



# Sobre el uso imágenes microtomográficas para estudios de carbón de madera arqueológico

*Using X-ray microtomography imaging for archaeological wood charcoal studies*

Cristina Marilyn Calo y Bernarda Marconetto

Instituto de Antropología de Córdoba, IDACOR, CONICET, Museo de Antropología, Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.  
E-mail: [mcalo.idacor@ffyh.unc.edu.ar](mailto:mcalo.idacor@ffyh.unc.edu.ar) ; [marconet@ffyh.unc.edu.ar](mailto:marconet@ffyh.unc.edu.ar)

## Resumen

*La aplicación de microtomografías a los análisis antracológicos cuenta con escasas referencias por el momento. Las expectativas en torno a sus potencialidades, sugeridas en parte por su uso sobre materiales similares, precisan ser evaluadas en la práctica antracológica, en función de las características particulares de su objeto de estudio y de las problemáticas que aborda. Este trabajo busca evidenciar algunos beneficios y desventajas de la técnica en el análisis de conjuntos de carbón de madera arqueológico y señalar aspectos sobre los cuales ésta puede hacer contribuciones significativas. Se presentan aquí los pasos de un plan experimental de adquisición de microtomografías aplicado a un conjunto de muestras de referencia actuales de carbón de madera. Esta propuesta incluye además un breve protocolo para la preparación de muestras de carbón actual para la adquisición de imágenes microtomográficas. Luego, se refieren los procedimientos digitales de análisis para una serie de caracteres anatómicos diagnósticos empleados para la identificación taxonómica de maderas y carbones. Finalmente se presentan descripciones de la anatomía microscópica de algunos ejemplares realizados íntegramente a partir del análisis de los modelos virtuales obtenidos por microtomografía. Los resultados sugieren que la microtomografía de rayos X es una técnica con la que se obtienen datos de calidad para la antracología. Sin embargo, la inversión de tiempo y recursos necesarios para estudiar los grandes conjuntos de muestras que son la base privilegiada de la especialidad podrían interferir en su aplicabilidad. En casos particulares de estudios que tengan como base conjuntos reducidos, poco variables o bien ejemplares específicos, la microtomografía presenta una serie de ventajas directamente relacionadas con la posibilidad de explorar la muestra a través de infinitos planos de visualización, la automatización de las mediciones y la densidad de datos morfológicos que es posible extraer de las imágenes tridimensionales para incluir en cálculos de índices y otros marcadores estadísticos, la no destructividad de los procesos de preparación y analíticos involucrados, la preservación de los ejemplares físicos y la documentación simultánea de grandes cantidades de información almacenada y disponible en modelos virtuales de los materiales estudiados.*

**Palabras clave:** Imágenes microtomográficas; Análisis antracológicos; Muestras experimentales de carbón de madera; Procesamiento de imágenes 3D; Modelos virtuales.

## Abstract

*There are currently hardly any references to anthracological analyses using microtomography. Expectations about its potential, suggested in part by its use on similar materials, need to be evaluated in anthracological practice, according to the specificity of its subject. This paper seeks to highlight some benefits and disadvantages of the technique in the analysis of archaeological charcoal assemblages and to point out aspects to which it offers significant contributions. Here we present the steps of an experimental plan for microtomographies acquisition applied to a set of modern reference samples of wood charcoal. A brief protocol on how to prepare contemporary charcoal samples for microtomographic imaging is also included in the proposal. Digital analysis procedures for a number of diagnostic anatomical characters used for the taxonomic identification of woods and charcoals are described below. Lastly, descriptions of the microscopic anatomy of some specimens are presented, based entirely on the analysis of virtual models obtained by microtomography. The results suggest that X-ray microtomography provides quality data for anthracology. However, time and resources needed to study large sample sets, which are the privileged basis of this disciplinary field, could interfere with its applicability. On the other hand, microtomography offers several advantages for studies based on small and/or taxonomically homogeneous assemblages of charcoals, or even specific samples. These are related to its capabilities in exploring the whole object through unlimited visualization planes, the automation of measurements and the bulk of morphological data that can be extracted from three-dimensional images, whether for index calculations or other statistical markers, the non-destructiveness involved in sample preparation and analytical processes, the preservation of*

Recibido 31-08-2024. Recibido con correcciones 04-10-2024. Aceptado 01-11-2024

Revista del Museo de Antropología 17 (3): 13-28 /2024 / ISSN 1852-060X (impreso) / ISSN 1852-4826 (electrónico)  
<http://revistas.unc.edu.ar/index.php/antropologia/index>

IDACOR-CONICET / Facultad de Filosofía y Humanidades – Universidad Nacional de Córdoba - Argentina

*physical specimens and the simultaneous documentation and storage of large amounts of available information as virtual models of the studied materials.*

**Keywords:** Microtomography images; Anthracological analysis; Experimental charred wood samples; 3D Imaging; Virtual models.

## Introducción

Hace algo más de una década que la microtomografía de rayos X aparece dentro del espectro metodológico de la arqueología con diferentes finalidades que incluyen, tanto el registro y la preservación de objetos y colecciones, como estudios experimentales, aplicaciones para el análisis de artefactos y materiales diversos, procesos de manufactura, procesos tafonómicos y de formación de sitio.

Algunos ejemplos estos trabajos, enumerados según la naturaleza de su objeto, abordan la caracterización composicional y estructural de pastas cerámicas (Bernardini *et al.*, 2019; Kahl y Ramminger, 2012), aspectos morfológicos de artefactos en piedra (Göldner *et al.*, 2022), la identificación de inclusiones en artefactos alfareros y líticos (Obata *et al.*, 2020; Ward *et al.*, 2019), el análisis de objetos y decoraciones en metal (Azeredo *et al.*, 2019; Machado *et al.*, 2019), estudios de textiles y material cestero (Andonova, 2021; Karjalainen *et al.*, 2023), aspectos de la matriz sedimentaria de los sitios (Villagrán *et al.*, 2019), abordajes tafonómicos y caracterización de material óseo humano y de otros animales (Beck *et al.*, 2012; Bello *et al.*, 2013; Boschini *et al.*, 2015; George *et al.*, 2024; Nava *et al.*, 2017) así como de macrorrestos botánicos (Barron *et al.*, 2022; Barron y Denham, 2018; Calo *et al.*, 2019, 2020; Coubray *et al.*, 2010; Murphy y Fuller, 2017; Ngan-Tillard *et al.*, 2015; Pritchard *et al.*, 2019; Zong *et al.*, 2017).

Entre estos últimos, el uso de microtomografías para el estudio de objetos arqueológicos y experimentales de madera y corteza se han centrado en aspectos tafonómicos (Haneca *et al.*, 2012), de conservación (Puhar *et al.*, 2022), cronológicos (Stelzner y Million, 2015) y principalmente en la caracterización e identificación taxonómica de la materia prima (Dreossi *et al.*, 2010; Mizuno *et al.*, 2010; Stelzner *et al.*, 2023, 2023; Whitau *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2018). Ya los estudios que proponen el uso de microtomografías sobre muestras de carbón de madera arqueológico son muy escasos y hasta el día de hoy han estado limitados a análisis preliminares y experimentales. Estos se centran en la posibilidad de describir caracteres anatómicos (Hubau *et al.*, 2013) y detectar la presencia de sustancias que podrían interferir en los fechados radiocarbónicos (Bird *et al.*, 2008).

La aplicación de microtomografías para el estudio propiamente antracológico de conjuntos de carbones recuperados en contextos arqueológicos, ya sea con

el objeto de caracterizar ambientes pasados o revelar aspectos culturales del uso de la madera, no cuenta aún con ejemplos publicados. En este punto, las expectativas en torno a sus potencialidades y desventajas, algunas sugeridas en los trabajos mencionados previamente, precisan ser evaluadas en la práctica, atendiendo a los conjuntos de carbones numerosos y morfológicamente diversos que dan base de la mayor parte de los análisis antracológicos.

Para empezar a indagar en esta problemática es necesario remitirse a la gran capacidad analítica y versatilidad demostrada por el extendido uso de la microscopía óptica en antracología. Si el objetivo es la identificación y el cálculo de índices como la frecuencia o abundancia de taxones, un analista experimentado puede obtener resultados estadísticamente satisfactorios dentro de un periodo razonable de tiempo, usando un microscopio de luz incidente disponible en los laboratorios de arqueobotánica. La microscopía de barrido de electrones, por ejemplo, es también una herramienta subsidiaria accesible cuando es necesario recabar datos que complementen la caracterización de determinados ejemplares.

Por su parte, la disponibilidad de instrumental para microtomografía de rayos X es menos frecuente y prácticamente en todos los casos requiere de la mediación de un técnico para su correcta manipulación. Asimismo, la obtención de imágenes microtomográficas de un conjunto muy numeroso de ejemplares de carbón precisa de la previa optimización de un plan experimental por el cual los resultados obtenidos resulten acordes a la inversión de tiempo y recursos para este tipo de aplicación.

Este trabajo se propone presentar la técnica en su aplicación a muestras de carbón de madera con énfasis en los procedimientos metodológicos y poner de manifiesto algunos de los beneficios y desventajas de su uso para el estudio de caracteres anatómicos sobre este tipo de material. De esta forma se busca señalar aspectos de los estudios antracológicos para los cuales el uso de imágenes microtomográficas puede contribuir de forma significativa.

Con este objetivo se presentan aquí los pasos de un plan experimental de adquisición de microfotografías aplicado a un conjunto de muestras de referencia actuales de carbón de madera. Esta propuesta incluye además un breve protocolo para la preparación de muestras de carbón actual para estudios con

microtomografías. Seguidamente se discriminan las estructuras anatómicas efectivamente observables en las imágenes y se refieren los procedimientos digitales de un análisis orientado a la determinación taxonómica, ejemplificados en las microtomografías de ocho ejemplares seleccionados para tal fin. A continuación, se presentan dos casos que buscan mostrar el alcance de la caracterización de atributos anatómicos diagnósticos basada exclusivamente en datos generados a partir de modelos virtuales microtomográficos.

Los resultados se evalúan principalmente en función del tiempo destinado a la adquisición de imágenes y la calidad del dato obtenido en los análisis. Además, se discuten aspectos en los que el uso de imágenes tomográficas, en tanto modelos tridimensionales de alta resolución, contribuye con datos específicos que sirven para potenciar los resultados en abordajes antracológicos.

#### *Sobre la Microtomografía de absorción de rayos X*

El funcionamiento general de la microtomografía está relacionado con la producción de imágenes radiográficas y tomográficas de extenso uso en la medicina. Ambas se encuentran en la base del desarrollo de la microtomografía de rayos X de aplicación industrial y científica a la que nos referimos en este trabajo (Baruchel *et al.*, 2000; Stock, 2008).

En una radiografía de base digital, el objeto radiografiado se sitúa en medio de un sistema compuesto por una fuente de rayos X y un detector. El haz de rayos X emitidos por la fuente atraviesa el objeto e interactúa con su estructura (densidad) según el principio físico de absorción de rayos X. En este proceso, la intensidad de los rayos X se ve disminuida o atenuada al alcanzar el detector, el cual recopila y digitaliza esta información permitiendo la creación de una imagen radiográfica

La tomografía de rayos X se basa en la obtención de una serie de estas radiografías (también llamadas proyecciones individuales) de un mismo objeto. Estas imágenes son adquiridas a partir de diferentes posiciones angulares del objeto y en su conjunto permiten reconstruir, por medio de procesos computacionales basados en algoritmos específicos, la estructura completa (interna y externa) del mismo.

Por su parte, la microtomografía de rayos X es capaz de generar estas imágenes con mayor resolución espacial que la tomografía, de modo que es posible captar detalles a escala micrométrica que estén presentes en estructura de un objeto. Aunque existen varios aspectos técnicos relevantes que diferencian la microtomografía de la tomografía médica, el incremento de la capacidad resolutoria que permite obtener imágenes nítidas de estructuras con dimensiones inferiores a los 100  $\mu\text{m}$  suele indicarse como un límite entre ambas técnicas

(Stock, 2008).

## **Materiales y Métodos**

Para diseñar el protocolo experimental y parametrización de la adquisición de las microtomografías se consideraron 50 muestras de carbón de madera de diferentes especies amazónicas, obtenidas de ejemplares de referencia pertenecientes a la colección del Museu de Arqueologia e Etnologia de la Universidade de São Paulo (MAE-USP). La totalidad del proceso de carbonización experimental bajo condiciones controladas se llevó a cabo en el MAE-USP siguiendo los procedimientos que se detallan a continuación.

Cada muestra fue previamente deshumidificada en una estufa FANEM modelo 515 durante un lapso de 5 horas a 40-50°C. Luego se envolvieron individualmente en papel de aluminio y se colocaron en bandejas metálicas que se introdujeron en una mufla modelo FDG 3P-S del fabricante EDG Equipamentos. Los parámetros de carbonización fueron normalizados para todas las muestras en un rango de incremento de temperatura, con inicio en la temperatura ambiente hasta un máximo de 400°C. La tasa de incremento de la temperatura se fijó en 2°C por minuto y una vez alcanzado el valor máximo, éste se mantuvo estable durante 40 minutos.

Las imágenes fueron adquiridas con un sistema microtomográfico modelo Phoenix v|tome|x m del fabricante General Electric Company en el Laboratório de Microtomografía Computadorizada y Procesamiento de Imagens 3D del Museu de Zoologia de la USP. El proceso de reconstrucción de las imágenes microtomográficas empleó el software Datos|x provisto por el mismo fabricante del equipo. Para la visualización y el procesamiento analítico de las microtomografías de los carbones se utilizó la distribución Fiji del software de procesamiento de imagen ImageJ en su versión 1.54f (Rueden *et al.*, 2017; Schindelin *et al.*, 2012; Schneider *et al.*, 2012).

El examen en torno a la especificación y control de los parámetros de adquisición en relación a los requerimientos de visualización de caracteres anatómicos diagnósticos de los diferentes taxones se realizó con base en la exploración de todo el conjunto de imágenes de las 50 muestras microtomografiadas. No obstante, este trabajo expone los resultados obtenidos sobre una selección de ocho ejemplares cuyas imágenes fueron sometidas a un conjunto de procedimientos digitales de análisis de atributos morfológicos. Los mismos cotejan la potencialidad de la técnica en la obtención de datos fehacientes de su estructura anatómica que resulten significativos para la determinación procedencias taxonómicas: *Anacardium giganteum* (ANACARDIACEAE), *Calycophyllum spruceanum* (RUBIACEAE), *Caryocar villosum* (CARYOCARACEAE)

*Diploptropis martiusii* (FABACEAE), *Hura crepitans* (EUPHORBIACEAE), *Hymenaea* sp (FABACEAE), *Platonia insignis* (GUTTIFERAE) y *Tabebuia* sp (BIGNONIACEAE). El análisis de los atributos anatómicos de los carbones se orientó según la lista de caracteres diagnósticos y las normas descriptivas de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) (Wheeler *et al.*, 1989, 2020).

Puesto que las muestras analizadas proceden de una colección y cuentan con una identificación taxonómica inicial fue posible utilizar como soporte del análisis la información disponible en atlas anatómicos de maderas de la región amazónica (Detienne y Jacquet, 1983; Gonçalves y Scheel-Ybert, 2016; Gonçalves y Scheel-Ybert, 2017; Souza-Pinto y Scheel-Ybert, 2021), claves de identificación como InsideWood (Wheeler, 2011) y CharKey (Bodin *et al.*, 2019) y trabajos específicos para algunos taxones que se citan en las mismas descripciones.

## Resultados

Los resultados se presentan en apartados que distinguen de forma general las diferentes fases que componen la aplicación de microtomografía de rayos X sobre este tipo de materiales.

### *Dimensiones y forma del fragmento de carbón para la adquisición de imágenes microtomográficas*

Si se parte de un interés analítico del tipo aquí propuesto, es fundamental conocer o determinar las dimensiones del objeto que será microtomografiado, ya que esto condiciona el alcance resolutivo de la imagen final y también el tiempo invertido en el experimento de adquisición. A diferencia de la microscopía, la modificación del tamaño de la muestra o del grado de detalle con que es posible observar determinadas estructuras sólo es posible mediante la ejecución de un nuevo experimento tomográfico.

En el caso del carbón de referencia es factible modificar las dimensiones de la muestra hasta obtener el tamaño que se evalúa más adecuado. Ya en el caso del carbón arqueológico las dimensiones de cada ejemplar pueden considerarse predefinidas por los diversos procesos de formación sitio y su modificación podría no ser deseable al optar por una técnica cuyo interés incluye la no destructividad de los procedimientos analíticos. En todo caso, los objetivos del estudio precisan considerar el compromiso entre el grado de detalle requerido y el tamaño predeterminado de los ejemplares en análisis.

El problema de la definición del tamaño de la muestra de carbón en función de la cantidad y tipo de caracteres diagnósticos que permiten reconocer diferentes taxones ya ha sido abordado por la metodología antracológica. Los estudios en regiones templadas y tropicales muestran

que el carbón de leño recuperado en fragmentos muy pequeños (menores a 2 mm) presenta una serie de dificultades e imprecisiones en su identificación (Chabal, 1988; Scheel-Ybert, 2004).

En particular, en el estudio de carbones procedentes de áreas tropicales y con gran diversidad florística como los que se examinan en este trabajo, la minimización del grado de incerteza en las determinaciones requiere de la observación de un mayor número de características diagnósticas. Los análisis muestran que el tamaño mínimo de los fragmentos estudiados para obtener una determinación taxonómica confiable de especies tropicales no debería ser inferior a los 4 mm (Scheel-Ybert, 2004).

Siguiendo estos resultados, para el diseño del protocolo de adquisición de imágenes microtomográficas en este trabajo se consideraron carbones de referencia dentro de dicho rango de tamaño. La parametrización y flujo de los experimentos para la adquisición de imágenes se establecieron posteriormente de acuerdo con estas dimensiones muestrales.

### *Parámetros experimentales: optimización de la resolución y el tiempo de escaneo*

Una vez definido el instrumental y las dimensiones de las muestras bajo estudio es posible cotejar las mejores condiciones de resolución (pixel x  $\mu\text{m}^2$ ) con las necesidades de detalle de la imagen final para la visualización de características de interés taxonómico.

Las dimensiones de las estructuras anatómicas de la madera son altamente variables tanto entre ellas como entre los diferentes taxones y algunos estudios se ocupan de su efecto en la aplicación de microtomografías sobre maderas (Grabner *et al.* 2009; Dierickx *et al.* 2024). En particular, el trabajo de Grabner *et al.* (2009) presenta un listado de las dimensiones máximas y mínimas alcanzadas por los diferentes caracteres diagnósticos del xilema. Los autores muestran que las estructuras sub-celulares que pueden ser necesarias para distinguir especies y variedades generalmente presentan tamaños iguales o menores que 5  $\mu\text{m}$  y claramente no pueden ser observadas en microtomografías que cuentan con un grado resolutivo inferior a ese valor. No obstante, los datos cualitativos, cuantitativos, distributivos y de presencia/ausencia de rasgos, como vasos, tejido parenquimático, tejido fibroso, contenidos y partículas biominerales, son visibles en tanto las imágenes no superen por mucho el valor de 5  $\mu\text{m}$  por pixel.

Las pruebas realizadas al inicio de este estudio establecen que en muestras de carbón cúbicas de aproximadamente 1 cm de lado ya es posible alcanzar tamaños de píxel dentro del intervalo indicado. El tiempo de adquisición de una imagen para este formato de objeto no supera los 40 minutos de experimento. Por consiguiente, para

el conjunto de las 50 muestras microtomografiadas el tiempo experimental global alcanzó las 30 horas reloj. A éste se adiciona el tiempo destinado a la reconstrucción tomográfica (en torno de los 20-30 minutos en este caso) y a la manipulación del objeto para disponerlo correctamente en el portaobjetos del equipo.

A partir de estos datos se aplicaron modificaciones con el objetivo de optimizar la performance experimental, estableciendo una reducción en torno al 50% en relación al tamaño de las muestras de prueba. Para ello se separó de cada espécimen carbonizado un cubo de 4 mm de lado y se optó por un sistema de montaje descrito en el apartado siguiente, que permite escanear las muestras por pares sin perder capacidad resolutive (Figura 1 A-C). La Tabla 1 exhibe los valores de resolución específicos adjudicados en cada imagen de las muestras cuyo análisis se presenta en este estudio. Los demás parámetros fueron determinados en función de la resolución y del tamaño de la muestra, tomando en consideración además la baja densidad de los materiales orgánicos, la composición homogénea del carbón de madera y el modo en que ambas condicionan la interacción con los rayos X para la producción de imágenes (*i.e.* Stock, 2008).

#### Montaje de las duplas de muestras

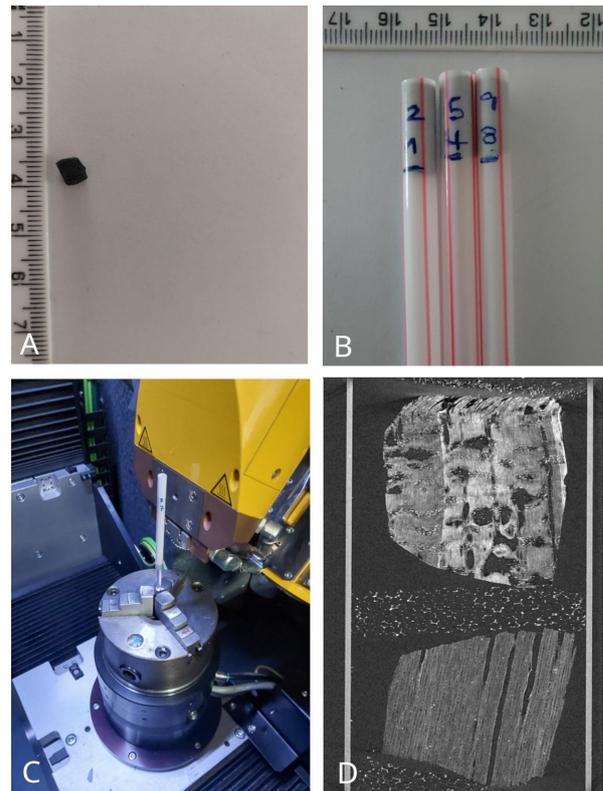
El sistema de soporte de las muestras en los sistemas Phoenix requiere la provisión de un medio de montaje específico para los objetos pequeños y frágiles, de modo que puedan ser fijados en el portaobjetos. Para el montaje de las duplas de fragmentos de carbón de referencia se utilizaron tubos de polipropileno de 140 mm de largo y 5,8 mm de diámetro, dentro de los cuales las dos muestras se colocaron apiladas y sujetas por discos de esponja floral (Figura 1 B-C). En la superficie del tubo, sobre la posición de cada carbón, se indicó la sigla que identifica la muestra con marcador permanente.

#### Visualización y pre-procesamiento de las imágenes reconstruidas

Cada una de las imágenes microtomográficas reconstruidas en este trabajo contiene en torno de 2Gb de información y se compone de una secuencia (*stack* o colección) de aproximadamente 2000 láminas (*slides*) que seccionan horizontalmente el objeto. En cada una de estas *slides* se observan, además de los fragmentos de carbón, la pared de tubo de polipropileno y el material de los discos de esponja floral (Figura 1 D).

El pre-procesamiento o preparación de las imágenes para el análisis tuvo como finalidad eliminar todos los píxeles que no representan el carbón usando las herramientas [Selection Brush]<sup>1</sup> [Clear Outside] [Roi Manager] automatizadas en una Macro, e individualizar

<sup>1</sup> En lo sucesivo, al interior de los corchetes [...] se indica el uso de las herramientas provistas por el software FIJI para cada procedimiento aplicado en las imágenes.



**Figura 1:** Preparación y montaje de las muestras para la adquisición de microtomografías. A) cubo de 4 mm de lado de carbón de madera; B) Montaje de las duplas de muestras de carbón en tubos de polipropileno; C) disposición del tubo de polipropileno con las duplas de muestras en el portaobjetos (garra) del microtomógrafo Phoenix (MZUSP); D) Corte longitudinal en una de las microtomografías de las duplas de carbonces.

**Figure 1:** Sample preparation and assembly for microtomography acquisition. A) a 4 mm side cube of wood charcoal; B) assembly of the charcoal sample pairs into polypropylene tubes; C) placement of the polypropylene tube with the sample pairs fixed on the microtomograph Phoenix (MZUSP) holder (claw); D) Longitudinal slice from one of the charcoal pairs microtomography.

en archivos separados las dos muestras dentro del tubo [Duplicate].

#### Análisis de las características anatómicas diagnósticas sobre la microtomografías de los carbonces

El primer paso del análisis consistió en reposicionar la imagen de los carbonces de modo que sea posible visualizar los tres planos anatómicos. El procedimiento más efectivo fue ubicar el trayecto de los vasos en la vertical [Interactive Stack Rotation] y volver a ejecutar los cortes horizontales para obtener una secuencia de láminas precisas en el plano transversal [Reslice]. Sobre este modelo se pueden obtener los cortes en los planos ortogonales que corresponden a las secciones longitudinales tangencial y radial (Figura 2 A-C). Posteriormente se ajustó la escala de las imágenes [Set Scale] a partir de los datos de reconstrucción

correspondientes a cada una de ellas, así como el contraste en los casos en que se hizo necesario para una mejor visualización [Enhance Contrast].

Las imágenes microtomográficas obtenidas a partir de los parámetros expuestos en la Tabla 1 distinguen fases (diferentes intervalos de la escala de grises) que se corresponden con variaciones en las densidades de algunas de las estructuras que componen la anatomía de la muestra. En la Figura 2 D se puede individualizar vasos, tejido parenquimático, tejido fibroso, cristales, contenidos e inclusiones de acuerdo con el rango de grises que componen su imagen. Estructuras con densidades muy similares, o bien con dimensiones menores o muy próximas al tamaño de píxel establecido, no son observables. No fue posible describir a partir de las imágenes obtenidas atributos correspondientes a:

- Placas de perforación: Si bien es observable en muchas de las muestras analizadas, no ha sido posible distinguir los diferentes tipos de placas presentes en la madera.
- Puntuaciones y engrosamientos helicoidales: No se observaron
- Traqueidas y fibras: No se observaron a nivel celular, sin embargo, en algunos casos fue posible diferenciar tejido formado por traqueidas o fibras debido a variaciones presentes en la densidad de unas y otras.
- Tipos celulares del parénquima axial: En la mayoría de los casos no es posible hacer esta distinción debido a que las células no pueden ser individualizadas con la resolución obtenida en las imágenes.
- Seriación y composición celular de los radios: En muchas de las imágenes no es posible contabilizar las células de los radios porque éstas no pueden ser claramente individualizadas.
- Variantes del cambium: No se observaron.

Por otra parte, los rasgos anatómicos claramente visibles en las microtomografías suman un total de 18 caracteres distribuidos en los tres planos anatómicos de la madera.

El análisis antracológico de los fragmentos de carbón en este trabajo se centran en este conjunto de atributos.

#### Anillos de Crecimiento

Límites de los anillos de crecimiento: Cuando presentes, los anillos de crecimiento se observaron en el plano transversal de las microtomografías (Figura 3 A-B).

Atributos cualitativos relacionados a los vasos:

Porosidad, Organización de los vasos; Agrupamiento de los vasos; Contorno de los vasos solitarios; Presencia de tilosis y depósitos en los vasos; Ausencia de vasos: Todos estos atributos son identificables en el plano transversal de las microtomografías (Figura 3 A-D).

#### Atributos cuantitativos relacionados a los vasos

Diámetro tangencial de los vasos; Cantidad de vasos por mm<sup>2</sup>; Largo de los elementos de vaso: Los valores correspondientes a estos rasgos se calcularon automáticamente sobre las imágenes microtomográficas usando herramientas de software. La herramienta [ROI Manager] permite seleccionar y medir individualmente el diámetro del lumen de los vasos en plano transversal ya sea sobre la totalidad o bien un conjunto de los vasos presentes en las imágenes (mínimo de 25 vasos). Sobre el conjunto de medidas obtenidas se obtuvieron los valores de la media, desvío estándar e intervalo para una interpretación más ajustada del dato (Figura 4 A) (Tabla 2).

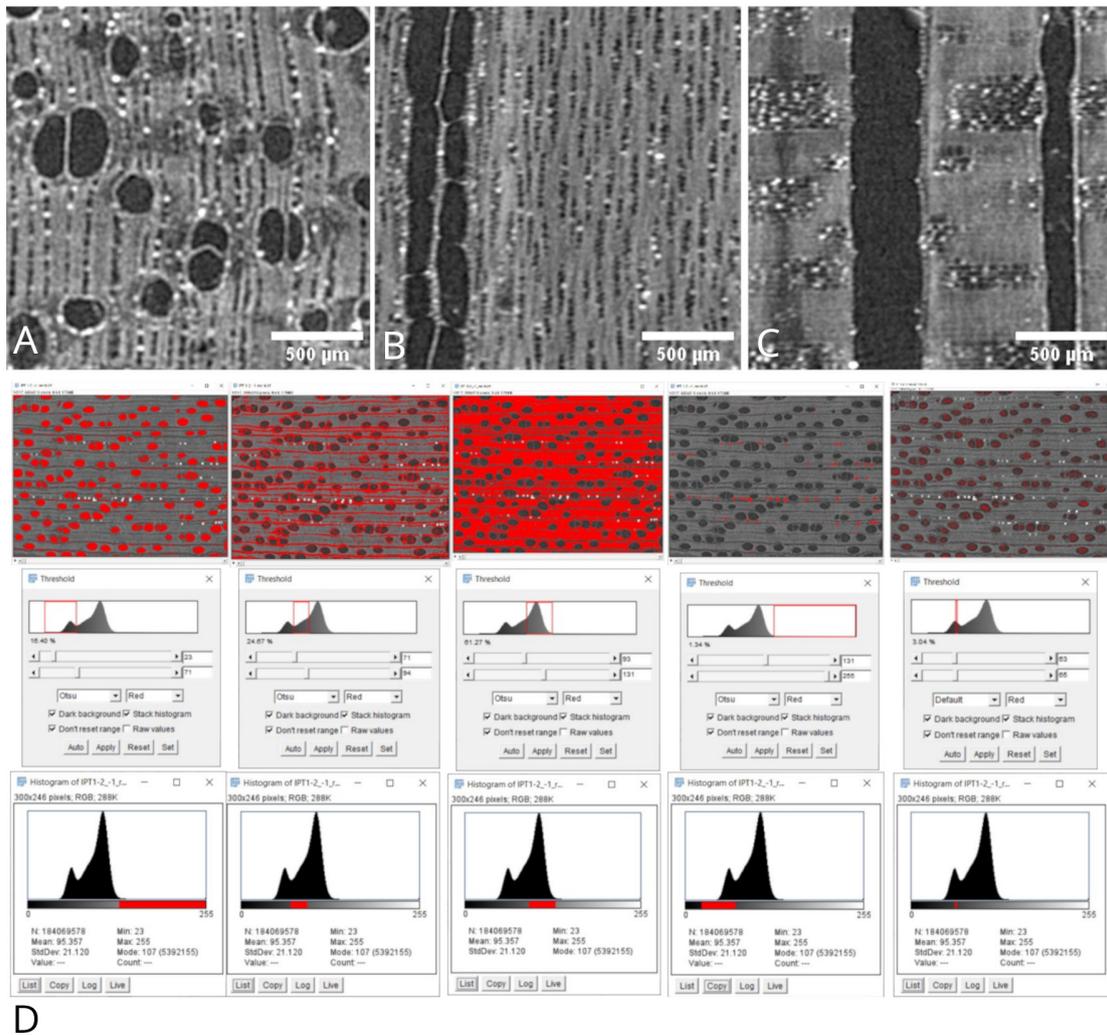
La cantidad de vasos por mm<sup>2</sup> también se realizó sobre láminas en plano transversal, delimitando cinco áreas de 1x1 mm con el selector [Rectangle] y luego se marcaron los vasos en cada una de ellas con el selector [Multipoint] que posee un contador acoplado. Luego se calculó la media sobre estos conjuntos de datos (Figura 4 B).

El largo de los elementos de vaso se calculó sobre los planos longitudinales usando la herramienta [ROI Manager], con el cálculo de los estadísticos media, desvío estándar e intervalo al final de las mediciones (Figura 4 C) (Tabla 3).

Muestra	Energía (KeV)	Corriente (mA)	DFD (mm)	DOD (mm)	Sector (°)	Angulo (°)	Tamaño Pixel (µm)
<i>Anacardium giganteum</i>	80	200	817,22	23,23	360	0,18	5,68
<i>Calycophyllum spruceanum</i>	70	170	817,22	20,44	360	0,18	5,00
<i>Caryocar villosum</i>	90	180	817,22	24,59	360	0,18	6,01
<i>Diploptropis martiusii</i>	70	170	817,22	20,44	360	0,18	5,00
<i>Hura crepitans</i>	70	200	817,22	21,75	360	0,18	5,32
<i>Hymeneae</i> sp	70	200	817,22	22,32	360	0,18	5,46
<i>Licania</i> sp	80	200	817,22	23,40	360	0,18	5,72
<i>Platonia insignis</i>	80	200	817,22	23,22	360	0,18	5,68
<i>Tabebuia</i> sp	70	200	817,22	22,32	360	0,18	5,46

**Tabla 1:** Parámetros experimentales de la adquisición de las microtomografías.

**Table 1:** Experimental settings used for microtomography acquisition.



**Figura 2:** A-C Láminas microtomográficas en los tres planos anatómicos -transversal, longitudinal tangencial y longitudinal radial, respectivamente- en *Anacardium giganteum*. Intervalos de la escala de grises que corresponden a vasos, radios, tejido fibroso, minerales y tilosis en la microtomografía de *Caryocar villosum*.

**Figure 2:** A-C Microtomographic slices showing the three anatomical planes - transversal, tangential longitudinal and radial longitudinal, respectively- in *Anacardium giganteum*. Gray scale intervals correlating vessels, rays, fibrous tissue, minerals and tyloses on *Caryocar villosum* microtomography.

**Atributos cualitativos relacionados al parénquima axial**  
Ausencia de parénquima axial; Tipo de parénquima axial: Tanto la ausencia como el tipo de parénquima axial se observaron en láminas del plano transversal de las muestras (Figura 4 D-F).

**Atributos cualitativos relacionados a los radios**  
Presencia de radios de diferentes tamaños, Ausencia de radios: Tanto la ausencia como la presencia de radios de diferentes tamaños se observaron en láminas en los planos transversal y longitudinales tangencial y radial.

**Atributos cuantitativos relacionados a los radios**  
Altura de los radios, Cantidad de radios por mm: Ambos atributos se midieron en láminas del plano longitudinal tangencial. El cálculo de la altura de los radios se realizó siguiendo un procedimiento similar al descrito

previamente en el caso del diámetro tangencial de los vasos, usando la herramienta [Roi Manager] (Figura 5 A-B) (Tabla 3). La cantidad de radios por milímetros se obtuvo a partir del trazado de líneas horizontales de 1 mm de largo con el selector [Straight] y contando los radios sobre dicha línea con el selector [Multipoint] y el contador automático asociado (Figura 5 C).

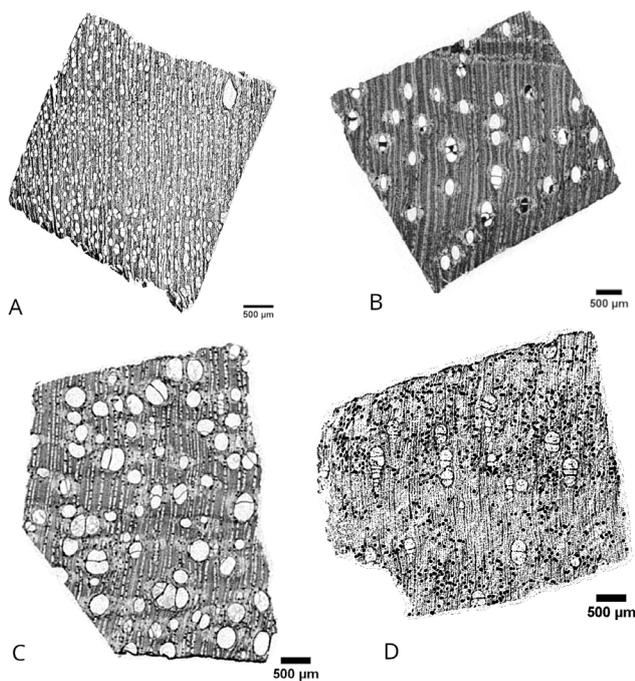
#### **Estructuras secretoras**

Células secretoras de aceites y mucílagos, Canales intercelulares, Tubos/Túbulos

Los canales y tubos se observaron en las imágenes dependiendo del tamaño de estas estructuras en cada espécimen estudiado (Figura 5 D).

#### **Inclusiones minerales**

La presencia de minerales resultó identificable en



**Figura 3:** Anillos de crecimiento, tipo de porosidad, tipo de distribución de los vasos, presencia de depósitos en los vasos observados en A) *Calycophyllum spruceanum*; B) *Hymenaea* sp; C) *Anacardium giganteum*; D) *Hura crepitans*.

**Figure 3:** Growth rings, porosity, vessel distribution, presence of vessel deposits in A) *Calycophyllum spruceanum*; B) *Hymenaea* sp; C) *Anacardium giganteum*; D) *Hura crepitans*.

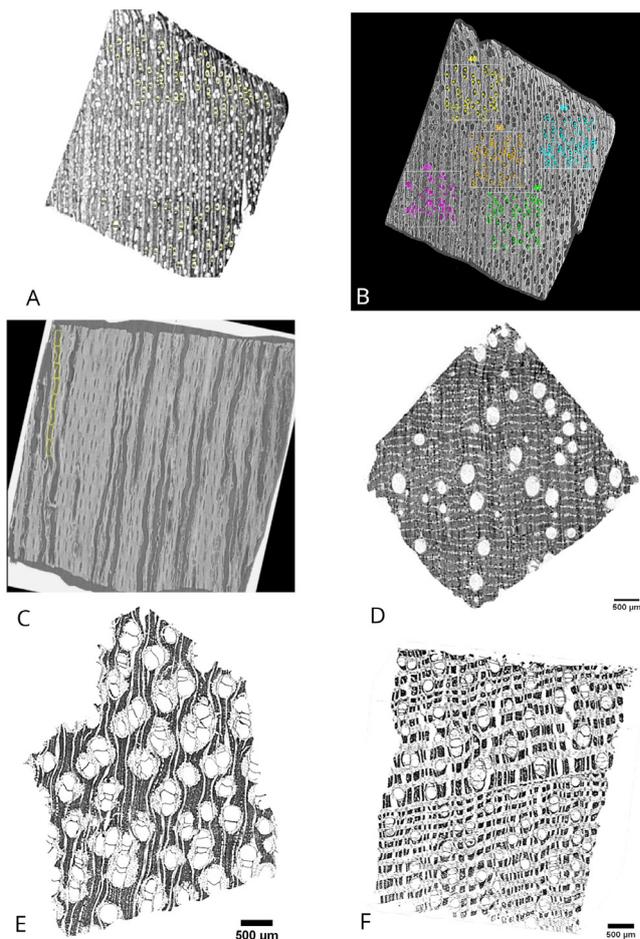
prácticamente todas las imágenes de muestras que los contienen, debido a la gran diferencia composicional y de densidad de los minerales con los tejidos que los rodean (Figura 3 B). También fue posible discriminar su presencia en diferentes tejidos. Sin embargo, la resolución de las imágenes limita las posibilidades de distinguir aspectos morfológicos de las partículas minerales.

### Descripción anatómica con base en imágenes microtomográficas

*Diploptropis martiusii*: Límite de los anillos de crecimiento: indistintos / Porosidad: difusa / Organización de los vasos: patrón radial o diagonal / Agrupamiento de los vasos: solitarios y radiales múltiples de 2 - 4 elementos / Contorno de los vasos: circular a oval / Media del diámetro tangencial de los vasos: [100 -150 µm] media 149,20 µm; DS 51,31 µm; intervalo 45,01 - 310,09 µm; n = 77 / Cantidad de vasos por mm<sup>2</sup>: [5 - 20 vasos por mm<sup>2</sup>] 8 / Media del largo de los elementos de vaso: [≥350 µm] media 98,04 µm; DS 19,76 µm; intervalo 58,00 - 143,00 µm; n = 23 / Tilosis y depósitos en los vasos: no se observa / Parénquima axial: paratraqueal aliforme / Seriación de los radios: 1 - 3 células / Composición celular de los radios: cuerpo formado por células procumbentes con una fila de células marginales cuadradas o verticales / Cantidad de radios por mm: 4 - 12 / Estructuras de

secreción: no se observan / Cristales: no se observan (cfr. Hernández, 2020) (Figura 6 A-C).

*Calycophyllum spruceanum*: Límites de los anillos de crecimiento: indistintos Porosidad: semi-anular / Organización de los vasos: patrón radial / Agrupamiento de los vasos: solitarios, con algunos radiales múltiples de 2 - 3 elementos / Contorno de los vasos: circular a oval / Media del diámetro tangencial de los vasos: [50 -100 µm] media 53,14 µm; DS 9,84 µm; Intervalo 35,01 - 85,02 µm; n = 104 / Cantidad de vasos por mm<sup>2</sup>: [40 - 100 vasos por mm<sup>2</sup>] 49 / Media del largo de los elementos de



**Figura 4:** A) Selección de vasos para el cálculo automático del diámetro tangencial en *Calycophyllum spruceanum* B) Selección de vasos por área para el cálculo de la cantidad de vasos por mm<sup>2</sup> en *Calycophyllum spruceanum* ; C) Selección de vasos para el cálculo del largo de vasos en *Tabebuia* sp.; D) Parénquima en bandas finas observado en *Licania* sp; E) Parénquima paratraqueal aliforme en *Diploptropis martiusii*; F) Parénquima en bandas anchas en *Platonina insignis*.

**Figure 4:** A) Vessel selection for tangential diameter measurement in *Calycophyllum spruceanum* B) Vessel selection by area for vessel number per mm<sup>2</sup> measurement in *Calycophyllum spruceanum*; C) Vessel selection for vessel length measurement in *Tabebuia* sp ; D) Thin banded parenchyma observed in *Licania* sp ; E) Aliform paratracheal parenchyma in *Diploptropis martiusii*; F) Wide banded parenchyma in *Platonina insignis*.

Label	Tang. Diam	Label	Tang. Diam	Label	Tang. Diam
1	60.02	38	55.02	74	65.02
2	65.02	39	65.02	75	45.01
3	55.02	40	50.01	76	45.01
4	65.02	41	50.01	77	55.02
5	45.01	42	75.02	78	60.02
6	50.01	43	50.01	79	50.01
7	50.01	44	55.02	80	45.01
8	55.02	45	45.01	81	50.01
9	45.01	46	65.02	82	35.01
10	50.01	47	60.02	83	55.02
11	55.02	48	70.02	84	55.02
12	55.02	49	70.02	85	50.01
13	45.01	50	65.02	86	45.01
14	55.02	51	55.02	87	50.01
15	55.02	52	55.02	88	45.01
16	45.01	53	60.02	89	50.01
17	60.02	54	55.02	90	50.01
18	60.02	55	60.02	91	45.01
19	55.02	56	60.02	92	40.01
20	55.02	57	40.01	93	50.01
21	45.01	58	50.01	94	50.01
22	45.01	59	50.01	95	55.02
23	65.02	60	35.01	96	60.02
24	65.02	61	35.01	97	60.02
25	55.02	62	70.02	98	40.01
26	50.01	63	60.02	99	40.01
27	60.02	64	40.01	100	35.01
28	60.02	65	35.01	101	50.01
29	55.02	66	65.02	102	80.02
30	40.01	67	50.01	103	80.02
31	50.01	68	50.01	104	70.02
32	60.02	69	40.01	<b>Mean</b>	<b>53.14</b>
33	65.02	70	40.01	<b>SD</b>	<b>9.84</b>
34	50.01	71	35.01	<b>Min</b>	<b>35.01</b>
35	55.02	71	35.01	<b>Max</b>	<b>80.02</b>
36	60.02	72	45.01		
37	40.01	73	60.02		

**Tabla 2:** Cálculo del diámetro tangencial ( $\mu\text{m}$ ) de los vasos en *Calycophyllum spruceanum*.

**Table 2:** *Vessels tangential diameter measurement* ( $\mu\text{m}$ ) on *Calycophyllum spruceanum*.

vaso: [350 - 800  $\mu\text{m}$ ] media 510,15  $\mu\text{m}$ ; DS 123,16  $\mu\text{m}$ ; Intervalo 180,05 - 185,20  $\mu\text{m}$ ; n = 22 / Tilosis y depósitos en los vasos: no se observa / Parénquima axial: ausente o raro / Seriación de los radios: múltiple de 4 - 10 series / Radios de dos tamaños diferentes: presentes / Cantidad de radios por mm: 4 - 12 / Estructuras de secreción : canales radiales / Cristales: no se observan (cfr. Baldin et al., 2016; Gálvez et al., 2020) (Figura 6 D-F).

## Conclusiones

Los resultados sugieren que la microtomografía de rayos X es una técnica que permite llevar adelante análisis antracológicos de fragmentos de carbón y describir una serie de características anatómicas que sirven a la identificación taxonómica. En este trabajo exploramos la visualización de estas características sobre la base de un diseño experimental que tiene en cuenta como variables relevantes la selección del tamaño apropiado de los fragmentos de carbón (cubos de 4 mm de lado) y la minimización del tiempo invertido en la adquisición de imágenes de 50 fragmentos de carbón (40 minutos por muestra) para obtener microtomografías con resoluciones en torno de los 5  $\mu\text{m}$  por pixel.

La capacidad resolutive, el tamaño del objeto y el tiempo de adquisición actúan aquí como variables igualmente relevantes e interdependientes, de tal modo que privilegiar alguna de ellas tiene consecuencias en el comportamiento de las restantes. El conjunto de atributos diagnósticos que se catalogaron como no observables responde en gran medida a los parámetros experimentales definidos para este estudio y no necesariamente a limitaciones intrínsecas del instrumental utilizado o la técnica.

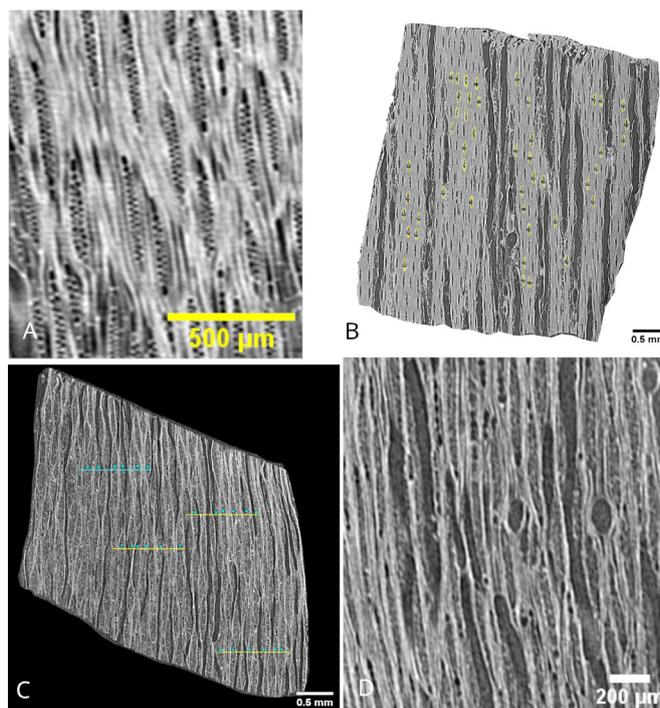
Varios estudios muestran que rasgos con dimensiones inferiores a 5  $\mu\text{m}$  pueden ser examinados en imágenes tomográficas de alta resolución (*i.e.* Brodersen, 2013; Trtik *et al.*, 2007; Van den Bulcke *et al.*, 2009). En este trabajo, por ejemplo, el incremento del grado resolutive de las microtomografías es posible modificando el tamaño del objeto al eliminar el montaje por duplas de muestras en favor del escaneo individual de cada fragmento. Como contrapartida es esperable un incremento considerable del tiempo total dedicado a la adquisición de imágenes.

Estas observaciones sugieren que el estudio de conjuntos muy numerosos de muestras, como aquellos que forman la base privilegiada de los antracología arqueológica, presentan dificultades para la aplicación de la técnica microtomográfica. Las mismas están vinculadas principalmente a la inversión de tiempo y consecuentemente, de recursos en la producción de imágenes de este tipo. El costo de adquisición, uso y mantenimiento de los sistemas microtomográficos es elevado y en general el acceso a este instrumental representa una inversión de recursos considerable que está en la base de la necesidad de previsión de tiempos de uso en el diseño experimental general.

Label	Height
1	415.12
2	405.12
3	410.12
4	570.17
5	180.05
6	440.13
7	320.10
8	535.16
9	475.14
10	475.14
11	650.19
12	570.17
13	670.20
14	600.18
15	685.20
16	460.14
17	515.15
18	650.19
19	470.14
20	555.16
21	525.16
22	645.19
<b>Mean</b>	<b>510.15</b>
<b>SD</b>	<b>123.16</b>
<b>Min</b>	<b>180.05</b>
<b>Max</b>	<b>685.20</b>

**Tabla 3:** Cálculo de largo ( $\mu\text{m}$ ) de los elementos de vaso en *Calycophyllum spruceanum*.

**Table 3:** Vessel length measurement ( $\mu\text{m}$ ) on *Calycophyllum spruceanum*.



**Figura 5:** A) Visualización de los radios 1-3 seriados en *Diplotropis martusii*; B) Selección de los radios para cálculo de la altura de los radios en *Tabebuia sp*; C) Selección de los radios para conteo de la cantidad de radios por mm en *Diplotropis martusii*; D) Visualización de ductos radiales en *Diplotropis martusii*.

**Figure 5:** A) View of serial rays 1-3 in *Diplotropis martusii*; B) Selection of rays for calculation of ray height in *Tabebuia sp*; C) Selection of rays for counting the number of rays per mm in *Diplotropis martusii*; D) View of radial ducts in *Diplotropis martusii*.

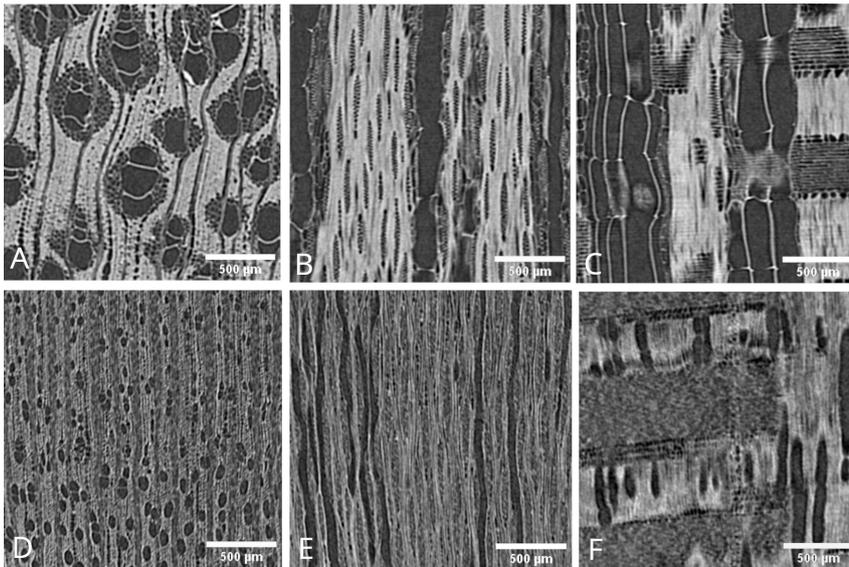
que las superficies lisas.

Estas últimas pueden ser obtenidas de forma relativamente simple a partir de microtomografías por medios virtuales, ya que estas imágenes configuran un modelo tridimensional que pueden seccionarse sobre infinitos planos, más allá de las tres secciones ortogonales utilizadas en el estudio de la anatomía microscópica de la madera y el carbón. Por lo mismo, es posible obtener secuencias de centenas o miles de láminas que recorren toda la muestra, aportando mayores cantidades de datos sobre un mismo atributo o un conjunto de ellos.

En algunos casos la multiplicidad de planos de corte y la tridimensionalidad presente en las microtomografías provee informaciones morfológicas y distribucionales/espaciales que resultan de difícil acceso usando técnicas de microscopía. Un caso por mencionar es la medición del largo de los elementos de vaso en planos longitudinales. Este atributo se menciona como uno de los que se describen con menor frecuencia en el banco de datos InsideWood (Wheeler, 2011) y en la

No obstante, es posible enumerar algunos aspectos en los que el análisis de carbón de madera usando microtomografías presenta ventajas metodológicas al tratar con conjuntos más acotados de carbones o casos específicos. Una de ellas se relaciona directamente con el carácter friable del material carbonizado y las dificultades que presenta para realizar cortes y/o láminas con las herramientas generalmente implementadas en el estudio de la madera.

Así, el examen vía microscopía óptica recurre al quiebre natural de los carbones con el fin de exponer las estructuras anatómicas diagnósticas en los tres planos de estudio. Esta práctica asume la pérdida de parte del material en procura de la orientación adecuada del plano, al tiempo que produce superficies irregulares que resultan menos eficientes en la exposición de los rasgos



**Figura 6:** Láminas en los tres planos anatómicos en A-C) *Diplotropis martiusii* y D-F) *Calycophyllum spruceanum*.

**Figure 6:** Slices showing the three anatomical planes in A-C) *Diplotropis martiusii* and D-F) *Calycophyllum spruceanum*.

literatura en general (Wheeler *et al.*, 2020: 437) debido a que presenta algunos problemas relacionados con los procedimientos de preparación de muestras fósiles y carbonizadas para su observación en microscopios. Durante el desarrollo de este estudio se observó que al exponer correctamente el plano longitudinal tangencial y recorrer la secuencia de láminas es posible visualizar los límites de los elementos de vaso y como tal medir su longitud.

También, el estudio de carbones a partir de modelos 3D de alta resolución por medio de procedimientos digitales permite automatizar las mediciones, conteos, cálculos o incluso el reconocimiento de morfologías dentro de una tendencia que incorpora paulatinamente algoritmos de machine learning y deep learning (Barron, 2024). De esta manera el proceso general se agiliza y permite contemplar el conteo y la medición de rasgos muy numerosos, al tiempo que contribuye a reducir la incidencia de errores y sesgos estadísticos o de observación.

Esta marcada ductilidad de las microtomografías para la extracción de datos morfológicos cuantitativos aparece expresada en las descripciones de los dos carbones examinados al final de este estudio. Sin embargo, este tipo de información suele recibir una atención limitada en el proceso de identificación taxonómica de material antracológico, debido a que la carbonización altera de forma sensible y variable los atributos dimensionales taxonómicamente diagnósticos de la madera. Los rasgos de carácter cualitativo y de presencia/ausencia se presentan más adecuados para la determinación de carbones, como así también la descripción de morfologías del orden de unas pocas micras hasta escalas sub-micrométricas suelen ser indispensables en esta tarea (Dierickx *et al.*, 2024; Grabner *et al.*, 2009).

Teniendo en cuenta los desafíos impuestos por

el compromiso entre escala resolutive, tamaño de muestra y tiempo de adquisición de imágenes microtomográficas, a la par de las ventajas en cuanto al tratamiento de materiales friables, la expansión de los planos de exposición de morfologías y la ductilidad en la obtención de datos distribucionales y cuantitativos, es posible vislumbrar algunos puntos sobresalientes de la aplicación de la técnica microtomográfica en antracología.

Es poco probable en el estado actual del desarrollo de la técnica (y diseminación de los sistemas microtomográficos) que esta pueda ser utilizada en abordajes que suponen la identificación de grandes conjuntos de carbón con resultados semejantes a los que se obtienen a través la microscopía óptica. Sin embargo, sí es factible en la actualidad que su uso complementario en casos específicos contribuya de manera satisfactoria en el trabajo de identificación.

En contrapartida, la microtomografía de rayos X puede formar parte de una metodología ventajosa en el caso de estudios de carbón de madera dirigidos a objetivos diferentes de la identificación y el tratamiento estadístico de la composición taxonómica de los conjuntos. Un ejemplo de esto son los abordajes basados en la anatomía ecológica, que compara información cualitativa y cuantitativa de una serie específica de caracteres anatómicos de determinadas especies para interpretar diferencias ambientales geográficas y cronológicas (Marconetto, 2010).

Finalmente, cabe mencionar los resultados positivos del análisis microtomográfico del carbón con relación a su preservación. Tanto los procesos de preparación de las muestras, así como los procedimientos de adquisición de las imágenes microtomográficas son prácticamente inocuos para la integridad de los ejemplares. De igual forma, el análisis antracológico posterior se ejecuta en su totalidad sobre modelos virtuales, de modo

que los fragmentos de carbón, especialmente los arqueológicos, pero también los respaldos físicos de las referencias pueden preservarse y conservarse para estudios futuros.

Una característica asociada a esta capacidad de preservar los materiales es la posibilidad de generar colecciones de referencia virtuales dinámicas y accesibles en base a los modelos obtenidos para cada estudio. Esta propiedad asocia en un mismo proceso el análisis y la documentación, intereses que han guiado a uno y otro lado la incorporación de la microtomografía de rayos X en la arqueología y han promovido la ampliación del acceso al instrumental específico en centros de investigación y museos en diferentes lugares del mundo.

### Agradecimientos

Los datos presentados en este trabajo se obtuvieron en el marco de un proyecto del Programa Jovem Pesquisador financiado por la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo 2021/03441-4) (CMC). Agradecemos al Museo de Arqueología e Etnología de la Universidade de São Paulo por dar acceso al material y el instrumental de laboratorio como sede del proyecto JP, así como al Laboratório de Microtomografia Computadorizada y Procesamiento de Imagens 3D del Museu de Zoologia de la USP, por su colaboración con el proyecto, apoyo técnico y acceso al microtomógrafo. Gracias también a los revisores por los acertados comentarios que contribuyeron a mejorar las conclusiones y el alcance de este artículo.

### Bibliografía

- Andonova, M. (2021). Ancient basketry on the inside: X-ray computed microtomography for the non-destructive assessment of small archaeological monocotyledonous fragments: examples from Southeast Europe. *Heritage Science*, 9(1), 158. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00631-z>
- Azeredo, S. R., Cesareo, R., Jordan, R. F., Fernandez, A., Gigante, G. E., Bustamante, A., y Lopes, R. T. (2019). Analysis of precious metals from the tomb of the "Lady of Cao" by X-ray microtomography and digital radiography. *X-Ray Spectrometry*, 48(5), 499–504. <https://doi.org/10.1002/xrs.3013>
- Baldin, T., Sieglöcher, A. M., y Marchiori, J. N. C. (2016). COMPARED ANATOMY OF SPECIES OF *Calycophyllum* DC. (Rubiaceae). *Revista Árvore*, 40, 759–768. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400020>

- Barron, A., y Denham, T. (2018). A microCT protocol for the visualisation and identification of domesticated plant remains within pottery sherds. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 21, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.07.024>
- Barron, A., Pritchard, J., y Denham, T. (2022). Identifying archaeological parenchyma in three dimensions: Diagnostic assessment of five important food plant species in the Indo-Pacific region. *Archaeology in Oceania*, 57(3), 189–213. <https://doi.org/10.1002/arco.5276>
- Barron, A. (2024). Applications of Microct Imaging to Archaeobotanical Research. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 31(2), 557–592. <https://doi.org/10.1007/s10816-023-09610-z>
- Baruchel, J., Cloetens, P., Härtwig, J., Ludwig, W., Mancini, L., Pernot, P., y Schlenker, M. (2000). Phase imaging using highly coherent X-rays: Radiography, tomography, diffraction topography. *Journal of Synchrotron Radiation*, 7(3), 196–201. <https://doi.org/10.1107/S0909049500002995>
- Beck, L., Cuif, J.-P., Pichon, L., Vaubailon, S., Dambricourt Malassé, A., y Abel, R. L. (2012). Checking collagen preservation in archaeological bone by non-destructive studies (Micro-CT and IBA). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 273, 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.07.076>
- Bello, S. M., De Groote, I., y Delbarre, G. (2013). Application of 3-dimensional microscopy and micro-CT scanning to the analysis of Magdalenian portable art on bone and antler. *Journal of Archaeological Science*, 40(5), 2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.016>
- Bernardini, F., Leghissa, E., Prokop, D., Velušček, A., De Min, A., Dreossi, D., Donato, S., Tuniz, C., Princivalle, F., y Montagnari Kokelj, M. (2019). X-ray computed microtomography of Late Copper Age decorated bowls with cross-shaped foots from central Slovenia and the Trieste Karst (North-Eastern Italy): Technology and paste characterisation. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(9), 4711–4728. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-4728>

00811-w

- Bird, M. I., Ascough, P. L., Young, I. M., Wood, C. V., y Scott, A. C. (2008). X-ray microtomographic imaging of charcoal. *Journal of Archaeological Science*, 35(10), 2698–2706. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.04.018>
- Bodin, S. C., Scheel-Ybert, R., Beauchêne, J., Molino, J.-F., y Bremond, L. (2019). CharKey: An electronic identification key for wood charcoals of French Guiana. *IAWA Journal*, 40(1), 75–S20. <https://doi.org/10.1163/22941932-40190227>
- Boschin, F., Zanolli, C., Bernardini, F., Princivale, F., y Tuniz, C. (2015). A Look from the Inside: MicroCT Analysis of Burned Bones. *Ethnobiology Letters*, 6(2), 258–266. <https://doi.org/10.14237/ebl.6.2.2015.365>
- Brodersen, C. R. (2013). Visualizing wood anatomy in three dimensions with high-resolution X-ray micro-tomography ( $\mu$ CT) – a review –. *IAWA Journal*, 34(4), 408–424. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000033>
- Calo, C. M., Rizzutto, M. A., Carmello-Guerreiro, S. M., Dias, C. S. B., Watling, J., Shock, M. P., Zimpel, C. A., Furquim, L. P., Pugliese, F., y Neves, E. G. (2020). A correlation analysis of Light Microscopy and X-ray MicroCT imaging methods applied to archaeological plant remains' morphological attributes visualization. *Scientific Reports*, 10(1), 15105. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71726-z>
- Calo, C. M., Rizzutto, M. A., Watling, J., Furquim, L., Shock, M. P., Andreello, A. C., Appoloni, C. R., Freitas, F. O., Kistler, L., Zimpel, C. A., Hermenegildo, T., Neves, E. G., y Pugliese, F. A. (2019). Study of plant remains from a fluvial shellmound (Monte Castelo, RO, Brazil) using the X-ray MicroCT imaging technique. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, 101902. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101902>
- Chabal, L. (1988). Pourquoi et comment prélever les charbons de bois pour la période antique: Les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault). *Lattara*, 1, 187–222.
- Coubray, S., Zech-Matterne, V., y Mazurier, A. (2010). The earliest remains of a Citrus fruit from a western Mediterranean archaeological context? A microtomographic-based re-assessment. *Comptes Rendus Palevol*, 9(6–7), 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2010.07.003>
- Detienne, P., y Jacquet, P. (1983). *Atlas d'identification des bois de l'Amazonie et des régions voisines*. Centre Technique Forestier Tropical.
- Dierickx, S., Genbrugge, S., Beeckman, H., Hubau, W., Kibleur, P., y Van den Bulcke, J. (2024). Non-destructive wood identification using X-ray  $\mu$ CT scanning: Which resolution do we need? *Plant Methods*, 20(1), 98. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01216-0>
- Dreossi, D., Favretto, S., Fioravanti, M., Mancini, L., Rigon, L., Sodini, N., Tromba, G., y Zanini, F. (2010). Synchrotron radiation Microtomography: A non-invasive tool for the characterization of archaeological wood. In L. Uzielli (Ed.), *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*. Firenze University Press.
- Gálvez, G. I. E. C., Rocha, M. P. da, Klitzke, R. J., y Mora, H. E. G. (2020). Caracterización anatómica y variabilidad de los componentes de la madera de *Calycophyllum spruceanum* (Benth). Hook. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 11(2), Article 2. <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/17300>
- George, M. J., Paris, E. H., Liu, W., López Bravo, R., y Lalo Jacinto, G. (2024). Applications of Micro-CT Imaging in Age-At-Death Estimates of Maya Dogs. *Environmental Archaeology*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/14614103.2024.2380117>
- Göldner, D., Karakostis, F. A., y Falcucci, A. (2022). Practical and technical aspects for the 3D scanning of lithic artefacts using micro-computed tomography techniques and laser light scanners for subsequent geometric morphometric analysis. Introducing the StyroStone protocol. *PLOS ONE*, 17(4), e0267163. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267163>
- Gonçalves, T. a. P., y Scheel-Ybert, R. (2016). Charcoal anatomy of Brazilian species. I. Anacardiaceae. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 1711–1725. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150433>
- Gonçalves, T. A. P., y Scheel-Ybert, R. (2017). Primeiro atlas antracológico de espécies brasileiras. *Série Livros Digital*, 10. <http://pantheon.ufrj>

[br/handle/11422/15320](http://doi.org/10.31048/py9r4w88/br/handle/11422/15320)

- Grabner, M., Salaberger, D., y Okochi, T. (2009). The need of high resolution  $\mu$ -X-ray CT in dendrochronology and in wood identification. *2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, 349–352. <https://doi.org/10.1109/ISPA.2009.5297695>
- Haneca, K., Deforce, K., Boone, M. N., Van Loo, D., Dierick, M., Van Acker, J., y Van Den Bulcke, J. (2012). X-Ray Sub-Micron Tomography as a Tool for the Study of Archaeological Wood Preserved Through the Corrosion of Metal Objects. *Archaeometry*, 54(5), 893–905. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00640.x>
- Hernández, W. J. L. (2020). Anatomía de Maderas de 130 Especies de Venezuela. *Revista Pittieria*, 0, Article 0.
- Hubau, W., Bulcke, J. V. den, Kitin, P., Brabant, L., Acker, J. V., y Beeckman, H. (2013). Complementary Imaging Techniques for Charcoal Examination and Identification. *IAWA Journal*, 34(2), 147–168. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000013>
- Kahl, W.-A., y Ramminger, B. (2012). Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: A pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg. *Journal of Archaeological Science*, 39(7), 2206–2219. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.029>
- Karjalainen, V.-P., Finnilä, M. A. J., Salmon, P. L., y Lipkin, S. (2023). Micro-computed tomography imaging and segmentation of the archaeological textiles from Valmarinniemi. *Journal of Archaeological Science*, 160, 105871. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2023.105871>
- Marconetto, M. B. (2010). Paleoenvironment and anthracology: Determination of variations in humidity based on anatomical characters in archeological plant charcoal (Ambato Valley, Catamarca, Argentina). *Journal of Archaeological Science*, 37(6), 1186–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.016>
- Machado, A. S., Silva, A. S. S., Campos, G. N., Gomes, C. S., Oliveira, D. F., y Lopes, R. T. (2019). Analysis of metallic archaeological artifacts by x-ray computed microtomography technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 151, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.06.016>
- Mizuno, S., Torizu, R., y Sugiyama, J. (2010). Wood identification of a wooden mask using synchrotron X-ray microtomography. *Journal of Archaeological Science*, 37(11), 2842–2845. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.022>
- Murphy, C., y Fuller, D. Q. (2017). Seed coat thinning during horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) domestication documented through synchrotron tomography of archaeological seeds. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05244-w>
- Nava, A., Coppa, A., Coppola, D., Mancini, L., Dreossi, D., Zanini, F., Bernardini, F., Tuniz, C., y Bondioli, L. (2017). Virtual histological assessment of the prenatal life history and age at death of the Upper Paleolithic fetus from Ostuni (Italy). *Scientific Reports*, 7(1), 9427. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09773-2>
- Ngan-Tillard, D., Dijkstra, J., Verwaal, W., Mulder, A., Huisman, H. (D J.), y Müller, A. (2015). Under Pressure: A Laboratory Investigation into the Effects of Mechanical Loading on Charred Organic Matter in Archaeological Sites. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 17(2), 122–142. <https://doi.org/10.1080/13505033.2015.1124179>
- Obata, H., Miyaura, M., y Nakano, K. (2020). Jomon pottery and maize weevils, *Sitophilus zeamais*, in Japan. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34(Part A), 102599. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102599>
- Pritchard, J., Lewis, T., Beeching, L., y Denham, T. (2019). An assessment of microCT technology for the investigation of charred archaeological parenchyma from house sites at Kuk Swamp, Papua New Guinea. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(5), 1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0648-0>
- Puhar, E. G., Korat, L., Erič, M., Jaklič, A., y Solina, F. (2022). Microtomographic Analysis of a Palaeolithic Wooden Point from the Ljubljana River. *Sensors*, 22(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/s22062369>
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., DeZonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., y Eliceiri,

- K. W. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18(1), 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>
- Scheel-Ybert, R. (2004). Teoría e método em Antracología. 2- Técnicas de campo e laboratório. *Arquivos Do Museu Nacional*, 62(4), 343–356.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D. J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., y Cardona, A. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., y Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Souza-Pinto, N. R. D., y Scheel-Ybert, R. (2021). Charcoal anatomy of Brazilian species. II. 15 native species occurring in Atlantic or Amazon rainforest. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 93(4), e20190983. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190983>
- Stelzner, I., Stelzner, J., Gwerder, D., Martinez-Garcia, J., y Schuetz, P. (2023). Imaging and Assessment of the Microstructure of Conserved Archaeological Pine. *Forests*, 14(2), 211. <https://doi.org/10.3390/f14020211>
- Stelzner, J., y Million, S. (2015). X-ray Computed Tomography for the anatomical and dendrochronological analysis of archaeological wood. *Journal of Archaeological Science*, 55, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.12.015>
- Stock, S. R. (2008). *Microcomputed tomography: Methodology and applications* (1st ed.). CRC Press.
- Trtik, P., Dual, J., Keunecke, D., Mannes, D., Niemz, P., Stähli, P., Kaestner, A., Groso, A., y Stampanoni, M. (2007). 3D imaging of microstructure of spruce wood. *Journal of Structural Biology*, 159(1), 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2007.02.003>
- Van den Bulcke, J., Boone, M., Van Acker, J., Stevens, M., y Van Hooebeke, L. (2009). X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. *Annals of Forest Science*, 66(5), 508–508. <https://doi.org/10.1051/forest/2009033>
- Villagran, X. S., Strauss, A., Alves, M., y Oliveira, R. E. (2019). Virtual micromorphology: The application of micro-CT scanning for the identification of termite mounds in archaeological sediments. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24, 785–795. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.02.035>
- Ward, I., Key, M. M., O’Leary, M. J., Carson, A., Shaw, J., y Maksimenko, A. (2019). Synchrotron X-ray tomographic imaging of embedded fossil invertebrates in Aboriginal stone artefacts from Western Australia: Implications for sourcing, distribution and chronostratigraphy. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.05.005>
- Wheeler, E. A. (2011). InsideWood—A web resource for hardwood anatomy. *IAWA Journal*, 32(2), Article 2. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000051>
- Wheeler, E. A., Baas, P., y Gasson, P. (Eds.). (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin n. s.*, 10(3), 219–332.
- Wheeler, E. A., Gasson, P. E., y Baas, P. (2020). Using the InsideWood web site: Potentials and pitfalls. *IAWA Journal*, 41(4), 412–462. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10032>
- Whitau, R., Dilkes-Hall, I. E., Dotte-Sarout, E., Langley, M. C., Balme, J., y O’Connor, S. (2016). X-ray computed microtomography and the identification of wood taxa selected for archaeological artefact manufacture: Rare examples from Australian contexts. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 6, 536–546. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.03.021>
- Zhao, G., Qiu, Z., Shen, J., Deng, Z., Gong, J., y Liu, D. (2018). Internal Structural Imaging of Cultural Wooden Relics Based on Three-Dimensional Computed Tomography. *BioResources*, 13(1), 1548–1562. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1548-1562>
- Zong, Y., Yao, S., Crawford, G. W., Fang, H., Lang, J., Fan, J., Sun, Z., Liu, Y., Zhang, J., Duan, X., Zhou, G., Xiao, T., Luan, F., Wang, Q., Chen, X., y Jiang, H. (2017). Selection for

Oil Content During Soybean Domestication  
Revealed by X-Ray Tomography of Ancient

Beans. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/srep43595>