasculares 298  $\mu\text{m}$  (151-424), clasificados como cortos (Figura 9). Platina de perforación simple y horizontal; punteaduras intervasculares alternas de forma redonda, con diámetro promedio de 8  $\mu\text{m}$  (6-11), clasificadas como medianas; apertura incluida de forma alargada.

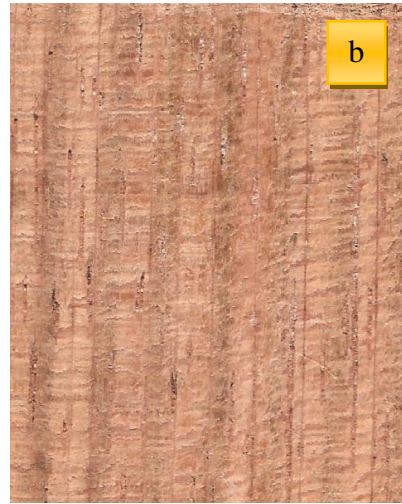
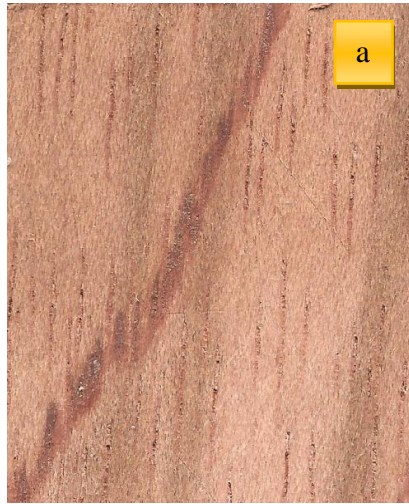
Parénquima: En la sección transversal paratraqueal vasicéntrico y en bandas del tipo marginal (Figura 10); en corte longitudinal no estratificado, de 1 a 2 septas por células (Figura 11). Canales intercelulares axiales en parénquima marginal.



Radios: En la sección tangencial altura promedio de 432  $\mu\text{m}$  (239-726) clasificados como extremadamente bajos, constituidos por 21 (10-32) células en promedio. Multiseriados de 35  $\mu\text{m}$  (25-64) de ancho en promedio, clasificados como muy finos, conformados por 3 células (2-3) en promedio (Figura 11). En sección radial, heterocelulares formados por células procumbentes con una hilera marginal de células erectas (Figura 12). En promedio 7 radios/mm (4-8), clasificados como pocos numerosos; heterogéneos tipo II, no estratificados. Punteaduras radiovasculares con bordes distintivos similar a la puntuación intervascular en tamaño y modelo.

Fibras: Libriformes, longitud promedio de 1 410  $\mu\text{m}$  (749-1 727) clasificadas como medianas. Diámetro tangencial de 19  $\mu\text{m}$  (11-27) en promedio, clasificadas como angostas; de paredes delgadas con espesor promedio de 5,3  $\mu\text{m}$  (1,6-12,4); no estratificadas (Figura 9).

Inclusiones: Gomas de color marrón en vasos, radios y parénquima marginal. Presencia de cristales cuadrangulares de igual tamaño en parénquima longitudinal (Figura 12).

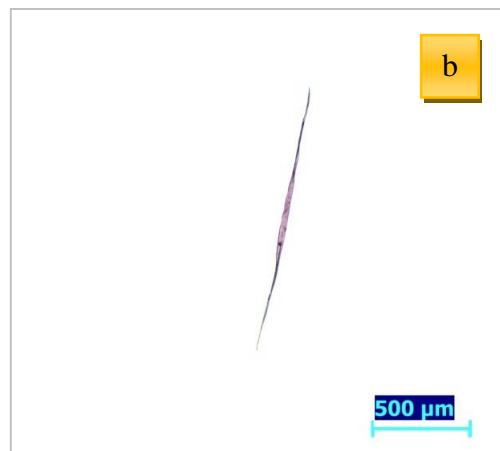


a) Sección tangencial, b) Sección radial

**Figura 7:** Madera de *Copaifera officinalis*



**Figura 8:** Sección transversal de *Copaifera officinalis* (10x)



a) Elemento vascular, b) Fibra

**Figura 9:** Elementos leñosos de *Copaifera officinalis*

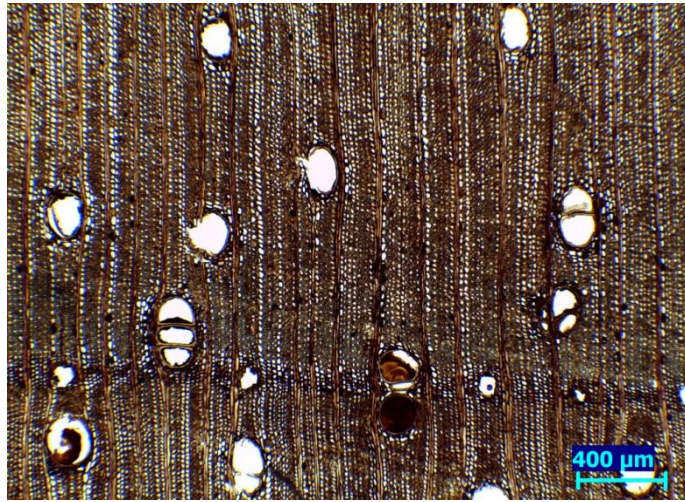


Figura 10: Sección transversal de *Copaifera officinalis*



Figura 11: Sección tangencial de *Copaifera officinalis*



a) Cristales en parénquima longitudinal, b) Cristales cuadrangulares

Figura 12: Sección radial de *Copaifera officinalis*

**Características generales**

En condición seca al aire, la albura es de color blanco rosáceo 7.5YR 8/2 y el duramen marrón fuerte 7.5YR 5/6 (Figura 13), presenta cambio abrupto en la transición de albura a duramen. Anillos de crecimiento poco diferenciados. Decoloración por abundantes gomas. Olor y sabor no distintivos. Grano entrecruzado, textura media, brillo medio y vetado de arcos superpuestos y satinado producido por los anillos de crecimiento y grano respectivamente. Madera de resistencia dura al ser cortada por la cuchilla en sentido transversal a las fibras.

**Descripción macroscópica**

Poros: Ligeramente visibles a simple vista, madera de porosidad difusa con arreglo radial. Poros solitarios con presencia de múltiples radiales de 2 a 3, líneas vasculares irregulares obstruidas con sílice.

Parénquima: Visible con lupa de 10x, vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente. Más claro que contrasta con las fibras. (Figura 14)

Radios: Visibles con lupa de 10x, no contrastados en la sección radial; estratificados.

**Descripción microscópica**

Poros/Elementos vasculares: Predominantemente poros solitarios de forma ovalada y múltiples radiales de 2 y 3. Diámetro tangencial promedio 164  $\mu\text{m}$  (116-202), clasificados como medianos. En promedio hay 6 poros/ $\text{mm}^2$  (4-11), clasificado como pocos. Longitud promedio de elementos vasculares 311  $\mu\text{m}$  (220-410), clasificados como cortos (Figura 15). Platina de perforación simple y horizontal; punteaduras intervasculares alternas de forma cuadrangular, con diámetro promedio de 9  $\mu\text{m}$  (8-10), clasificadas como medianas; apertura incluida de forma alargada.

Parénquima: En la sección transversal hay parénquima paratraqueal vasicéntrico, aliforme predominantemente con alas cortas tipo rombo y escasas alas largas tipo ala y aliforme

confluente (Figura 16); en corte longitudinal no estratificado, de 1 a 2 septas por células y escasas de 3 a 4 septas por células (Figura 17).

Radios: En la sección tangencial altura promedio de 235  $\mu\text{m}$  (165-300) clasificados como extremadamente bajos, constituidos por 10 (6-15) células en promedio. Uniseriados de 21  $\mu\text{m}$  (8-41) de ancho en promedio, clasificados como muy finos, conformados por 1 célula (1-3) en promedio (Figura 17). En la sección radial, homocelulares formados solo por células procumbentes (Figura 18). En promedio 10 radios/mm (6-15), clasificados como poco numerosos, estratificados. Punteaduras radiovasculares con bordes distintivos similar a la puntuación intervascular en tamaño y modelo.

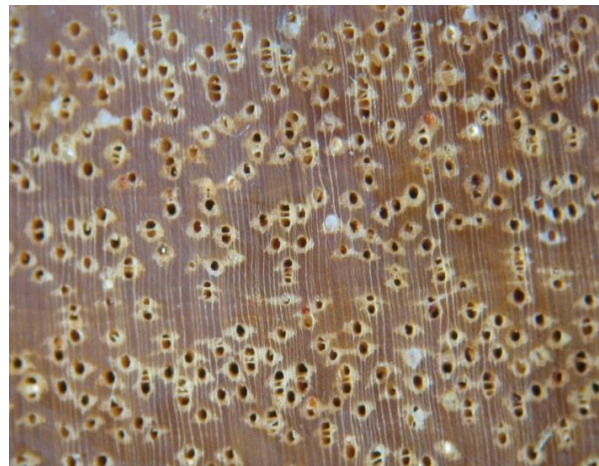
Fibras: Libríformes, longitud promedio de 1 424  $\mu\text{m}$  (1 172-1 752) clasificadas como medianas. Diámetro tangencial de 12  $\mu\text{m}$  (9-25) en promedio, clasificada como angosta; de paredes muy gruesas con espesor promedio de 5,3  $\mu\text{m}$  (3,2-13,4); no estratificadas. (Figura 15).

Inclusiones: Presencia de gomas de color rojo intenso en vasos.

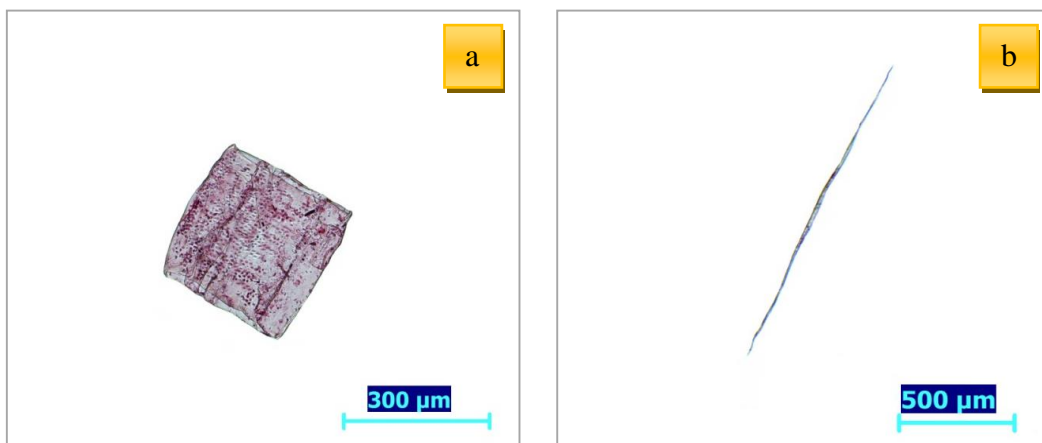


a) Sección tangencial, b) Sección radial

**Figura 13:** Madera de *Dipteryx odorata*



**Figura 14:** Sección transversal de *Dipteryx odorata* (10x)



a) Elemento vascular, b) Fibra

**Figura 15:** Elementos leñosos de *Dipteryx odorata*

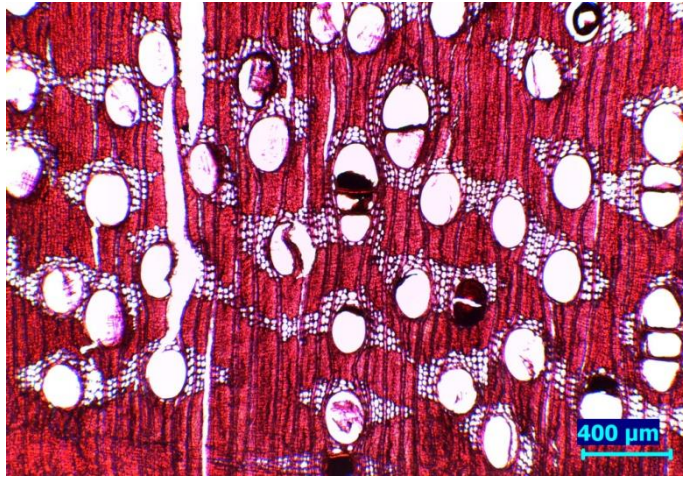


Figura 16: Sección transversal de *Dipteryx odorata*



Figura 17: Sección tangencial de *Dipteryx odorata* con radios estratificados

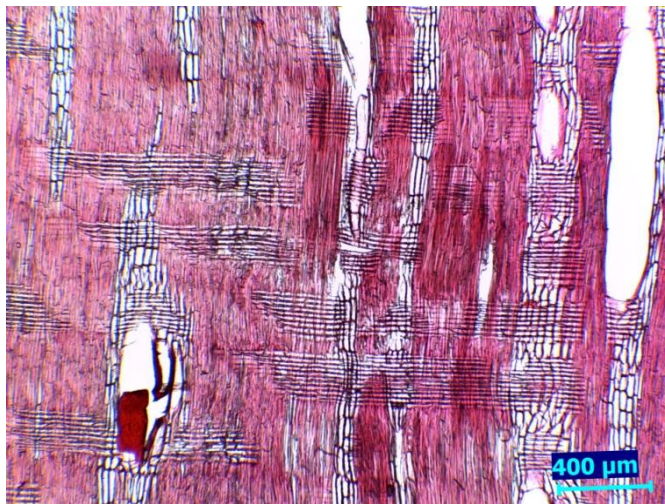


Figura 18: Sección radial de *Dipteryx odorata*

**Características generales**

En condición seca al aire, el duramen es de color amarillo pálido 2.5Y 7/4 (Figura 19), no hay transición de albura a duramen. Anillos de crecimiento no diferenciados. Decoloración tipo manchas producido por hongos. Olor y sabor no distintivos. Grano entrecruzado, textura media y brillo medio. Madera de resistencia blanda al ser cortada por la cuchilla en sentido transversal a las fibras.

**Descripción macroscópica**

Poros: Ligeramente visibles a simple vista, madera de porosidad difusa con arreglo radial. Poros solitarios y escasos múltiples radiales de 2, líneas vasculares irregulares obstruidas por tilosis.

Parénquima: Visible con lupa de 10x, vasicéntrico y aliforme. Más claro que contrasta con las fibras. (Figura 20)

Radios: Visibles con lupa de 10x, pocos contrastados en la sección radial; no estratificados.

**Descripción microscópica**

Poros/Elementos vasculares: Poros solitarios de forma ovalada y escasos múltiples radiales de 2. Diámetro tangencial promedio 129  $\mu\text{m}$  (93-168), clasificados como medianos. En promedio hay 5 poros/ $\text{mm}^2$  (3-8), clasificado como pocos. Longitud de elementos vasculares 262  $\mu\text{m}$  (123-378), clasificados como cortos (Figura 21). Platina de perforación simple y poco inclinada; punteaduras intervasculares alternas de forma poligonal y ovalada, con diámetro promedio de 7  $\mu\text{m}$  (6-8), clasificadas como medianas; apertura incluida y coalescentes de forma alargada. Presencia de tilosis en los elementos vasculares.

Parénquima: En la sección transversal paratraqueal vasicéntrico multiseriado y aliforme con alas cortas tipo rombo (Figura 22); en corte longitudinal no estratificado, de 3 a 4 septas por células (Figura 23).



Radios: En la sección tangencial altura promedio de 252  $\mu\text{m}$  (170-458) clasificados como extremadamente bajos, constituidos por 9 (6-14) células en promedio. Biseriados de 47  $\mu\text{m}$  (26-73) de ancho en promedio, clasificados como muy finos, conformados por 2 células (1-3) en promedio (Figura 23). En sección radial, mayormente heterocelulares formados por células procumbentes con una hilera marginal de células erectas y/o cuadradas (Figura 24). En promedio 7 radios/mm (5-9), clasificados como poco numerosos; heterogéneos tipo II, no estratificados. Punteaduras radiovasculares con mucha reducción de bordes a aparentemente simple, puntuaciones circulares o angulares.

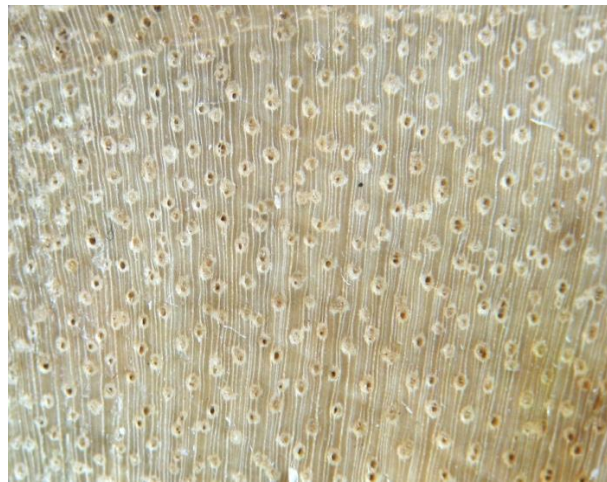
Fibras: Libriformes, longitud promedio de 658  $\mu\text{m}$  (498-835) clasificadas como cortas. Diámetro tangencial de 15  $\mu\text{m}$  (10-19) en promedio, clasificada como angosta; de paredes muy delgadas con espesor promedio de 2,1  $\mu\text{m}$  (1,5-3,1) (Figura 21); septadas, no estratificadas.

Inclusiones: Gomas de color rojo intenso en radios.

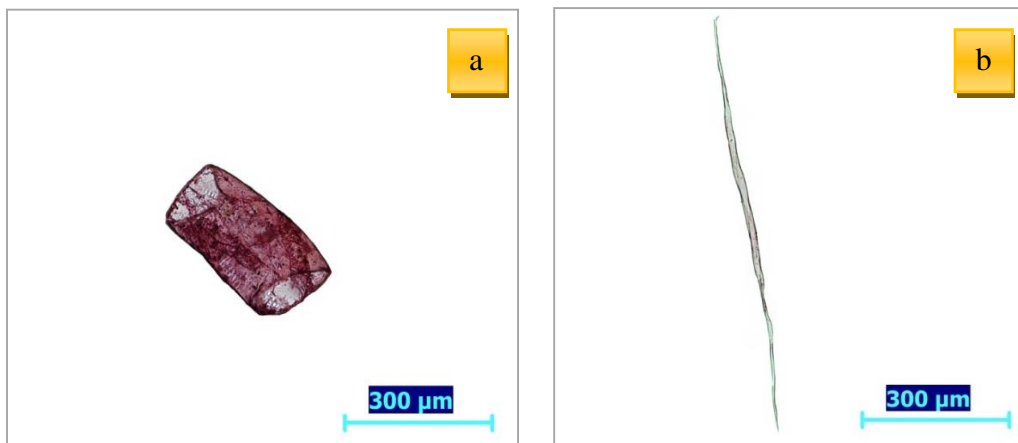


a) Sección tangencial, b) Sección radial

**Figura 19: Madera de *Mangifera* sp.**



**Figura 20: Sección transversal de *Mangifera* sp. (10x)**



a) Elemento vascular, b) Fibra

**Figura 21: Elementos leñosos de *Mangifera* sp.**

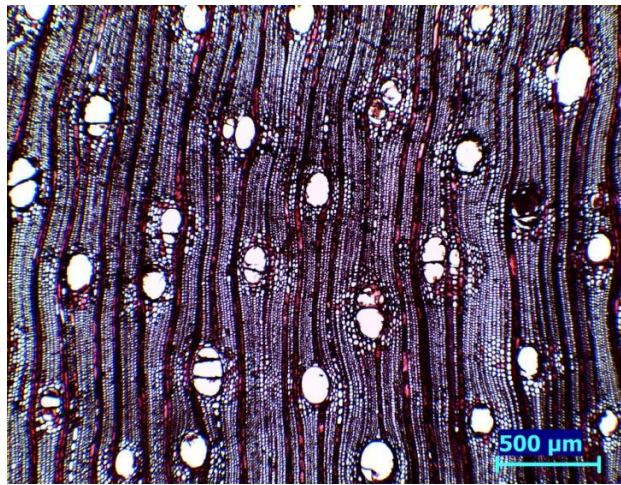
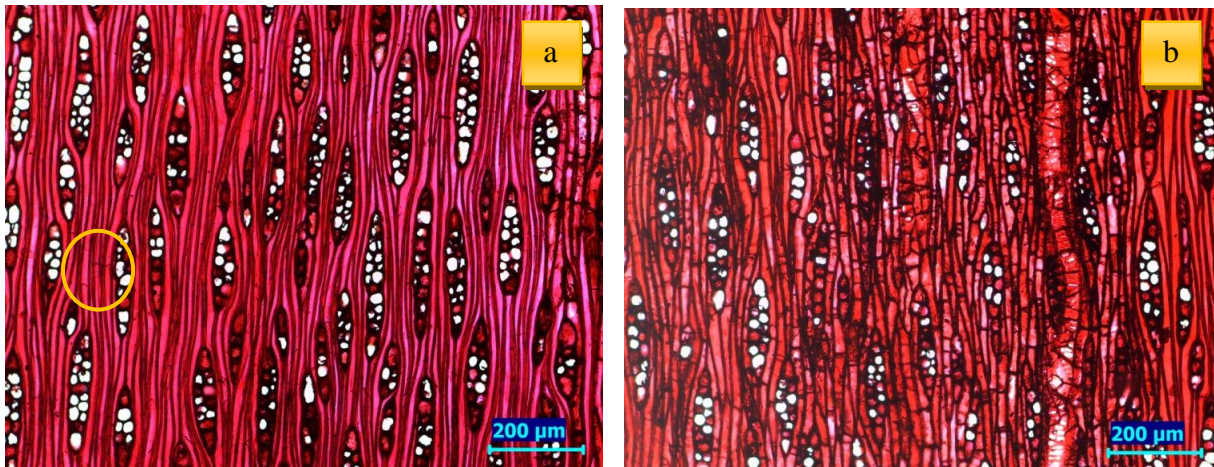


Figura 22: Sección transversal de *Mangifera* sp.



a)Fibras septadas,b)Parénquima septado y tilosis

Figura 23: Sección tangencial de *Mangifera* sp.

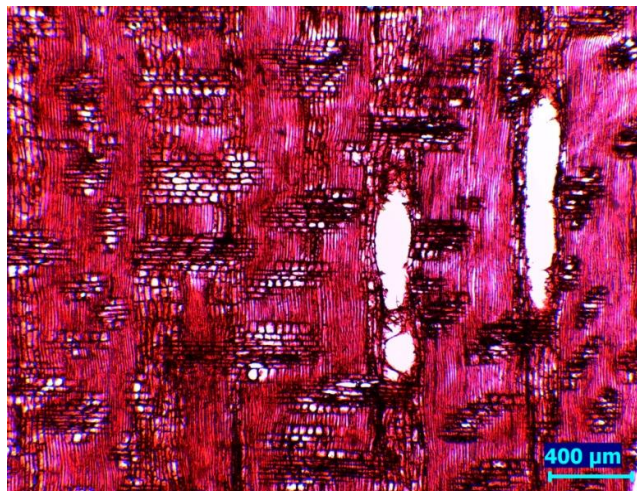


Figura 24: Sección radial de *Mangifera* sp.

**Características generales**

En condición seca al aire, el duramen es de color amarillo pálido 2.5Y 8/3 con vetas de color oscuro de manera irregular (Figura 25), no hay transición de albura a duramen. Anillos de crecimiento no diferenciados. Olor y sabor no distintivos. Grano entrecruzado, textura fina, brillo ausente y veteado característico causado por el color. Madera de resistencia dura al ser cortada por la cuchilla en sentido transversal a las fibras

**Descripción macroscópica**

Poros: Visibles con lupa de 10x, madera de porosidad difusa con arreglo radial. Poros, solitarios y múltiples radiales, líneas vasculares irregulares sin obstrucción.

Parénquima: Visible con lupa de 10x, marginal. (Figura 26)

Radios: Visibles con lupa de 10x, poco contrastados en la sección radial y no estratificados.

**Descripción microscópica**

Poros/Elementos vasculares: Predominantemente múltiples radiales de 2 y solitarios de forma ovalada. Diámetro tangencial promedio 53  $\mu\text{m}$  (32-68), clasificados como pequeños. En promedio hay 13 poros/ $\text{mm}^2$  (7-19), clasificados como pocos. Longitud de elementos vasculares 131  $\mu\text{m}$  (75-187), clasificados como cortos (Figura 27). Platina de perforación simple y horizontal; punteaduras intervasculares alternas de forma poligonal, con diámetro promedio de 4  $\mu\text{m}$  (3-5), clasificadas como muy pequeñas; apertura incluida y de forma ovalada. Presencia de apéndices en uno o en ambos extremos del elemento vascular, además de tilosis tipo escleróticas.

Parénquima: En la sección transversal presenta paratraqueal vasicéntrico y escaso aliforme y aliforme confluyente además de parénquima en bandas tipo marginal (Figura 28); en corte longitudinal no estratificado, de 3 a 4 septas por células (Figura 29).

Radios: En la sección tangencial altura promedio de 243  $\mu\text{m}$  (156-482) clasificados como extremadamente bajos, constituidos por 15 (9-33) células en promedio. Multiseriados de 40  $\mu\text{m}$  (29-55) de ancho promedio, clasificados como muy finos, conformados por 4 células (3-5) en promedio (Figura 29). En sección radial, homocelulares formados solo por células procumbentes (Figura 30). En promedio 8 radios/mm (6-11), clasificados como poco numerosos; no estratificados. Punteaduras radiovasculares con bordes distintivos similar a la puntuación intervascular en tamaño y modelo.

Fibras: Libriformes, longitud promedio de 988  $\mu\text{m}$  (736-1 235) clasificadas como medianas. Diámetro tangencial de 13  $\mu\text{m}$  (10-20) en promedio, clasificada como angosta; de paredes delgadas con espesor promedio de 2,6  $\mu\text{m}$  (2,0-3,5); no estratificadas (Figura 27). Fibras con punteaduras notoriamente areoladas.

Inclusiones: Gomas de color rojo en vasos y cristales en radios.

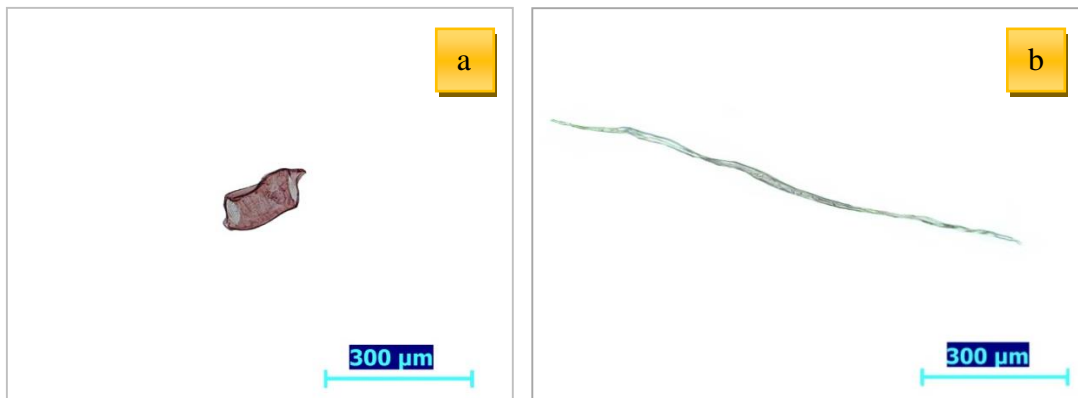


a) Sección tangencial, b) Sección radial

**Figura 25: Madera de *Citrus* sp.**



**Figura 26: Sección transversal *Citrus* sp. (10x)**



Elemento vascular, b) Fibra

**Figura 27: Elementos leñosos de *Citrus* sp.**

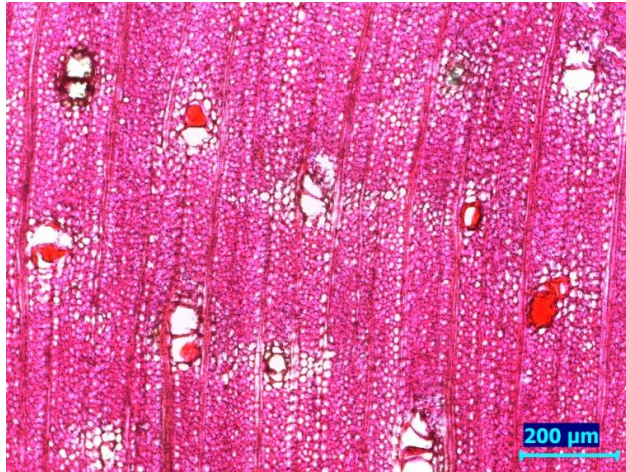


Figura 28: Sección transversal de *Citrus* sp.

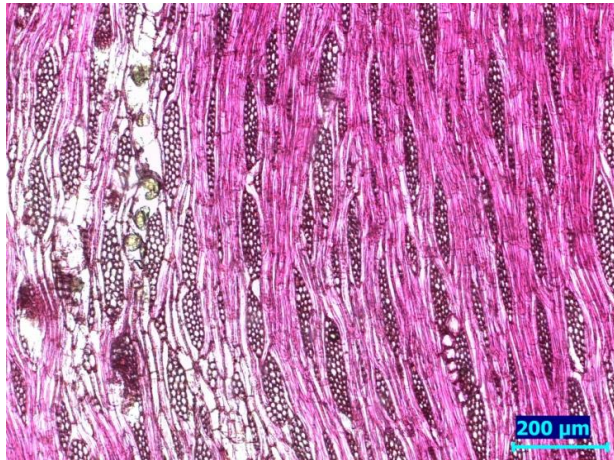


Figura 29: Sección tangencial de *Citrus* sp. con parénquima septado

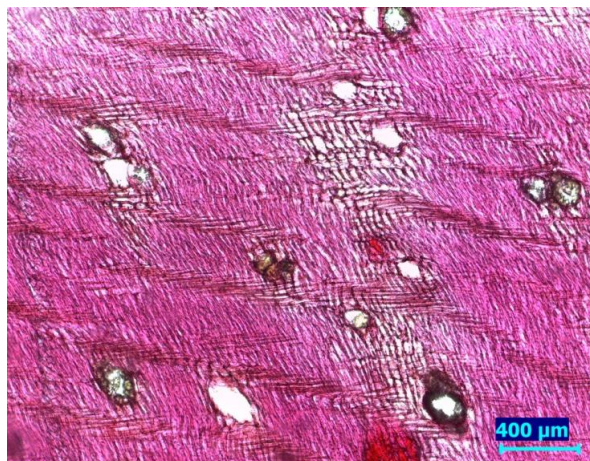


Figura 30: Sección radial de *Citrus* sp.

## **2. Descripción macroscópica del carbón**

### ***Calycophyllum spruceanum* (Capirona)**

El carbón presenta porosidad difusa con arreglo radial. Poros solitarios y múltiples radiales de 2. Diámetro tangencial promedio de 42  $\mu\text{m}$  (27-59), clasificados como muy pequeños. En promedio hay 48 poros/ $\text{mm}^2$  (34-61), clasificados como numerosos. Parénquima no visible. Radios visibles que brillan a contraluz. Presencia de escasas grietas en dirección de los radios (Figura 31).

### ***Copaifera officinalis* (Copaiba)**

El carbón presenta porosidad difusa con arreglo radial. Predominan los solitarios sobre los múltiples radiales de 2 y 3. Diámetro tangencial promedio de 123  $\mu\text{m}$  (85-185), clasificados como medianos. En promedio hay 4 poros/ $\text{mm}^2$  (3-7), clasificados como muy pocos. Parénquima marginal visible y brillante. Radios visibles que brillan a contraluz. Posee profundas grietas en dirección a los radios y son pequeñas en dirección perpendicular a los radios (Figura 32).

### ***Dipteryx odorata* (Shihuahuaco)**

El carbón presenta porosidad difusa con arreglo radial. Predominan los solitarios con presencia también de múltiples radiales de 2 a 4. Diámetro tangencial promedio de 136  $\mu\text{m}$  (88-193), clasificados como medianos. En promedio hay 10 poros/ $\text{mm}^2$  (7-13), clasificados como pocos. Parénquima paratraqueal vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente. Radios visibles que brillan a contraluz y mantienen la misma disposición que en la madera. Escasas grietas en dirección perpendicular a los radios (Figura 33).

### ***Magifera* sp. (Mango)**

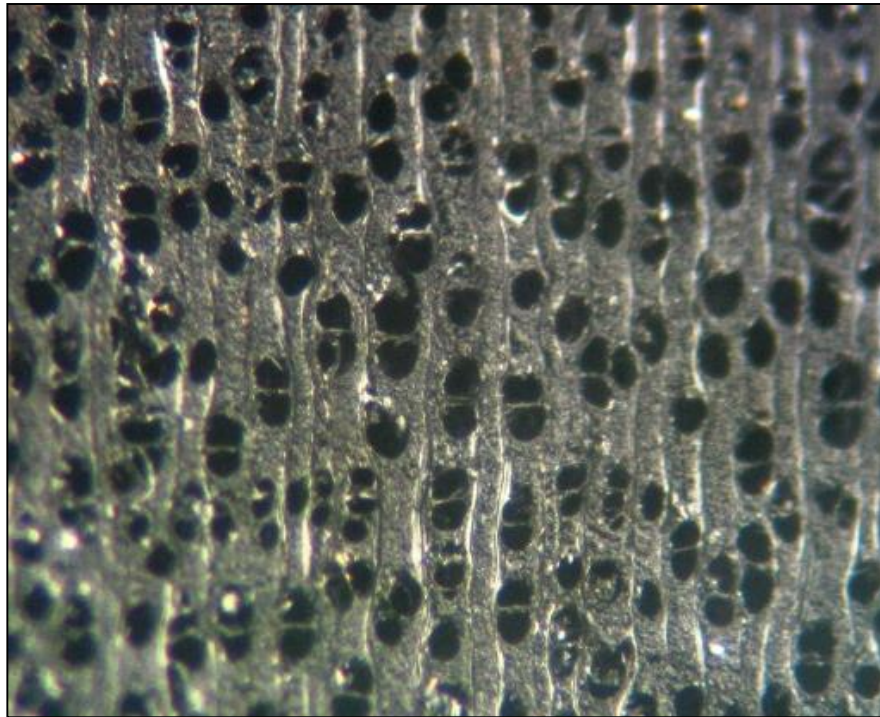
El carbón presenta porosidad difusa con arreglo radial. Poros solitarios y múltiples radiales de 2, parcialmente obstruidos por la presencia de tilosis. Diámetro tangencial promedio de 78  $\mu\text{m}$  (43-137), clasificados como pequeños. En promedio hay 7 poros/ $\text{mm}^2$  (4-9), clasificados como pocos. Parénquima paratraqueal vasicéntrico en varias capas alrededor de los poros y



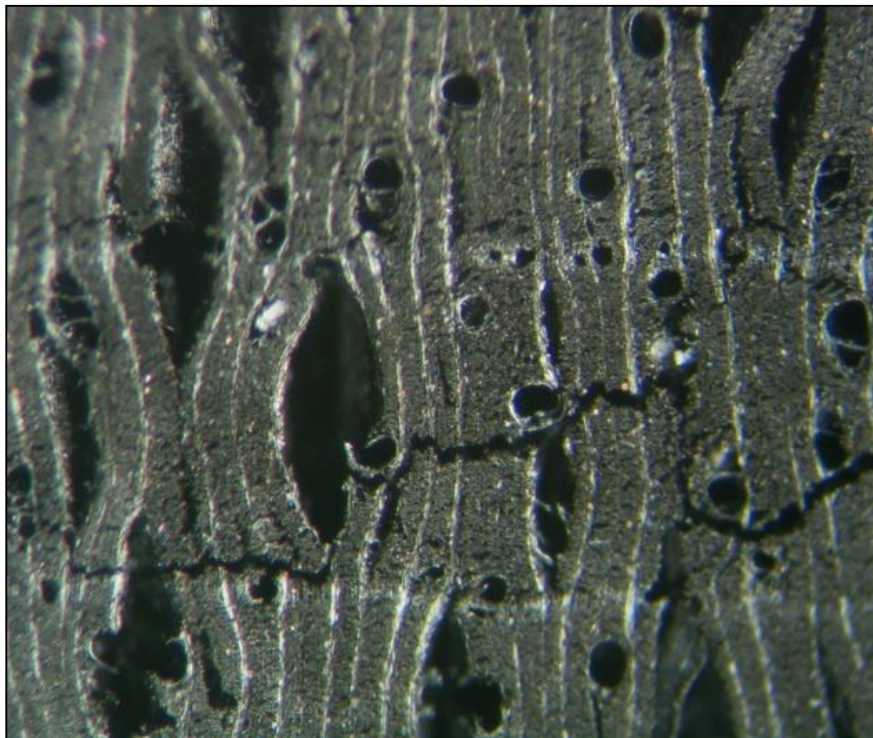
aliforme. Radios visibles que mantienen el mismo patrón que la madera y brillan con el reflejo de la luz. Posee grietas tanto en dirección de los radios como perpendicular a ellos (Figura 34).

***Citrus* sp. (Naranja)**

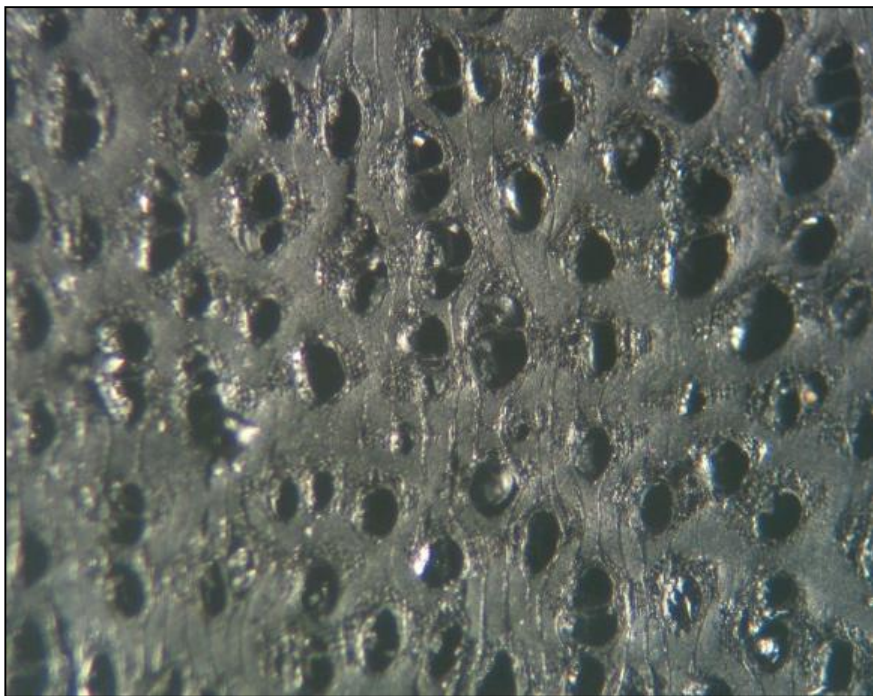
El carbón presenta porosidad difusa con arreglo radial. Poros numerosos solitarios y múltiples radiales de 2, parcialmente obstruidos por la presencia de tilosis. Diámetro tangencial promedio de 35  $\mu\text{m}$  (22-67), clasificados como muy pequeños. En promedio hay 19 poros/ $\text{mm}^2$  (11-26), clasificados como pocos. Parénquima paratraqueal vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente. Radios visibles que brillan con el reflejo de la luz. Presenta grietas profundas en dirección a los radios y perpendicular a ellos (Figura 35).



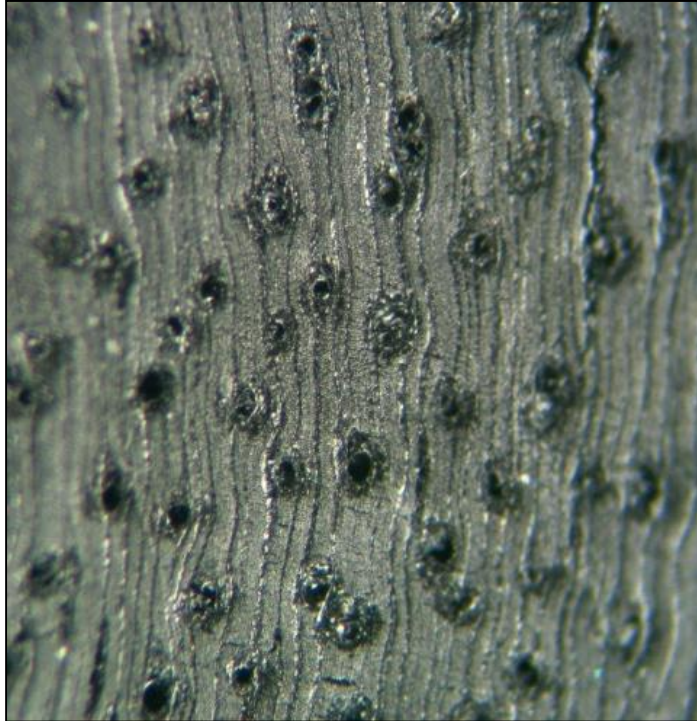
**Figura 31:** Sección transversal de carbón de *Calycophyllum spruceanum* (40x)



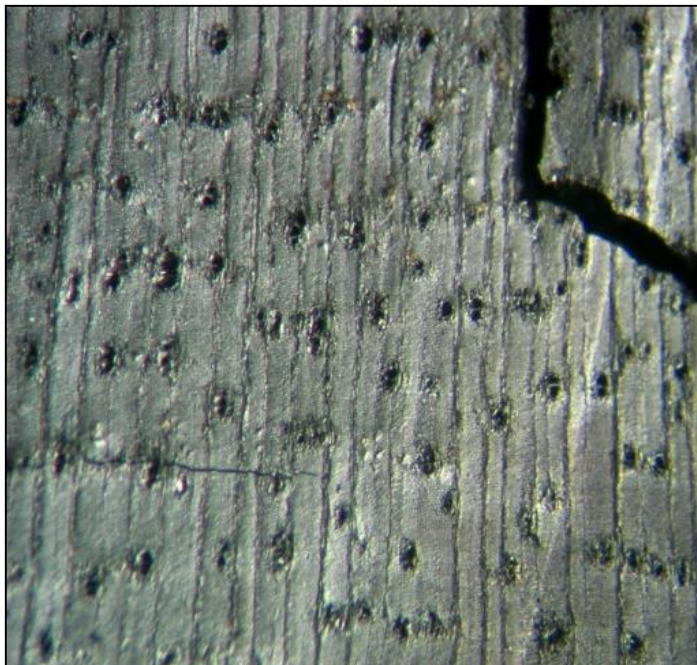
**Figura 32:** Sección transversal de carbón de *Copaifera officinalis* (40x)



**Figura 33:** Sección transversal de carbón de *Dipteryx odorata* (40x)



**Figura 34:** Sección transversal de carbón de *Mangifera* sp.(40x)



**Figura 35:** Sección transversal de madera de *Citrus* sp. (40x)

### **3. Discusión de resultados**

A través de las Tablas 3 y 4 se presenta un resumen de las características generales, macroscópicas y microscópicas de la madera de las cinco especies forestales en estudio.

#### **3.1. Características generales, organolépticas y macroscópicas de la madera**

De las cinco especies capirona es de color pardo, copaiba rojo, shihuahuaco marrón, mango y naranjo amarillos, resultados que coinciden con los autores Chavesta (2005), Acevedo y Kikata (1994), Chavesta (2015), León (2014) y Brenes *et al.* (2012) respectivamente.

Con respecto al grano; copaiba tiene grano recto, capirona grano recto a ligeramente entrecruzado y las especies restantes grano entrecruzado. En cuanto a la textura capirona y naranjo presentaron textura fina y las demás textura media. Los resultados de ambas características para las cinco especies coincidieron con lo reportado por los autores Chavesta (2005), Acevedo y Kikata (1994), Chavesta (2015), León (2014) y Brenes *et al.* (2012). El brillo fue medio para copaiba, shihuahuaco y mango, mientras que para el resto de especies estuvo ausente.

La resistencia del corte manual con una cuchilla fue dura para capirona, copaiba, shihuahuaco y naranjo, mientras que para el mango fue considerada blanda.

En cuanto al parénquima a nivel macroscópico este no fue visible en capirona resultado que concuerda a lo reportado por Chavesta (2005). Asimismo, el parénquima de copaiba coincide con lo presentado por Acevedo y Kikata (1994), para shihuahuaco además del parénquima vasicéntrico y aliforme expuesto por Chavesta (2015) se contó con aliforme confluyente. En especies como mango se visualizó parénquima vasicéntrico y aliforme y en naranjo bandas tipo marginal.

Con respecto a las inclusiones, la presencia de gomas en copaiba y shihuahuaco coincide con lo reportado por Acevedo y Kikata (1994) y Chavesta (2015) respectivamente. Otra inclusión como el sílice sólo en presentó en shihuahuaco.

### 3.2. Características microscópicas de la madera

A nivel microscópico, la longitud de los elementos vasculares en capirona fue mediana, para el resto de especies fueron cortas. Además capirona y naranjo fueron las únicas especies que presentaron apéndices en sus elementos vasculares en uno o ambos extremos. En cuanto a los poros por mm<sup>2</sup> fueron numerosos para la especie capirona, caracterizados por ser pequeños al igual que el naranjo, resultados que coinciden con lo reportado por Chavesta (2005) y Brenes *et al.* (2012). La única especie con presencia de canales intercelulares fue copaiba resultados de acuerdo a Acevedo y Kikata (1994).

Respecto al parénquima, fue ausente en capirona conforme a lo reportado por Chavesta (2005); copaiba presentó paratraqueal vasicéntrico y bandas del tipo marginal de acuerdo a Acevedo y Kikata (1994); shihuahuaco presentó además del parénquima paratraqueal vasicéntrico y aliforme de acuerdo a Chavesta (2015), el tipo aliforme confluyente; en tanto que el mango presentó paratraqueal vasicéntrico y aliforme de acuerdo con lo expuesto por León (2014) y naranjo presentó paratraqueal vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente y bandas del tipo marginal según Brenes *et al.* (2012). El parénquima septado solo estuvo ausente en capirona.

En cuanto a los radios, las especies shihuahuaco y naranjo presentaron radios homogéneos conformados por células procumbentes; mientras que el resto de especies presentó radios heterogéneos. Además, shihuahuaco fue la única especie con radios estratificados conforme a lo reportado por Chavesta (2015) y capirona presentó escasos radios fusionados de acuerdo con Chavesta (2005); mientras que en las demás especies fue ausente.

La especie capirona presentó fibra larga, mango corta y las otras tres especies medianas. El espesor de pared de las fibras fue grueso en shihuahuaco y para las otras especies fue delgado a muy delgado; asimismo, mango fue la única especie con fibras septadas.

En cuanto a inclusiones, la presencia de gomas se dio en copaiba, shihuahuaco, mango y naranjo; copaiba y naranjo presentaron cristales, en forma de rombo. La especie mango presentó tilosis conforme a lo reportado por León (2014), así como el naranjo tilosis de paredes engrosadas.

Tabla 3: Características generales y macroscópicas de las cinco especies en estudio

ESPECIES	CARACTERÍSTICAS GENERALES												CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS																			
	Color				Grano		Textura		Brillo		Veteado		Resistencia manual al corte		Poros		Parénquima						Radios		Otros							
	Rojo	Amarillo	Pardo	Marrón	Recto	Entrecruzado	Fina	Media	Ausente	Medio	Arcos superpuestos	Satinado	Característicos	Ausente	Blanda	Dura	Visibilidad	Agrupamiento	Canales intercelulares			En bandas			Radios		Otros					
																	No visible a simple vista	Ligeramente visible a simple vista	Solitarios	Múltiples	No visible aún con lupa de 10x	Visible con lupa de 10x	Vasocéntrico	Aliforme	Aliforme confluyente	Marginal	Visibles con lupa de 10x	Estratificados	Gomas	Sílice		
Capirona			x		x	x	x		x					x		x	x	x			x						x					
Copaiba	x				x		x		x	x					x		x	xx	x	x		x			x	x			x			
Shihuahuaco				x		x	x		x	x	x				x		x	xx	x			x	x	x	x		x	x	x	x		
Mango		x				x		x	x				x	x			x	x	x			x	x			x						
Naranja		x				x	x		x			x			x		x	x	x			x			x		x					

xx: Predominancia



### **3.3. Análisis estadísticos de las dimensiones de los elementos xilemáticos**

En la Tabla 5 se presentan los valores estadísticos, para los elementos xilemáticos de las cinco especies en estudio. Según la categorización del coeficiente de variabilidad realizada por Rubio (2002), se puede afirmar que el diámetro tangencial de poros de las especies capirona, shihuahuaco y mango presentan datos regularmente homogéneos, mientras que las demás especies presentan datos regularmente variables. En cuanto a longitud de elementos vasculares, shihuahuaco presenta datos regularmente homogéneos, mientras que copaiba, mango y naranjo presentan datos variables y capirona muy variables.

Con respecto a la longitud de fibras las cinco especies en estudio presentaron según la categorización del coeficiente de variabilidad, datos regularmente homogéneos; sin embargo, para el espesor de pared de las fibras, naranjo fue la única especie que presentó datos regularmente homogéneos; capirona presentó datos regularmente variables; mango datos variables y las dos especies restantes datos muy variables.



**Tabla 5: Valores estadísticos de las mediciones de elementos leñosos**

Concepto	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
<b>Capirona</b>											
Valor Promedio	59	43	420	39	19	3	8	16	4,4	1 649	489
Valor mínimo	48	30	233	25	10	3	6	11	2,6	1 323	193
Valor máximo	90	59	841	70	47	7	10	27	7,3	2 073	785
Desviación estándar	9	5	116	10	6	1	1	3	1	184	151
Coeficiente de variabilidad	14	12	28	25	34	21	14	17	19	11	31
Intervalo de confianza	59±2	43±1	420±33	39±3	19±2	3±1	8±1	16±1	4,4±1	1 649±52	489±43
<b>Copaiba</b>											
Valor Promedio	152	4	432	35	21	3	7	19	5,3	1 410	298
Valor mínimo	81	2	239	25	10	2	4	11	1,6	749	151
Valor máximo	212	7	726	64	32	3	8	27	12,4	1 727	424
Desviación estándar	24	1	118	7	5	1	1	4	3	182	66
Coeficiente de variabilidad	16	31	27	21	27	18	13	20	53	13	22
Intervalo de confianza	152±7	4±1	432±33	35±2	21±2	3±1	7±1	19±1	5,3±1	1 410±52	298±19
<b>Shihuahuaco</b>											
Valor Promedio	164	6	235	21	10	2	10	12	5,3	1 424	311
Valor mínimo	116	4	165	8	6	1	6	9	3,2	1 172	220
Valor máximo	202	11	300	41	15	3	15	25	13,4	1 752	410
Desviación estándar	19	2	27	9	2	1	2	3	1	139	40
Coeficiente de variabilidad	12	24	11	43	15	39	22	20	28	10	13
Intervalo de confianza	164±5	6±1	235±7	21±3	10±1	2±1	10±1	12±1	5,3±1	1 424±39	311±11
<b>Mango</b>											
Valor Promedio	129	5	252	47	9	2	7	15	2,1	658	262
Valor mínimo	93	3	170	26	6	1	5	10	1,5	498	123
Valor máximo	168	9	458	73	14	3	9	19	3,1	835	378
Desviación estándar	16	1	56	8	2	1	1	2	1	90	56
Coeficiente de variabilidad	12	21	22	17	22	12	17	15	20	14	21
Intervalo de confianza	129±5	5±0	252±16	47±2	9±1	2±1	7±1	15±1	2,1±1	658±26	262±16
<b>Naranja</b>											
Valor Promedio	53	13	243	40	15	4	8	13	2,6	988	131
Valor mínimo	32	7	156	29	9	3	6	10	2,0	736	75
Valor máximo	68	19	482	55	33	5	11	20	3,5	1 235	187
Desviación estándar	8	3	56	6	4	1	1	2	1	120	26
Coeficiente de variabilidad	15	22	23	15	26	16	14	16	12	12	20
Intervalo de confianza	53±3	13±1	243±16	40±2	15±1	4±1	8±1	13±1	2,6±1	988±34	131±7

### 3.4. Análisis comparativo entre la estructura anatómica de la madera y carbón

El análisis comparativo tiene la finalidad de determinar si es posible o no identificar la especie a partir de carbón, del mismo modo indicar las características xilemáticas que se conservan y contribuyen a la identificación. Para el análisis se utilizó la Tabla 6 de características macroscópicas del carbón de las cinco especies en estudio

El carbón de capirona conserva el agrupamiento de poros solitarios y múltiples radiales conforme a la descripción anatómica de la madera; sin embargo, la dimensión del diámetro es inferior ocasionando un aumento en la densidad de poros por  $\text{mm}^2$  (Tabla 6), resultados que corroboran lo reportado por Gonçalves (2010); Muñiz *et al.* (2012a) y Nigoski *et al.* (2012). El menor agrietamiento de esta especie se debió a su alta densidad, brindando mayor resistencia y soporte durante la carbonización. (Figura 37).

El carbón de copaiba mantiene poros solitarios y múltiples radiales, con disminución en el diámetro tangencial de los poros similar a lo reportado para el carbón de *Copaifera* sp. por Albuquerque (2012). Asimismo, el parénquima marginal también perduró y de acuerdo a lo expuesto por Gonçalves (2012) los canales gomíferos se conservaron, pero visiblemente más pequeños; sin embargo, el parénquima vasicéntrico no llega a visualizarse, por la contracción y la poca cantidad de células alrededor del poro (Figura 39), comportamiento que es respaldado por Muñiz *et al.* (2012a) al determinar que en un mismo proceso de carbonización el comportamiento dimensional de las estructuras anatómicas es distinto, influenciado muchas veces por la cantidad de elementos celulares. Es importante resaltar la presencia de profundas grietas en dirección a los radios, posiblemente causadas por su baja densidad, descomposición rápida de la superficie de la madera por acción del calor y/o por la presión que causa la liberación de los gases piroleñosos (Souza *et al.*, 2015). Además hay pequeñas grietas en dirección perpendicular a los radios, posiblemente a causa de tensiones internas en la madera.

El carbón de shihuahuaco presentó poros solitarios y múltiples radiales de 2 y 3, dimensionalmente más pequeños, al igual que lo reportado por Nigoski *et al.* (2012) y Albuquerque (2012) teniendo como consecuencia mayor densidad de poros/ $\text{mm}^2$ . Igualmente se conservó el parénquima vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente. Los radios mantuvieron el mismo patrón de la madera al presentar líneas sinuosas próximas a los poros (Figura 41). La presencia de grietas se dio en dirección perpendicular a los radios, posiblemente por la tensión interna al poseer grano entrecruzado.

El carbón de mango mantiene poros solitarios y múltiples radiales después del proceso de carbonización.; asimismo, es la especie que presenta mayor contracción de diámetro de poros ocasionando mayor frecuencia de poros/mm<sup>2</sup>. El parénquima vasicéntrico y aliforme perduraron, debido a la presencia de abundante tejido parenquimático alrededor de los poros. Los radios también se conservaron y mantuvieron el patrón de la madera. Se presentaron grietas en dirección a los radios la cual puede deberse a la presencia de radios multiseriados cuya contracción es mayor de acuerdo a Gonçalves (2010), también se observaron grietas perpendiculares a los radios, posiblemente por las tensiones internas causadas por el grano entrecruzado (Figura 43).

Los poros del naranjo a pesar de ser los más pequeños con respecto a la demás especies en estudio y haber presentado disminución tangencial se pudieron visualizar a través de imágenes capturadas con el estereoscopio después de la carbonización, presentando poros solitarios y predominantemente múltiples radiales; asimismo, aumentó la densidad poros/mm<sup>2</sup>. Con respecto al parénquima este fue más difícil de distinguir, a pesar de tener paratraqueal (vasicéntrico, aliforme y aliforme confluyente) y bandas del tipo marginal en contraste a lo expuesto por Metcalfe y Chalk, citados por Gonçalves *et al.* (2015), quienes argumentan que estos tipos de parénquimas por lo general son más fáciles de diferenciar por el contraste con las fibras. Los radios son visibles y mantienen el mismo patrón de la madera (Figura 45). Las escasas grietas profundas pueden deberse a la descomposición rápida de la superficie de la madera por acción del calor y/o por la presión que causa la liberación de los gases piroleñosos (Souza *et al.*, 2015).

Conforme a lo observado los elementos xilemáticos de las cinco especies en estudio han diferido en su comportamiento dimensional bajo el mismo método de carbonización, debido a la variación en el espesor de la pared de fibras, cantidad de parénquima y ancho de radios; sin embargo, las contracciones no impidieron la identificación de la especie de acuerdo a lo reportado por Gonçalves (2010), Albuquerque (2012), Muñoz *et al.* (2013), Nigoski *et al.* (2012, 2015). A diferencia de lo reportado por Pipa (2004), la presencia de tilosis si contribuye en el reconocimiento de las especies pues se conserva después del proceso de carbonización.

Las grietas fueron comunes en las cinco especies, en algunas se presentaron en mayor proporción y con mayor profundidad, mientras que en otras no; siendo causadas por la presencia predominante del tipo de radio (uniseriado o multiseriado); por acción del calor en

la superficie de la madera; la presión ejercida por los gases piroleñosos al salir de las estructuras celulares; la densidad y la influencia que tiene la orientación del grano tal como lo menciona Byrne e Nagle citado por Muñiz, *et al.*(2013). Asimismo, las grietas no impidieron el reconocimiento de las especies tal como reporta Afonso *et al.* (2015).

A modo de comparación en la Tabla 7 se presenta el diámetro tangencial y frecuencia de poros para madera y carbón de las cinco especies en estudio.

Tabla 6: Características macroscópicas del carbón de las cinco especies en estudio

ESPECIE	VASOS/POROS								PARÉNQUIMA				OTRAS CARACTERÍSTICAS	
	N°/mm²			Diámetro tangencial			Agrupamiento		Ausente	Paratraqueal			En bandas	Trilosis
	Muy pocos	Pocos	Numerosos	Muy pequeños	Pequeños	Medianos	Solitarios	Múltiples radiales		Vasocéntrico	Aliforme	Aliforme confluyente		
Capirona			x	x			x	x	x					
Copaiba	x					x	xx	x					x	
Shihuahuaco		x				x	xx	x		x	x	x		
Mango		x			x		x	x		x	x			x
Naranja		x		x			x	x		x	x	x	x	x

xx: Predominancia

**Tabla 7: Valores estadísticos de las mediciones de diámetro tangencial y frecuencia de poros mm<sup>2</sup> para madera y carbón**

<b>Concepto</b>	<b>Madera</b>		<b>Carbón</b>	
	<b>Poros</b>		<b>Poros</b>	
	<b>Diámetro tangencial</b>	<b>Número por mm<sup>2</sup></b>	<b>Diámetro tangencial</b>	<b>Número por mm<sup>2</sup></b>
<b>Capirona</b>				
Valor Promedio	59	43	42	48
Valor mínimo	48	30	27	34
Valor máximo	90	59	59	61
Desviación estándar	9	5	8	5
Coeficiente de variabilidad	14	12	19	11
Intervalo de confianza	59±2	43±1	42±2	48±2
<b>Copaiba</b>				
Valor Promedio	152	4	123	4
Valor mínimo	81	2	85	3
Valor máximo	212	7	185	7
Desviación estándar	24	1	25	1
Coeficiente de variabilidad	16	31	20	26
Intervalo de confianza	152±7	4±1	123±7	4±0
<b>Shihuahuaco</b>				
Valor Promedio	164	6	136	10
Valor mínimo	116	4	88	7
Valor máximo	202	11	193	13
Desviación estándar	19	2	24	2
Coeficiente de variabilidad	12	24	18	17
Intervalo de confianza	164±5	6±1	136±7	10±0
<b>Mango</b>				
Valor Promedio	129	5	78	7
Valor mínimo	93	3	43	4
Valor máximo	168	8	137	9
Desviación estándar	16	1	18	1
Coeficiente de variabilidad	12	21	23	18
Intervalo de confianza	129±5	5±0	78±5	7±0
<b>Naranja</b>				
Valor Promedio	53	13	35	19
Valor mínimo	32	7	22	11
Valor máximo	68	19	67	26
Desviación estándar	8	3	8	3
Coeficiente de variabilidad	15	22	24	18
Intervalo de confianza	53±3	13±1	35±2	19±1

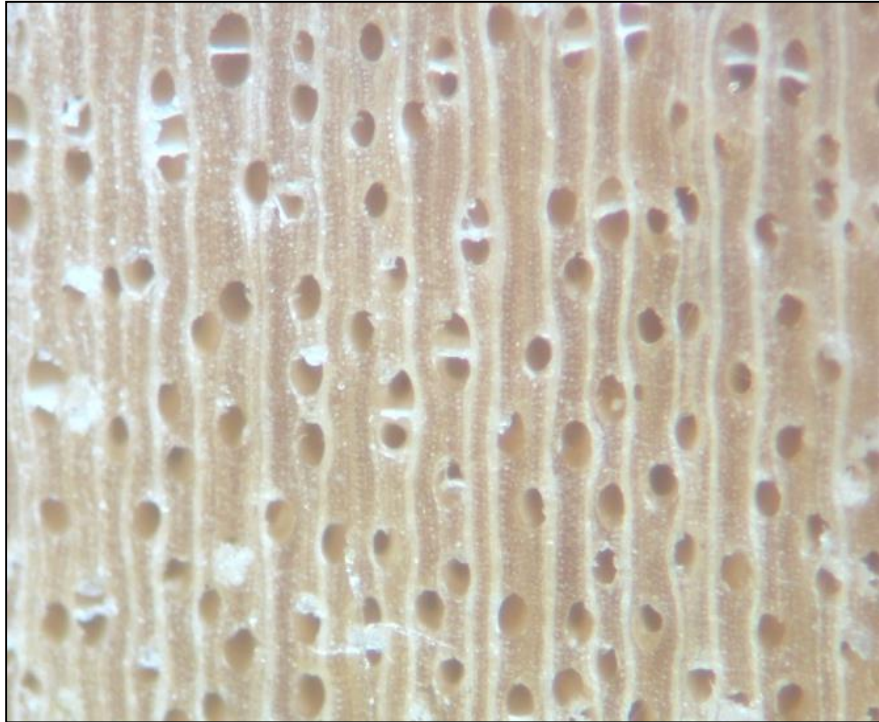


Figura 36: Sección transversal de la madera de *Calycophyllum spruceanum* (40x)

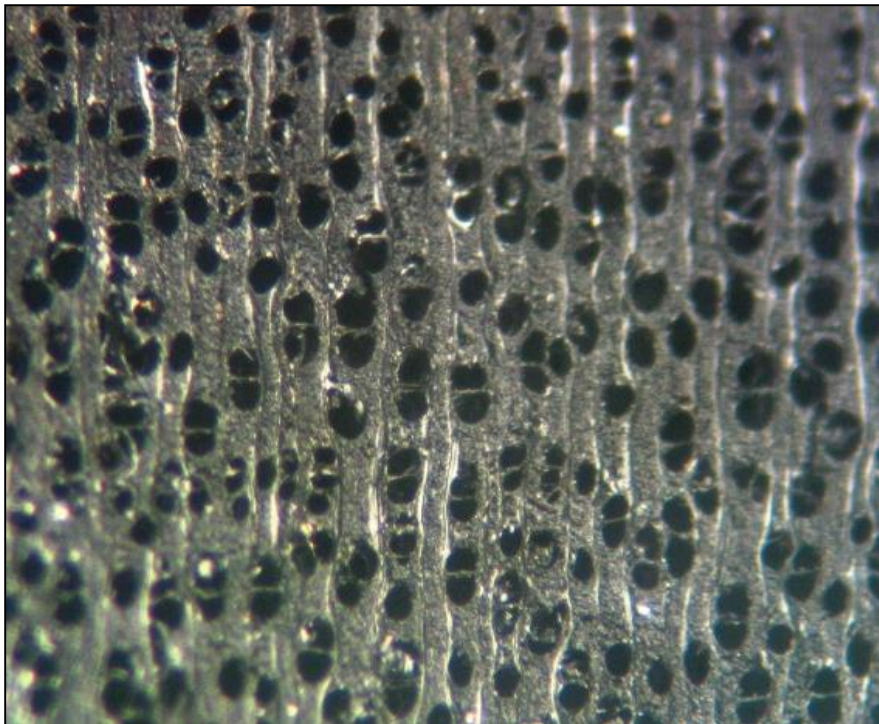


Figura 37: Sección transversal de carbón de *Calycophyllum spruceanum* (40x)

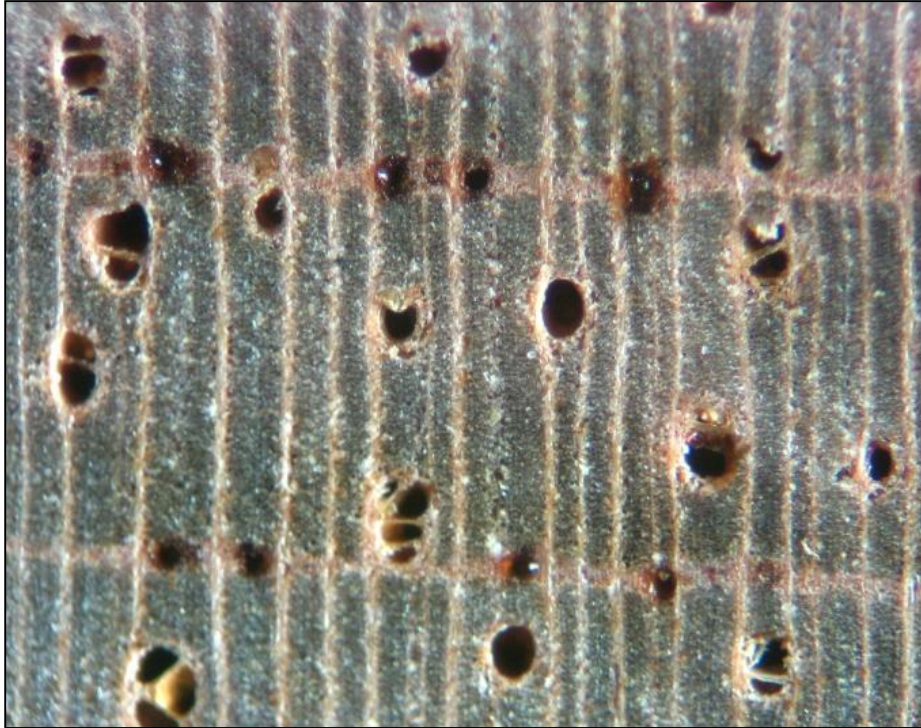


Figura 38: Sección transversal de madera de *Copaifera officinalis* (40x)

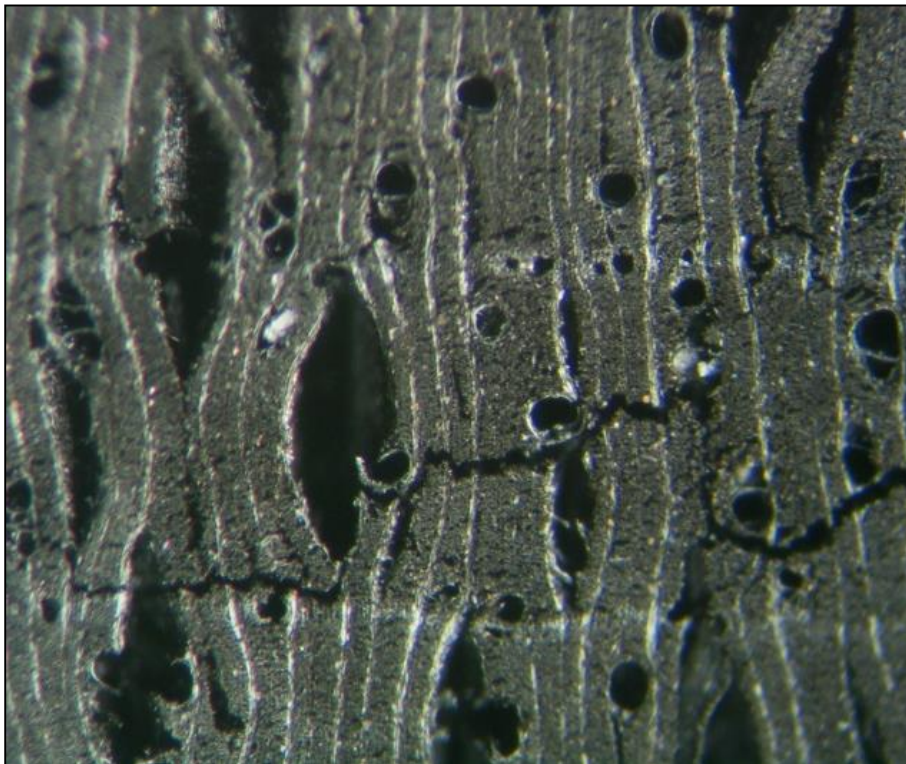


Figura 39: Sección transversal de carbón de *Copaifera officinalis* (40x)



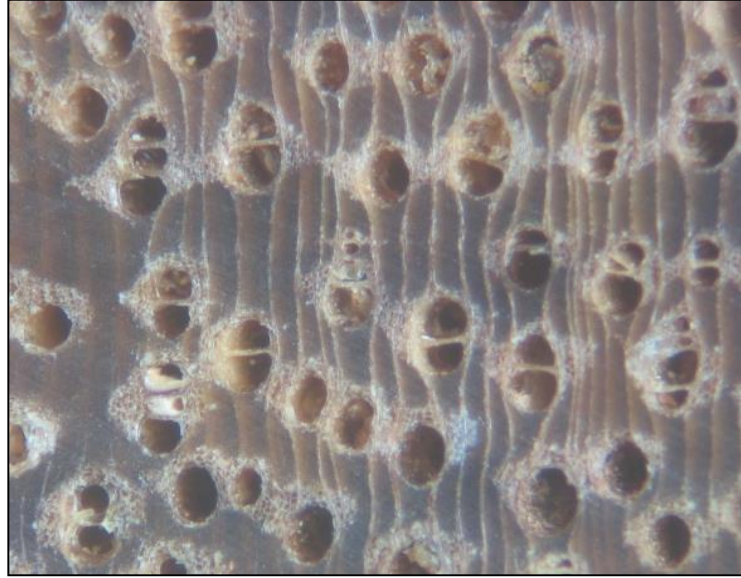


Figura 40: Sección transversal de madera de *Dipteryx odorata* (40x)

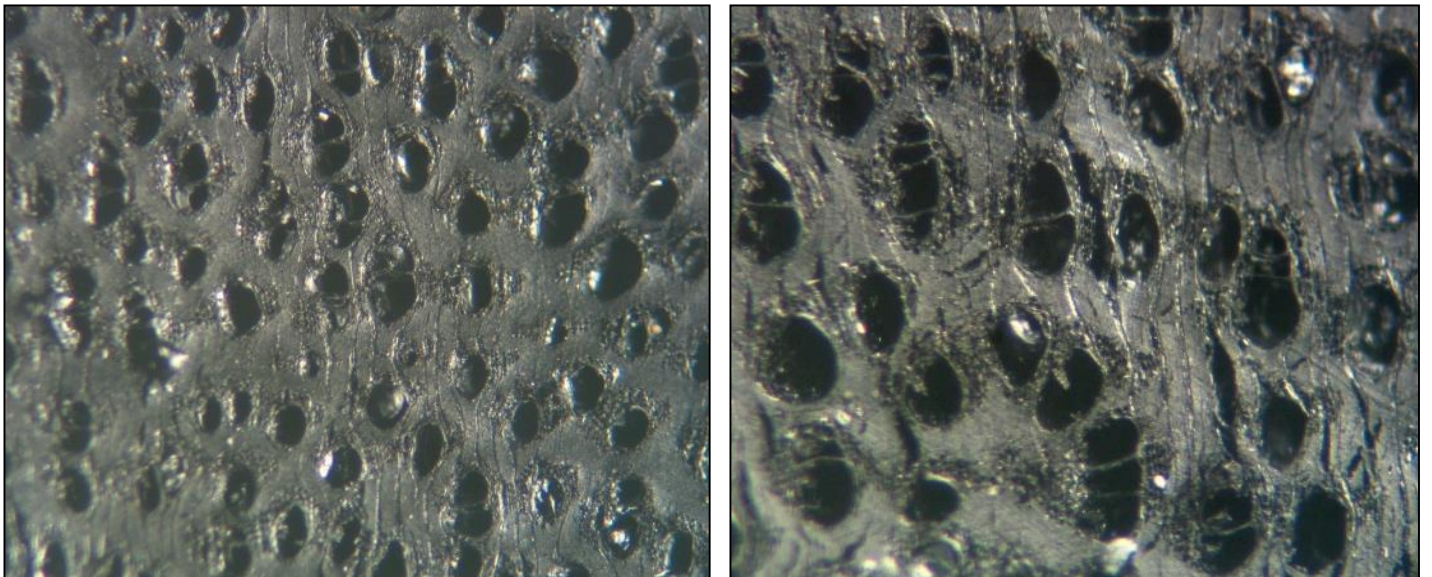


Figura 41: Sección transversal de carbón de *Mangifera* sp. (40x)

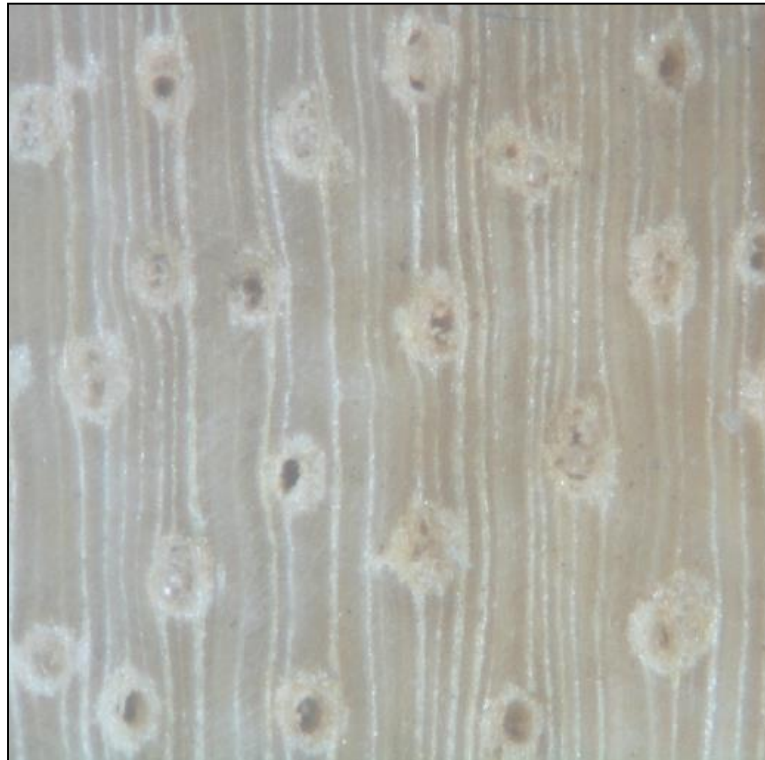


Figura 42: Sección transversal de madera de *Mangifera* sp.(40x)

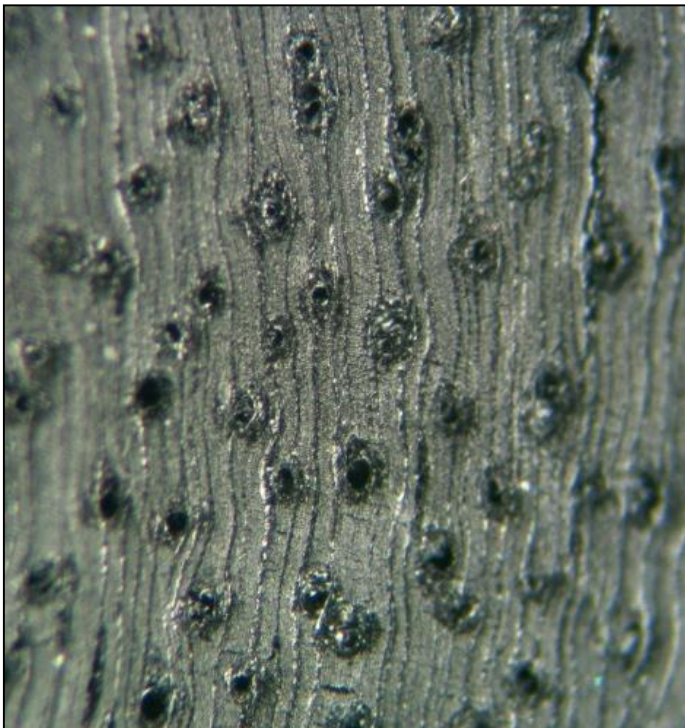


Figura 43: Sección transversal de carbón de *Mangifera* sp.(40x)

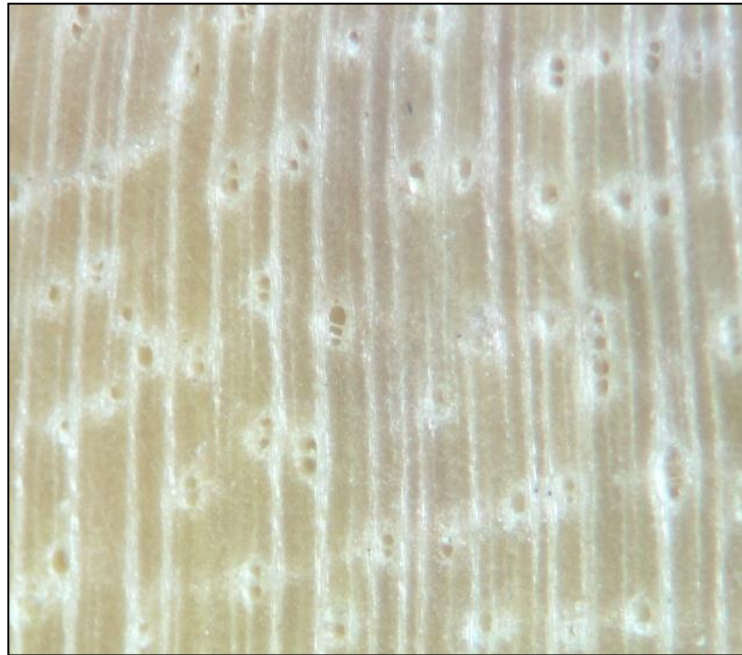


Figura 44: Sección transversal de madera de *Citrus* sp. (40x)

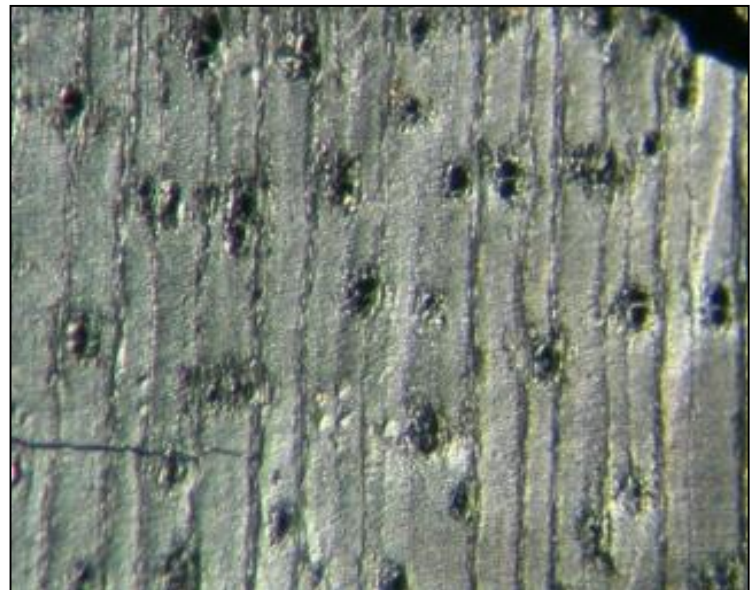
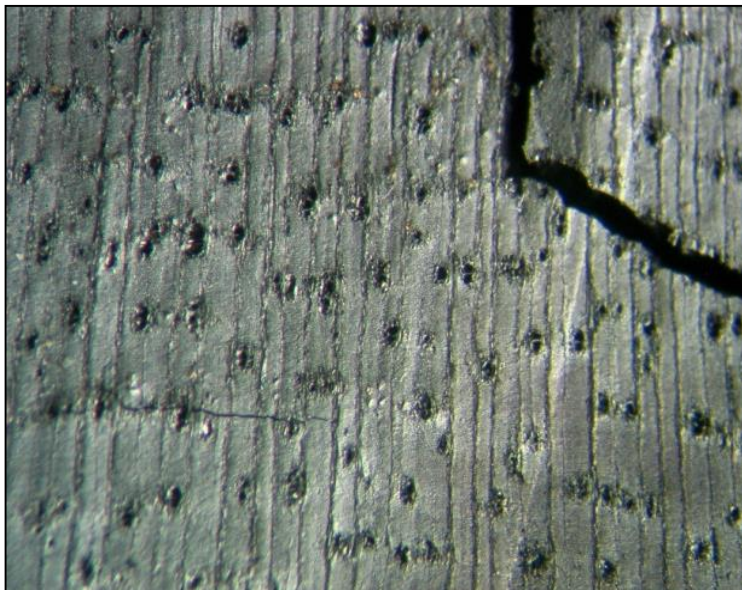


Figura 45: Sección transversal de madera de *Citrus* sp. (40x)

### 3.5. Características físicas – químicas del carbón vegetal

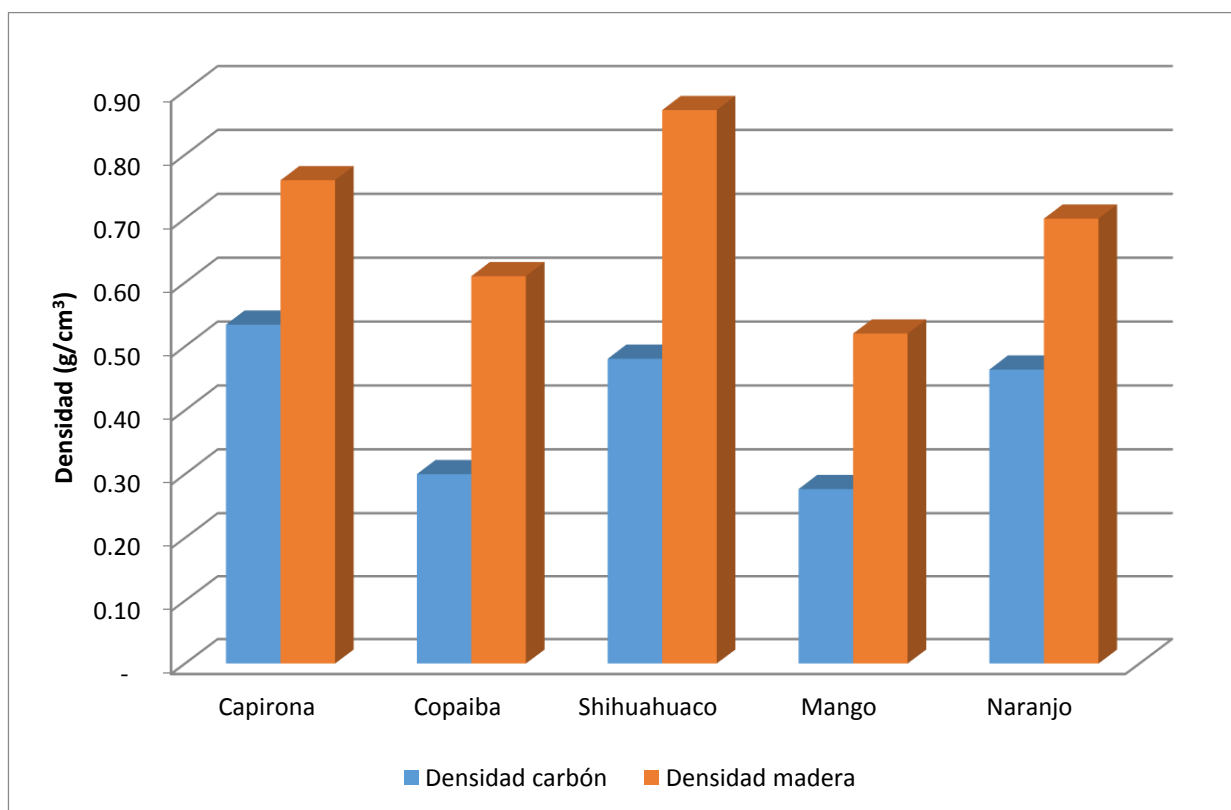
Los resultados obtenidos de las especies en estudio evidencian una relación directa entre los valores de densidad básica de la madera de origen con los valores de la densidad aparente del carbón vegetal, conforme lo señala Earl (1975), Brito y Barrichelo (1980), Trugilho y Silva (2001) y Rivera y Uceda (1984). La densidad aparente del carbón es inferior a la madera, debido a que la pérdida de masa es mayor a la reducción de las dimensiones del carbón tal como lo señala Trugilho y Silva (2001). De las cinco especies se esperaba que la densidad aparente del carbón de shihuahuaco sea superior al resto; sin embargo, el valor del carbón de capirona es el más alto. Una posible causa sería la cantidad de material volátil presente, puesto que los residuos líquidos y alquitranosos contribuyen en el peso del carbón y como consecuencia en la densidad. Por lo tanto, el carbón de capirona al contener más material volátil supera en densidad aparente al carbón de shihuahuaco (Figura 46).

El contenido de humedad obtenido oscila entre 5-7 por ciento en todas las especies, debido a que la prueba se realizó dos meses después del proceso de carbonización, adquiriendo humedad del medio ambiente, tal como lo reporta Earl (1975) y FAO (1983) (Figura 47).

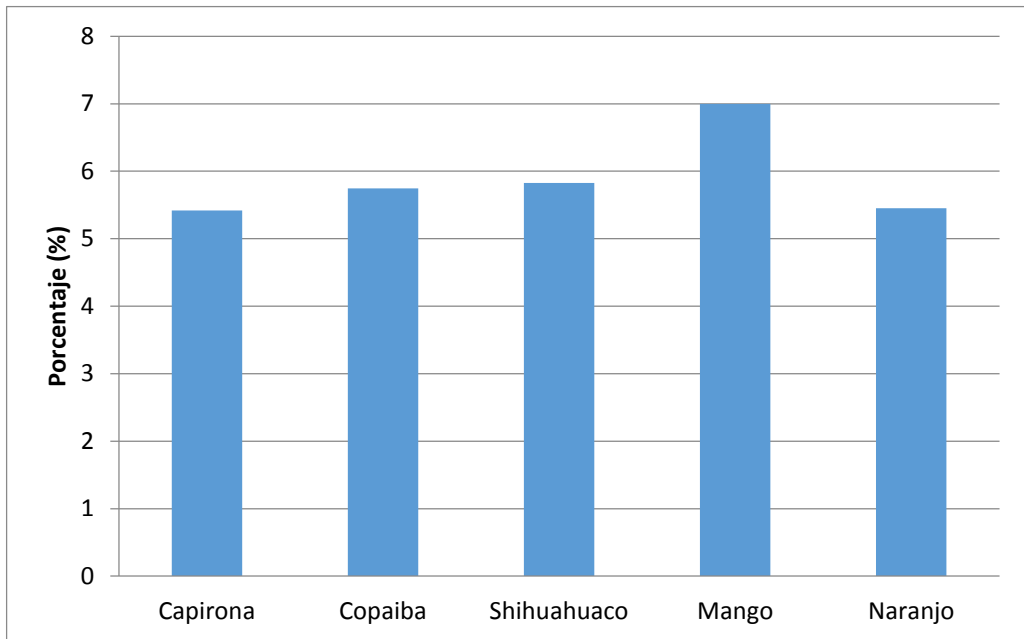
Para el caso del material volátil, se presentan valores por encima del 30 por ciento; se observa una relación inversa entre los valores de material volátil con la cantidad de carbono fijo, tal como lo confirma Couto *et al.* (2015). La cantidad de material volátil depende del tiempo y la temperatura de carbonización, así como de la composición de la madera. En el caso del naranjo, presenta un valor elevado de material volátil, probablemente relacionado con componentes propios de su madera (Figura 48).

Con respecto al contenido de cenizas los valores obtenidos son variables, depende de la especie según lo reporta FAO (1983) y no guardan relación directa con el contenido de carbono fijo como lo establece Couto *et al.* (2015). Este autor señala que a mayor material volátil liberado, mayor será el contenido de compuestos inorgánicos y carbono fijo en la fase sólida de la carbonización. Sin embargo, es importante resaltar que las especies mango y naranjo presentaron valores altos de cenizas, los cuales podrían estar influenciados por el tipo de leño que conformó las probetas, puesto que ambas especies provinieron de ramas. El resultado podría ser consecuencia de probetas próximas a la médula con mayor concentración de minerales, como lo señala Couto *et al.* (2015) en un estudio realizado al carbón de *Eucalyptus* y *Corymbia* (Figura 49).

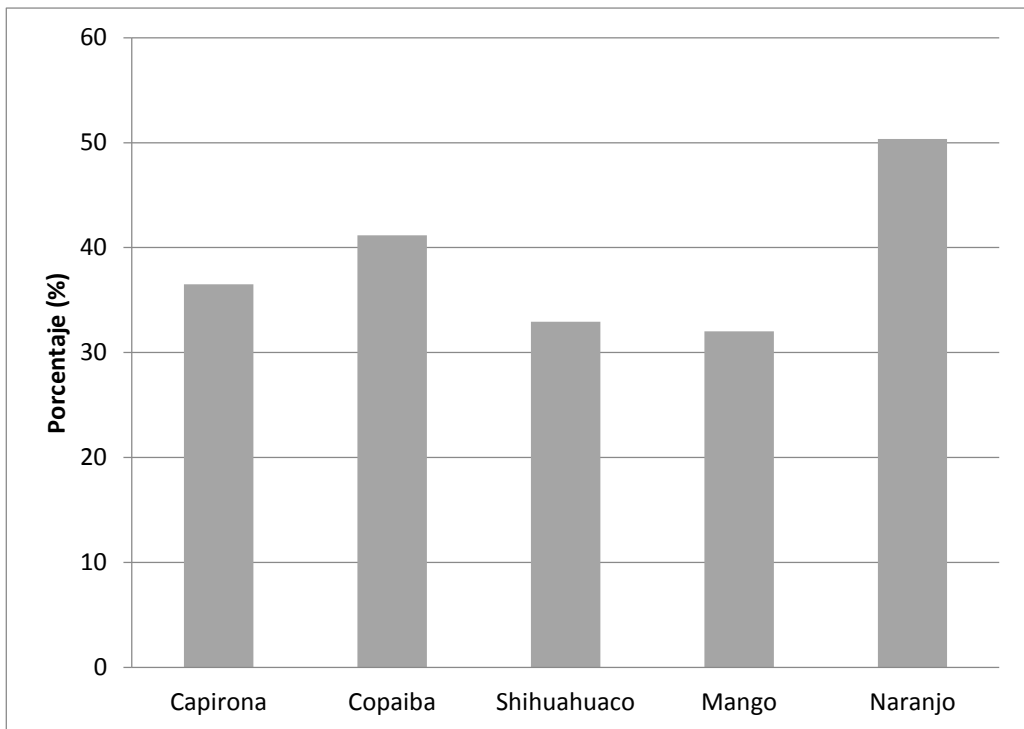
Las especies capirona, copaiba y shihuahuaco presentaron una relación importante entre el contenido de carbono fijo y la densidad aparente del carbón, la que a su vez se correlaciona, de manera directa, con la densidad de la madera de origen. Dicha relación está influenciada en parte explicado por el contenido de lignina, componente químico constituyente de la madera con estabilidad estructural capaz de soportar altas temperaturas y contribuir en la concentración del carbono fijo; incrementando así la densidad, tal como lo mencionan Brito y Barrichelo (1977) (Figura 50).



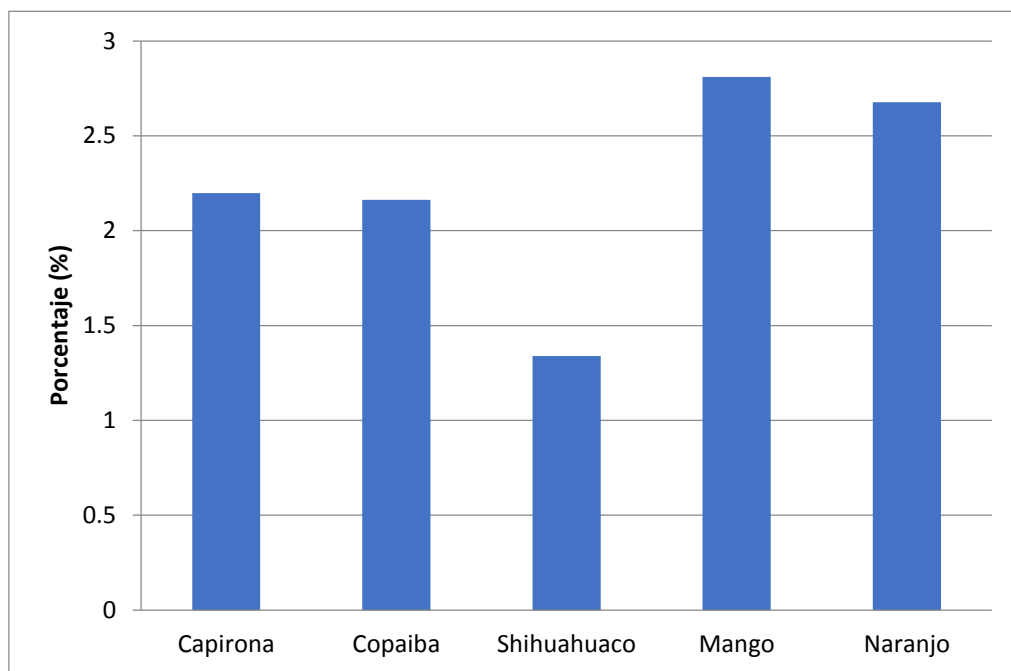
**Figura 46: Comparación entre la densidad básica de la madera y la densidad aparente del carbón**



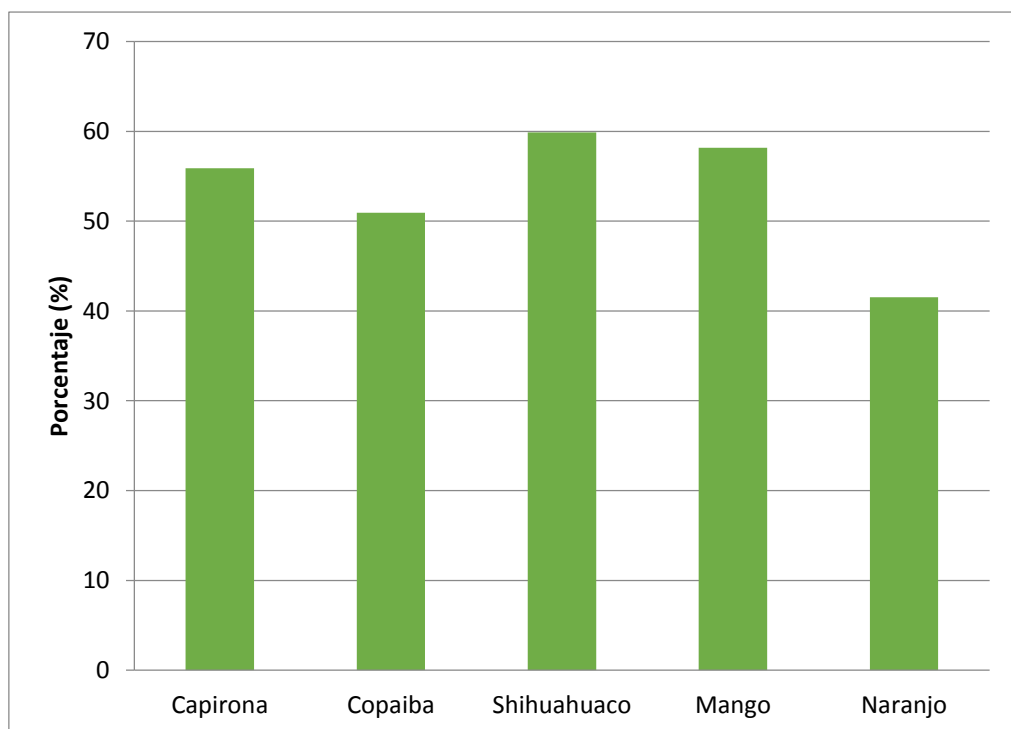
**Figura 47: Contenido de humedad de las cinco especies en estudio**



**Figura 48: Contenido de material volátil de las cinco especies en estudio**



**Figura 49: Contenido de cenizas de las cinco especies en estudio**



**Figura 50: Contenido de carbono fijo en las cinco especies en estudio**

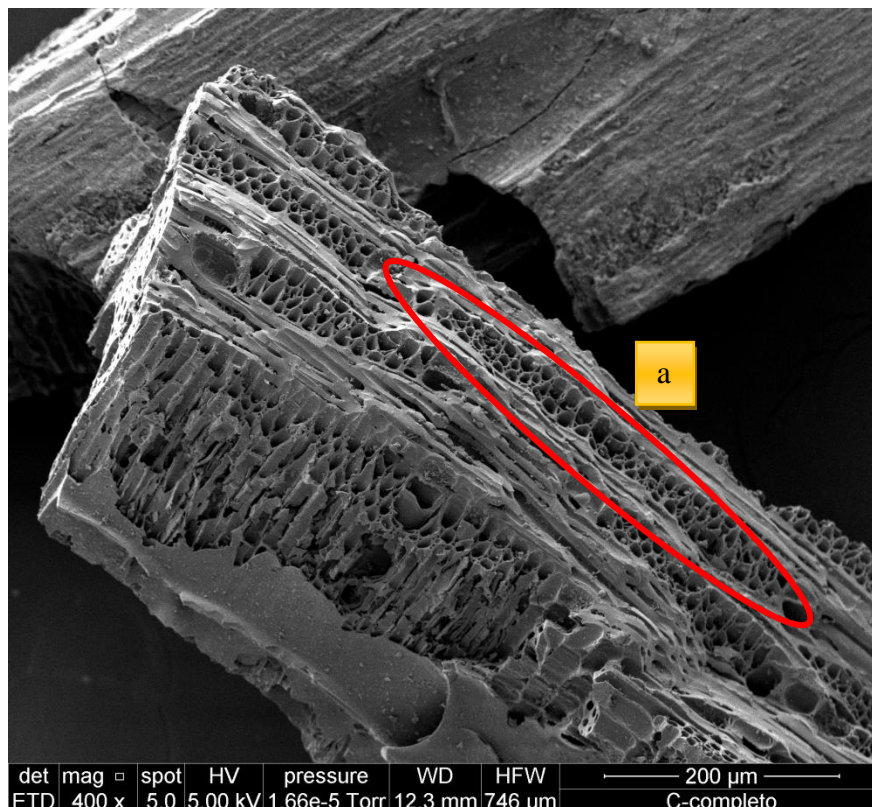
### 3.6. Análisis de carbón molido

Este análisis se realizó solo para las especies capirona y shihuahuaco el cual se detalla a continuación:

En el fragmento de carbón de la especie capirona (*Calycophyllum spruceanum*), se puede observar parte de la sección tangencial, representando los numerosos orificios, a las células que conforman los radios multiseriados (Figura 51 y 52).

En la Figura 53 se puede un fragmento de la sección transversal de capirona (*Calycophyllum spruceanum*), conformada por un par de poros rodeados por numerosas y pequeñas fibras. Asimismo, las punteaduras intervasculares pudieron observarse a un aumento de 400x (Figura 54 y 55).

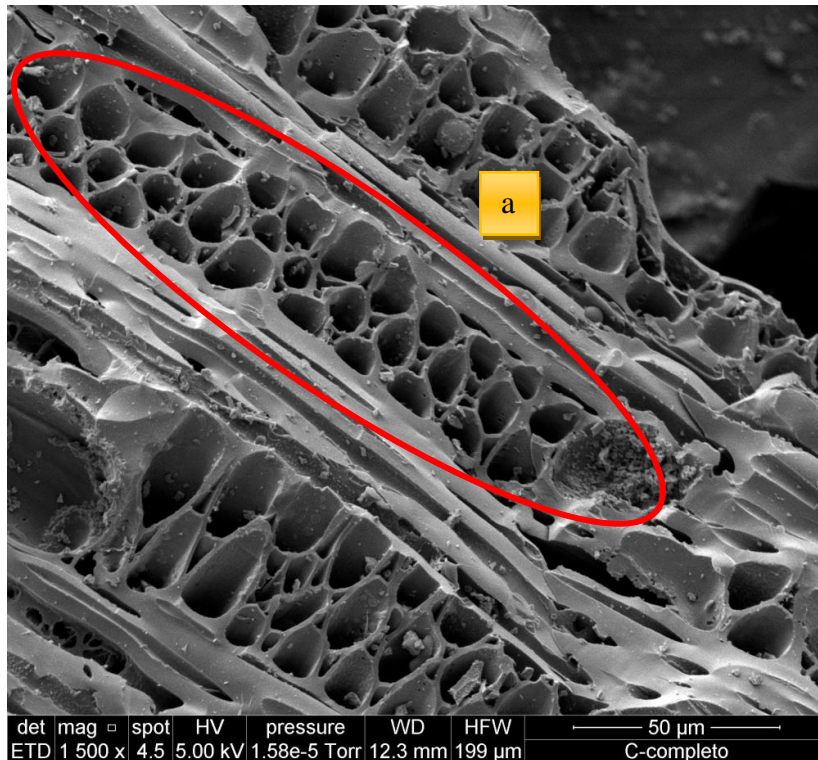
Para el caso de la especie shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), en la sección tangencial se observan dos líneas horizontales de células que constituyen a dos radios uniseriados (Figura 56 y 57).



a) Radio multiseriado en sección tangencial

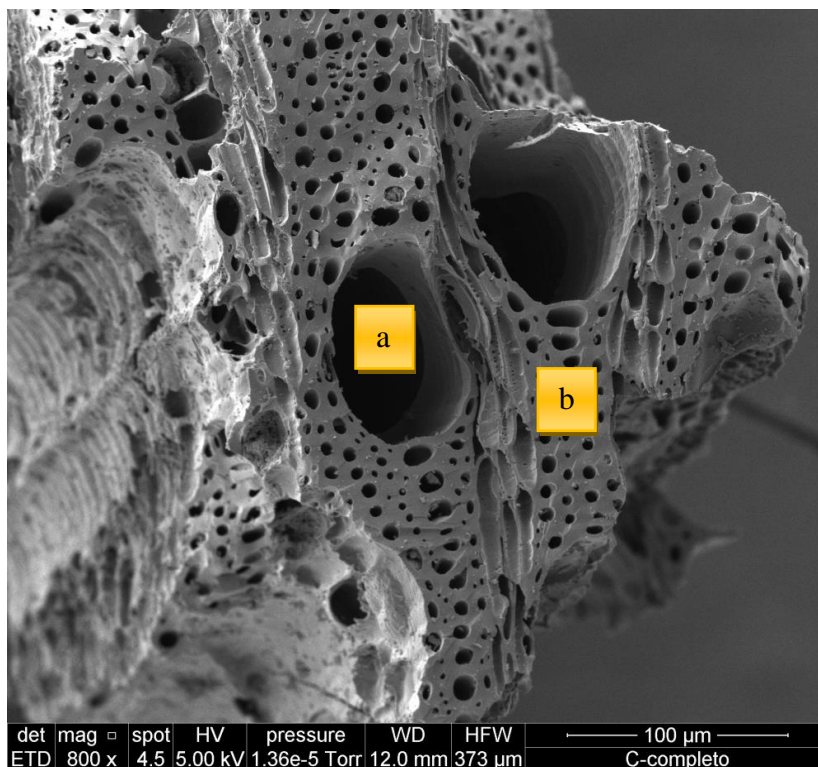
**Figura 51:** *Calycophyllum spruceanum* a 400x en microscopio SEM.





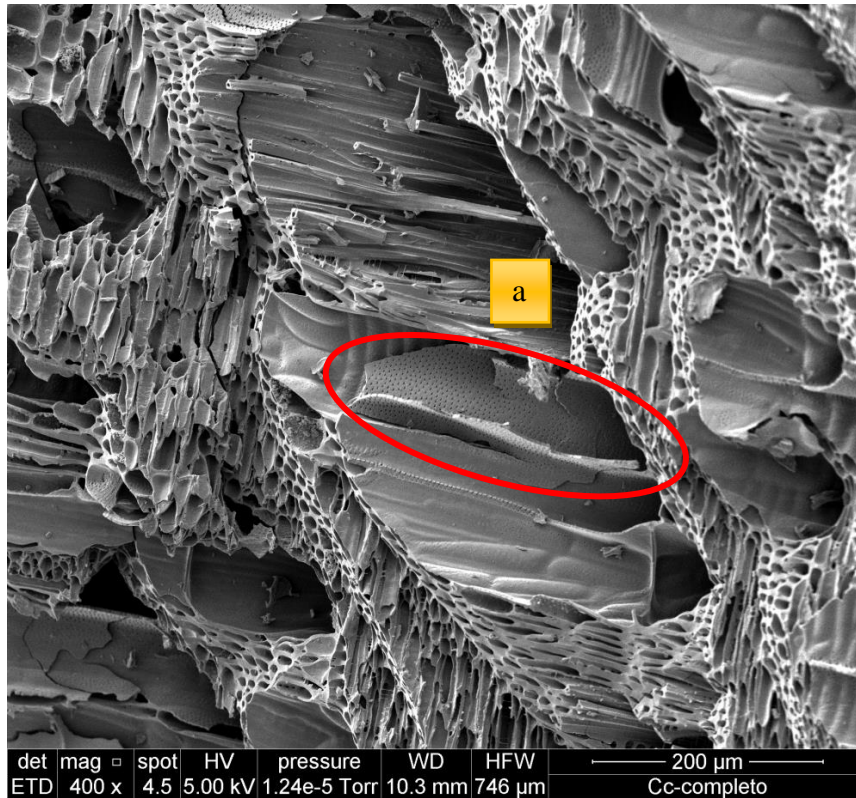
a) Radio multiseriado

**Figura 52:** Sección tangencial de *Calycophyllum spruceanum* a 1500x en microscopio SEM.



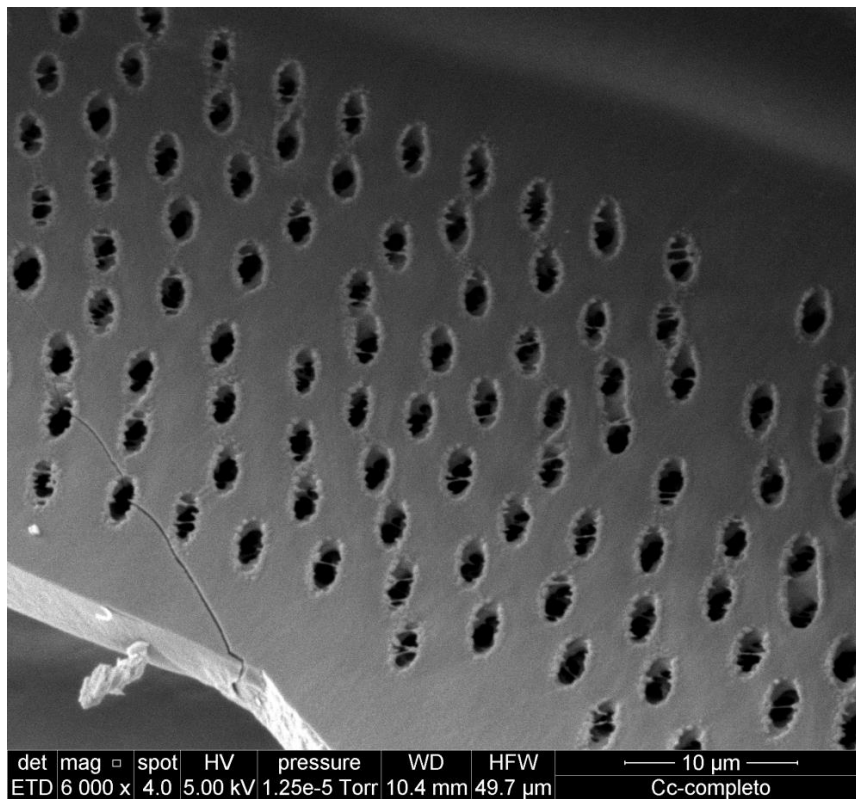
a) Poro, b)Fibras

**Figura 53:** Sección transversal de *Calycophyllum spruceanum* a 800X en microscopio SEM.

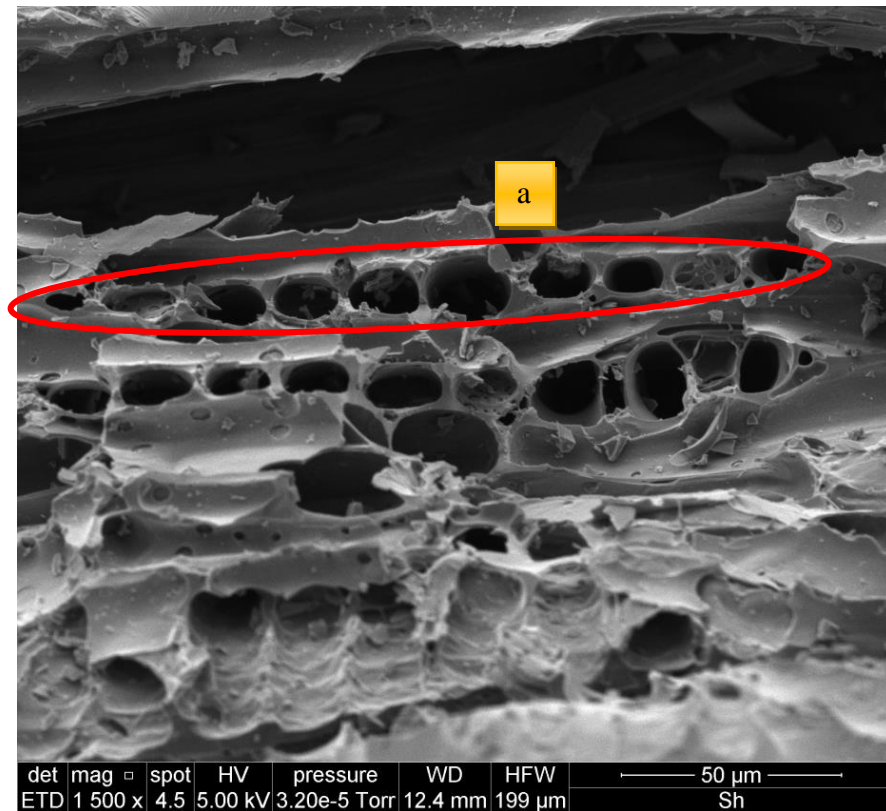


a) Sección de un elemento vascular con punteaduras intervasculares

**Figura 54:** *Calycophyllum spruceanum* a 400x en microscopio SEM.

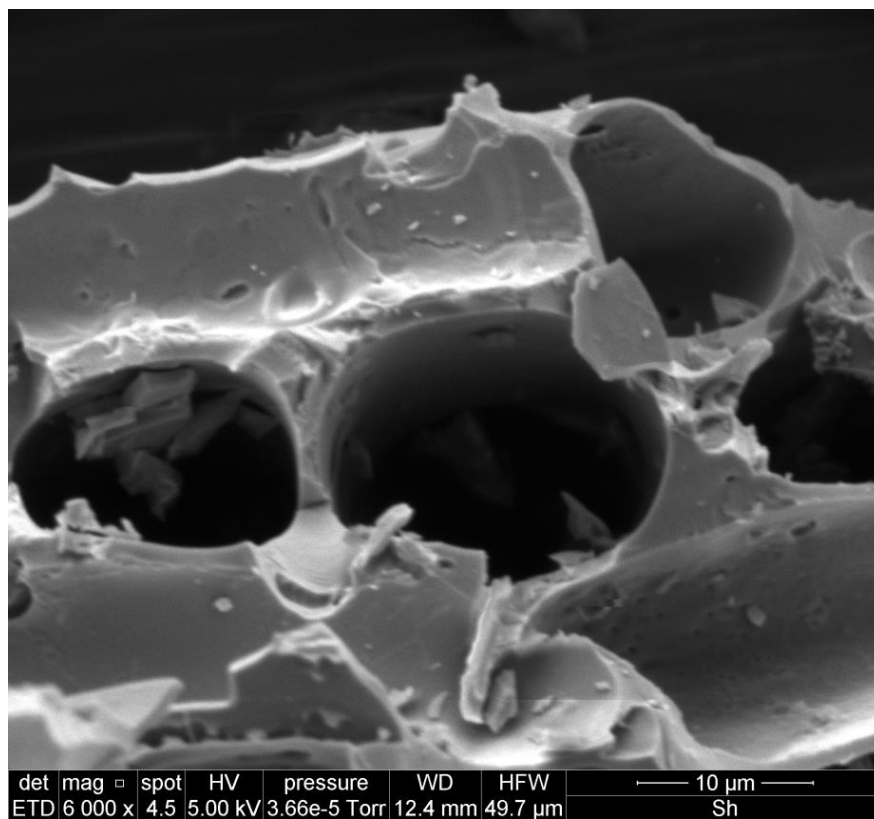


**Figura 55:** Punteaduras intervasculares en *Calycophyllum spruceanum* a 6 000x en microscopio SEM



a) Radio uniseriado

**Figura 56:** Sección tangencial de *Dipteryx odorata* a 1500x en microscopio SEM.



**Figura 57:** Células de radio uniseriado de *Dipteryx odorata* a 6000x en microscopio SEM

### 3.7. Claves de identificación microscópica

La clave numérica microscópica, según la clasificación establecida por IAWA (1989) es la siguiente:

*Calycophyllum spruceanum* (Capiroña)

2 5 7 10 13 22 24. 30 41 49 53 62 66 69 73 75 98 101 107 115  
186 189 .192 195 197 217 218

*Copaifera officinalis* (Copaiba)

1 5 7 9 13 22 26 30 42 46 52 66 69 72 79 89 91 97 106 109 115  
127 141 186 189 192 194 198 217 218

*Dipteryx odorata* (Shihuahuaco)

2 5 7 9 13 22 26 30 42 47 52 66 70 72 70 81 82 83 91 97 104 115  
118 120 186 189 192 195 197 217 218

*Magifera* sp. (Mango)

2 5 7 9 13 22 26 31 42 47 52 56 65 68 71 79 80 82 92 97 104 106  
109 115 186 189 192 194 199 217 218

*Citrus* sp. (Naranja)

1 5 7 10 13 22 24 30 41 47 52 57 62 66 69 72 79 89 92 98 104 109  
115 141 186 189 192 195 199 217 218



## V. CONCLUSIONES

- 1) Los elementos xilemáticos que se conservan después del proceso de carbonización permiten la identificación de las especies estudiadas.
- 2) El proceso de carbonización ocasiona la reducción del tamaño de los poros e incrementa el número de poros/mm<sup>2</sup>.
- 3) Las gomas no se conservan después del proceso de carbonización en tanto que la tilosis si lo hace.
- 4) No siempre la madera que tiene mayor densidad produce un carbón con mayor densidad.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Elaborar una clave de identificación del carbón vegetal que incluya el reconocimiento a nivel macroscópico, microscópico y submicroscópico. En este último caso cuando haya dificultad en la visualización de las características anatómicas.
- Implementar una xiloteca y antracoteca que facilite la identificación del carbón vegetal.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, M; Kikata, Y. 1994. Atlas de maderas del Perú. Lima, PE. 202 p.
- Afonso, C; Gonçalves, T; Muñiz, G; Matos, J; Nisgoski, S. 2015. Mozambique's charcoals: anatomy of nine native species. *Bosque* 36(1): 105-112.
- Albuquerque, A. 2012. Anatomia comparada do lenho e do carvão aplicada na identificação de 75 espécies da floresta Amazônica, no estado do Pará, Brasil. Tesis Mg. Piracicaba, BR. Universidad de Sao Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 249p.
- Alves, E; Angyalossy-Alfonso, V. 2000. Ecological trends in the Wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. *IAWA Journal*. 21(1):3-30
- \_\_\_\_\_. 2002. Ecological trends in the Wood anatomy of some Brazilian species. 2. Axial parenchyma, rays and fibres. *IAWA Journal*. 23(4):391-418
- Aróstegui, A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Lima, PE. 57p
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 1984. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Annual Book of ASTM Standards. ES.
- Bennett-Curry, A; Malhi, Y; Menton, M. 2013. Leakage effects in natural resource supply chains: a case study from the Peruvian commercial charcoal market. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. London, UK. 20(4):336-348.
- Brenes-Angulo, O; Reyes-Cordero, D; Moya-Roque, R. 2012. Estudio de la anatomía del xilema secundario de seis especies del género *Citrus* cultivadas en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)* 9(23):35-44.
- Brito, J.O; Barrichelo, L.E.G. 1977. Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Circular técnica no. 28.4p



- \_\_\_\_\_. 1980. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x Densidade do carvão. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais IPEF no.20: 101-113
- Carrillo-Parra, A; Foroughbakhch- Pournavab, R.; Bustamante-García, V. 2013. Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4(17): 62-71.
- Chavesta, M. 2005. Maderas para pisos. Lima, PE. 176p.
- \_\_\_\_\_. 2015. Atlas anatómico de maderas del Perú. Vol II.105p.
- CNF (Cámara Nacional Foresta, PE). 2015. Cartilla de precios de productos y servicios forestales.
- Congreso Internacional de Bioenergía (5, 2010, Curitiba-Paraná, Br). s.f. Rendimento e qualidade do carvão produzido pela carbonização em um novo forno metálico. Loffredo, R; Machado, JA; Magalhães, W; Lima, E. 6p.
- COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas). 1972. Maderas: Métodos para realizar el análisis estadístico de las propiedades de las maderas: Esquema 1° de Norma. COPANT 30:1-012. 8p
- Couto, A; Trugilho, PF; Napoli, A; Lima, JT; Silva, JR.; Protásio, T. 2015. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. Scientia Forestalis 43(108): 817-831.
- Damásio, R; Pereira, B; Oliveira, A; Cardoso, M; Vital, B; Carvalho, AM.2013. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). Pesquisa Florestal Brasileira 33(75):261-267
- DGFFS (Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre, PE) .2009. Perú Forestal en Números año 2008. Lima, PE.67p
- \_\_\_\_\_. 2010. Perú Forestal en Números año 2009. Lima, PE.64p
- \_\_\_\_\_. 2011. Perú Forestal en Números año 2010. Lima, PE.65p
- \_\_\_\_\_. 2012. Perú Forestal en Números año 2011. Lima, PE.128p
- \_\_\_\_\_. 2013. Perú Forestal en Números año 2012. Lima, PE.204p

- \_\_\_\_\_. 2014. Perú Forestal en Números año 2013. Lima, PE. 212p
- Earl, D. 1975. Informe sobre el carbón vegetal. FAO. Roma. p.94
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal (en línea). Roma. Estudios Montes. FAO. Consultado 22 ene. 2016. Disponible <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S11.htm#s>
- García, L; Guideo, A; Peraza, C; De Palacios, P. 2003. La madera y su anatomía. Madrid, ES. Ediciones Multi-Prensa Conde del Valle de Salazar. 327p.
- Gonzales, H. 2010. Descomposición térmica de la madera: Energía y carbonización de la madera. Copias del curso. Lima, PE. 38p.
- Gonzales, H. 2013. Productos forestales de transformación química. Copias del curso. Lima, PE. 129p.
- Gonçalves, T. 2010. Anatomia do lenho e do carvão de espécies arbóreas do Cerrado no estado de Sao Paulo, Brasil. Tesis Mag. Botucatu, BR. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” .111p
- \_\_\_\_\_, T; Marcati, C; Scheel-Ybert, R. 2012. The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum* and *Pouteria torta* from the Brazilian Cerrado. IAWA Journal. 33(1):73-90
- Gonçalves, T; Nigoski, S; Oliveira, J; Marcati, C; Ballarin, A; Muñoz, G. 2015. A contribution to the identification of charcoal origin in Brasil II – Macroscopic characterization of Cerrado species. Anais da Academia Brasileira de Ciencias. 88(2): 1045-1054.
- IAWA (International Association of Wood Anatomists, NL). 1989. List of Microscopic Features for Hardwood Identification. Leiden, NL. V. 10 tomo 3, 333p.
- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, BR). 1992. Norma de procedimentos em estudos de anatomia de madeira: I. Angiospermae, II. Gimnospermae. LPF-Serie Técnica N°15. Brasília. 5-15p
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, PE). 2016. Cerca de 10 millones de personas viven en Lima Metropolitana. Nota de prensa.

INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, PE); MINAG (Ministerio de Agricultura, PE). 1997. Compendio Estadístico de la Actividad Forestal del Perú 1980-1996. Lima, PE.100p.

\_\_\_\_\_.1998. Perú Forestal en Números año 1997. Lima, PE.48p

\_\_\_\_\_.1999. Perú Forestal en Números año 1998. Lima, PE.45p

\_\_\_\_\_.1999. Perú Forestal en Números año 1998. Lima, PE.45p

\_\_\_\_\_.2000. Perú Forestal en Números año 1999. Lima, PE.103p

\_\_\_\_\_.2001. Perú Forestal en Números año 2000. Lima, PE.85p

\_\_\_\_\_.2002. Perú Forestal en Números año 2001. Lima, PE.128p

\_\_\_\_\_.s.f. Perú Forestal en Números año 2002. Lima, PE.150p

\_\_\_\_\_.2005. Perú Forestal en Números año 2003. Lima, PE.130p

\_\_\_\_\_.2005. Perú Forestal en Números año 2004. Lima, PE.143p

\_\_\_\_\_.2006. Perú Forestal en Números año 2005. Lima, PE.148p

\_\_\_\_\_.2007. Perú Forestal en Números año 2006. Lima, PE.151p

\_\_\_\_\_.2008. Perú Forestal en Números año 2007. Lima, PE.70p

\_\_\_\_\_. 2014. Anatomía de maderas de 108 especies de Venezuela. VE. 264p.

La Torre-Cuadro, M; Menton, M. 2016. Descifrando datos oficiales sobre el consume de leña y carbon vegetal en el Perú. CIFOR Infobrief. No.145.6p

León, W; Espinoza, N. 2001. Anatomía de la madera. Mérida, VE, Universidad de los Andes. 83p.

MINAGRI-SERFOR. (Ministerio de Agricultura y riego – Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, PE) 2015. Perú Forestal en Números año 2014. Lima, PE. 204p

MEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). s.f. Balance Nacional de Energía – 2008.

\_\_\_\_\_. 2016. Balance Nacional de Energía – 2014.

Munsell Color Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. 1990. Munsell Soil Charts. Baltimore, Maryland.

- Muñiz, G; Nisgoski, S; Franca, R; Schardosin, F. 2012a. Anatomia comparativa da madeira e carvão de *Cedrelina catenaeformis* Ducke e *Enterolobium schomburgkii* Benth. Para fins de identificação. *Scientia Forestalis*, Piracicaba. 40(94):291-297.
- \_\_\_\_\_. 2012b. Anatomia do carvão de espécies florestais. *Cerne*, Lavras. 18(3):471-477.
- Muñiz, G; Franca, R; Fiorese, A; Nisgoski, S. 2013. Análisis de la estructura anatómica de la madera y del carbón de dos especies de Sapotaceae. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(3): 311-320.
- \_\_\_\_\_; Carneiro, M; Batista, F; Schardosin, F; Nisgoski, S. 2016. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “*Angelim*” by *NEIR-IR* wood anatomy. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 18(3):505-522.
- Nisgoski, S; Muñiz, G; França, R; Rodrigues, F; Batista, R. 2012. Anatomia do lenho carbonizado de *Copaifera* cf. *langsdorfii* Desf. E *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild. *Ciencia da Madeira*. 3(2):66-79.
- \_\_\_\_\_; Morrone, S; Schardosin, F; França, R. 2015. NIR and anatomy of Wood and charcoal from Moraceae and Euphorbiaceae species. *Ciencia da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)* 6(3):183-190.
- OIT (Organización Internacional del Trabajo, CH). 1986. Producción de leña y carbón vegetal. Ginebra, Suiza. 119p.
- Pérez, A. 1984. Apuntes de anatomía de maderas. Mérida, VE, Universidad de los Andes. 132p.
- Pipa, E. 2004. Validación de una metodología de identificación del carbón vegetal del género *Prosopis* (algarrobo) a partir de la estructura anatómica. Tesis Ing. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 56p
- Richter, H.G; Dallwitz, M.J. 2009. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. Consultado de 10 marzo 2016. Disponible <ftp://delta-intkey.com/wood/es/www/anamaind.htm>
- Rivera, SM; Magnin, S; Cavatorta, M. 1994. Aporte del microscopio electrónico de barrido en la identificación del carbón vegetal. *Quebracho* n°.2:21-27

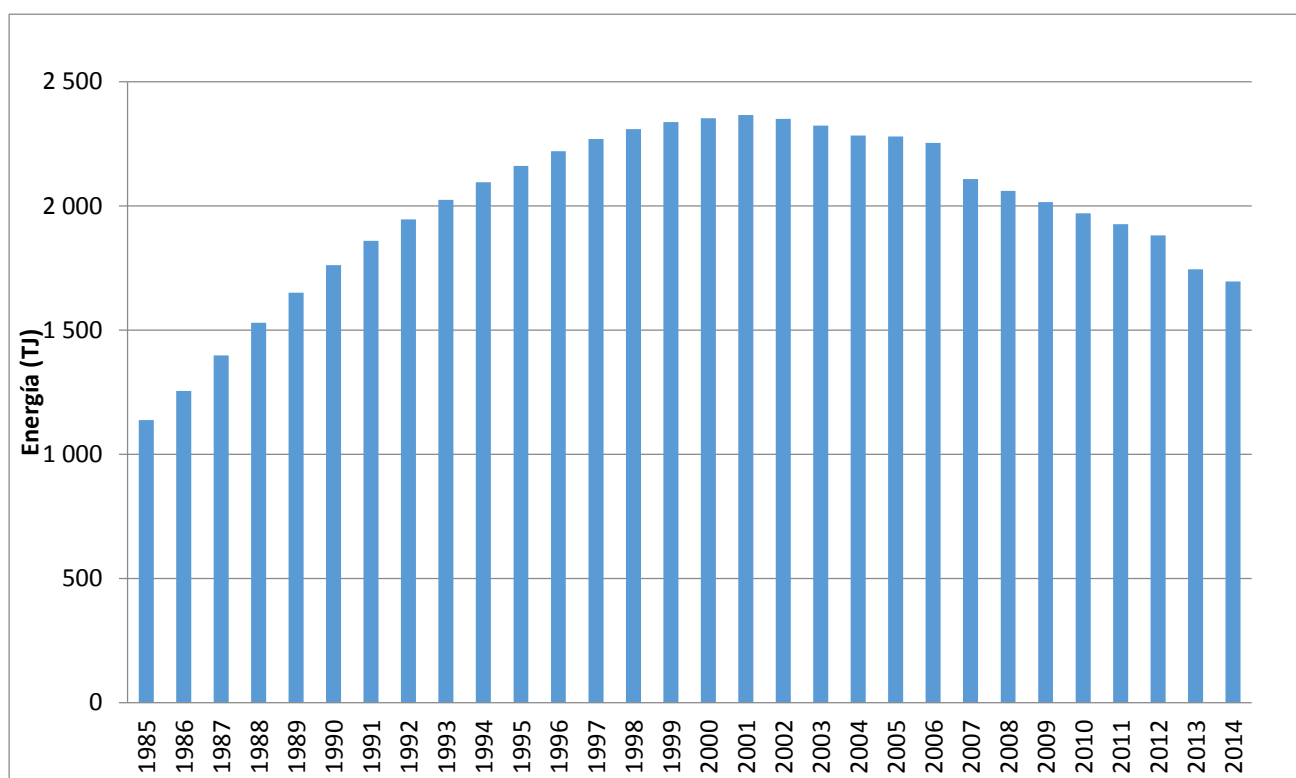
- Rivera, P; Uceda, M. 1984. Características físico-químicas de la madera y carbón de once especies forestales de la Amazonía peruana. *Revista Forestal del Perú* 14(2):1-8.
- Rodríguez-Ariza, M. 2005. La Antracología: metodología y objetivos. *Arqueometría y Arqueología Medieval*. Granada, España, Al-Baraka. 193-217. Consultado 10 may. 2016. Disponible en <http://www.biblioarqueologia.com/publicacion.php?id=83>
- Rubio, J. 2002. Estadística. Universidad Nacional Agraria La Molina. 175p.
- Sandoval. 2005. Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal. Cuadernos 38. Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México.
- Souza, M; Silva, K; Perdigão, C; Silva, G; Melo, LE. 2015. Anatomia do leño carbonizado de espécies madeireiras comercializadas na Amazonia. *Fundação Casa da Cultura de Marabá* no. 8
- Trugilho, PF; Silva, D. 2001. Influencia de la temperatura final de carbonización en las características físicas y químicas del carbón vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). *Scientia Agraria* 2(1-2).

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1

#### Balance nacional energético

Consumo anual energético de carbón vegetal



FUENTE:

Ministerio de Energía y Minas (s.f.)

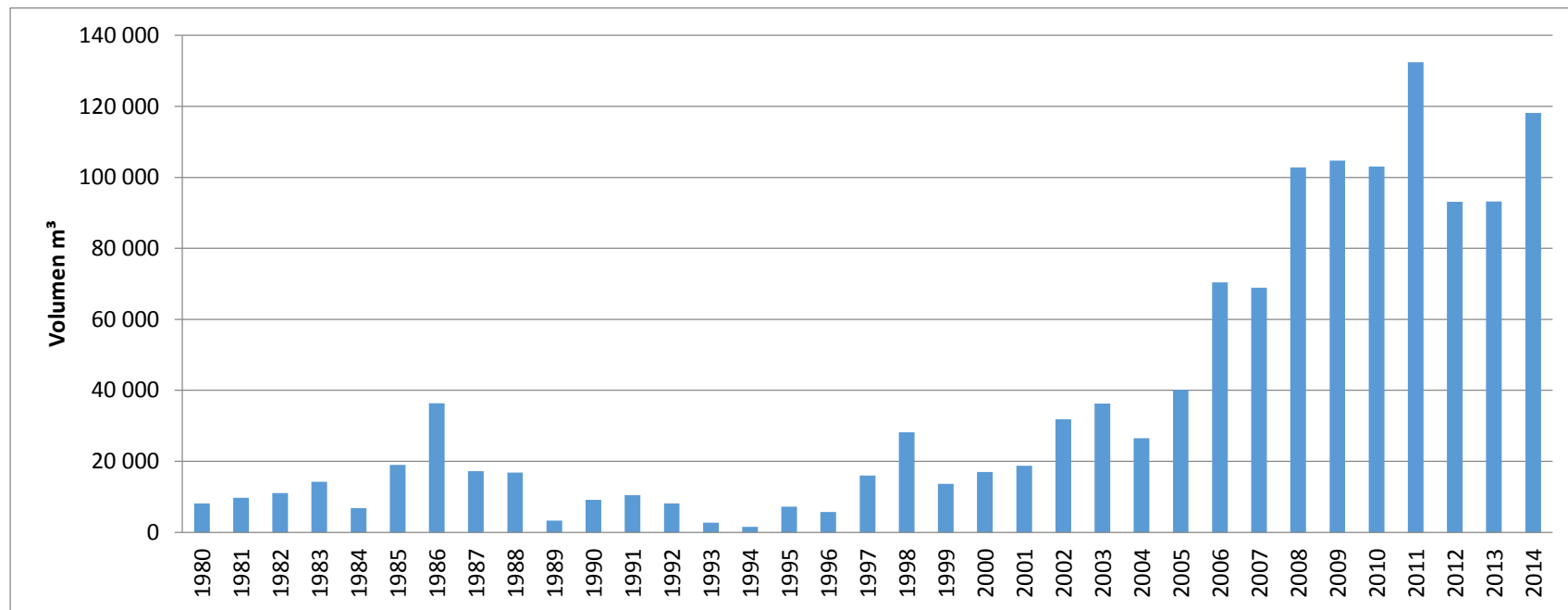
Ministerio de Energía y Minas (2016)



## ANEXO 2

### Producción nacional de carbón vegetal

#### Producción anual de carbón vegetal



FUENTE:

*Instituto Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (1997-2007)*

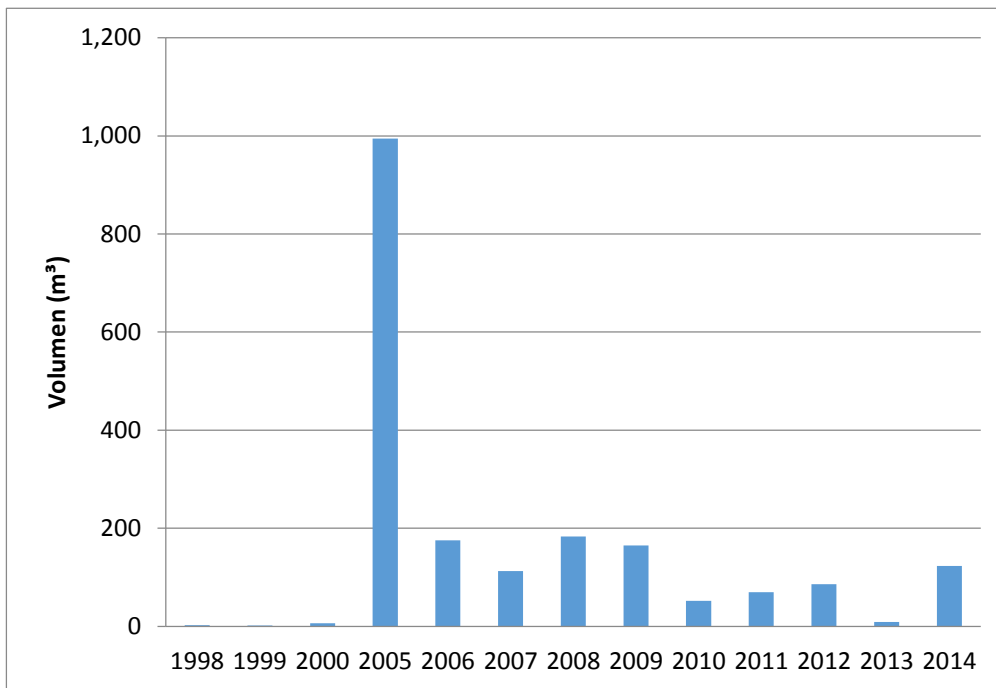
*Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)*

*MINAGRI-SERFOR(2014)*





### Producción anual de carbón de capiróna



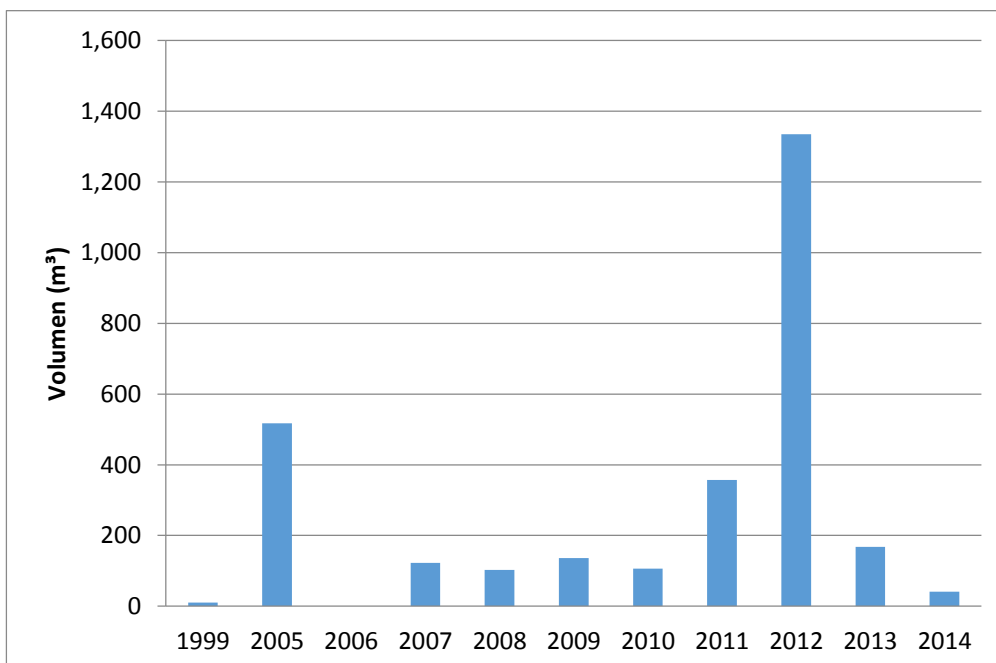
FUENTE:

*Instituto Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (1999-2007)*

*Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)*

*MINAGRI-SERFOR (2014)*

### Producción anual de carbón de copaiba



FUENTE:

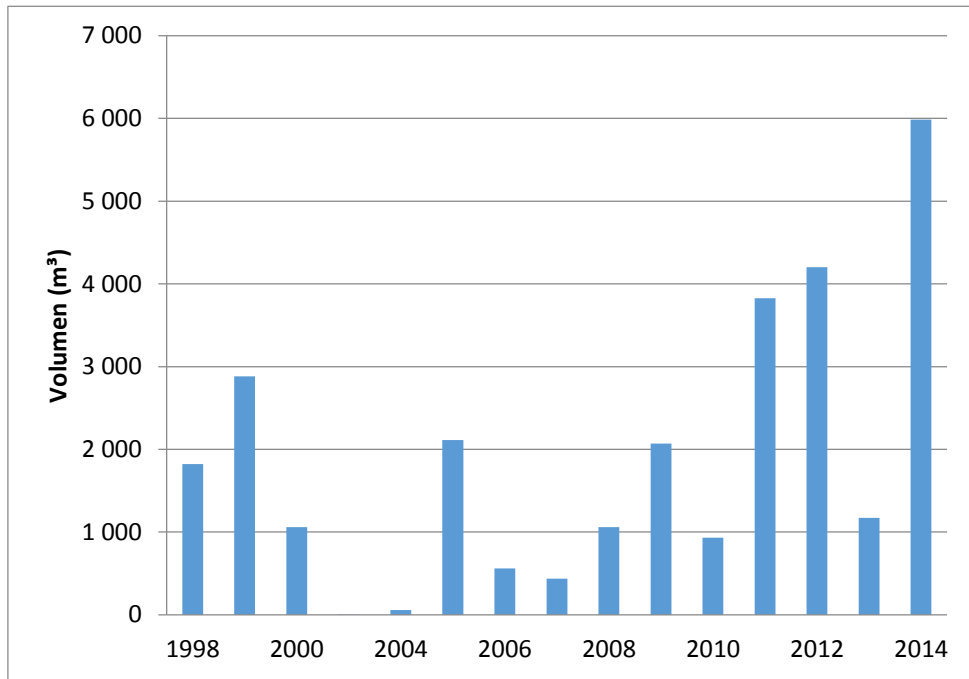
*Instituto*

*Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (2000-2007)*

*Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)*

*MINAGRI-SERFOR (2014)*

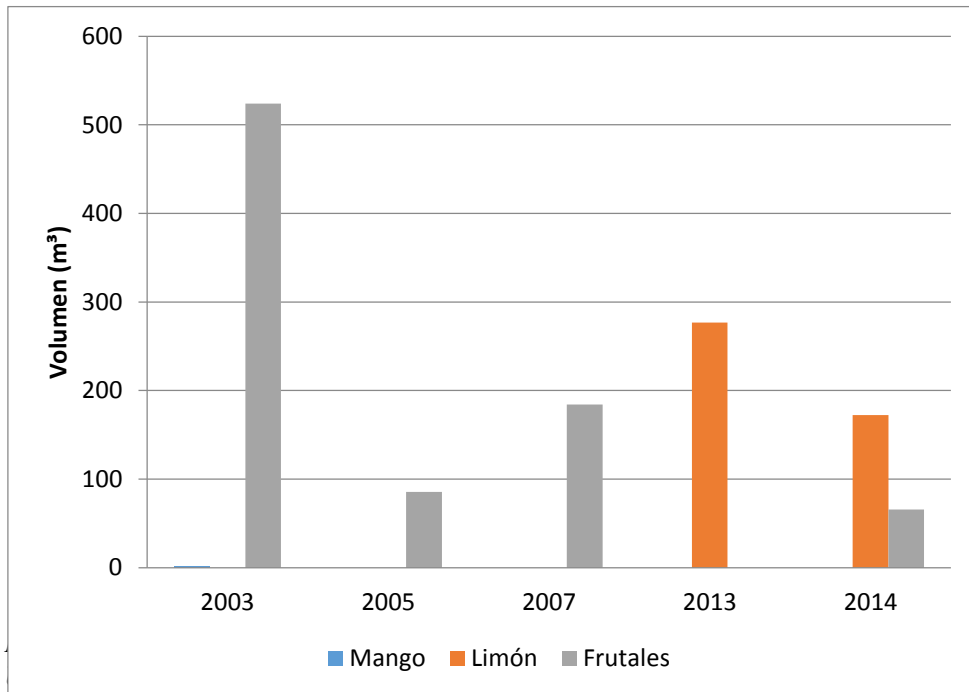
### Producción anual de carbón de shihuahuaco



FUENTE:

Instituto Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (1999-2007)  
 Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)  
 MINAGRI-SERFOR (2014)

### Producción anual de carbón de frutales variados

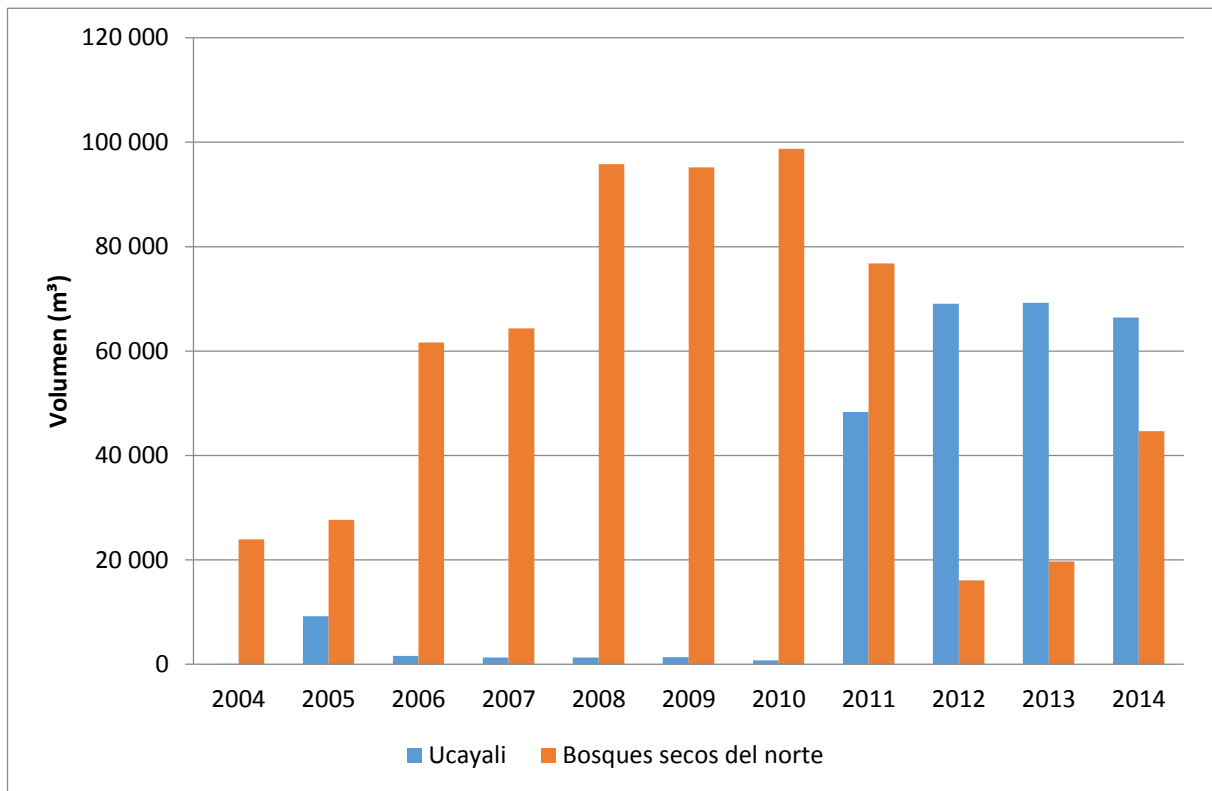


F

FUENTE:

Instituto Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (2005-2007)  
 Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)  
 MINAGRI-SERFOR (2014)

### Producción anual de carbón en las principales zonas de abastecimiento



**FUENTE:**

*Instituto Nacional de Recursos Naturales: Ministerio de Agricultura (2005-2007)*

*Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre (2009-2014)*

*MINAGRI-SERFOR (2014)*

## ANEXO 3

### Lista de características microscópicas para la identificación de maderas duras - IAWA (1989)

#### -Características anatómicas

##### Anillos de crecimiento

1. Anillos de crecimiento diferenciados
2. Anillos de crecimiento no diferenciados

##### Vasos/poros

###### Porosidad

3. Porosidad circular
4. Porosidad semicircular
5. Porosidad difusa

###### Arreglo o disposición de poros

6. Poros en bandas tangenciales
7. Poros en disposición diagonal o radial
8. Poros en disposición dendrítica

###### Agrupamiento de poros

9. Poros exclusivamente solitarios (90% o más)
10. Poros múltiples radiales de 4 o más
11. Poros en racimos o grupos

###### Contorno de poros solitarios

12. Poros solitarios con contorno angular

###### Platinas de perforación

13. Platinas de perforación simple
14. Platinas de perforación escaleriforme
15. Platinas de perforación escaleriforme con  $\leq 10$  barras
16. Platinas de perforación escaleriforme con 10-20 barras
17. Platinas de perforación escaleriforme con 20-40 barras
18. Platinas de perforación escaleriforme con  $\geq 40$  barras
19. Platinas de perforación reticulada, foraminada y/o otros tipos de perforación múltiple

###### Punteaduras intervasculares: Arreglo y tamaño

20. Punteaduras intervasculares escaleriforme
21. Punteaduras intervasculares opuestas
22. Punteaduras intervasculares alternas
23. Punteaduras intervasculares alternas de forma poligonal

24. Muy pequeñas -  $\leq 4\mu\text{m}$
25. Pequeñas - 4-7 $\mu\text{m}$
26. Medianas - 7-10 $\mu\text{m}$
27. Grandes -  $\geq 10\mu\text{m}$
28. Rango de tamaño punteaduras intervasculares ( $\mu\text{m}$ )

###### Punteaduras ornadas

29. Punteaduras ornadas

###### Punteaduras radiovasculares

30. Punteaduras radiovasculares con bordes diferenciados, similares a las punteaduras intervasculares en forma y tamaño
31. Punteaduras radiovasculares con bordes muy reducidos a aparentemente simple: punteaduras redondas o angulares
32. Punteaduras radiovasculares con bordes muy reducidos a aparentemente simple: punteaduras horizontales (escaleriforme, como un tajo) a vertical (empalizada)
33. Punteaduras radiovasculares de dos tipos o tamaños distintos en la misma célula radial.
34. Punteaduras radiovasculares unilateralmente compuestas y grandes
35. Punteaduras radiovasculares restringidas a hileras marginales

###### Engrosamientos espiralados

36. Engrosamientos espiralados presentes en los elementos vasculares
37. Engrosamientos espiralados en todo el cuerpo de los elementos vasculares
38. Engrosamientos espiralados sólo en las colas de los elementos vasculares
39. Engrosamientos espiralados presentes sólo en los elementos vasculares delgados

###### Diámetro tangencial promedio de poros

40.  $\leq 50\mu\text{m}$
41. 50-100 $\mu\text{m}$
42. 100-200 $\mu\text{m}$
43.  $\geq 200\mu\text{m}$
44. Promedio,  $\pm$  desviación estándar, rango,  $n = x$
45. Poros de dos clases de diámetros distintas, maderas sin porosidad circular

###### Poros por milímetro cuadrado

46.  $\leq 5$  poros/ $\text{mm}^2$
47. 5-20 poros/ $\text{mm}^2$

- 48. 20-40 poros/mm<sup>2</sup>
- 49. 40-100 poros/mm<sup>2</sup>
- 50.  $\geq 100$  poros/mm<sup>2</sup>
- 51. Promedio,  $\pm$  desviación estándar, rango,  $n = x$

Longitud promedio de elementos vasculares

- 52.  $\leq 350\mu\text{m}$
- 53. 350-800 $\mu\text{m}$
- 54.  $\geq 800\mu\text{m}$
- 55. Promedio,  $\pm$  desviación estándar, rango,  $n = x$

Tilosis y depósitos en vasos

- 56. Tilosis común
- 57. Tilosis esclerótica
- 58. Gomas y otros depósitos en vasos en el duramen

Madera sin poros

- 59. Madera sin vasos

#### **Traqueidas y fibras**

- 60. Traqueidas vasicéntricas/vasculares presentes

Fibras de tejido macerado

- 61. Fibras con punteaduras simples a areoladas con borde reducido
- 62. Fibras con punteaduras areoladas
- 63. Punteaduras comunes en las paredes radial y tangencial
- 64. Engrosamientos espiralados en fibras de tejido macerado

Fibras septadas y bandas de fibras similares a parénquima

- 65. Presencia de fibras septadas
- 66. Presencia de fibras no septadas
- 67. Bandas de fibras parecidas a parénquima alternando con fibras ordinarias

Espesor de pared de las fibras

- 68. Fibras de pared muy delgada
- 69. Fibras de pared delgada a gruesa
- 70. Fibras de pared muy gruesa

Longitud promedio de fibras

- 71.  $\leq 900\mu\text{m}$
- 72. 900-1600 $\mu\text{m}$
- 73.  $\geq 1600\mu\text{m}$
- 74. Promedio,  $\pm$  desviación estándar, rango,  $n = x$

Parénquima longitudinal

- 75. Parénquima longitudinal ausente o extremadamente raro

Parénquima longitudinal apotraqueal

- 76. Parénquima longitudinal difuso
- 77. Parénquima longitudinal difuso en agregados
- Parénquima longitudinal paratraqueal
- 78. Parénquima longitudinal paratraqueal escaso
- 79. Parénquima longitudinal vasicéntrico
- 80. Parénquima longitudinal aliforme
- 81. Parénquima longitudinal aliforme romboide
- 82. Parénquima longitudinal aliforme en forma de alas
- 83. Parénquima longitudinal confluyente
- 84. Parénquima longitudinal paratraqueal unilateral
- Parénquima longitudinal en bandas
- 85. Bandas de parénquima longitudinal de más de 3 células de ancho
- 86. Parénquima longitudinal en bandas delgadas o líneas hasta 3 células de ancho
- 87. Parénquima longitudinal reticulado
- 88. Parénquima longitudinal escaleriforme
- 89. Parénquima longitudinal marginal o aparentemente en bandas marginales
- Tipo de célula/longitud de hilera del parénquima longitudinal
- 90. Células de parénquima fusiformes
- 91. Dos células por hilera de parénquima
- 92. Cuatro (3-4) células por hilera de parénquima
- 93. Ocho (5-8) células por hilera de parénquima
- 94. Más de 8 células por hilera de parénquima
- 95. Parénquima no lignificado

#### **Radios**

Ancho de radios

- 96. Radios exclusivamente uniseriados
- 97. Radios con 1-3 células de ancho
- 98. Radios mayores comúnmente de 4-10 células de ancho
- 99. Radios mayores comúnmente  $> 10$  células de ancho
- 100. Radios con porciones multiseriadas tan anchas como las porciones uniseriadas

Radios agregados

- 101. Radios agregados

Altura de radios

- 102. Altura de radios  $> 1\text{mm}$

Radios de dos tamaños distintos

- 103. Radios de dos tamaños distintos

Radios: Composición celular

- 104. Todas las células radiales procumbentes
- 105. Todas las células radiales erectas y/o cuadradas
- 106. Cuerpo de células radiales procumbentes con una fila marginal de células erectas y/o cuadradas
- 107. Cuerpo de células radiales procumbentes con 2-4 hileras marginales de células erectas y/o cuadradas
- 108. Cuerpo de células radiales procumbentes con más de 4 hileras marginales de células erectas y/o cuadradas
- 109. Radios con células procumbentes, erectas y cuadradas mezcladas en todo el radio

Células envolventes

- 110. Células envolventes

Células tipo baldosas

- 111. Células tipo baldosas

Perforaciones en células radiales

- 112. Perforaciones en células radiales

Paredes celulares del parénquima radial separadas

- 113. Paredes celulares del parénquima radial separadas

Radios por milímetro

- 114.  $\leq 4$  /mm

- 115. 4-12 /mm

- 116.  $\geq 12$  /mm

Madera sin radios

- 117. Madera sin radios

**Estructura estratificada**

- 118. Todos los radios estratificados
  - 119. Radios menores estratificados, radios mayores no estratificados
  - 120. Parénquima longitudinal y/o elementos vasculares estratificados
  - 121. Fibras estratificadas
  - 122. Radios y/o elementos axiales estratificados irregularmente
  - 123. Número de hileras de radios por mm longitudinal
- Elementos secretorios y variantes cambiales
- Células oleosas y mucilaginosas
- 124. Células oleosas y/o mucilaginosas asociadas al parénquima radial
  - 125. Células oleosas y/o mucilaginosas asociadas al parénquima longitudinal
  - 126. Células oleosas y/o mucilaginosas presentes entre las fibras

Canales intercelulares

- 127. Canales longitudinales en líneas tangenciales largas
  - 128. Canales longitudinales en líneas tangenciales cortas
  - 129. Canales longitudinales difusos
  - 130. Canales radiales
  - 131. Canales intercelulares de origen traumático
- Tubos laticíferos o taniníferos
- 132. Tubos laticíferos o taniníferos
- Variantes cambiales
- 133. Floema incluido, concéntrico
  - 134. Floema incluido, difuso
  - 135. Otras variantes cambiales

**Inclusiones minerales**

- 136. Presencia de cristales prismáticos
  - 137. Cristales prismáticos en células radiales erectas y/o cuadradas
  - 138. Cristales prismáticos en células radiales procumbentes
  - 139. Cristales prismáticos en alineación radial en células radiales procumbentes
  - 140. Cristales prismáticos en cámaras en células erectas y/o cuadradas
  - 141. Cristales prismáticos en células del parénquima longitudinal.
  - 142. Cristales prismáticos en cámaras en células del parénquima longitudinal
  - 143. Cristales prismáticos en fibras

Drusas

- 144. Presencia de drusas
  - 145. Drusas en células de parénquima radial
  - 146. Drusas en células de parénquima longitudinal
  - 147. Drusas en fibras
  - 148. Drusas en cámaras

Otros tipos de cristales

- 149. Rafidios
- 150. Cristales aciculares
- 151. Estiloides y/o cristales elongados
- 152. Cristales de otras formas (mayormente pequeños)
- 153. Cristales arenosos

Otras características de diagnóstico de cristales

- 154. Más de un cristal del mismo tamaño por célula o cámara

- 155. Cristales de dos tamaños distintos por célula o cámara
- 156. Cristales en células agrandadas
- 157. Cristales en tilosis
- 158. Cistolitos
- Sílice
- 159. Presencia de cuerpos de sílice
  - 160. Cuerpos de sílice en células radiales
  - 161. Cuerpos de sílice en células de parénquima longitudinal
  - 162. Cuerpos de sílice en fibras
- 163. Sílice vítreo

#### **APENDICE - información no anatómica**

##### Distribución Geográfica

- 164. Europa y Asia templada (región Brazier y Franklin 74)
  - 165. Europa, excepto el Mediterráneo
  - 166. Mediterráneo incluyendo África del Norte y el Medio Oriente
  - 167. Asia Templada (China), Japón, USSR
- 168. Asia del Sur Central (región Brazier y Franklin 75)
  - 169. India, Pakistán, Sri Lanka
  - 170. Birmania
- 171. Sureste de Asia y el Pacífico (región Brazier y Franklin 76)
  - 172. Tailandia, Laos, Vietnam, Camboya (Indochina)
  - 173. Indonesia, Filipinas, Malasia, Brunei, Papua Nueva Guinea e Islas Salomón
  - 174. Islas del Pacífico (incluyendo Nueva Caledonia, Samoa, Hawai y Fiji)
- 175. Australia y Nueva Zelanda (región Brazier y Franklin 77)
  - 176. Australia
  - 177. Nueva Zelanda
- 178. África Tropical e islas adyacentes (región Brazier y Franklin 78)
  - 179. África Tropical
  - 180. Madagascar y Mauricio, La Reunión y Comores
- 181. África del Sur (Sur del Trópico de Capricornio) (región Brazier y Franklin 79)

- 182. América del Norte, norte de Méjico (región Brazier y Franklin 80)
- 183. Neotrópico y Brasil templado (región Brazier y Franklin 81)
  - 184. Méjico y América Central
  - 185. El Caribe
  - 186. América del Sur Tropical
  - 187. Sur de Brasil
- 188. América del Sur templado incluyendo Argentina, Chile, Uruguay, Paraguay ((región Brazier y Franklin 82)

##### Hábitat

- 189. Árbol
- 190. Arbusto
- 191. Trepadora/liana
- Madera de importancia comercial
  - 192. Madera de importancia comercial
- Densidad Básica
  - 193. Densidad básica baja,  $\leq 0.40$
  - 194. Densidad básica media,  $0.40-0.75$
  - 195. Densidad básica alta,  $\geq 0.75$
- Color del duramen
  - 196. Duramen de color más oscuro que la albura
  - 197. Duramen básicamente marrón o tono marrón
  - 198. Duramen básicamente rojo o tono rojo
  - 199. Duramen básicamente amarillo o tono amarillo
  - 200. Duramen básicamente blanco a gris
  - 201. Duramen con vetas
  - 202. Duramen diferente a los de arriba
- Olor
  - 203. Olor distinguible
- Fluorescencia del duramen
  - 204. Duramen fluorescente
- Extractivos en agua y etanol: fluorescencia y color
  - 205. Extractivo en agua fluorescente
  - 206. Extractivo en agua básicamente sin color a color marrón o tono marrón
  - 207. Extractivo en agua básicamente rojo o tono rojo
  - 208. Extractivo en agua básicamente amarillo o tono amarillo
  - 209. Extractivo en agua diferente a los de arriba
  - 210. Extractivo en etanol fluorescente
  - 211. Extractivo en etanol básicamente sin color a color marrón o tono marrón
  - 212. Extractivo en etanol básicamente rojo o tono rojo



213. Extractivo en etanol básicamente amarillo o tono amarillo
214. Extractivo en etanol diferente a los de arriba  
Prueba de espuma
215. Prueba de espuma positiva  
Prueba de Cromo Azurol-S
216. Prueba de Cromo Azurol-S positiva  
Prueba de combustión de astillas
217. Astillas combustionan hasta carbón
218. Astillas combustionan totalmente hasta cenizas:  
Color de cenizas blanco brillante
219. Astillas combustionan totalmente hasta cenizas:  
Color de cenizas amarillo-marrón
220. Astillas combustionan totalmente hasta cenizas:  
Color de cenizas diferente a las de arriba
221. Astillas combustionan parcialmente hasta cenizas

## ANEXO 4

### CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS LEÑOSOS EN BASE A SUS DIMENSIONES

#### N° de poros por mm<sup>2</sup>

Muy pocos	< 5
Pocos	5 a 20
Moderadamente numeroso	21 a 40
Numerosos	41 a 100
Muy numerosos	> 100

#### Diámetro de poros

Muy pequeños	< 50um
Pequeños	50 < 100um
Medianos	101 < 200um
Grandes	> 200um

#### Longitud de los elementos vasculares

Cortos	< 350 um
Medianos	351 a 800 um
Largos	> 800um

#### N° de radios/mm

Pocos	< 4
Poco numerosos	4 a 11
Numerosos	>11

#### Longitud de fibras

Cortas	< 900um
Medianas	901-1600um
Largas	> 1600um

#### Diámetros de fibras

Angostas	< 25um
Medianas	25-40um
Anchas	>40um

#### Altura de radios

Extremadamente bajos	menos de 600 um
Bajos	600-2000um
Medianos	2000-5000um
Altos	5000-10000um
Muy altos	> 10000um

#### Ancho de radios

Muy finos	< 50um
finos	51-100um
Medianos	101-200um
Anchos	> 200um

#### Espesor de pared de las fibras (um)

Muy gruesa	Cuando el diámetro del lumen es menor a 1/3 del diámetro total
Gruesa	Cuando el diámetro del lumen es de 1/3 a 1/2 del diámetro total
Delgada	Cuando el diámetro del lumen es de 1/2 a 3/4 del diámetro total
Muy delgada	Cuando el diámetro del lumen es mayor de 3/4 del diámetro total

## ANEXO 5

### COEFICIENTE DE VARIABILIDAD ESTABLECIDA POR RUBIO (2002)

<b>CV (%)</b>	<b>GRADO DE VARIABILIDAD</b>
$0 < CV < 10$	Datos muy homogéneos
$10 \leq CV < 15$	Datos regularmente homogéneos
$15 \leq CV < 20$	Datos regularmente variables
$20 \leq CV < 25$	Datos variables
$CV \geq 25$	Datos muy variables

*FUENTE: Rubio (2002)*

## ANEXO 6

### Medición de elementos anatómicos de la especie capirona

N°	Poros		Radios					Fibras			Vasos
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
1	55	59	339	31	19	3	6	19	5,4	1 546	705
2	61	50	410	38	18	3	9	15	5,2	1 363	489
3	64	49	540	34	12	3	7	16	4,5	1 881	683
4	52	46	264	37	15	3	7	14	4,5	1 591	785
5	70	49	299	34	13	3	9	14	4,4	1 824	694
6	73	48	491	39	16	3	10	16	4,1	1 788	245
7	61	30	344	29	13	3	7	20	3,8	1 726	647
8	56	42	510	31	28	3	8	16	3,8	1 323	376
9	80	44	295	36	12	3	7	21	5,1	1 362	350
10	54	40	400	33	25	3	6	14	3,8	1 560	541
11	58	40	495	30	16	3	7	17	4,3	1 528	463
12	90	39	489	29	23	3	7	14	4,5	1 376	645
13	64	44	362	25	24	3	6	20	5,1	1 555	591
14	56	36	396	29	23	3	7	16	3,9	1 931	516
15	62	47	340	35	12	3	7	17	4,0	1 696	455
16	54	35	454	40	27	3	7	12	4,1	1 508	423
17	54	35	408	36	18	4	9	16	5,0	1 611	484
18	54	39	579	29	17	3	9	27	7,3	1 578	360
19	71	42	504	38	20	4	7	15	4,1	1 486	601
20	65	45	371	36	16	3	7	18	5,0	1 710	193
21	57	47	426	54	11	4	7	11	2,6	1 640	700
22	55	47	348	35	15	4	7	16	4,4	1 461	670
23	54	46	307	49	19	3	6	15	4,1	1 565	377
24	58	35	475	45	20	3	7	11	3,5	1 863	306
25	54	36	492	52	18	4	9	13	4,5	1 533	300
26	55	45	444	55	18	4	6	15	4,8	1 879	422
27	61	42	574	54	23	3	9	17	5,8	1 329	540
28	54	38	424	54	14	3	9	15	4,2	1 751	425
29	50	40	470	47	21	3	10	14	3,4	1 612	535
30	51	39	288	34	16	4	7	15	3,8	1 689	509
31	51	48	841	70	13	3	8	11	3,6	1 487	370
32	48	37	325	43	18	4	8	15	3,7	1 764	465

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
33	54	47	388	58	20	3	8	16	3,7	1 929	366
34	62	48	316	37	18	4	9	15	3,4	1 684	467
35	59	50	504	53	12	4	6	13	4,2	1 782	431
36	52	39	285	40	18	4	7	17	5,0	1 831	410
37	53	43	696	30	20	4	6	18	6,2	1 690	391
38	54	47	384	43	17	3	7	14	3,3	1 531	739
39	59	36	393	32	15	3	8	15	4,5	1 718	352
40	61	40	242	27	13	3	8	19	4,5	1 720	269
41	50	46	390	29	28	4	8	15	4,3	1 863	742
42	52	48	433	39	20	4	9	17	5,1	1 541	470
43	50	48	591	43	13	4	8	13	3,6	1 887	451
44	64	47	233	28	24	4	7	13	3,2	1 603	355
45	51	45	424	39	14	3	8	15	4,3	1 447	486
46	68	39	432	41	29	3	8	15	3,7	1 693	533
47	70	45	506	38	47	7	8	17	5,2	1 583	194
48	74	44	235	31	18	3	9	16	4,6	1 997	737
49	65	44	439	36	10	4	8	17	4,1	2 073	690
50	70	48	397	26	18	3	7	19	5,9	1 357	499
Sumatoria	2 966	2 163	20 991	1 930	927	171	381	787	219,2	82 448	24 443
Promedio	59	43	420	39	19	3	8	16	4,4	1 649	489
Desviación estándar	9	5	116	10	6	1	1	3	0,8	184	151
Coefficiente de variabilidad	14	12	28	25	34	21	14	17	19,3	11	31

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 7

### Medición de elementos anatómicos de la especie copaiba

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
1	153	5	356	64	18	3	7	22	8,7	1 456	338
2	155	6	433	42	19	3	7	18	6,7	1 199	367
3	131	5	440	25	19	3	6	20	6,1	1 395	210
4	128	3	312	34	19	2	7	16	7,0	1 297	286
5	198	3	328	28	12	2	6	22	8,0	1 503	219
6	158	5	551	37	25	3	6	11	1,9	1 150	291
7	139	3	399	39	18	2	7	11	3,2	1 306	384
8	176	4	561	35	30	3	6	21	3,9	1 485	341
9	128	4	274	32	13	2	4	15	2,9	1 426	319
10	153	6	499	34	23	2	6	21	4,1	1 557	327
11	164	5	292	27	17	3	7	25	6,4	953	169
12	163	3	314	32	15	3	7	23	9,3	1 455	297
13	212	5	707	45	32	3	7	20	2,6	1 334	410
14	118	4	528	38	26	2	7	25	9,5	1 377	151
15	159	3	239	41	13	3	6	20	6,7	1 497	311
16	166	3	557	36	26	2	7	23	7,2	1 424	316
17	130	6	494	41	23	3	6	21	1,8	1 592	255
18	167	4	565	36	29	3	6	24	12,4	1 410	235
19	90	3	262	25	10	2	6	19	1,8	1 727	387
20	153	4	433	34	22	2	7	16	2,1	1 574	301
21	135	5	442	34	23	3	7	15	2,2	1 378	230
22	164	5	584	30	29	3	6	18	5,8	1 260	286
23	172	4	435	28	20	3	7	22	10,9	1 308	340
24	176	2	369	29	18	3	6	21	2,2	1 428	387
25	81	3	486	32	26	3	6	16	2,4	1 594	269
26	149	4	726	41	25	3	7	23	4,9	951	274
27	185	3	419	35	21	3	6	13	2,9	1 576	252
28	126	3	452	39	20	3	7	21	2,5	1 535	341
29	180	3	256	39	21	3	8	15	4,7	1 356	180
30	150	3	435	44	12	3	6	17	2,9	1 400	239
31	171	2	342	28	18	3	7	24	12,4	1 425	358
32	159	6	464	37	23	2	8	16	1,9	1 599	270

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
33	145	7	467	36	24	3	8	20	5,1	1 566	263
34	118	5	495	31	27	3	8	25	1,6	1 255	422
35	162	4	642	25	12	3	7	15	2,8	1 596	323
36	158	4	267	32	28	2	6	21	4,9	1 536	224
37	138	3	543	31	25	3	7	14	3,8	1 363	212
38	152	4	354	44	16	3	7	16	2,6	1 433	304
39	167	5	327	32	15	2	7	14	4,0	1 576	310
40	139	3	565	31	25	3	7	23	3,8	1 557	343
41	161	2	558	43	22	3	4	25	7,0	749	424
42	153	3	339	28	12	2	6	19	5,7	1 421	374
43	144	5	472	43	15	3	7	21	7,2	1 536	300
44	142	6	401	44	25	2	5	16	6,9	1 298	249
45	140	5	314	31	17	3	6	27	6,7	1 366	325
46	177	3	394	25	18	2	6	14	5,3	1 445	387
47	170	4	280	25	21	3	7	19	7,1	1 674	273
48	177	4	490	33	18	3	7	17	7,6	1 293	351
49	167	2	447	43	28	3	6	16	6,0	1 484	210
50	168	3	313	27	16	2	7	18	7,4	1 403	261
Sumatoria	7 665	199	21 623	1 746	1 029	134	327	958	2633	70 479	14 895
Promedio	152	4	432	35	21	3	7	19	5,3	1 410	298
Desviación estándar	24	1	118	7	5	0	1	4	2,8	182	66
Coficiente de variabilidad	16	31	27	21	27	18	13	20	53,1	13	22

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 8

### Medición de elementos anatómicos de la especie shihuahuaco

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
1	196	5	219	10	9	1	13	13	5,2	1 312	338
2	178	7	253	13	11	1	9	11	4,8	1 439	316
3	142	8	237	29	11	1	13	12	4,9	1 637	297
4	147	5	218	20	9	2	13	12	4,9	1 288	286
5	169	7	219	13	9	1	10	14	5,1	1 416	262
6	157	8	204	20	9	1	9	13	5,4	1 353	274
7	151	5	262	10	10	1	10	14	5,9	1 665	283
8	140	6	241	12	9	1	9	13	5,8	1 725	282
9	159	6	207	37	11	3	14	12	5,8	1 371	361
10	202	7	221	28	9	2	9	10	4,4	1 351	242
11	171	5	236	26	10	2	14	15	6,7	1 366	343
12	173	8	274	23	13	2	10	11	4,8	1 567	305
13	174	11	261	41	13	1	9	12	5,6	1 325	278
14	160	6	264	39	11	2	7	13	5,4	1 486	347
15	116	9	240	19	13	1	9	11	4,3	1 603	362
16	151	5	300	15	11	1	10	17	6,3	1 501	306
17	193	6	214	32	9	1	10	15	6,8	1 752	220
18	148	5	231	16	10	1	9	14	4,9	1 433	296
19	180	6	275	17	10	1	8	25	13,4	1 343	289
20	185	6	214	17	8	2	12	10	4,4	1 279	363
21	185	6	243	34	13	2	6	17	7,0	1 580	269
22	169	7	268	12	11	2	9	11	4,6	1 691	381
23	177	4	217	25	12	2	7	10	4,2	1 410	378
24	156	5	248	35	10	3	9	11	5,0	1 463	327
25	188	5	224	29	10	2	12	12	5,3	1 448	298
26	166	5	210	21	10	1	9	11	4,9	1 467	283
27	168	4	214	16	10	1	6	12	5,6	1 378	340
28	180	5	245	19	10	1	9	11	4,3	1 490	268
29	161	6	244	10	15	2	9	12	4,9	1 540	343
30	150	10	264	31	12	1	9	11	5,1	1 426	265
31	165	8	230	8	10	1	13	10	5,0	1 247	356
32	159	6	165	12	6	1	9	12	4,5	1 279	330



N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
33	183	6	228	23	12	2	10	11	4,4	1 203	272
34	165	5	206	15	8	1	10	15	7,6	1 484	332
35	186	7	248	15	11	1	9	12	5,4	1 368	277
36	162	7	220	18	11	2	8	11	4,6	1 410	355
37	180	4	222	32	10	2	8	13	5,1	1 629	286
38	173	6	199	16	9	1	7	10	4,0	1 435	311
39	141	8	247	31	10	2	11	11	4,7	1 331	311
40	147	7	256	24	9	1	11	11	4,5	1 183	323
41	137	8	251	34	11	2	9	12	5,1	1 301	359
42	162	8	247	24	11	2	10	13	5,4	1 396	410
43	129	8	225	10	12	1	11	11	4,1	1 383	291
44	150	9	290	11	12	1	10	12	5,5	1 484	295
45	194	6	235	13	9	1	8	17	7,4	1 203	303
46	177	7	179	16	10	1	7	14	5,9	1 172	286
47	151	7	261	16	10	1	8	12	4,8	1 416	381
48	155	6	196	10	12	2	8	10	4,0	1 418	323
49	122	7	233	17	9	1	14	10	3,2	1 481	267
50	161	5	226	14	10	2	15	9	4,3	1 276	291
Sumatoria	8 194	323	11 731	1 029	520	75	488	622	265,1	71 203	15 558
Promedio (x)	164	6	235	21	10	1	10	12	5,3	1 424	311
Desviación estándar	19	2	27	9	2	1	2	3	1,5	139	40
Coefficiente de variabilidad	12	24	11	43	15	39	22	20	27,7	10	13

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 9

### Medición de elementos anatómicos de la especie mango

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
1	125	5	240	52	10	2	5	16	2,7	603	307
2	142	6	241	49	8	2	6	13	2,7	514	312
3	156	8	257	38	9	2	8	14	2,1	498	264
4	117	5	200	39	7	2	5	13	2,2	799	219
5	140	7	223	48	10	2	6	18	1,8	778	315
6	125	5	292	73	10	3	7	13	2,1	738	245
7	123	6	219	47	7	2	6	11	2,3	636	291
8	139	5	200	44	12	2	5	10	2,2	719	310
9	128	5	353	61	10	2	6	13	1,9	659	232
10	153	4	222	47	7	2	5	17	2,0	627	134
11	133	7	326	49	10	2	5	19	1,8	655	258
12	145	4	298	49	11	2	6	16	2,4	825	276
13	110	5	345	47	10	2	7	14	1,9	623	291
14	93	3	248	42	11	2	7	14	1,8	790	199
15	108	4	226	45	7	2	7	12	2,3	777	169
16	115	6	222	32	7	1	7	17	1,7	581	214
17	153	6	284	41	9	2	6	16	1,8	506	357
18	142	6	208	44	7	2	6	16	2,0	740	196
19	164	6	299	58	10	2	5	15	1,5	776	318
20	121	7	400	48	13	2	7	14	1,6	705	241
21	117	7	234	39	9	2	7	14	1,7	534	351
22	112	5	234	52	8	2	7	17	1,6	624	313
23	133	4	306	47	11	2	6	12	2,0	533	275
24	116	5	206	38	7	2	7	17	1,6	578	289
25	139	8	228	46	8	2	7	11	1,6	707	349
26	113	4	247	47	9	2	6	18	1,9	795	322
27	112	4	255	56	10	2	8	14	1,5	643	232
28	107	5	269	50	10	2	7	16	2,6	703	264
29	130	5	249	49	9	2	7	16	2,4	604	236
30	128	6	188	51	7	2	7	15	3,1	597	195
31	122	7	237	61	8	2	7	17	1,5	558	210
32	122	6	198	54	6	2	6	13	2,3	714	225
33	145	5	211	46	8	2	8	19	3,0	624	251

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
34	122	5	250	52	9	2	7	19	2,0	835	201
35	129	6	280	44	9	2	9	16	2,3	746	317
36	107	5	201	48	8	2	8	16	2,3	614	232
37	113	5	270	50	11	2	7	17	2,1	623	303
38	151	7	206	34	7	2	8	15	2,8	542	283
39	110	5	458	47	14	2	7	14	2,4	637	269
40	136	4	186	54	6	2	6	16	2,2	593	123
41	133	5	269	48	10	2	6	19	3,1	600	218
42	124	6	170	45	6	2	6	16	2,7	693	271
43	120	5	231	45	7	2	7	15	1,8	667	328
44	168	4	249	54	8	2	9	12	1,6	601	279
45	136	4	249	46	8	2	8	18	2,3	565	296
46	121	5	200	40	6	2	8	15	2,0	728	248
47	142	7	269	54	8	2	5	15	1,9	682	276
48	129	6	311	29	12	2	9	12	1,8	764	197
49	133	4	223	26	7	1	9	17	2,2	546	378
50	136	5	196	47	7	2	7	17	2,1	691	210
Sumatoria	6,436	281	12,578	2,356	438	99	338	759	104,8	32 890	13,090
Promedio	129	5	252	47	9	2	7	15	2,1	658	262
Desviación estándar	16	1	56	8	2	0	1	2	0,4	90	56
Coficiente de variabilidad	12	21	22	17	22	12	17	15	19,9	14	21

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 10

### Medición de elementos anatómicos de la especie naranjo

N°	Poros		Radios					Fibras			Vasos
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
1	49	16	482	34	33	3	8	19	2,7	1 011	100
2	54	9	242	47	15	4	10	12	2,5	925	133
3	52	11	243	38	16	4	9	20	2,7	967	101
4	58	9	279	43	15	4	9	15	2,7	931	109
5	67	9	318	39	20	4	8	14	2,6	838	134
6	51	14	233	36	14	4	7	10	2,3	1 202	112
7	66	16	253	51	16	5	9	12	2,2	1 161	176
8	52	12	180	36	10	3	8	12	2,2	1 065	120
9	42	9	231	39	14	4	8	12	2,8	1 073	119
10	48	12	156	34	9	3	8	11	2,5	949	164
11	51	13	265	47	14	4	9	13	2,9	862	120
12	59	9	191	47	13	4	8	11	2,9	1 069	169
13	45	7	290	36	17	3	9	13	2,6	898	101
14	50	11	210	46	14	3	9	14	2,1	905	155
15	59	11	259	44	15	4	9	16	2,6	958	136
16	54	15	156	44	9	3	7	13	2,0	975	148
17	45	14	232	44	15	4	9	12	2,9	838	154
18	43	10	274	41	18	4	9	15	2,7	1 159	134
19	48	9	249	34	18	3	8	13	3,2	1 077	95
20	58	13	307	29	16	4	6	16	2,5	969	185
21	51	10	316	29	19	3	9	12	3,4	1 049	135
22	32	13	171	36	12	3	8	14	2,8	922	96
23	39	13	240	38	13	4	8	14	2,9	1 199	152
24	44	10	177	35	12	4	7	15	2,5	956	138
25	46	11	214	37	13	4	7	13	2,3	903	111
26	50	14	161	43	10	3	8	17	2,9	1 004	164
27	61	13	321	42	21	5	6	13	2,4	1 005	93
28	46	14	275	37	19	4	8	13	2,5	943	75
29	64	15	233	35	15	4	8	14	2,6	1 035	123
30	51	18	274	49	18	5	7	12	2,9	944	161
31	55	17	242	33	16	3	10	12	2,4	916	140
32	46	17	305	39	19	4	7	14	2,6	956	120

N°	Poros		Radios				Fibras			Vasos	
	Diámetro tangencial	Número por mm <sup>2</sup>	Altura	Ancho	Número de células		Número por mm	D. Total	Esp. Pared	Longitud	Longitud
					Altura	Ancho					
33	54	15	202	34	13	4	8	13	2,7	999	135
34	47	19	218	35	13	4	6	16	2,6	1 078	120
35	39	17	206	43	12	4	8	12	2,7	927	111
36	54	13	249	36	14	4	11	10	2,3	1 121	101
37	54	14	186	41	11	4	10	17	3,5	1 066	155
38	66	17	266	35	16	4	9	11	2,6	825	119
39	61	15	280	43	18	4	9	16	2,4	1 117	130
40	52	14	219	55	14	5	10	15	3,0	844	103
41	65	13	261	41	16	4	7	10	2,4	1 219	113
42	56	17	186	36	10	4	10	14	2,3	870	124
43	50	14	206	37	13	4	7	13	2,3	1 017	153
44	68	19	247	37	16	5	7	12	2,6	748	178
45	51	15	250	43	15	3	8	11	2,7	1 235	133
46	52	10	157	37	11	4	7	11	2,4	805	151
47	47	12	249	55	16	5	9	11	2,2	1 012	105
48	46	15	239	54	13	4	7	13	2,5	736	187
49	58	16	261	46	12	4	8	12	2,4	978	137
50	67	13	297	43	16	5	9	13	2,4	1 141	131
Sumatoria	2 626	662	12 162	2 013	747	195	410	666	129,6	49 401	6 557
Promedio	53	13	243	40	15	4	8	13	2,6	988	131
Desviación estándar	8	3	56	6	4	1	1	2	0,3	120	26
Coefficiente de variabilidad	15	22	23	15	26	16	14	16	11,9	12	20

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 11

### Propiedades físicas y químicas del carbón de las cinco especies en estudio

<b>Características</b>	<b>Capirona</b>	<b>Copaiba</b>	<b>Shihuahuaco</b>	<b>Mango</b>	<b>Naranjo</b>
Densidad de madera	0,76	0,61	0,87	0,52-0,7	0,49-0,78
<b>Densidad de carbón</b>					
Promedio	0,53	0,30	0,48	0,28	0,46
Desv. standard	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04
CV %	7,30	9,20	3,20	10,06	8,67
<b>Contenido de humedad (%)</b>					
Promedio	5,42	5,74	5,83	7,00	5,45
Desv. standard	0,59	0,28	0,11	0,61	0,76
CV %	10,91	4,89	1,85	8,66	14,00
<b>Material volátil (%)</b>					
Promedio	36,50	41,17	32,94	32,02	50,36
Desv. standard	1,67	4,63	0,62	0,43	3,14
CV %	4,59	11,25	1,87	1,35	6,23
<b>Ceniza (%)</b>					
Promedio	2,20	2,16	1,34	2,81	2,68
Desv. standard	0,16	0,06	0,02	0,65	0,08
CV %	7,36	2,95	1,48	22,98	2,91
<b>Carbono fijo (%)</b>					
Promedio	55,88	50,92	59,90	58,17	41,52
Desv. standard	1,63	4,40	0,70	1,67	2,47
CV %	2,92	8,63	1,17	2,88	5,96

FUENTE: *Elaboración propia*