



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA
MADERA

Doctorado en Ciencias y Tecnología de la
Madera

Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplado
análisis de imágenes 3D con simulaciones numéricas

Tesis que para obtener el Grado de Doctor en Ciencias y
Tecnología de la Madera presenta

Juan Gabriel Rivera Ramos

Director de Tesis:

Codirector de Tesis:

Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra

Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete

Morelia, Michoacán noviembre de 2025

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN.....	11
I. MARCO TEÓRICO	14
I.1 El flujo en la madera	14
I.2 Influencia de la estructura de la madera	14
I.3 Madera de coníferas	16
I.4 Madera de latifoliadas	16
I.5 Madera temprana y tardía.....	17
I.6 Influencia de las propiedades del fluido	17
I.7 Influencia del sistema	18
I.8 Flujo laminar	18
I.9 Flujo no lineal	19
I.10 Flujo turbulento.....	19
I.11 Desplazamiento molecular o difusión de Knudsen	20
I.12 Numero de Reynolds.....	20
I.13 Modelos de flujo en la madera	21
I.14 Procesos CFD	21
I.15 Análisis de imágenes 3D de TC	22
I.16 Filtros	23
I.17 Segmentación	23
I.18 Transformación geométrica	23
I.19 Transformación morfológica.....	24
I.20 Descriptores de región y frontera.....	24
II. JUSTIFICACIÓN.....	25
III. OBJETIVOS.....	26
IV. HIPÓTESIS	27
Capítulo 1: CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA DE <i>Fraxinus uhdei</i> POR ACOPLAMIENTO DE	

MICROTOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA y SEM	28
1.1 Resumen	28
1.2 Introduction	28
1.3 Materiales y Métodos	29
1.4 Resultados	30
1.5 Conclusiones	36
1.6 Referencias	36
Capítulo 2: PARÁMETROS ANATÓMICOS QUE CONTROLAN EL FLUJO SIMULADO EN UNA LATIFOLIADA.....	38
2.1 Nivel poroso	38
2.2 Procesamiento de imágenes.....	39
2.3 Permeabilidad con voxel de 5 μm	41
2.4 Permeabilidad con voxel de 1 μm	43
2.5 Flujo longitudinal	46
2.6 Flujo en dirección tangencial	48
2.7 Flujo en dirección radial.....	49
2.8 Conclusión.....	53
2.9 Referencias	53
Capítulo 3: PARÁMETROS ANATÓMICOS QUE CONTROLAN EL FLUJO SIMULADO EN UNA CONÍFERA	55
3.1 Preparación del material.....	55
3.2 Procesamiento de imágenes 3D.....	56
3.3 Simulación numérica de permeabilidad	59
3.4 Análisis de las ramificaciones del lumen	59
3.5 Análisis de la microestructura de la madera.....	62
3.6 Análisis de gradientes de presión	65
3.7 Relación de variables.....	75
3.8 Conclusión.....	90
3.9 Referencias	91
Capítulo 4: PERMEABILIDAD EXPERIMENTAL.....	92
4.1 Permeabilidad en <i>Fraxinus uhdei</i>	92
4.2 Permeabilidad en <i>Abies religiosa</i>	94

4.3	Comparaciones de permeabilidad experimental y permeabilidad de simulación numérica.....	96
4.3.1	Valores de permeabilidad gaseosa y simulada en <i>Fraxinus uhdei</i>	105
4.3.2	Valores de permeabilidad gaseosa y simulada en <i>Abies religiosa</i>	107
4.3.3	Iteraciones	109
4.3.4	Extensiones en traqueidas de <i>Abies religiosa</i>	109
Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		113
REFERENCIAS		115
6 APÉNDICES		119
6.1	Lista de publicaciones	119

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización anatómica en madera de <i>Fraxinus uhdei</i>	36
Cuadro 2. Características de porosidad de madera de <i>Dalbergia ruddae</i>	43
Cuadro 3. Características de porosidad y permeabilidad en madera de <i>Dalbergia ruddae</i>	44
Cuadro 4. Simulaciones numéricas de permeabilidad en distintos tamaños de probeta	76
Cuadro 5. Simulaciones numéricas de permeabilidad en un mismo tamaño de probetas	76
Cuadro 6. Regresiones lineales simples en volúmenes distintos	79
Cuadro 7. Regresiones múltiples, modelo 1	81
Cuadro 8. Regresiones múltiples, modelo 2	82
Cuadro 9. Regresiones múltiples, modelo 3	82
Cuadro 10. Regresiones múltiples, modelo 4	82
Cuadro 11. Regresiones múltiples, modelo 5	83
Cuadro 12. Regresiones múltiples, modelo 6	83
Cuadro 13. Regresiones múltiples, modelo 7	83
Cuadro 14. Regresiones múltiples, modelo 8	84
Cuadro 15. Regresiones múltiples, modelos con tortuosidad anisotrópica	85
Cuadro 16. Regresiones simples, con volumen igual	87
Cuadro 17. Regresiones múltiples, con volumen igual	89
Cuadro 18. Permeabilidades estimadas de <i>Fraxinus uhdei</i> en dirección longitudinal	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1:

- Figura 1. Caracterización anatómica con μ CT, separación de elementos celulares y conectividad de tejido de madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c, d, e, f). Vasos (V), Fibras (F), Rayos (R), Cristales (C), Parénquima Vasicentrico (VP), Puntuación (P), Almidones (S). 32
- Figura 2. C Cristales y almidones en imágenes SEM de madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c). Rayo (R), Cristales (C), Puntuación (P), Almidón (S). 33
- Figura 3. Distribución de parámetros anatómicos caracterizados con μ TC en madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c, d, e, f, g, h). 35

Capítulo 2:

- Figura 1. Tratamiento de imágenes: a) Slice Imagen inicial, b) 3D de imagen inicial, c) Slice transversal de imagen filtrada, d) Slice radial filtrado, e) Slice tangencial filtrado, f) 3D filtrado, g) Orthoslice de la imagen, h) Humbralización de imagen, i) Fase sólida, j) Fase porosa, k) Cavidad del vaso y tejido, l) Cavidades del tejido sin vaso, m) Cavidad del vaso. 41
- Figura 2. Cortes virtuales de probetas con 5 mm de diámetro: a) Líneas de flujo en vasos, b) Microestructura de baja definición, c) Corte 2d de 5 mm de diámetro. 42
- Figura 3. R Microestructura de probetas con 1 mm de diámetro: a) Microestructura de madera de *Dalbergia ruddae*, b) Líneas de flujo en el vaso, c) Líneas de flujo en fibras, parénquima y vaso. 45
- Figura 4. Pore surface distribution b) cell wall thicknesses distribution. 46
- Figura 5. Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido longitudinal en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura, b) flujo en vaso con gomas, c) líneas de flujo en vaso con gomas, d) primer plano de estructura en vaso, e) líneas de flujo vaso-tejido, f) flujo en tejido leñoso, g) puntos críticos del flujo en puntuaciones de fibra, h) flujo en parénquima radial, i) líneas de flujo en el tejido leñoso. 47
- Figura 6. R Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido tangencial en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura cara radial, b) flujo en tejido leñoso, c) líneas de flujo a través de fibras, parénquima y extractivos, d) trayectoria parénquima radial-parénquima axial, e) líneas de flujo vaso- tejido, f) puntos críticos de flujo en vaso, g) flujo en vaso con gomas. 49
- Figura 7. Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido radial en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura cara tangencial, b) flujo en tejido leñoso sin vaso, c) flujo en tejido leñoso con vaso, d) desviación de flujo radial en dirección longitudinal, e) flujo en vaso con gomas. 50
- Figura 8. Simulación numérica de flujo en imágenes 3D de TC de madera de *Dalbergia ruddae*: a) Flujo longitudinal en el tejido completo, b) Flujo longitudinal en tejido sin vaso, c) flujo longitudinal en vaso, d) flujo tangencial en el tejido completo, e) flujo tangencial en tejido sin vaso, f) flujo radial en el tejido completo, g) flujo radial en tejido sin vaso. 52

Capítulo 3:

Figura 1. Preparación de material: a) Árbol de <i>Pinus devoniana</i> utilizado, b) Extracción de muestras, c) Probetas utilizadas para el estudio.	56
Figura 2. Tratamiento de imágenes TC: a) Imagen inicial de pinus devoniana, b) 3D de imagen inicial filtrada c) Imagen binaria, d) Corte tangencial, e) Corte radial, f) Corte transversal, g) ROI imagen con vóxel de 4 μm , h) Distribución de color.	58
Figura 3. Reconstrucción de continuidad de las cavidades celulares, espacios y extensiones celulares en microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> imágenes TC: a) Continuidad entre lumen, puntuación, espacios de extensiones y cámaras de extensiones, b) Tipos de extensiones, c) Continuidad en campos de cruzamiento, d) Cámaras entre espacios de extensiones, e) Comprobación de las ramificaciones en microestructura transversal, f) Comprobación de las ramificaciones en microestructura de zona de traslape de traqueidas; Cavity de parénquima (CP), extensión (E), cavidad de traqueida (CT), puntuación (P).	62
Figura 4. Microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> imágenes TC: a) Cavidades celulares en la microestructura, b) Capas de la pared celular de <i>Pinus devoniana</i> identificadas con TC, c) Conectividad de extensiones y rugosidad de pared, d) Extensión en esquina de traqueidas; Lamela media (LM), extensión (E), capa de la madera (S2) y (S3), cavidad de parénquima (CP), cavidad de traqueida (CT), puntuación (P).	65
Figura 5. Gráficos de presión en microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> imágenes TC: a) Gradiente de presión en dirección de flujo longitudinal, b) Gradiente de presión en dirección de flujo radial, c) Gradiente de presión en dirección de flujo tangencial; Célula (C), extensión (E), cavidad de traqueida (CT).	69
Figura 6. Microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> en imágenes TC con vóxel de 4 μm . Xilema tardío (XTa), Xilema temprano (XTe).	72
Figura 7. Flujo radial en microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> imágenes TC.....	73
Figura 8. Flujo tangencial en microestructura de madera de <i>Pinus devoniana</i> imágenes TC: a) Líneas de flujo en continuación rayo-extensión, b) Flujo periódico en los rayos y extensiones de traqueidas; Canal resinífero (CR), extensión (E).	75
Figura 9. Gráficos P-P de normalidad: a) Modelo uno, b) Modelo dos, c) Modelo tres, d) Modelo cuatro.	86
Figura 10. Gráficos de dispersión de residuos: a) Modelo uno, b) Modelo dos, c) Modelo tres, d) Modelo cuatro.....	87

Capítulo 4:

Figura 1. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en dirección longitudinal.....	93
Figura 2. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en dirección radial y tangencial.	94
Figura 3. Permeabilidad gaseosa de <i>Abies religiosa</i> en dirección longitudinal.....	95
Figura 4. Permeabilidad gaseosa de <i>Abies religiosa</i> en dirección radial y tangencial.....	96
Figura 5. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en dirección longitudinal.....	97

Figura 6. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> con cambios en el factor modificado de convergencia.....	98
Figura 7. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en la zona interna de la rodaja.....	99
Figura 8. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en segmentos críticos.	101
Figura 9. Permeabilidad gaseosa en fibras y parenquimade <i>Fraxinus uhdei</i>	102
Figura 10. Permeabilidad gaseosa de <i>Fraxinus uhdei</i> en el segmento crítico.	103
Figura 11. Permeabilidad longitudinal gaseosa y simulada numéricamente de <i>Fraxinus uhdei</i>	106
Figura 12. Permeabilidad radial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Fraxinus uhdei</i>	107
Figura 13. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Fraxinus uhdei</i>	107
Figura 14. Permeabilidad longitudinal gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	108
Figura 15. Permeabilidad radial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	108
Figura 16. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	109
Figura 17. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	110
Figura 18. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	111
Figura 19. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de <i>Abies religiosa</i>	112

RESUMEN

A través de imágenes tridimensionales fieles de la madera se analiza la relación de la microestructura con la resistencia al flujo masivo en el dominio poroso. Se incluyen las características de los lúmenes, superficie específica del volumen, fracciones de volumen (porosidad), conectividad porosa, tortuosidad geométrica y espesor de pared. Con las simulaciones de flujo continuo se obtienen las velocidades y las caídas de presión locales, dado que la resistencia al flujo de la fase porosa en un material puede ser expresada con las caídas de presión del flujo en este. El objetivo es determinar las caídas de presión características de los elementos celulares correspondientes a distintos valores de permeabilidad absoluta. Con la identificación de los elementos que controlan la permeabilidad validada experimentalmente, se localizan los pasos de garganta potenciales para el crecimiento de núcleos de interfaces en la corriente de flujo que dan origen al estrangulamiento. Para un proceso de infiltración por presión es primordial conocer el comportamiento en los puntos críticos periódicos en la sección de los conductos en la fase porosa ya que podrían llegar a propiciar caídas de presión cercanas a la presión de vapor del fluido.

Este fenómeno en la madera es poco claro, por los retos experimentales para su estudio bajo procesos de presión y por ser un medio poroso complejo heterogéneo de menor escala al fenómeno en tuberías. Por lo anterior, el escalado y el enfoque empleado en la simulación precisan comparar los parámetros macroscópicos como la permeabilidad con valores experimentales. Se esperaría que las trayectorias de flujo en un régimen establecido en la simulación sean más realistas si la permeabilidad estimada es aproximadamente igual a la experimental. En la presente investigación se utiliza el régimen de Darcy, ya que se han demostrado buenas aproximaciones del campo de flujo con el flujo de Stokes.

Palabras clave: Material poroso complejo, Estrangulamiento de flujo, Permeabilidad en madera, Caída de presión, Anatomía de la madera.

ABSTRACT

Through accurate three-dimensional images of wood, the relationship between microstructure and resistance to mass flow in the porous domain is analyzed. This includes the characteristics of the lumens, specific surface area of the volume, volume fractions (porosity), porous connectivity, geometric tortuosity, and wall thickness. Continuous flow simulations are used to obtain local velocities and pressure drops, given that the flow resistance of the porous phase in a material can be expressed by the pressure drops of the flow in it. The objective is to determine the characteristic pressure drops of the cellular elements corresponding to different values of absolute permeability. By identifying the elements that control experimentally validated permeability, potential bottlenecks for the growth of interface nuclei in the flow stream that give rise to throttling are located. For a pressure infiltration process, it is essential to know the behavior at the periodic critical points in the section of the conduits in the porous phase, as they could lead to pressure drops close to the vapor pressure of the fluid.

This phenomenon in wood is unclear due to the experimental challenges involved in studying it under pressure processes and because it is a complex heterogeneous porous medium on a smaller scale than the phenomenon in pipes. Therefore, the scaling and approach used in the simulation require comparing macroscopic parameters such as permeability with experimental values. It would be expected that the flow trajectories in a regime established in the simulation would be more realistic if the estimated permeability is approximately equal to the experimental value. In this research, the Darcy regime is used, as good approximations of the flow field with Stokes flow have been demonstrated.

INTRODUCCIÓN

El transporte de fluidos en la madera se presenta durante los procesos de infiltración o desecación, operaciones altamente requeridas en la tratabilidad de este material (McKinley et al. 2018; Yörür, & Kayahan, 2018; Montero et al. 2020; Miller et al. 2020). Los principales factores que influyen en el flujo del fluido son las condiciones del sistema, las propiedades del fluido y de la estructura de la madera (Erickson 1970; Hansmann et al. 2002; Tondi et al. 2013; Leggate et al. 2020). Los dos primeros factores son variables que pueden mantenerse bajo control en un proceso aplicado. La microestructura de la madera, a diferencia de estos, es naturalmente variable debido a la anisotropía y heterogeneidad celular, por lo que resulta difícil mantener constantes sus características. Bajo este escenario, es posible el estudio de la interacción de la microestructura de la madera con el flujo de fluidos, en condiciones del sistema y propiedades del fluido constantes, a fin de establecer la influencia de la microestructura en el flujo. Esto a su vez es útil para determinar las condiciones óptimas de un sistema y las propiedades óptimas de un fluido en base a la microestructura del material.

Los flujos masivos se presentan principalmente a través de la porosidad interconectada, distribuida hacia el interior del sólido (Siau, 1984). Desde un punto de vista macroscópico, el fluido es trasladado de un punto a otro por su energía potencial. En este proceso mecánico, se debe superar a las fuerzas de fricción entre la dinámica del fluido y la superficie en paredes de los capilares. Lo que describe a la energía potencial como el trabajo realizado al mover la unidad de masa entre dos puntos del flujo. Que, a su vez, describe la medida de la energía mecánica por unidad de masa transformada a energía térmica por mecanismos friccionales (Mott, 1996; Langrish & Walker, 1993). La energía mecánica por unidad de masa del fluido en un sistema capilar es, por tanto, el potencial hidráulico. De acuerdo con la ley de Hubbert (1940), el flujo sucede de sitios con mayor potencial hidráulico a sitios de menor potencial, indistintamente de la dirección. Este gradiente de potencial es propiciado en la madera por un gradiente de presión hidrostática o capilar interna y por difusión osmótica.

En condiciones de estado estacionario, donde los parámetros del flujo son constantes en el espacio y el tiempo, de acuerdo con la ley de Darcy el flujo es proporcional al gradiente de presión en

un medio poroso. Consecuentemente, se obtiene una constante de proporcionalidad, la cual, al introducir la viscosidad dinámica del fluido en el cálculo, se vuelve independiente de las propiedades del fluido y de los mecanismos de flujo, para depender únicamente de las propiedades del medio poroso (Perré & Turner, 1999). Sin embargo, existen condiciones que afectan la relación lineal entre el flujo y el diferencial de presión, mostrando comportamiento de un flujo inestable. Esto debido a que el desplazamiento de un fluido en madera se puede presentar por flujo laminar, no lineal, turbulento y deslizamiento molecular o de difusión Knudsen, modificando el número de Reynolds. Además, existe interacción entre flujo y madera, el fluido puede no ser monofásico y presentar compresibilidad, a través del tiempo se presentan cambios dimensionales higroscópicos que pueden variar en relación a la anisotropía, las dimensiones de los capilares no son homogéneas y a mayor longitud en la madera generalmente se disminuye el caudal volumétrico como consecuencia de la disminución de porosidad interconectada. Debido a estas heterogeneidades, es difícil describir adecuadamente el flujo en el marco de los modelos clásicos basado en los promedios de porosidad (Krabbenhoft & Damkilde, 2004) y la magnitud del flujo puede ser sobrevaluada, siendo mucho menor el valor real en la madera porque es menor la cantidad real de poros interconectados que pueden contribuir al flujo del fluido.

Con el reciente desarrollo de técnicas tridimensionales de caracterización no destructivas ha sido posible observar los flujos depositados al interior de la madera. McKinley et al., (2018) observaron la línea de unión de un adhesivo en madera de Douglas-fir con la ayuda de TC y comprobaron la penetración del adhesivo en la pared celular, además de los depósitos dentro de los poros. Para la detección de embolismo en plantas Patt et al., (2019) utilizaron la TC y complementaron con técnicas de hidráulica estándar para poder predecir la conductividad hidráulica de los tejidos del xilema. Louërat et al. (2018) presentaron un método para predecir las propiedades de difusión, utilizando imágenes TC para las simulaciones numéricas de transferencia de calor y masa. Rivera et al. (2021), identificaron patrones en las líneas de flujo y valores de permeabilidad en madera de *Eucalyptus nitens* utilizando simulaciones numéricas. No obstante, para comprender mejor la influencia de la microestructura en el flujo y determinar la posible interacción entre flujo, sistema y microestructura, es necesario mayor investigación con métodos capaces de mostrar el flujo.

La presente investigación abordará este tema utilizando el análisis de imágenes tridimensionales

de la madera para acoplarlo con simulaciones numéricas. A través de imágenes fieles de la estructura de la madera serán consideradas variables que afectan al flujo masivo como lo son la rugosidad, dimensión de los capilares, superficie específica del volumen, fracciones de volumen (porosidad, poro lleno, solido), conectividad porosa en función de la longitud, tortuosidad geométrica y espesor de pared. Con las simulaciones se observarán variables de flujo como el caudal, velocidades en distintos capilares y el diferencial de presión utilizado. El objetivo principal de este trabajo, es determinar la relación de las características microestructurales de la madera que influyen en el paso de fluidos masivos a través de la misma, mediante la dinámica de fluidos desarrollada en imágenes 3D de la microestructura real de la madera. Por lo que, los alcances de la presente se limitan al flujo masivo a través de las cavidades, sin considerar, la reactividad química de la pared celular.

I. MARCO TEÓRICO

I.1 El flujo en la madera

Como material heterogéneo, anisótropo y poroso, la infiltración de la madera es una propiedad altamente variable (Tarmian *et al.*, 2020). Los principales factores que influyen en el flujo del fluido en la madera son las condiciones del sistema, las propiedades del fluido y de la estructura de la madera (Erickson, 1970; Hansmann *et al.*, 2002; Tondi *et al.*, 2013; Leggate *et al.*, 2020) por lo que, para realizar un análisis del mismo, resulta útil identificar una variable independiente que refleje en lo posible el comportamiento del resto. El transporte de fluidos a través de la madera se puede subdividir en dos clasificaciones principales. El primero es el flujo de fluidos a granel a través de los vacíos interconectados de la estructura de madera, bajo la influencia de un gradiente de presión estática o capilar. La segunda es la difusión, que consiste en dos tipos: la difusión de intergas, que incluye la transferencia de vapor de agua a través del aire en los lúmenes de las células; y la difusión del agua en los límites, que tiene lugar dentro de las paredes celulares de la madera. Otro tipo de difusión que se produce junto con el flujo de gases es el conocido como la difusión de Knudsen (Siau 1984). Sin embargo, para fines prácticos, la magnitud del flujo de un fluido a través de la madera es determinada por su permeabilidad. El número de factores que influyen en el flujo es muy amplio, incluidas las propiedades químicas de la madera. Sin embargo, esta investigación solo abordará los relacionados a la anatomía de la madera.

I.2 Influencia de la estructura de la madera

Si las células de la madera están interconectadas al momento de infiltrarla, el aire puede escapar cuando se comprime y el material es permeable. Si las células están cerradas, el aire sólo puede escapar rompiendo las paredes celulares y así el material es impermeable. Algunas maderas son relativamente permeables, otras altamente impermeables. El tamaño de las aberturas que conectan varias células de madera determina el grado de permeabilidad según la ley de Poiseuille. Maderas que tienen la misma porosidad pueden tener permeabilidades muy diferentes (Langrish & Walker, 1993).

Las dimensiones de los capilares juegan un papel importante en el flujo masivo debido al incremento del caudal volumétrico por incremento del radio capilar que se encuentra interconectado, si el resto de las variables permanecieran constantes de acuerdo a la ley de Poiseuille. En un proceso por presión o por gravedad los capilares de las diferentes células de la madera funcionan como la carga hidrostática del flujo en función del radio (volumen para un sistema de gravedad), a su vez esta carga es transmitida a través del fluido en las aberturas que interconectan a estos capilares (Siau & Petty, 1979). Las aberturas cortas de conexión, por lo general son las cámaras de las puntuaciones entre elementos celulares, perforaciones de platina en vasos, aberturas formadas entre la pared celular y los obstáculos en el lumen como gomas, extractivos, torus, membranas o fisuras de pared. Estas reducciones de sección en el flujo a presión constante implican una transferencia de energía en el fluido y una aceleración del mismo, transformando el flujo laminar lento a flujo no lineal en estos puntos de conexión en función del radio de la abertura y de la carga hidrostática (radio del capilar). El efecto de esta reducción de sección en la difusión molecular por diferencia de presión en el capilar, se vuelve muy significativo en el flujo gaseoso cuando la trayectoria libre media del gas es aproximadamente igual al radio capilar (cualquier capilar de las células de la madera). Puesto que el camino libre medio es inversamente proporcional a la presión, el efecto es más pronunciado a bajas presiones, donde puede constituir una gran desviación de la ley de Darcy. En dichas condiciones el tamaño de los capilares no solamente afecta el caudal volumétrico, también tiene un efecto sobre el diferencial de presión, ya que Siau & Petty (1979) demostraron que, para un flujo no lineal el diferencial de presión requerido es proporcional a la cuarta potencia del caudal volumétrico, el cual es aproximadamente el requerido para un flujo turbulento. El número crítico de Reynolds de un flujo no lineal está establecido en una relación aproximada de 0.8 la longitud del capilar corto (abertura con conectividad) entre su radio (Kuroda & Siau, 1988). Esta condición muestra que la mayor oposición al flujo en un sistema capilar interconectado se localiza en los pequeños capilares que interconectan los más grandes incrementando considerablemente el diferencial de presión requerido, el espesor de pared celular y el radio de las aberturas pueden influir en el número de Reynolds y el diferencial de presión puede reflejar la magnitud de estos factores de influencia.

I.3 Madera de coníferas

De forma independiente, la estructura de una madera dada determina gran parte del movimiento de fluidos en su interior. No obstante, resulta conveniente conocer que el flujo de fluido en la madera tiene relación con la procedencia de la misma. En coníferas se ha demostrado que, la resistencia al flujo reside completamente en la membrana de la puntuación de las traqueidas (Petty & Preston, 1969) y en la membrana de las puntuaciones simples entre las células de parénquima de los radios (Fujikawa & Ishida, 1975). La aspiración de puntuaciones es de gran influencia y se produce durante el secado, en la eliminación del agua libre de líquido de las coníferas cuando el toro es desplazado a través de la cámara de puntuación, debido a las altas fuerzas de tensión capilar, y bloquea la apertura de la puntuación (Siau, 1984), quedando fuertemente unida por la formación de enlaces de hidrogeno entre el toro, el margo y la pared (Thomas & Kringstad, 1971). La aspiración se puede presentar de forma natural en la formación del duramen cuando compuestos inorgánicos y lignosustancias se adhieren a las paredes, el toro y el margo de puntuaciones bordeadas (Comstock, 1965) o cuando extraíbles orgánicos hidrófobos ocluyen las membranas disminuyendo el contenido de humedad y provocando aspiración (Mantanis & Young, 1997). El duramen también se puede ver afectado por deposición de extractivos en las células de la madera (Erickson, 1970; Leggate *et al.*, 2020).

I.4 Madera de latifoliadas

En madera de latifoliadas, los vasos son responsables de la relativamente alta permeabilidad longitudinal en la albura, se diferencian de otros elementos al no estar completamente encerrados, ya que tienen grandes perforaciones en ambos extremos. No obstante, cuando hay presencia de gomas o tilosis, aumenta enormemente la resistencia al flujo a lo largo de los vasos; las especies que normalmente no forman tilosis pueden formar obstáculos en respuesta a una lesión que sella el flujo en cavidades por la secreción de ceras y resinas. Las maderas de poro difuso son de longitud limitada de vaso y el flujo a través de las puntuaciones intervasculares entre los vasos contiguos debe ser eficiente (Langrish & Walker, 1993). La formación de tilosos, la presencia de extractivos y la obstrucción de puntuaciones en duramen son las principales causas

de la disminución de permeabilidad en latifoliadas (Wardrop & Davies, 1961; Resch & Euckland, 1964). Debido a la diversidad de células y sus interconexiones en las angiospermas, la ruta de flujo de un fluido es más complicada (tortuosidad geométrica), la posibilidad de tratamiento de infiltración se ve muy afectada por el tamaño y distribución de los vasos y las características de las puntuaciones en el interior de los vasos, así como en los pares de puntuaciones bordeadas en los elementos circundantes (Tarmian & Perré, 2009; Ahmed *et al.*, 2011). El ángulo de contacto entre fluidos líquidos acuosos y la pared de los capilares del duramen se modifican debido a la presencia de extractivos, conduciendo a menor humectabilidad que en albura (Mantanis & Young, 1997).

I.5 Madera temprana y tardía

El flujo del fluido a través de madera tardía seca en las coníferas, es mayor que en la madera temprana, esto se debe a la mayor rigidez de las membranas de las puntuaciones, por textura más compacta del margo, mayor lignificación, cámara más pequeña, membrana más gruesa, mayor distancia de desplazamiento hacia la pared (Bramhall & Wilson, 1971; Kininmonth, 1971; Usta, 2005) Se han reportado valores de presión necesarias para desplazar la membrana hasta 100 veces mayores respecto de la madera temprana (Bolton & Petty, 1978). En la madera temprana la rugosidad y la porosidad de las paredes del capilar es mayor que en la madera tardía, lo que origina mayor mojabilidad de estas superficies (Mantanis & Young, 1997).

I.6 Influencia de las propiedades del fluido

Los estudios han demostrado que un fluido a alta viscosidad tiene menor capacidad de distribución y penetración en la madera (Tondi *et al.*, 2013; Owoyemi, 2010). A medida que un fluido se mueve, dentro de él se desarrolla un esfuerzo cortante, cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido. Se define al esfuerzo cortante como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra (Mott, 1996), por lo que la viscosidad se puede definir como la capacidad del fluido a disipar los esfuerzos cortantes, ya que un fluido siempre se deforma ante esfuerzos cortantes. La polaridad y el peso molecular del fluido también influye el flujo en la madera, Furuno *et al.* (2004) encontró que las resinas fenólicas con pesos

moleculares bajos y medios (290 y 470) penetran en las paredes celulares más lejos y viajan más fácil en los capilares. Por su parte, se reporta que flujos apolares no penetran la pared celular, pero presentan mayor flujo masivo (Siau, 1984). En cuanto a tamaño de partícula, los fluidos compuestos por nanopartículas pueden penetrar a través de la estructura capilar de la madera más fácilmente, no así a la microporosidad de la pared celular y suelen depositarse en las membranas de las fosas (Matsunaga *et al.*, 2009).

I.7 Influencia del sistema

La impregnación de la madera se puede realizar mediante procesos a presión o sin presión. Es posible una penetración más profunda y uniforme del fluido con procesos de presión. El flujo masivo del fluido a través de los capilares es el mecanismo dominante durante la impregnación a presión de la madera, y el proceso de difusión a través de las paredes celulares es insignificante. Una combinación de acción capilar y difusión controla el caudal durante la impregnación de madera seca con métodos sin presión, mientras que la difusión es el proceso dominante durante el tratamiento de madera verde (Tarmian *et al.*, 2020).

I.8 Flujo laminar

La viscosidad se entiende como la fricción interna del fluido que requiere la aplicación de una fuerza para hacer que una capa de un fluido fluya suavemente más allá de una capa adyacente o causar una superficie para moverse en relación con otro cuando hay un fluido entre ellos. Gases y líquidos poseen la viscosidad. El flujo que resulta cuando se superan las fuerzas viscosas es en un flujo uniforme y aerodinámico llamado flujo laminar y ocurre en respuesta a una caída de presión aplicada a través de capilares donde el caudal es relativamente bajo (Siau, 1984). El flujo laminar se caracteriza por ser lento, suave y tener bajo número de Reynolds, es descrito con la ley de Poiseuille (ec.1). Donde: Q es el caudal volumétrico, N es número de capilares circulares paralelos, r es el radio del capilar, ΔP caída de presión a través del capilar, L es la longitud del capilar y μ es la viscosidad del fluido.

(ec.1)

$$Q = \frac{N\pi r^4 \Delta P}{8\mu L}$$

I.9 Flujo no lineal

Se le llama flujo no lineal, debido a la pérdida de energía cinética que sufre cuando el flujo entra de un capilar mayor a uno más corto, como al pasar de un capilar de traqueida a un capilar de puntuación, su número crítico de Reynolds es mucho menor que el de flujo turbulento (Tarmian *et al.*, 2020). Para los líquidos es descrito por la ley de Poiseuille (ec. 2) cuando el capilar corto es $L/r < 100$, para lo cual se aplica un factor de corrección para considerar la caída de presión adicional asociadas a pérdidas viscosa en los extremos (aceleración), sustituyendo la longitud L por $L' = L + 1.2 r$ donde: Q es el caudal volumétrico, N es número de capilares circulares paralelos, r es el radio del capilar, ΔP caída de presión a través del capilar, L' es la longitud del capilar corto y μ es la viscosidad del fluido (Siau, 1984). El número crítico de Reynolds de un flujo no lineal tiene un valor muy por debajo del que tiene un flujo turbulento, sin embargo, el diferencial de presión requerido para este flujo es en proporción cuádruple del requerido para un flujo laminar

$$Q = \frac{N\pi r^4 \Delta P}{8\mu L'} \quad (\text{ec.2})$$

I.10 Flujo turbulento

Para el número de Reynolds inferior a 2000, las perturbaciones se amortiguan y el flujo permanece laminar. Por encima de este número crítico, dependiendo de diferentes parámetros incluyendo la rugosidad de la superficie, generalmente se desarrolla la turbulencia. El perfil de velocidad dentro del capilar cambia de un perfil parabólico para el flujo laminar a un perfil plano para un flujo turbulento (Perré, 2007). Una manera de calcular el número adimensional es con la siguiente ecuación (ec 3), donde Re es número de Reynolds, D es el diámetro capilar, μ la viscosidad dinámica del fluido, ρ es la densidad y v es la velocidad media en el capilar.

(ec.3)

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{Dvp}}{\mu}$$

I.11 Desplazamiento molecular o difusión de Knudsen

Consiste en la difusión molecular a través de un capilar debido al gradiente de presión resultante de la diferencia de presión aplicada. Se produce además del flujo viscoso y se vuelve muy significativo en el flujo gaseoso cuando la trayectoria libre media del gas es aproximadamente igual al radio capilar. Puesto que el camino libre medio es inversamente proporcional a la presión, el efecto es más pronunciado a bajas presiones, donde puede constituir una gran desviación de la ley de Darcy (Siau, 1984). Es un proceso molecular que se produce debido al gradiente de concentración, la presión parcial del vapor de agua o el potencial químico como las tres principales fuerzas impulsoras.

I.12 Numero de Reynolds

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la segunda ley del movimiento de Newton, la fuerza viscosa se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área (Mott, 1996). En un estudio realizado por Kuroda & Siau (1988) en madera de conífera y latifoliadas, se examinó el flujo no lineal y se encontró que la permeabilidad disminuía junto con el caudal al incrementar el diferencial de presión, los valores obtenidos del número crítico de Reynolds (Re) en el umbral de esta condición (perdida de amortiguamiento) utilizando la ecuación de Tompkins fueron similares a los valores calculados a partir de la relación longitud- radio de las aberturas de puntuaciones (capilares cortos) de acuerdo con Siau *et al.* (1978) y el estudio de capilares cortos de Petty & Preston (1969) donde: $Re \approx 0.8 L'/r$, los valores obtenidos del número crítico fueron de 0.41 a 1.62, valores muy por debajo de los 2000 que marca el flujo turbulento, lo que demuestra la necesidad de un delicado equilibrio entre diferencial de presión, caudal y velocidad.

I.13 Modelos de flujo en la madera

En los últimos años ha habido una creciente conciencia de que los modelos clásicos pueden necesitar revisión, en primer lugar, para describir las situaciones más básicas, y además, para poder extender estos modelos a nuevos escenarios. Un ejemplo de esto son los modelos describiendo el transporte de los conservantes. Aunque está muy relacionado con el problema de transporte de agua, los modelos clásicos no están obviamente extendidos para tratar este problema. La tasa de secado suele estar regida en gran medida por la tasa de evaporación en la superficie de intercambio, que es relativamente fácil de cuantificar, a diferencia de la transferencia interna. En la infiltración, por otra parte, la totalidad del proceso se rige únicamente por las propiedades de transferencia interna, que pueden ser muy difíciles de cuantificar en términos del modelo de continuo único (Krabbenhoft & Damkilde, 2004).

Los modelos solicitados para la descripción de este transporte son, sin embargo, a menudo inadecuados en el sentido de que solo funcionan para un rango limitado de condiciones, o tal vez no se comparan bien con experimentos. A menudo esto se atribuye a la falta de parámetros físicos precisos introducidos en los modelos, lo que se atribuye de nuevo a la variabilidad de la madera, mientras que la validez de los propios modelos solo se cuestiona en raras ocasiones. (Krabbenhoft, 2004).

Recientemente se utiliza la microestructura digital de la madera para análisis posteriores de la caracterización geométrica y la simulación física (Tao *et al.*, 2020).

I.14 Procesos CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos, que resuelve por métodos numéricos los problemas de dinámica de fluidos, transferencia de calor y masa, especies químicas y otras ecuaciones diferenciales parciales que representan otros fenómenos físicos cuando tales problemas no pueden ser resueltos por técnicas de análisis exactas debido a las no-linealidades, geometrías complejas y condiciones de frontera complicadas. El empleo de computadoras de alta capacidad ha impulsado el uso de soluciones

numéricas para la solución de ecuaciones diferenciales parciales, en donde el usuario puede limitarse a la preparación de los datos de entrada, ejecución de las simulaciones en el software y análisis de datos adquiridos (Xamán, 2016).

I.15 Análisis de imágenes 3D de TC

El empleo de la TC para el análisis de la estructura de la madera es relativamente moderno, las ventajas de esta técnica de análisis es obtener una visión tridimensional de la estructura interna y se pueden realizar análisis in-situ de las muestras, ya que no es destructiva. De hecho, las imágenes obtenidas representan valores de la atenuación de los rayos-X, lo que es proporcional a la cantidad de energía absorbida y, por consiguiente, proporcional a la densidad media del material, que es un buen estimador de las características anatómicas de la estructura (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2013).

El acoplamiento de las imágenes 3D con simulaciones numéricas facilitan el análisis de flujo en un medio poroso heterogéneo con líneas de flujo internas dependientes de la morfología del mismo (Bultreys *et al.*, 2016).

La señal de una imagen puede presentar interferencias que distorsionan la información que transporta, por lo que se hace necesario el tratamiento digital de señales a través de un sistema. El método o conjunto de reglas para implementar el sistema mediante un programa que realice las operaciones matemáticas correspondientes se denomina algoritmo, estos mismos algoritmos son utilizados para manipular la imagen y extraer la información contenida o conformada por sus elementos constitutivos denominados voxel (Proakis & Manolakis, 1998). Existen al menos 2 tratamientos básicos aplicables a la señal de las imágenes, la eliminación del ruido térmico y el aplanamiento de campo. El ruido térmico se refiere a los electrones producidos por aumento en la temperatura del sensor CCD (corriente oscura) y el aplanamiento de campo a la corrección de falta de uniformidad en la imagen generada por ruido de lectura durante el cálculo del rango dinámico (Moretón, 2016).

I.16 Filtros

La mayoría de las implementaciones de filtros se realizan en dos dominios: el dominio espacial y el dominio frecuencial. Los métodos basados en el dominio espacial hacen referencia a la manipulación directa de la luminiscencia de los píxeles, mientras que los métodos basados en el dominio frecuencial (transformada discreta de Fourier) modifican indirectamente la luminiscencia de cada píxel utilizando como factores de ponderación los valores de los otros píxeles de la imagen o del entorno del punto y las relaciones numéricas entre ellos. Las operaciones espaciales se pueden entender como la modificación directa del espectro de frecuencias de la imagen, por supuesto, este espectro de frecuencias se define como frecuencias espaciales para una imagen (Marcos *et al.*, 2006). El filtrado se emplea de formas muy variadas en el procesamiento digital de señales; por ejemplo, para eliminar el ruido indeseado que pueda existir en las señales deseadas, para conformación espectral en la ecualización de canales de comunicación, en la detección de señales de radar, sonar y de comunicaciones y para realizar el análisis espectral de señales (Proakis & Manolakis, 1998).

I.17 Segmentación

La segmentación es el proceso de separar los objetos de la imagen en contraste con el fondo. La forma más simple de segmentación se basa en la diferencia en las intensidades de brillo de los objetos y el fondo. Se busca un valor de intensidad mínimo y máximo, para que todos los píxeles que pertenecen a los objetos de interés tengan intensidades entre el mínimo y máximo, y todos los otros píxeles tengan valores de intensidad por debajo del mínimo o por encima de máximo. El resultado de una segmentación a menudo se representa como una (imagen binaria) máscara binaria (Baeker, 2010).

I.18 Transformación geométrica

Estos algoritmos modifican las características geométricas de las imágenes, se aplican en la reconstrucción de imágenes deformadas, el giro y ajuste de las mismas o la deformación intencionada de ciertos rasgos para posteriores análisis. Generalmente los más utilizados son los de escalado, translación, giro y espejo. Todos los algoritmos correspondientes a

transformaciones geométricas se basan en realizar una nueva distribución de los píxeles. El proceso de transformación geométrica se fundamenta en: determinar las nuevas coordenadas de cada píxel (i,j) en la rejilla transformada, (i',j') (Marcos *et al.*, 2006).

I.19 Transformación morfológica

Los operadores morfológicos definen las transformaciones de forma y estructura de los objetos. Estas herramientas matemáticas permiten obtener componentes que dan una idea de la forma y estructura de los objetos que forman la imagen. Además, permiten modificar estas formas para separar los objetos unos de otros, obtener contornos primarios, descomponer formas complejas en formas más simples, obtener contornos dentro de entornos ruidosos, reconstruir elementos distorsionados (Erosión, dilatación, esqueletonización, abertura, cierre). La morfología matemática analiza imágenes usando operadores desarrollados con la teoría de conjuntos (Marcos *et al.*, 2006; Nixo & Aguado, 2019).

I.20 Descriptores de región y frontera

Son parámetros que se obtienen del estudio del contorno de los objetos (Marcos *et al.*, 2006). Una región generalmente describe los contenidos (o puntos interiores) que están rodeados por un límite (o perímetro) que a menudo se llama el contorno de la región (Nixo & Aguado, 2019). La forma del contorno es generalmente analizada con el estudio de su circularidad, diámetro, área, perímetro, solidez, etc.

II. JUSTIFICACIÓN

La descripción tridimensional de la microestructura de la madera, en particular los espacios vacíos y su interconectividad mediante microtomografía de rayos X (TC), permitirá realizar un estudio de flujo de fluidos a través de esos espacios con la ayuda de un software computacional que resuelva las ecuaciones de Stokes. Esto es necesario para establecer los parámetros que faciliten significativamente el paso del flujo, lo que establece las pautas generales para realizar ajustes en las tareas de control durante procesos de infiltración bajo presión. El objetivo es lograr mayor proximidad a la total infiltración de la madera. De manera representativa, se utilizan tejidos tempranos y tardíos de maderas de coníferas y latifoliadas. Las modificaciones o ajustes a tareas de control y sustancias infiltrantes dependen de dichos parámetros. Los problemas recurrentes de infiltración con distribución no homogénea o nula se presentan durante los tratamientos industriales en la distribución de agentes de modificación y protección, flujo de materiales nano reforzados en el tejido, impregnación de resinas, materiales biomórficos, composites de matriz orgánica, entre otros. Este estudio es fundamental para elevar los controles de calidad y la competitividad de estas áreas de valor agregado en las maderas.

III. OBJETIVOS

- GENERAL:

Determinar las características anatómicas de la madera que controlan el paso de fluidos mediante la dinámica de fluidos en microestructuras 3D reales de la madera.

- ESPECÍFICOS:

- Caracterizar la microestructura anatómica en 3D de las especies en estudio, durante cada una de las etapas del progreso de los tratamientos.
- Determinar la permeabilidad, tortuosidad y conectividad celular de las especies en estudio, mediante simulación numérica.
- Evaluar experimentalmente la permeabilidad de gas de las especies en estudio, mediante un permeámetro.
- Determinar la trayectoria de flujo a través de la fase porosa en las especies en estudio, durante cada una de las etapas del progreso de los tratamientos.
- Analizar el efecto de las características de la microestructura anatómica en el flujo de las especies en estudio.
- Analizar la relación entre parámetros evaluados y la relación entre resultados virtuales y experimentales.
- Determinar el mínimo volumen para lecturas estables de permeabilidad.
- Evaluar el diferencial de presión para el flujo en los capilares de un sistema específico, mediante CFD en imágenes 3D de TC.

IV. HIPÓTESIS

La descripción de las características propias del espacio vacío (poros en general) en 3D permiten establecer cuáles son los parámetros que controlan el flujo a través de las diferentes especies de la madera, ya que la información tridimensional que se obtiene de la TC y las simulaciones es muy amplia y muestra la interacción entre estas características y el flujo.

Debido a que la TC es una técnica no destructiva, es posible realizar simulaciones numéricas de flujo que permitirán observar tridimensionalmente el comportamiento y limitar el uso de esta metodología para el paso de fluidos a través de la madera con pruebas experimentales de permeabilidad gaseosa.

Los parámetros que controlan el flujo presentan drásticas caídas de presión con los incrementos del diferencial de presión a medida que poseen menor permeabilidad.

Capítulo 1: CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA DE *Fraxinus uhdei* POR ACOPLAMIENTO DE MICROTOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA y SEM

1.1 Resumen

Este trabajo realiza una caracterización anatómica de la madera de *Fraxinus uhdei* para identificar diferentes tejidos leñosos y su interconectividad. La microtomografía computarizada como técnica no destructiva y la microscopía electrónica de barrido (SEM) pueden determinar la composición anatómica de dicha madera. Se analizó una muestra seca sin defectos mediante imágenes 3D con dos resoluciones de tamaño de vóxel diferentes, 1.6 y 4 μm . Posteriormente, las muestras fueron observadas mediante SEM. Se determinaron mediciones como la pared celular, la cavidad y los parámetros de fracción de volumen. Se obtuvieron las distribuciones del espesor de la pared, la longitud, el volumen, el diámetro, el lumen y el área de los poros. Se concluye que la combinación de ambas técnicas nos permite caracterizar completamente la compleja anatomía de la madera. Sin embargo, para mediciones 3D con algoritmos, el tamaño del vóxel y la precisión en la segmentación de elementos, así como el grado de especialización del algoritmo utilizado, son fundamentales para la elección de los parámetros.

1.2 Introduction

La caracterización anatómica de la madera se ha realizado convencionalmente a través de métodos invasivos que exponen las muestras a procesos de cambios físicos y el análisis es limitado a cortes de dos dimensiones (Carlquist, 2013; Daniel, 2016). Los cortes histológicos y la disociación de elementos constitutivos empleados en la microscopía óptica, pueden interferir en la continuidad, cambios dimensionales, efectos de histéresis anisotrópicos, desgarramientos y posible deformación de las sustancias depositadas (Tardif & Conciatori, 2015). Una técnica no invasiva que podría complementar los análisis microestructurales es la μTC que utiliza los rayos X para reconstruir tridimensionalmente la anatomía generando réplicas digitalizadas para su estudio (Gupta *et al.* 2021). Sin embargo, debido a la complejidad de la madera de *Fraxinus uhdei* como un biomaterial anisotrópico de origen latifoliada forestal, los algoritmos utilizados en los softwares especializados en el análisis de imágenes pueden enfrentar algunos desafíos que

combinados afectan la caracterización. El tamaño de vóxel empleado es un factor que afecta el campo de visión a mayor resolución (Greffé *et al.*, 2024), así mismo, la medición de elementos con mayor longitud que la imagen.

Contrariamente se corre el riesgo de no distinguir elementos como las fibras o su estructura. La falta de contraste entre sus elementos o entre estos y los depósitos internos pueden dificultar la segmentación virtual de los mismos para su adecuada medición, como la longitud de las fibras o el diámetro de los elementos. Los algoritmos de segmentación pueden influir el resultado de forma distinta (Saxena *et al.*, 2017), de acuerdo a métodos de umbralización manuales con el histograma de nivel de brillo de voxel o algoritmos que consideran un valor ponderado de la vecindad del voxel (Schlüter *et al.*, 2014). La eliminación de ruido y los ajustes permanentes de brillo o contraste pueden modificar el valor original del voxel (Anam *et al.*, 2020; Du Plessis *et al.*, 2020). El mapa de distancias se puede ver influenciado durante la eskeletonización de los vóxeles, debido a la presencia de sustancias en el lumen, afectando la reconstrucción de estos (Rivera *et al.*, 2024). Dichos desafíos requieren la identificación de parámetros con problemáticas o adecuada caracterización en base al desarrollo del tratamiento de imágenes empleado y la identificación de componentes con SEM. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación es desarrollar una caracterización anatómica viable mediante el acoplamiento de las técnicas μ TC y SEM.

1.3 Materiales y Métodos

El material de estudio fue extraído de un árbol de *Fraxinus uhdei* de fuste recto, en la zona de albura a una altura de 1.30 m con un DAP de 0.95 m. La probeta tenía un diámetro de 5 x 5 cm de altura. De esta se obtuvieron las probetas para el tomógrafo con un diámetro de 1.6 y de 4 mm para efectos de resolución en la caracterización. Se seleccionó una probeta seca, libre de irregularidades y sin defectos superficiales aparentes.

La adquisición de las imágenes se realizó en un equipo de tomografía Xradia Zeiss Versa 510, con algoritmo para la reconstrucción tomográfica, el cual es parte del software del sistema TC. Se tomaron proyecciones en los 360° con una resolución de tamaño de vóxel de 1.6 y 4.0 μ m.

El tratamiento de imágenes se realizó en el programa ImageJ y AVIZO™. Las imágenes para caracterización cualitativa se obtuvieron con cortes virtuales alineados paralelamente al eje longitudinal de las fibras, empleando la herramienta de rotación de vóxeles. Posteriormente se

seleccionó manualmente en el histograma de niveles de gris, los correspondientes a la pared celular únicamente y se le asignó el color a los niveles de gris de 0 – 255 (Rivera et al., 2024). Los niveles de brillo están asociados a los cambios de densidad del material, establecido durante la tomografía por rayos-X.

Para la caracterización cuantitativa las imágenes se binarizaron, humbralizando la fase porosa completa. Posteriormente, se segmentaron los distintos componentes celulares de interés, esto se realizó con cierres para aislar los voxeles correspondientes al componente de interés y con la separación de objetos. Se etiquetaron los voxeles para su análisis y previamente al análisis de partículas con los operadores de medición de los parámetros, se ajustó la escala de voxeles a μm . Las fracciones de volumen se calcularon con la fracción de voxeles correspondientes a cada componente. La conectividad se calculó con la técnica de vecindad de voxeles conectados, pertenecientes a la fase porosa de la imagen etiquetada.

Las imágenes SEM se realizaron sin capa conductora, a baja presión y tensión de 20 kV, en el Instituto Tecnológico de Morelia (ITM).

1.4 Resultados

Con voxel de $4 \mu\text{m}$ (Fig. 1a, b) los contornos de los objetos son aproximados pero suficientes para las mediciones, particularmente las puntuaciones pierden definición. Sin embargo, se destaca que las puntuaciones mantuvieron la conectividad requerida para fines de medición, siempre que se incluyeron todos los vértices del voxel en el cálculo. Fue posible medir factores de forma como la circularidad en fibras y parénquima, también la longitud de los elementos completos. También facilito determinar la porosidad tipo circular y orientación de vasos (V), vasos en agrupamientos cortos en dirección radial (arreglo múltiple radial) y los cristales prismáticos (C) en bandas hacia el final del tejido temprano. Con el voxel de $1.6 \mu\text{m}$ (Fig. 1c) se obtuvieron elementos bien definidos, rugosidad, continuidad y forma. Los cambios de nivel de brillo (asociados a la densidad) en la pared celular se muestran en función de los cambios de color, menor valor en rosa intenso y mayor en azul. Aquí la longitud de fibras libriformes (F) no fue mayor que la longitud de la imagen, facilitando medidas de longitud y volumen. Se observaron las placas de perforación simple en V, parénquima vasicentrico (VP) y apotraqueal difuso. Así mismo, rayos heterogéneos (R) de células procumbentes y cuadradas, triseriados y poliseriados. Las puntuaciones simples (P) bien definidas, almidones (S) adheridos en los lúmenes.

Se obtuvo la segmentación en los distintos tejidos celulares, a través de los procesos de separación entre las porosidades y la pared celular (Fig. 1d). Aquí las células se obtuvieron independientes, distinguidas con un color propio y etiquetadas para su análisis individual, ya que presentaron la dificultad de formar un solo objeto virtual por la unión a través de las puntuaciones. Esto se realizó con el posterior etiquetado de los objetos y separación total de los mismos. Los cristales en banda formaron racimos que adoptan la forma depositada en el radio. En los vasos, la continuidad muestra la inclinación y las separaciones o uniones a lo largo de su trayectoria. Los elementos de vaso tuvieron una media de 232, max 329, min 142, DS 48. Las puntuaciones se observaron sobre la cara radial de las fibras, alineadas radial, tangencial y longitudinalmente. En los vasos predominaron las puntuaciones opuestas y en el parénquima radial en el centro y extremos de las 6 paredes de la célula. El entramado de las fibras, los radios y el parénquima axial es develado con esta técnica de segmentación y etiquetado individual celular, un tejido complejo propio de las especies latifoliadas. Para la medición de las fracciones fue indispensable segmentar los radios de las fibras (Fig. 1e), mediante la técnica de cierre de voxels restantes al tejido de interés. En la Fig. 1f se muestra en color amarillo la porosidad de cualquier tipo de tejido interconectada y las células confinadas en colores distintos, obteniendo un 99.6 % interconectado. La interconexión se presentó a través de las puntuaciones poco definidas utilizando el voxel de 4.0 μm (Fig. 1f), pero con la técnica de cálculo de al menos un vértice conectado entre vecindad de los voxels (26 vértices) fue posible. Utilizar voxel de 4 μm permitió medir un volumen mayor con sectores confinados.

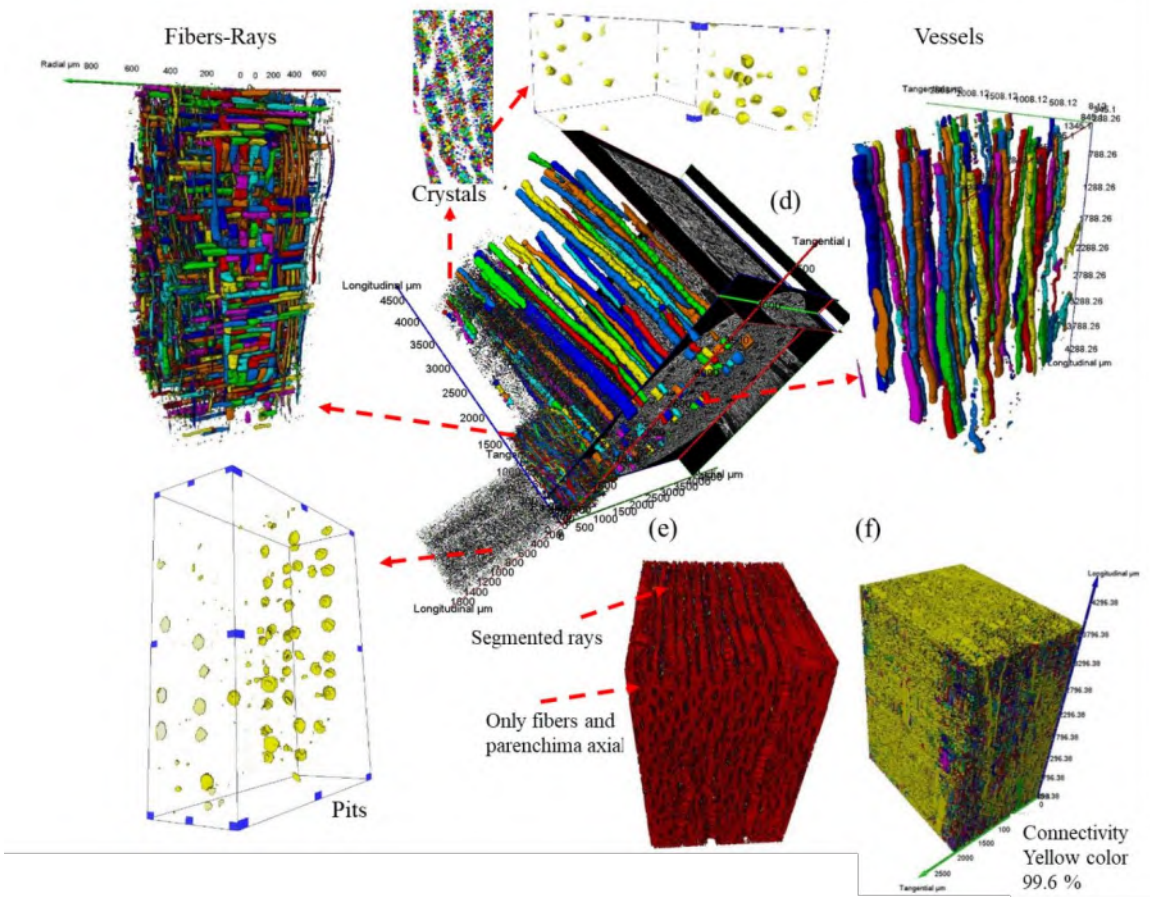
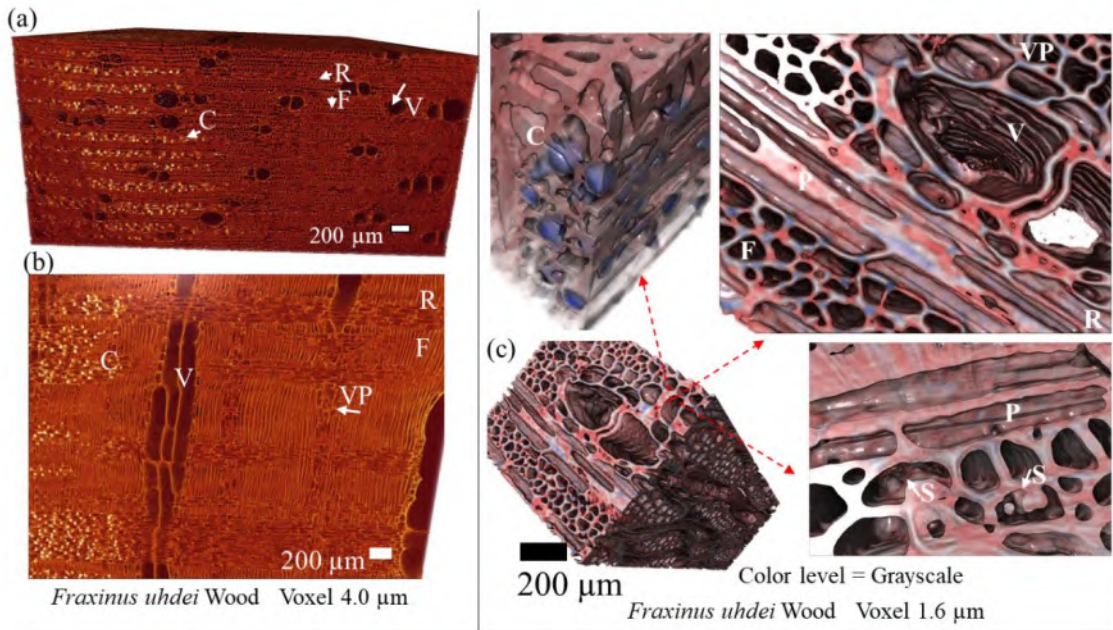


Fig. 1 Caracterización anatómica con μCT , separación de elementos celulares y conectividad de tejido de madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c, d, e, f). Vasos (V), Fibras (F), Rayos (R), Cristales (C), Parénquima Vasicentrico (VP), Puntuación (P), Almidones (S).

La elevada densidad de los cristales prismáticos respecto de la pared celular, facilito el análisis de estos en μ TC. El factor de forma y tamaño corresponde con el mostrado en imagen SEM (Fig. 2a). La cercana densidad entre la pared y los almidones adheridos, dificulto, pero fue suficiente para el contraste con esta y su definición en las imágenes de μ TC. La presencia de los almidones es corroborada con las imágenes del SEM, que muestran los almidones dentro del radio (Fig. 2b) en forma de racimos agregados a la pared (Fig. 2c). Es posible también corroborar las mediciones realizadas con tomografía computarizada, en las imagines por SEM, la dimensión de los elementos celulares se corresponde con las obtenidas en imagines de TC.

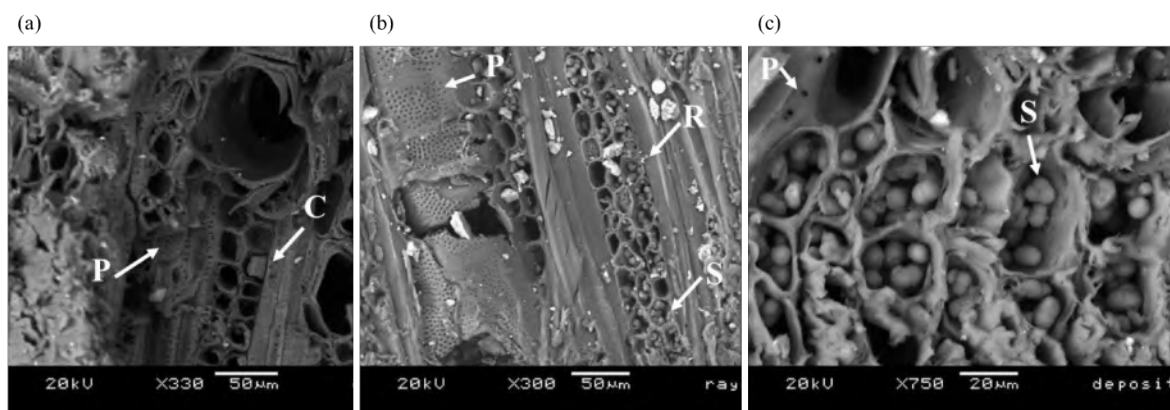


Fig. 2 Cristales y almidones en imágenes SEM de madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c). Rayo (R), Cristales (C), Puntuación (P), Almidón (S).

En la Fig. 3 se muestran las distribuciones de las características anatómicas obtenidas como propiedades volumétricas de las imágenes tridimensionales. En todos los casos el valor de las medias se vio afectado por la medición del total de los objetos, a diferencia de la caracterización (IAWA, 2007) donde se seleccionan las fibras más largas, los mayores diámetros o la medición diametral tangencial. El diámetro de los vasos arroja una media de 260 μ m y los valores mínimos corresponden a segmentos del vaso con constricción (Fig. 3A). Este valor es razonablemente cercano a 230 μ m (Aguilar & Barajas, 2005) y 202 μ m (Rangel, 2016), reportado por para esta especie. La media del espesor de pared fue de 8.3 μ m (Fig. 3b), similar a 8.5 μ m reportado (Rangel, 2016) y 2.2 (Aguilar & Barajas, 2005) dentro del rango de la distribución. En la presente investigación influyeron las paredes de fibras cortas y largas del volumen analizado, obteniendo una distribución normal (Fig. 3b). La dificultad para que los algoritmos segmentaran las fibras

unas de otras, fue compleja debido al mismo nivel de brillo de la pared entre estas. Por este motivo, se optó por separar los lúmenes de las fibras y medir su longitud, asumiendo este valor como longitud de fibra ya que la diferencia es despreciable. Se obtuvo una media de 751 μm con proporciones similares de tamaños, las fibras más largas fueron de 1500 μm (Fig. 3c). El valor máximo obtenido se corresponde con las mediciones en el sistema tradicional en microscopía óptica donde únicamente se miden las fibras más largas. Rangel (2016) obtiene una longitud de 1422 μm , Aguilar & Barajas (2005) 1409 μm . El diámetro de lumen fue de 8.6 μm (Fig. 3d), en contraste con 27 μm (Rangel, 2016) y 19.8 μm (Aguilar & Barajas, 2005), diferencias causadas por medir lúmenes reducidos de los extremos de fibras aquí. El diámetro de las puntuaciones presento una media de 6 μm (Fig. 3e) y un volumen de 565 μm^3 (Fig. 3f). El diámetro de los cristales fue de 24 μm (Fig. 3g) y un volumen de 21403 μm^3 (Fig. 3h). Se desconocen reportes en la literatura sobre el volumen de dichas características en la especie, probablemente por la aplicación novedosa de esta técnica.

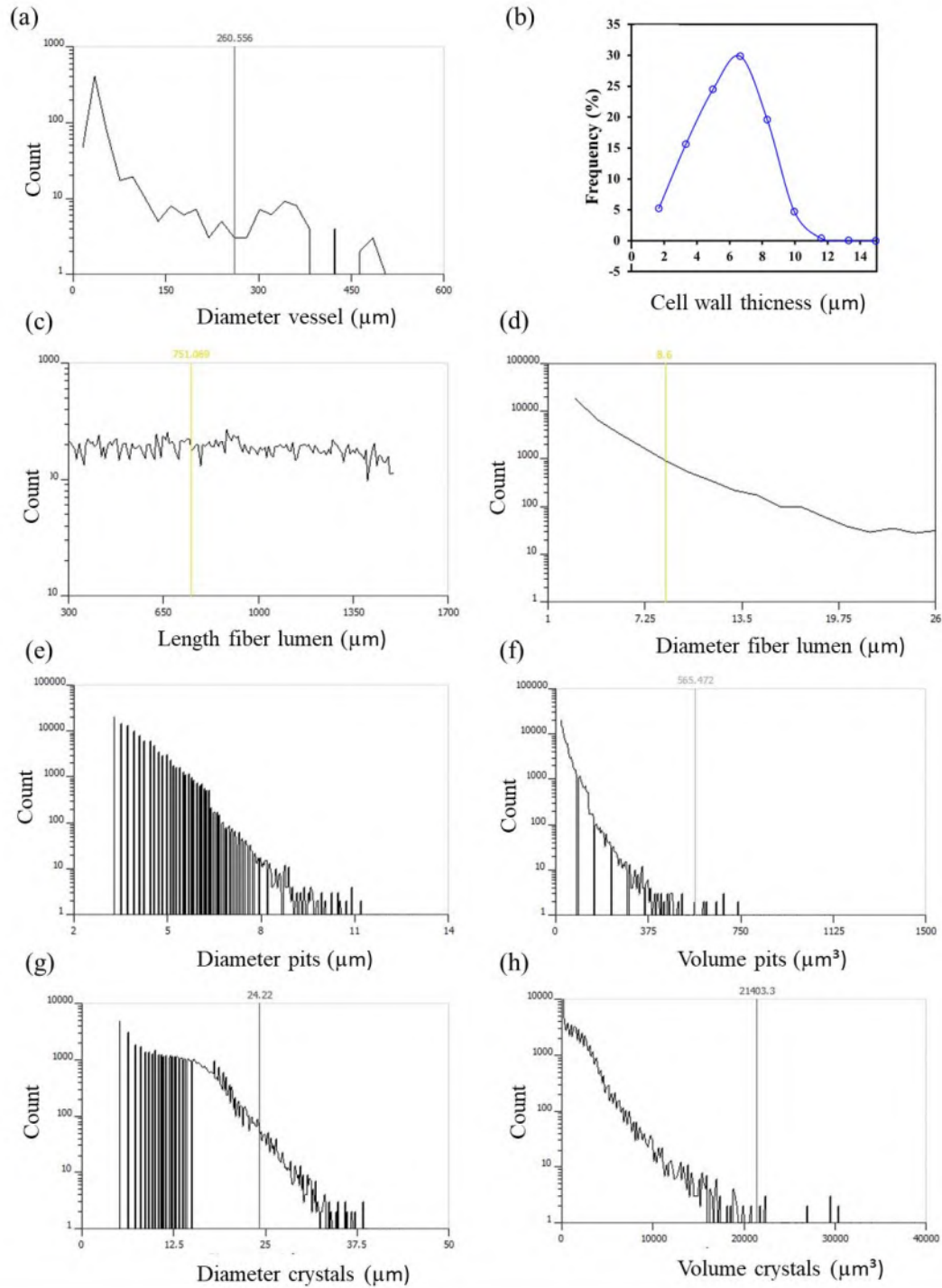


Fig. 3 Distribución de parámetros anatómicos caracterizados con μ TC en madera de *Fraxinus uhdei* (a, b, c, d, e, f, g, h).

En el cuadro 1 se muestran las fracciones de volumen obtenidas para cada porosidad de tejido celular, pared celular y cristales, destacando el balance natural que existe entre estos. Si sumamos

la fracción de puntuaciones (VF_P), más fibras y parénquima axial (VF_F), más vasos (VF_V), es aproximadamente igual a la pared celular (VF_W). Es decir ($VF_P + VF_F + VF_V \approx VF_W$), $0.3608 \approx 0.3594$. Por lo que, la diferencia establecida por la cantidad de rayos (VF_R) de 0.2748 sumada a la pared celular (0.3594), es aproximadamente igual a la porosidad total del tejido (VF_T). Es decir ($VF_R + VF_W \approx VF_T$), $0.6342 \approx 0.6356$. Se obtuvieron las superficies por conteo de voxeles en cada uno de los objetos de la imagen y el factor de forma de sus contornos, lo valores son congruentes con los distintos tejidos celulares (Cuadro 1). El valor uno en la circularidad indica la máxima esfericidad.

Cuadro 1 Caracterización anatómica en madera de *Fraxinus uhdei*

	Fracción de Volumen (0-1)	Superficie (μm^2) Media/Moda/DS	Circularidad (0-1) Media/Moda/DS
Porosidad total	0.6356	---	--
Porosidad vasos	0.0650	8305/5505/4432	0.82/0.87/0.08
Porosidad fibras	0.2900	140/17/109	0.93/0.99/0.13
Porosidad puntuación	0.0058	24/11/14	0.94/1.00/0.07
Porosidad rayo	0.2748	1052/429/443	0.29/0.35/0.07
Cristales	0.0050	100/49/42	0.87/0.98/0.11
Pared celular	0.3594	---	--

1.5 Conclusiones

Las mediciones en imágenes de tomografía adquiridas difirieron poco de las reportadas para esta especie, debido a que las características analizadas por procesamiento de imágenes integraron tejidos completos, incrementando la precisión. La caracterización anatómica se complementó íntegramente con imágenes μ TC y SEM para aspectos cualitativos. Sin embargo, para mediciones 3D con algoritmos el tamaño de vóxel y la precisión en la segmentación de elementos, así como, el grado de especialización del algoritmo utilizado, es fundamental para la elección de parámetros.

1.6 Referencias

1. S. Carlquist, Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood, Springer Science & Business Media. 2nd edn. (Springer Berlin, Heidelberg,

- 2013), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-21714-6>
2. G. Daniel, Microscope techniques for understanding wood cell structure and biodegradation, In Secondary xylem biology (Academic Press, Cambridge, 2016), pp. 309-343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00015-2>
3. J.C. Tardif, & F. Conciatori, Microscopic examination of wood: Sample preparation and techniques for light microscopy. Plant microtechniques and protocols (Springer, Cham, Suiza, 2015), pp. 373-415. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19944-3_22
4. P. Gupta, D. Bisht, V. Kandpal & S. Gupta, Advances in the wood anatomical studies with innovations in microscopy: A review. Innovative forestry for a sustainable future, (Food & Agriculture Org., Italy, 2021), pp. 139-148. <https://doi.org/10.1752B/cifor/008199>
5. R. Greffe, V. Libertiaux, E. Béchet, C. Phillips, & C. Geuzaine, Visual Tools for Computed Tomography Volume Representation: Large Data Visualisation and Surface Extraction. (<https://lib.uliege.be>, 2024), <http://hdl.handle.net/2268.2/20388>
6. N. Saxena, R. Hofmann, F. O. Alpak, J. Dietderich, S. Hunter & R.J. Day-Stirrat, Marine Petr. Geo. **86**, 972-990 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.07.004>
7. S. Schlüter, et al., Wat. Res. (2014). <https://doi.org/10.1002/2014WR015256>
8. C. Anam, et al., J. biomed. Phys. & Eng. (2020). <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2002-1072>
9. A. Du Plessis, et al., Mater. Tod. Comm. **22**, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100792>
10. J.G. Rivera-Ramos, et al., Forest. (2024). <https://doi.org/10.3390/f15081403>
11. IAWA Committee, IAWA list of microscopic features for hardwood identification. International Association of Wood Anatomists Bulletin new series, 4th edn, (IAWA Bulletin, Netherlands, 2007), pp. 219-332.
12. S.R. Aguilar & J.M. Barajas, Anatomía de la madera de especies arbóreas de un bosque mesófilo de montaña: un enfoque ecológico-evolutivo. (redalyc.org, 2005), <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707704>
13. G. Rangel, Descripción anatómica de la madera de Fresno *Fraxinus uhdei* (Wenz) Lingelsh. July (2016), Available online: <https://docplayer.es/63502251-Descripcion-anatomica-de-la-madera-de-fresno-fraxinus-uhdei-wenz-lingelsh.html>

Capítulo 2: PARÁMETROS ANATÓMICOS QUE CONTROLAN EL FLUJO SIMULADO EN UNA LATIFOLIADA

De acuerdo a la clasificación de la IUPAC (1972) la madera podría ser microporosa, mesoporosa y macroporosa, lo que conforma un complejo sistema poroso o capilar que propicia condiciones de frontera tortuosas para las trayectorias del flujo (Rivera *et al.* 2021). Estos conductos porosos están formados por un sistema capilar grueso y están interconectados por medio de aberturas más pequeñas o puntuaciones de las paredes celulares, complicando con esto el flujo masivo (Langrish & Walker, 1993). Los macroporos o vasos tienen una alta capacidad relativa de flujo longitudinal ya que son células con extremos abiertos, limitados únicamente por placas perforadas. Sin embargo, pueden presentar obstrucción por tilosis o por secreción celular (Thompson & Koch, 1981; De Micco *et al.*, 2016). De aquí que la dificultad para medir las variables predictoras y obtener los rangos que controlan o son factores en el comportamiento del fluido, al utilizar probetas de dimensiones cercanas a 5 mm de diámetro, tienen poros bien definidos en las latifoliadas pero poca claridad en el lumen y menor aun, en las puntuaciones o espesor de pared celular. La determinación de los efectos del tamaño de las probetas en la simulación de permeabilidad y los parámetros de interés en el comportamiento del flujo para seleccionar las variables requieren de su análisis

Así mismo, la ruta del flujo en dirección transversal es más complicada debido a la diversidad de células en las angiospermas. No se cuenta con suficiente información sobre las interacciones con las puntuaciones en el interior de los vasos, así como en los pares de puntuaciones bordeadas en los elementos circundantes (Pereira *et al.*, 2018). Los estudios realizados han profundizado en este tema, demostrando las grandes diferencias que existen entre los flujos longitudinales y los bajos valores de flujos transversales (Pan *et al.*, 2015; Rezende *et al.*, 2017). Sin embargo, asociar los resultados cuantitativos de flujo con las características microestructurales de la madera no ha sido un procedimiento fácilmente accesible y directo debido, en gran parte, a que la caracterización microestructural se realiza en 2D. Los flujos en las tres principales direcciones ortogonales son analizados en este capítulo.

2.1 Nivel poroso

Para analizar si el flujo tiene distinto comportamiento y esto afecta el valor de permeabilidad

simulada en los distintos niveles de porosidad, se utilizaron imágenes de tomografía computarizada 3D de madera de *Dalbergia ruddae*. Con base en las distintas cualidades entre vasos, fibras, parénquima, puntuaciones y con dos tamaños de voxel de 1 y 5 μm . La diferencia en resoluciones afecta el campo de visión y por tanto la zona celular del tejido seleccionado es distinta, así como la permeabilidad a saber. Las simulaciones de flujo se realizaron en los distintos niveles de porosidad por separado y en conjunto, en la dirección tangencial, radial y longitudinal de la zona de albura y duramen. Las imágenes utilizadas de madera de *Dalbergia ruddae* proceden de material escaneado por tomografía computarizada de rayos-X.

2.2 Procesamiento de imágenes

Para el post tratamiento de los datos de los voxeles se importó la imagen reconstruida a los softwares especializados Fiji y AVIZO™. Debido a que la imagen se adquirió en 16 bits por la capacidad de la cámara CCD de rango dinámico de 65535 niveles de gris, se procedió a convertirla a 8 bits con 256 niveles, para reducir el consumo de datos por el archivo procesado. Posteriormente se intensificó el brillo y contraste entre los distintos niveles de intensidad de la imagen de forma manual (Fig.1c).

Los cortes virtuales se realizaron orientados en la dirección tangencia, radial y longitudinal a los anillos de crecimiento de la madera (Fig.1d,1e), esta orientación se hizo con la rotación angular sobre los ejes x, y, z de la imagen (Fig.1f).

Las regiones de interés para los cortes virtuales se seleccionaron basándose en el tejido celular, con la ayuda de los cortes ortogonales del volumen analizado (Fig.1g). Los cortes se efectuaron con la extracción del subvolumen de voxeles seleccionados.

La segmentación virtual de las fase sólida y porosa en madera, se realizó por binarización de la imagen (Fig.1h). Se umbraliza por el método global basado en histograma de intensidad de brillo, seleccionando únicamente los valores correspondientes a la pared celular (Fig.1i), para separarla del fondo o porosidad (Fig.1j). Los métodos por histograma no consideran operaciones en la vecindad de los voxeles, únicamente la separación de intensidades.

Posteriormente se separaron los cortes para realizar las simulaciones en tres diferentes condiciones. La primera compuesta por la cavidad de vaso y los lúmenes en el tejido de fibras y parénquima, equivalente al total de la fase prosa (Fig.1k). La segunda compuesta únicamente de

los lúmenes de fibras y parénquima (Fig.11). La tercera condición compuesta por la cavidad del vaso (Fig.1m). La separación de la cavidad del vaso del resto de las cavidades se realizó etiquetando los poros de la imagen y con repetidas operaciones de erosión y dilatación hasta aislar la porosidad del vaso, para posteriormente realizar la diferencia entre esas dos imágenes. El operador morfológico de erosión elimina los píxeles en los bordes de los objetos del conjunto, y así, erosiona o encoge el conjunto. Posteriormente la erosión es corregida por la dilatación, con el aumento de voxels en los bordes.

Los procedimientos para medir el área de los poros, el espesor de la pared celular y la fracción de volumen, se encuentran descritos en Rivera et al. (2021). Para las simulaciones numéricas de permeabilidad se utilizaron las imágenes tridimensionales reconstruidas, donde la pared celular determino las condiciones de frontera para el dominio computacional. En el módulo de simulación de experimentos de permeabilidad absoluta del software AVIZO™ se realizaron las simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics). Los CFD emplean un dominio computacional (fluido) para formar un enmallado compuesto por celdas geométricas, a los puntos nodales de cada celda se les realizan los cálculos de permeabilidad o velocidad de flujo promedio cuando estos cruzan la fase porosa, solucionando numéricamente las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes en cada punto. Las simulaciones estuvieron condicionadas a flujo laminar, con un diferencial de presión de 30000 Pa, viscosidad del fluido de 0.001 Pa.s y un criterio de convergencia de 0.0001. Las simulaciones fueron realizadas en dirección radial, tangencial y longitudinal. Las líneas de flujo se observaron en sus velocidades máximas alcanzadas para cada una de estas direcciones por separado y comparando las velocidades en las tres direcciones, utilizando para ello un mismo rango de velocidad de referencia comparativa.

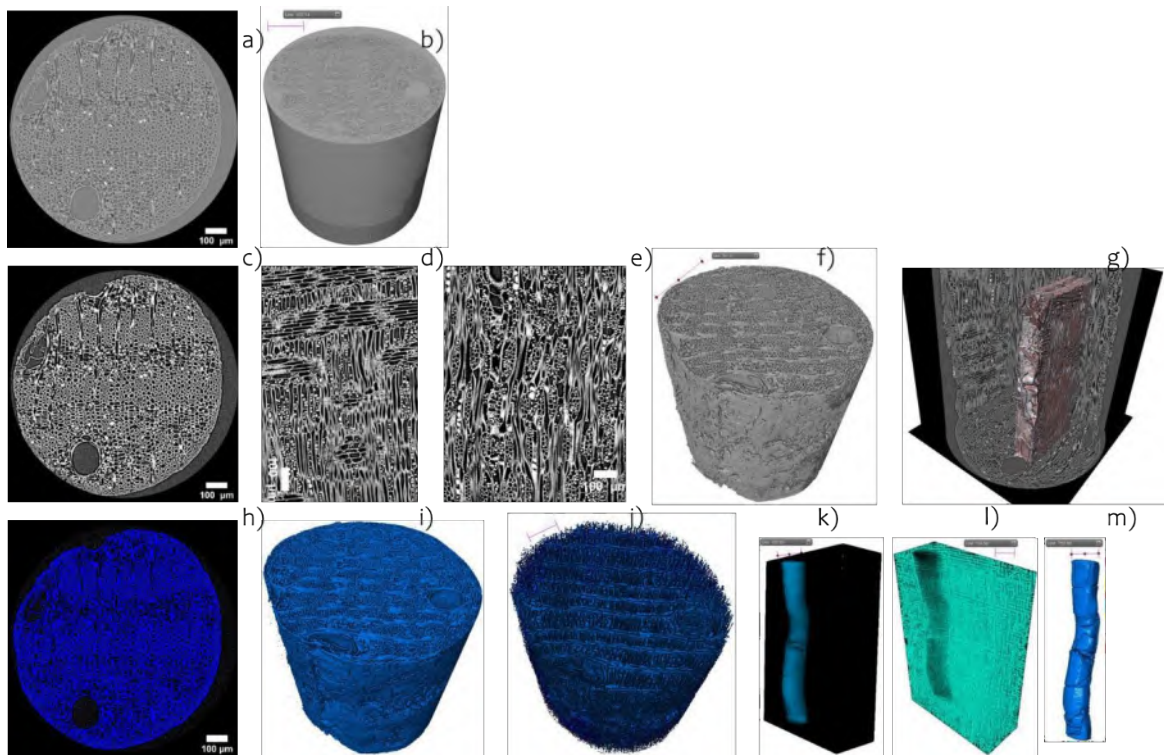


Figura 1: Tratamiento de imágenes: a) Slice Imagen inicial, b) 3D de imagen inicial, c) Slice transversal de imagen filtrada, d) Slice radial filtrado, e) Slice tangencial filtrado, f) 3D filtrado, g) Orthoslice de la imagen, h) Humbralización de imagen, i) Fase sólida, j) Fase porosa, k) Cavidad del vaso y tejido, l) Cavidades del tejido sin vaso, m) Cavidad del vaso.

2.3 Permeabilidad con voxel de 5 μm

Con microestructuras menos definidas por el voxel se presentan caminos de mayor resistencia en las zonas de células de menor dimensión, como es el caso de la figura 2a, donde se observa al flujo con trayectorias principalmente dentro de los vasos, evadiendo a la zona de fibras. Esto es debido a que se facilita la trayectoria del flujo por las células con menor diversidad de caminos o reducciones en la sección transversal del conducto, además de que las fibras se encuentran cerradas en sus extremidades. Sin embargo, cuando existen otro tipo de obstáculos como se mostrará más adelante con mayor definición de la microestructura, el flujo se presenta de manera distinta dando origen a lecturas de permeabilidad también distintas.

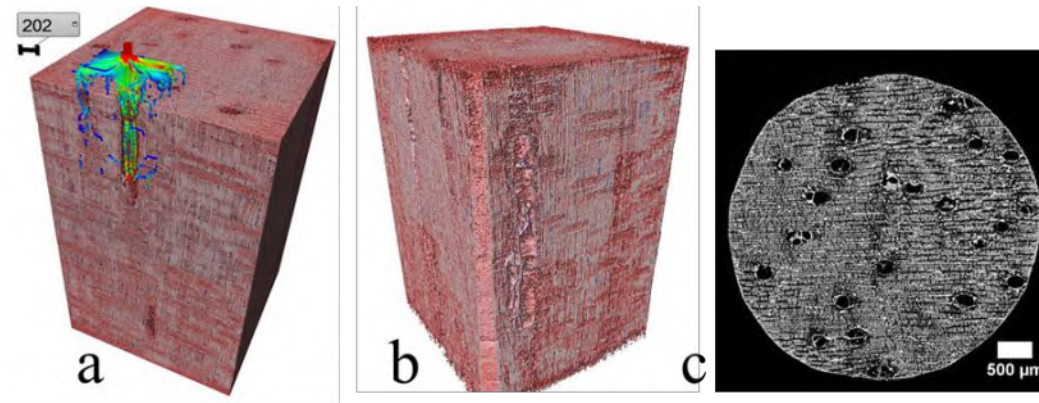


Figura 2. Cortes virtuales de probetas con 5 mm de diámetro: a) Líneas de flujo en vasos, b) Microestructura de baja definición, c) Corte 2d de 5 mm de diámetro.

En las probetas de mayor tamaño se obtuvieron valores de permeabilidad distintos a los de las probetas de 1 mm de diámetro. Los cambios en las características de las cavidades del tejido no muestran ninguna tendencia sobre el flujo masivo, este último medido como permeabilidad en las cavidades (cuadro 2). La conectividad entre cavidades es alta, prácticamente del 100 %, para todos los cortes analizados, eliminando la posibilidad de que existan espacios totalmente confinados al flujo masivo y adquiriendo una propiedad constante (cuadro 2). De igual forma, los valores de tortuosidad son muy similares entre sí. La superficie transversal de las cavidades en albura y duramen no muestran diferencias significativas, únicamente un aumento progresivo en los cortes debido a la mayor porción de vasos presente en estos. La alta desviación estándar de los cortes 1 y 2 se debe a la combinación de cavidades de fibras y de vasos (cuadro 2). La fracción de volumen de cavidades presenta diferencias entre cortes, pero no se observa ninguna relación con la permeabilidad. La falta de relación entre estos valores y su poca variación, se debe a la poca resolución de las imágenes utilizadas con un tamaño de vóxel de $4.7 \mu\text{m}$. Insuficiente para definir la estructura anatómica de fibras o parénquima de manera adecuada, mostrando débilmente la estructura de los vasos. Lo que conlleva a mediciones de flujo, como se observa en el cuadro 1, donde la permeabilidad longitudinal en los cortes de albura y duramen presentan valores cercanos a la permeabilidad radial o tangencial sin mostrar las causas de este efecto negativo. Los resultados obtenidos también muestran poca diferencia entre el flujo masivo del duramen y de la albura, así como un mayor flujo en la dirección longitudinal y radial y menor en dirección tangencial (cuadro 2).

Cuadro 2. Características de porosidad de madera de *Dalbergia ruddae*

	K_L μm^2	K_R μm^2	K_T μm^2	Fracción de volumen	Área de cavidades (SD) μm^2	Tortuosidad	Conectividad %
Albura							
C ₁	3.69	1.15	0.52	70.0	147.3 (126)	1.07	99.9
C ₂	8.95	1.42	0.67	63.1	238.5 (539)	1.08	99.7
C ₃	2.80	0.53	0.30	73.8	313.6 (1692)	1.04	99.9
Duramen							
C ₁	4.80	1.23	0.56	67.6	154.6 (144)	1.14	99.9
C ₂	6.75	1.28	0.51	63.9	225.2 (1078)	1.04	99.9
C ₃	2.09	0.25	0.19	79.0	322.1 (1846)	1.04	99.9

K_L = permeabilidad longitudinal, K_R = permeabilidad radial, K_T = permeabilidad tangencial, (SD) = desviación estándar.

2.4 Permeabilidad con voxel de 1 μm

En las simulaciones con probetas pequeñas de 1 mm de diámetro, las líneas de flujo presentan mayor precisión en su interacción con la estructura de la madera. Por lo tanto, los valores de permeabilidad obtenidos (cuadro 3) pudieran ser más correctos que los mostrados en el cuadro 2. En la segmentación de fases se conservaron los bordes de los objetos de la imagen inicial en escala de grises. Con este resultado se garantiza la conservación de la conectividad original entre las distintas cavidades en la imagen y menor incertidumbre en la medición de las fracciones de volumen. Por otra parte, con el tamaño de voxel cercano a 1 μm en la imagen, fue posible evaluar en las simulaciones al conjunto de distintas células con resolución suficiente para incluir la presencia de obstáculos en las puntuaciones, rugosidades de las paredes celulares, así como otras heterogeneidades u obstáculos de influencia en flujo del fluido, como los extractivos.

La fracción de volumen del espacio poroso fue superior a la fracción de pared celular (Cuadro 3), este valor establece el espacio disponible para el flujo masivo en un 62.6 % en el volumen analizado. Del cual, un 7.4 % corresponde a la cavidad del vaso y un 55.2 % a los lúmenes de fibras y parénquima. No obstante, se ha demostrado que para distintas microestructuras que tienen una cantidad de poros similar, pueden presentar distinto flujo de fluido, lo que sugiere que el flujo masivo no depende exclusivamente del espacio disponible. Como era de esperar, los valores de permeabilidad obtenidos son superiores en dirección longitudinal, seguidos de la dirección radial y finalmente la tangencial (cuadro 3). Esta condición es congruente con la

estructura anatómica obtenida, como se muestra posteriormente. La permeabilidad longitudinal es ligeramente inferior a los obtenidos experimentalmente por Chen *et al.* (1998), para madera de albura de *Quercus rubra* L. de 58.6 μm^2 , *Juglans nigra* L. de 28.1 μm^2 y *Liriodendron tulipifera* L. de 28.9 μm^2 , debido, probablemente, a diferencias anatómicas y las inclusiones presentes en la madera de *Dalbergia*.

Los valores de permeabilidad obtenidos en dirección radial y tangencial (cuadro 3) son ligeramente superiores a los obtenidos por Milota *et al.* (1995), en permeabilidad al gas para madera de pino, ellos reportaron un 0.19 y 0.08 μm^2 , para dirección radial y tangencial respectivamente, estas son condiciones distintas en anatomía y tipo de fluido, pero muestran capacidades de permeabilidad muy similares en estas direcciones.

Cuadro 3. Características de porosidad y permeabilidad en madera de *Dalbergia ruddae*

		Poros de fibras y parénquima	Poros de vaso	Poros totales de madera	Pared celular
<i>K</i> Longitudinal	(μm^2)	17.99	6.14	17.97	-
<i>K</i> Tangencial	(μm^2)	0.24	-	0.26	
<i>K</i> Radial	(μm^2)	0.58		0.76	
Tortuosidad geométrica		1.18	1.06	1.17	-
Fracción de volumen (%)		55.19	7.39	62.58	37.42

K = permeabilidad.

En la figura 3 de la microestructura de la madera utilizando un tamaño de 1 mm de diámetro, se observa claramente a las células del tejido (fig. 3a), donde las líneas de flujo interaccionan con los obstáculos dentro del vaso (fig. 3b) y con los obstáculos y conductos del resto de células de dimensiones más pequeñas que el vaso (fig. 3c). Por lo que, es posible realizar un estudio más completo de la interacción del flujo con el tejido, así como mediciones más precisas y minuciosas de las variables independientes.

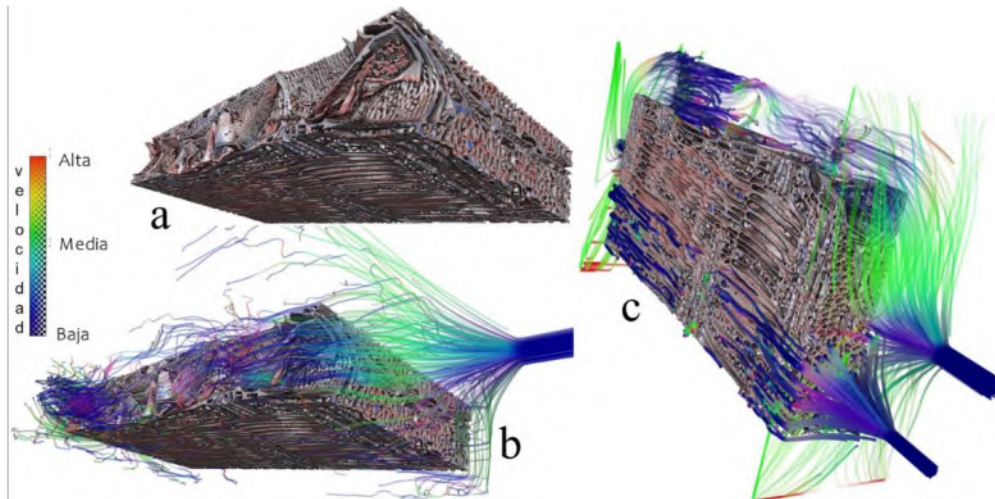


Figura 3. Microestructura de probetas con 1 mm de diámetro: a) Microestructura de madera de *Dalbergia ruddae*, b) Líneas de flujo en el vaso, c) Líneas de flujo en fibras, parénquima y vaso.

Con el tamaño de voxel cercano a $1\mu\text{m}$ en la imagen, fue posible evaluar en las simulaciones al conjunto de distintas células con resolución suficiente para incluir la presencia de obstáculos en las puntuaciones, rugosidades de las paredes celulares, así como otras heterogeneidades u obstáculos de influencia en flujo del fluido, como los extractivos. No obstante, la longitud de las fibras rebasa el campo de visión.

El tamaño de lumenes presentó una distribución con alta concentración en áreas inferiores a los $50\mu\text{m}^2$ (fig. 4a). Los poros característicos con áreas debajo de $50\mu\text{m}^2$ corresponden a familias de fibras predominantes con similitud en sus dimensiones. Las concentraciones fueron disminuyendo conforme se fue incrementando el tamaño, hasta llegar a los poros de $200\mu\text{m}^2$ (fig. 4a). Los valores cercanos a $200\mu\text{m}^2$, son los poros del parénquima axial. A partir de este tamaño se da el incremento abrupto hasta $18868\mu\text{m}^2$ correspondiente a los poros que conforman el vaso. La distribución determino la configuración porosa de gran influencia en la trayectoria del flujo masivo y por ende de gran importancia. La concentración de tamaños se presentó en 7.6, 4.9, 5.1, 3.1 y 3.3 % para áreas de 10.6, 14.2, 17.8, 22.5 y $26.1\mu\text{m}^2$ consecutivamente y los poros de puntuaciones no obstruidos funcionaron como ductos de conectividad entre las cavidades de todo tipo de células. La longitud de estas pequeñas cavidades está determinada por el espesor de la pared celular, así que, el espesor de pared celular del tejido leñoso y el área de la cámara de puntuación, determinaron las condiciones geométricas de estos ductos de

conectividad. El espesor de pared celular fue de 1.2 a 14 μm . (fig. 4b), con una media de 4 μm , los espesores mayores a 8 e inferiores a 1.5 μm presentaron frecuencias inferiores al 5 %. La precisión de estas mediciones se ve reflejada en la diferencia del valor de permeabilidad. Por su parte, esta precisión es afectada por la longitud de las fibras. Los valores de permeabilidad en la imagen de menor resolución, son menores debido a la mayor cantidad de obstáculo acumulados por distancia, como por ejemplo las fibras completas o cantidad de platinas. Pero también, por la falta de resolución que brinda menos caminos opcionales.

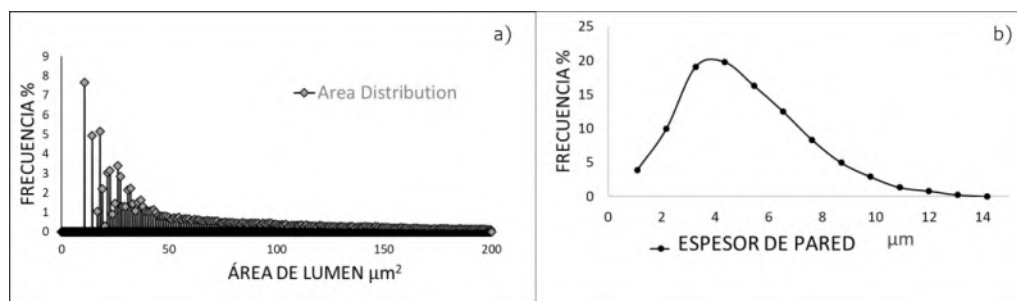


Figure 4: a) Pore surface distribution and b) cell wall thicknesses distribution.

2.5 Flujo longitudinal

En el corte a lo largo del vaso se observa el depósito de gomas (fig. 5a). También es posible observar un gran número de puntuaciones obstruidas por la membrana (fig. 5a). En el vaso se muestra la gran obstrucción al flujo de la goma (fig. 5b) y los puntos críticos del flujo originados en las reducidas aberturas de la estructura de gomas y la pared del vaso (fig. 5c), por donde el flujo es forzado a cruzar incrementando su velocidad debido a la reducción de sección, observado como líneas de flujo en color cercano al rojo (fig. 5b, 5c). Debido a esta obstrucción, el valor de la permeabilidad longitudinal en el vaso es 3 veces inferior a la permeabilidad del tejido completo (tabla 1) y prácticamente son similares los valores de permeabilidad longitudinal en el tejido completo y el tejido sin vaso (tabla 1), lo que revela la baja contribución del vaso con gomas en el flujo de fluidos. Lo que hace necesaria alta resolución para lecturas de flujo en otro tipo de tejido. En la figura 5d, se observan aberturas a lo largo de la pared radial del vaso y la estructura de gomas, por donde fluiría el flujo longitudinal en el vaso con gomas en esta especie. En un primer plano de las líneas de flujo (fig. 5e) se observa cómo en la obstrucción por gomas en el vaso, las líneas continúan su trayectoria por los radios (líneas color verde) y se incorporan

nuevamente al flujo longitudinal en el lumen de las fibras. En las fibras se observa cómo el punto crítico de resistencia al flujo se presenta en las puntuaciones (fig. 5f) como aceleraciones por reducción de sección (fig. 5g) y el parénquima radial también participa en forma de ductos de conectividad entre lúmenes de fibras para mantener el flujo del fluido (fig. 5h). En la figura 5i, se muestra esta red tridimensional que une los lúmenes de las fibras.

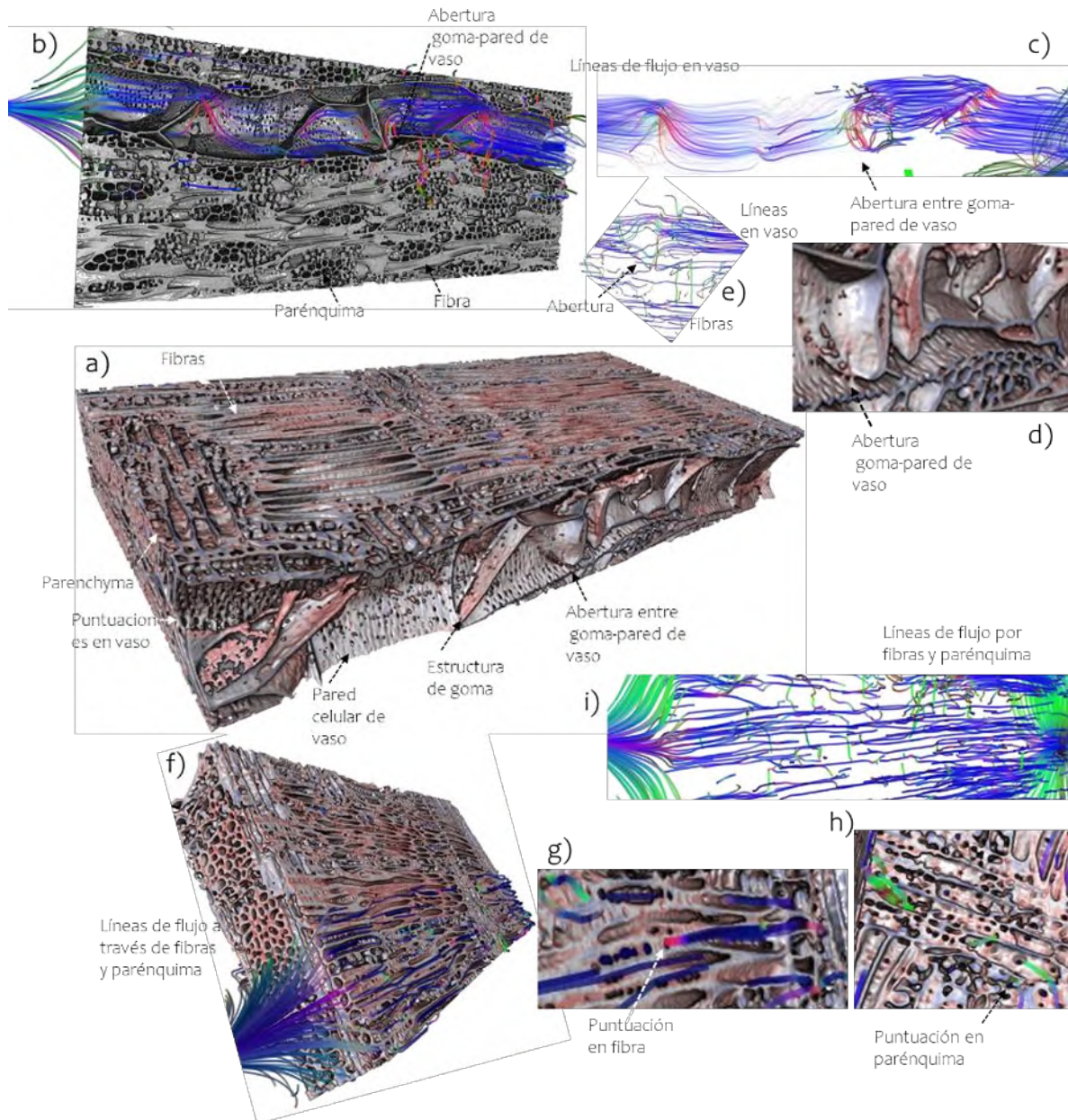


Figure 5: Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido longitudinal en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura, b) flujo en vaso con gomitas, c) líneas de flujo en vaso con gomitas,

d) primer plano de estructura en vaso, e) líneas de flujo vaso-tejido, f) flujo en tejido leñoso, g) puntos críticos del flujo en puntuaciones de fibra, h) flujo en parénquima radial, i) líneas de flujo en el tejido leñoso.

2.6 Flujo en dirección tangencial

El flujo en dirección tangencial se presenta principalmente a través de las puntuaciones sobre la cara radial (fig. 6a). Las líneas de flujo se desplazan tangencialmente a través de los lúmenes de fibras, lúmenes del parénquima radial y sorteando los extractivos depositados en los lúmenes de parénquima axial (fig. 6b, 6c), frecuentemente se desplazan en dirección radial a través de las células de radio hasta encontrar preferentemente una célula de parénquima axial, las cuales tienen mayor tamaño de cavidad, puntuaciones más grandes con menor resistencia al flujo y en sus lúmenes se encuentran depositados los extractivos de esta especie (fig. 6d), a través de estas células de parénquima axial continúan su trayectoria en dirección tangencial, lo que disminuye el flujo en los lúmenes de fibra. La trayectoria en el vaso en la dirección tangencial se observó afectada en sitios con presencia de gomas, ya que esta presentó crecimiento en dirección radial, formando barreras en forma de pared en dirección tangencial. Lo cual, forzó al flujo a rodear las estructuras de gomas (fig. 6e, 6f, 6g). En las zonas del vaso que no presentaron gomas, las líneas de flujo continuaron su trayectoria sin desviación de la dirección tangencial (fig. 6e). En las puntuaciones del vaso se observa la caída de velocidad en las líneas de flujo al pasar del parénquima axial paratraqueal al vaso, a través de la puntuación (fig. 6f).

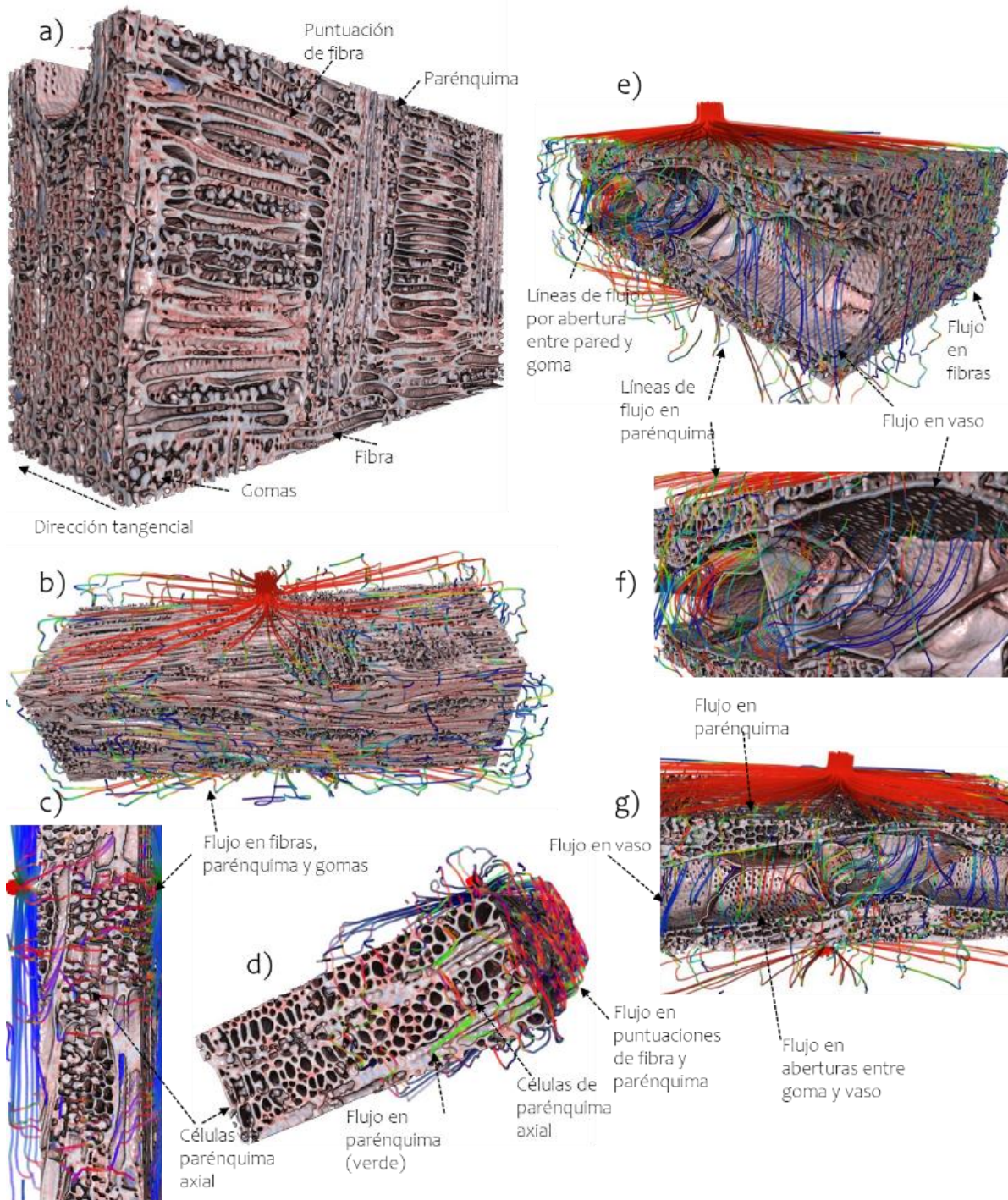


Figure 6: Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido tangencial en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura cara radial, b) flujo en tejido leñoso, c) líneas de flujo a través de fibras, parénquima y extractivos, d) trayectoria parénquima radial-parénquima axial, e) líneas de flujo vaso- tejido, f) puntos críticos de flujo en vaso, g) flujo en vaso con gomas.

2.7 Flujo en dirección radial

En las caras tangenciales de la madera es posible observar las paredes de las fibras con muy pocas puntuaciones (fig. 7a), debido a esta falta de conductos el flujo en dirección radial se presenta a través de los radios, en el tejido sin vaso (fig. 7b), así mismo, en el tejido completo (fig. 7c). El flujo en las fibras se observa de forma frecuente, durante la desviación del flujo en dirección longitudinal para unir la continuidad de los radios y continuar el flujo en dirección radial (fig. 7d). Las líneas de flujo en el vaso, mantuvieron su trayectoria en dirección radial, sin presentar complicaciones (fig. 7c, d, e) y con un notorio aumento en el flujo respecto de la dirección tangencial. La relativa facilidad en la trayectoria de flujo en esta dirección se vio reflejada en la mayor permeabilidad que en la dirección tangencial (tabla 1).

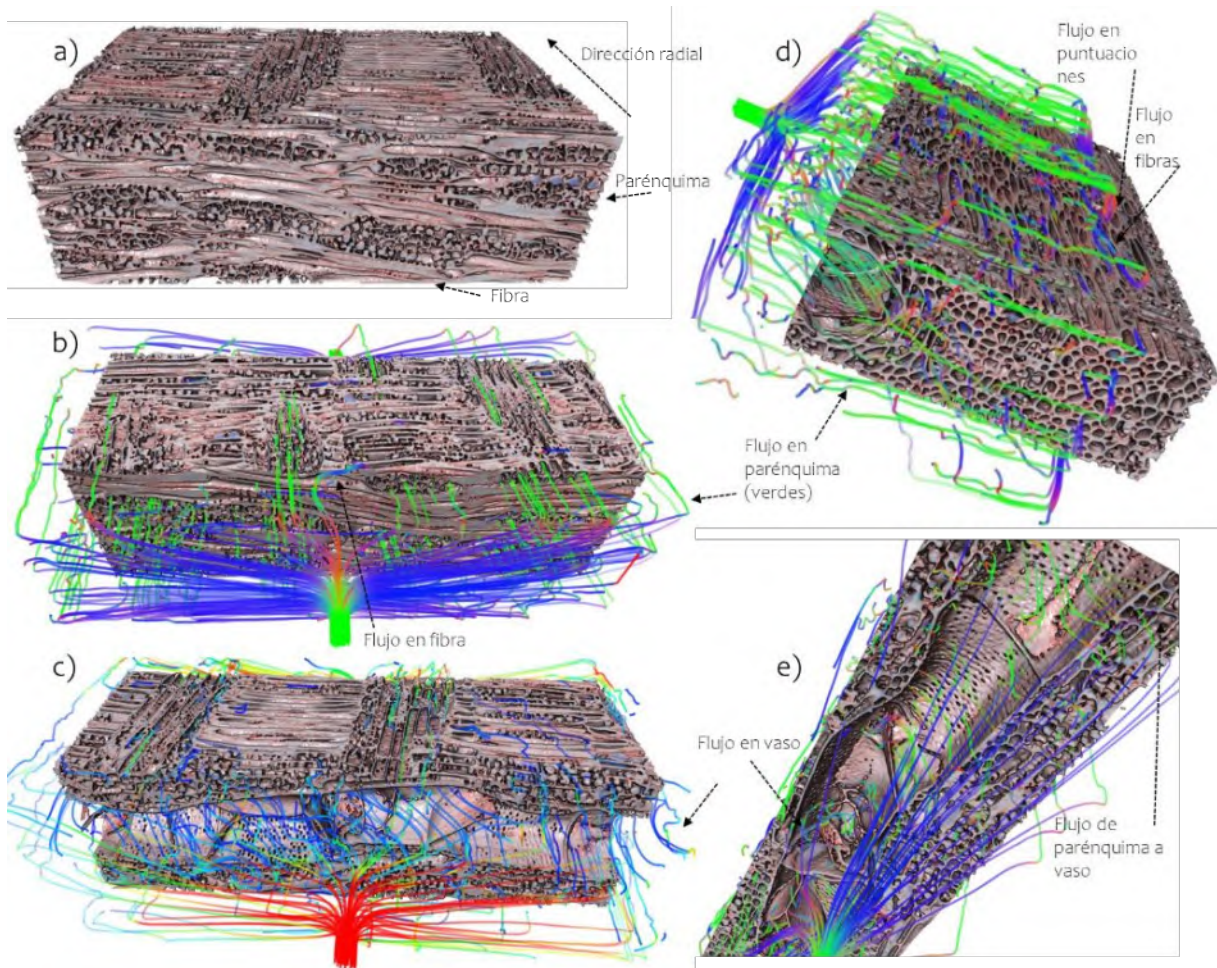


Figure 7: Interacción de la microestructura de madera de *Dalbergia ruddae* con el flujo de fluido radial en imágenes 3D: a) renderizado de microestructura cara tangencial, b) flujo en tejido leñoso sin vaso, c) flujo en tejido leñoso

con vaso, d) desviación de flujo radial en dirección longitudinal, e) flujo en vaso con gomas.

En la simulación longitudinal a la fibra y utilizando el mismo rango de velocidad para el tejido leñoso completo (fig. 8a), el tejido sin vaso (fig. 8b) y el vaso (fig. 8c), las líneas de flujo presentaron una trayectoria distinta en las mismas regiones de las distintas imágenes. Esto confirma que la participación de los vasos disminuye la carga de flujo en el resto del tejido, pero que el tejido en zonas de fibras y parénquima aumenta su contribución al flujo cuando se presenta un obstáculo en el fluido del vaso que obligue a modificar su trayectoria. En las figuras 8b, también se observa que al centro del volumen analizado el flujo tiene continuidad, por lo que se deduce que en la figura 8a, esta misma área no presenta flujo debido a que se requiere menor presión en la región del vaso, modificando así la trayectoria del flujo por los conductos de más fácil acceso y no necesariamente por que esta región de fibras carezca de conectividad porosa. Este mismo efecto se puede observar en el vaso, en la figura 8a, algunas líneas de flujo se desvían fuera del vaso al encontrar un obstáculo que exige mayor presión que la necesaria para rodear a través de las fibras o parénquima adyacente. Por este motivo en la figura 8a, a la altura de la mitad de la longitud del vaso no se observan líneas en color rojo a diferencia de la figura 8c, donde en este punto crítico (fechas blancas) si presenta líneas aceleradas en color rojo debido a la reducción de sección y a que no existen conductos alternos de escape que exijan menor presión, como en el caso del flujo de la figura 8a. Estos resultados son congruentes de acuerdo a la ley de Hubbert (1940), donde el flujo sucede de sitios con mayor potencial hidráulico a sitios de menor potencial, indistintamente de la dirección.

En la dirección tangencial el flujo presentó mayores velocidades en el tejido completo (fig. 8d), a diferencia del tejido sin vaso, en donde el flujo fue más lento en la misma región (fig. 8e). En el acercamiento de la figura 8d, es posible observar a las líneas de flujo rodear al vaso, esto es debido a que en esta dirección las estructuras de gomas se encuentran perpendicular al flujo. La trayectoria tangencial presentó desviación en dirección longitudinal y constantes aceleraciones y desaceleraciones en ambas condiciones de tejido completo y tejido sin vaso (fig. 8d, 8e). Las aceleraciones y desaceleraciones corresponden al tamaño de las cavidades en la trayectoria, acelerando a medida que disminuye la cavidad y viceversa. Esta condición obedece a la ley descrita por Darcy donde el flujo es proporcional al gradiente de presión cuando existe un estado de conservación del potencial hidráulico en el fluido.

Las velocidades de flujo en dirección radial son bastante similares en el tejido completo (fig. 8f) y el tejido sin vaso (fig. 8g), prácticamente la presencia del vaso tiene influencia en la velocidad únicamente al cruzar el vaso en esta dirección e inmediatamente después adquiere nuevamente la misma velocidad al entrar al parénquima axial, parénquima radial y las fibras (fig. 8f). Al igual que en dirección tangencial, las líneas de flujo presentan una constante aceleración y desaceleración de acuerdo al tipo de cavidad en su trayectoria (fig. 8f, 8g). La trayectoria de flujo en esta dirección del tejido se presentó principalmente en los radios, con una fuerte participación de desplazamientos en dirección longitudinal a través de las cavidades de fibras y parénquima axial (fig. 8f, 8g), esto debido a que en esta dirección son muy escasas las puntuaciones en las paredes celulares en fibras a excepción de las puntuaciones y las cámaras en las células de parénquima, lo cual facilitó las condiciones de flujo casi exclusivamente en los radios y en las puntuaciones de células de parénquima y el vaso. Al interior del vaso se observa claramente mayor flujo en esta dirección (zoom fig. 8f) que en la dirección tangencial (zoom fig. 8d). Además, en dirección radial las líneas de flujo cruzan directamente el vaso (zoom fig. 8f), a diferencia de la dirección tangencial donde gran parte de las líneas rodearon el vaso debido a obstrucción en su pared (fig. 8d).

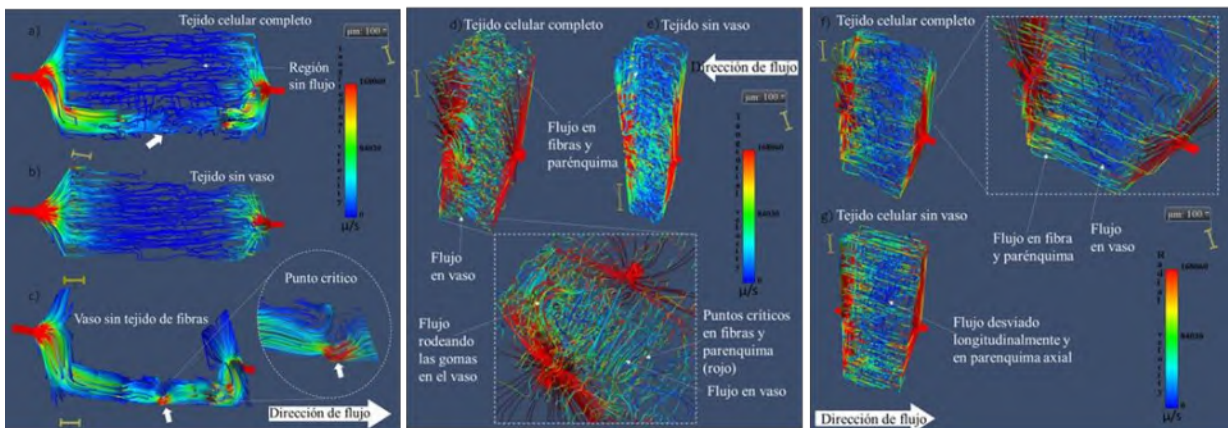


Figure 8: Simulación numérica de flujo en imágenes 3D de TC de madera de *Dalbergia ruddae*: a) Flujo longitudinal en el tejido completo, b) Flujo longitudinal en tejido sin vaso, c) flujo longitudinal en vaso, d) flujo tangencial en el tejido completo, e) flujo tangencial en tejido sin vaso, f) flujo radial en el tejido completo, g) flujo radial en tejido sin vaso.

2.8 Conclusión

En este trabajo se analizó la relación de la microestructura 3D con el paso de flujo a través de la *Dalbergia Raddae* acoplando simulaciones numéricas de la microestructura 3D real de la misma, llegando a la conclusión de que el flujo en dirección longitudinal se vio fuertemente influenciado por la presencia de gomas en los vasos, forzándolo a fluir a través de las fibras en los segmentos obstruidos dentro del vaso y prácticamente anulando la contribución del vaso al flujo. En dirección tangencial el parénquima axial desempeña una función indispensable y las estructuras de gomas obstruyen perpendicularmente al flujo. El flujo en dirección radial se presenta mayormente en el parénquima radial y a través del vaso. Determinando que la mayor permeabilidad se da en la dirección perpendicular de la madera a pesar de la no contribución de los vasos.

2.9 Referencias

- Chen, P. Y., Zhang, G., & Van Sambeek, J. W. (1998). Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species. *Forest Products Journal*, 48(3), 87.
- De Micco, V., Balzano, A., Wheeler, E. A., & Baas, P. (2016). Tyloses and gums: a review of structure, function and occurrence of vessel occlusions. *IAWA journal*, 37(2), 186- 205.
- IUPAC (1972). Manual os Symbols and Terminology, Appendix 2, Pt. 1, Colloid and Surface Chemistry. *Pure Appl. Chem.* 31, 578
- Langrish TAG, Walker JCF (1993) Transport processes in wood. In: Walker JCF (ed) Primary wood processing, principles and practice, 2nd edn. USDA, Madison, pp 121–152
- Hubbert, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology*, 48(8, Part1), 785-944.
- Milota, M. R., Tschernitz, J. L., Verrill, S. P., & Mianowski, T. (1995). Permeabilidad al gas de la plantación de pino loblolly. *Ciencia de la madera y la fibra*, 27(1), 34-40.
- Rivera Ramos, J. G., Espinoza Herrera, R., Arteaga, D., Cruz de León, J., & Olmos, L. (2021). Microstructural analysis of *Eucalyptusnitens* wood through computed microtomography. *Wood Material Science & Engineering*, 1-14.
- Rezende, R. N., Lima, J. T., Paula, L. E. D. R., Hein, P. R. G., & Silva, J. R. M. D. (2017). Wood

- permeability in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*. *Floresta e Ambiente*, 25.
- Thompson, W. S. (1981). Preservative treatment of hardwoods: a review.
- Pan, Z., Ma, Y., Connell, L. D., Down, D. I., & Camilleri, M. (2015). Measuring anisotropic permeability using a cubic shale sample in a triaxial cell. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 336-344.
- Pereira, L., Flores-Borges, D. N., Bittencourt, P. R., Mayer, J. L., Kiyota, E., Araújo, P., ... & Mazzafera, P. (2018). Infrared nanospectroscopy reveals the chemical nature of pit membranes in water-conducting cells of the plant xylem. *Plant physiology*, 177(4), 1629-1638.

Capítulo 3: PARÁMETROS ANATÓMICOS QUE CONTROLAN EL FLUJO SIMULADO EN UNA CONÍFERA

Partiendo de hipótesis simplificadoras, como el estudio de flujo de régimen laminar, monofásico, libre de tensiones capilares, en un medio indeformable, es posible obtener el gradiente de presión local en cada punto (x,y,z) en un momento específico, lo cual puede proyectar espacialmente la dinámica del fluido para su visualización y análisis a nivel de celda básica del xilema. Sin embargo, la interconectividad de los lúmenes celulares podría influir drásticamente el paso del flujo (Hacke et al, 2015) y analizar las distintas ramificaciones de estas constricciones, puede resultar en una difícil tarea de visualización espacial, debido a la alta similitud entre las ramificaciones y el lumen celular durante la proyección, diferencias entre su resolución, pero también por la precisión requerida del proceso de segmentación.

En este capítulo se utilizó la extracción de la cadena de voxeles central (esqueletonización), en la cual se calcula el mapa de distancias mínimas de todo voxel a voxel del contorno más cercano, posteriormente se realiza el adelgazamiento de los voxeles y la distancia es utilizada para la secuencia de nodos y segmentos que forman el objeto de gráfico espacial (3D), obtenido como la reconstrucción del sistema completo que podría emplear el flujo masivo en la celda del xilema. Así mismo, es necesaria la diferenciación de las capas de la pared celular de la madera con los depósitos adheridos a la pared, para el análisis de obstrucción de flujo por depósitos. Aquí se utilizó el nivel de brillo en la escala de gris de los voxeles para la diferenciación.

Para conocer la influencia y establecer la relación de las variables independientes sobre la variable de interés, en este caso la permeabilidad, se obtuvieron los modelos de regresiones lineal simples y múltiples. Esto también se realizó con la finalidad de poder dar validez a los parámetros utilizados en la presente investigación, en las etapas posteriores.

3.1 Preparación del material

La muestra utilizada para este estudio fue colectada de un árbol de *Pinus devoniana* con fuste recto, en un terreno con 5 % de pendiente ubicado en la localidad de Rio Bello municipio de Morelia, Michoacán, México, latitud 19°38'51"N y longitud 101°8'3"W y una altitud de 2,058 mmm, con una temperatura media anual de 15.7 °C y lluvias 98.7 días/año de 0.04 in. El árbol tiene una altura de 20 m y un diámetro a la altura del pecho de 75 cm. El material de estudio se

extrajo a 1.30 m sobre la base del tallo del árbol. Se retiró el floema externo e interno del área y posteriormente se inició la perforación a partir del xilema, dentro de la zona de albura (fig.1a), se utilizaron sacabocados de 5 y 2 cm de diámetro interno para la perforación (fig. 1b,1c). Los cilindros se secaron hasta alcanzar la humedad de equilibrio del 12 % de manera natural al interior de laboratorio. Posteriormente los cilindros se tornearon a navaja para adquirir las probetas para tomografía a 1 y 4 mm de diámetro, con el objetivo de adquirir imágenes en 3D con una resolución de píxeles de 1 y 4 μm .

La adquisición de imágenes en 3D se realizó con un equipo de tomografía Xradia Zeiss Versa 510 con una fuente de rayos X de alta energía (30-160 kV, 10 W). Para obtener la atenuación del haz de rayos X a través del material, la muestra se colocó entre la fuente del haz y el detector CCD, y el tamaño del vóxel se ajustó. Se usó un voltaje de 40 kV y se tomaron 1600 radiografías a un desplazamiento angular de $0,225^\circ$ alrededor de la muestra, con un tiempo de exposición de 6 s por disparo.

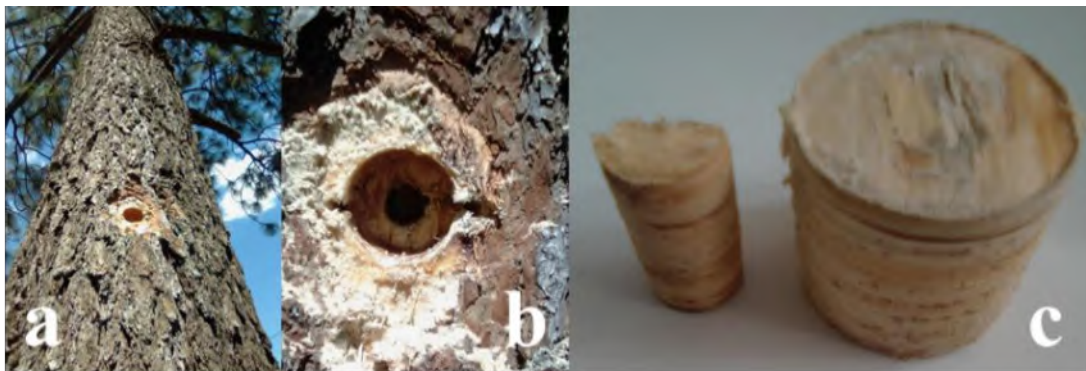


Figura 1: Preparación de material: a) Árbol de *Pinus devoniana* utilizado, b) Extracción de muestras, c) Probetas utilizadas para el estudio.

3.2 Procesamiento de imágenes 3D

Para el post tratamiento de los datos de los voxeles se importó la imagen reconstruida a los softwares especializados Fiji y AVIZO™. Debido a que la imagen se adquirió en 16 bits por la capacidad de la cámara CCD de rango dinámico de 65535 niveles de gris, se procedió a convertirla a 8 bits con 256 niveles, para reducir el consumo de datos por el archivo procesado.

Posteriormente se intensificó el brillo y contraste entre los distintos niveles de intensidad de la imagen únicamente para visualización, no para realizar mediciones en la imagen. Con esta técnica es posible recalcular el valor del vóxel, estirando los valores máximos y mínimos de intensidad de la imagen para que abarque el máximo rango dinámico posible (0-255) definido por la imagen activa (8-bit). El histograma de la imagen adopta convenientemente una distribución más homogénea al intensificar los contrastes y se reparte en todo el rango de valores (Fig. 2d, 2e, 2f).

Los cortes virtuales se realizaron orientados en la dirección tangencial, radial y longitudinal a los anillos de crecimiento de la madera (Fig. 2d, 2e, 2f), esta orientación se hizo con la rotación angular sobre los ejes x, y, z de la imagen.

Las regiones de interés para los cortes virtuales se seleccionaron en base al tejido celular, con la ayuda de los cortes ortogonales del volumen analizado. Los cortes se efectuaron con la extracción del subvolumen de vóxeles seleccionados.

La segmentación virtual de las fase sólida y porosa en madera, se realizó por binarización de la imagen filtrada (Fig. 2c). En la binarización se asigna el valor cero a los píxeles con valor fuera de un umbral seleccionado y valor uno a los umbralizados. Debido a que la imagen presenta bien definidos los bordes en los objetos, fue suficiente umbralizar por el método global basado en histograma de intensidad de brillo, seleccionando únicamente los valores correspondientes a la pared celular, para separarla del fondo o porosidad (Fig. 2c). Los métodos por histograma no consideran operaciones en la vecindad de los vóxeles, únicamente la separación de intensidades. Las fases segmentadas de espacios en el tejido, fueron utilizadas para las simulaciones de permeabilidad.

Para la reconstrucción de la continuidad de las cavidades celulares y espacios intercelulares, se utilizó la imagen binaria correspondiente a estas fases para extraer la superficie esqueleto o la cadena de vóxeles central, este conjunto de vóxeles conectados separan equidistantemente los bordes de los objetos y se obtiene calculando un mapa de distancia de la imagen y el adelgazamiento de la misma. Posteriormente la cadena de vóxeles se convierte en un objeto gráfico espacial que conserva en cada uno de sus puntos la información del mapa de distancia al límite más cercano, el cual será utilizado en la reconstrucción de la continuidad de los espacios. Para verificar que la sensibilidad intrínseca del mapa no hubiere alterado las ramificaciones de la

cadena de vóxeles, se realizó únicamente una inspección visual a través del ensamblaje entre las imágenes reconstruidas de continuidad y pared celular, omitiendo así el proceso de comparación de número de componentes.

En la imagen de madera con tejido temprano y tardío, se eligió la región de interés (Fig. 2g) y se realizó el corte virtual para su tratamiento y análisis. La región de interés de madera con tejido temprano y tardío, se realizó con el corte virtual orientado radialmente sobre la zona de transición del anillo de crecimiento.

Para realizar las imágenes de la anatomía del xilema se asignaron colores a las capas de la pared celular de la madera en base al nivel de brillo en la escala de grises de cada voxel (Fig. 2h).

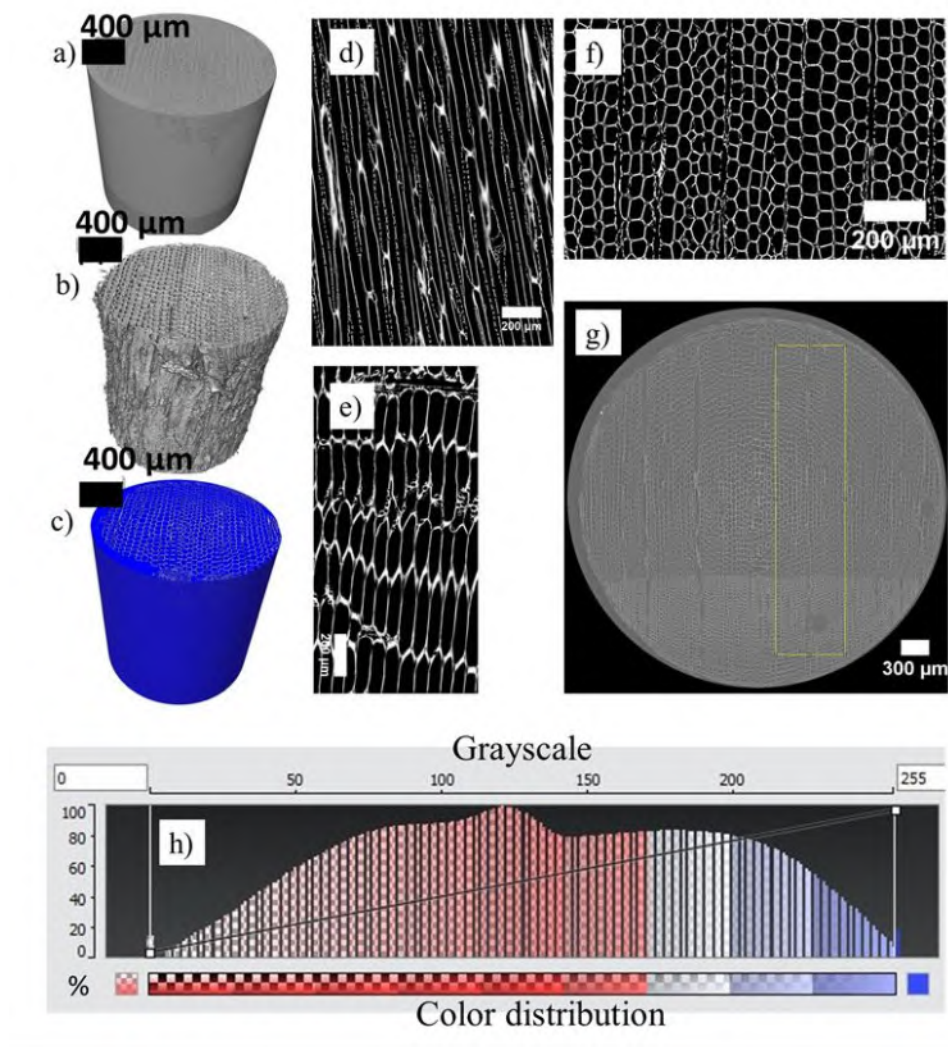


Figure 2: Tratamiento de imágenes TC: a) Imagen inicial de *pinus devoniana*, b) 3D de imagen inicial filtrada

c) Imagen binaria, d) Corte tangencial, e) Corte radial, f) Corte transversal, g) ROI imagen con vóxel de 4 μm , h) Distribución de color.

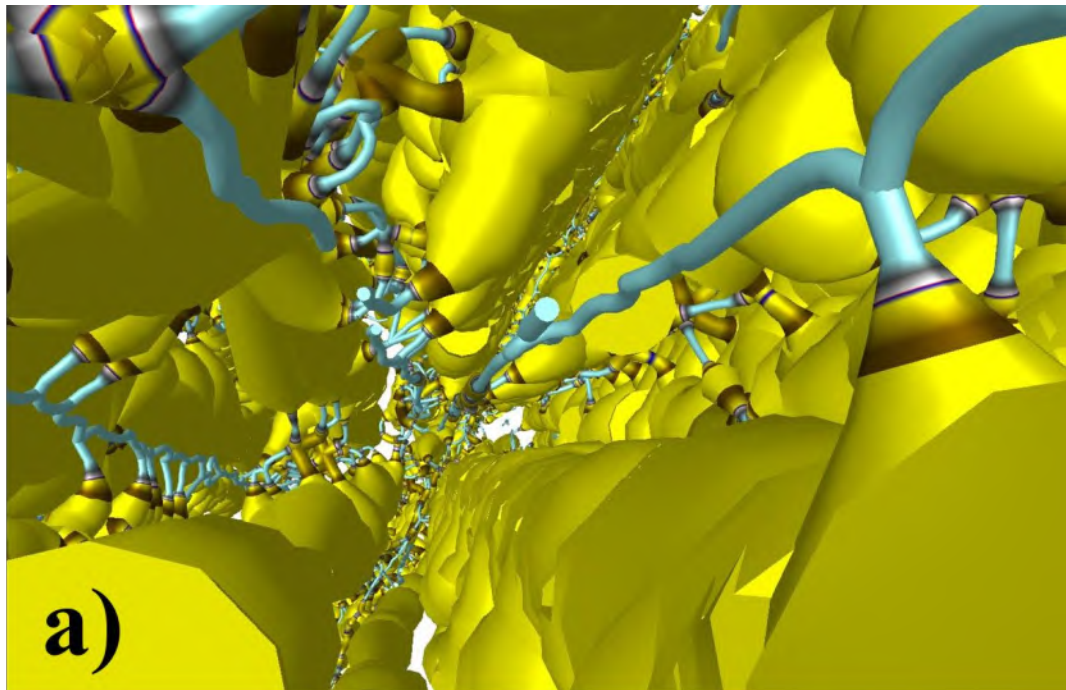
3.3 Simulación numérica de permeabilidad

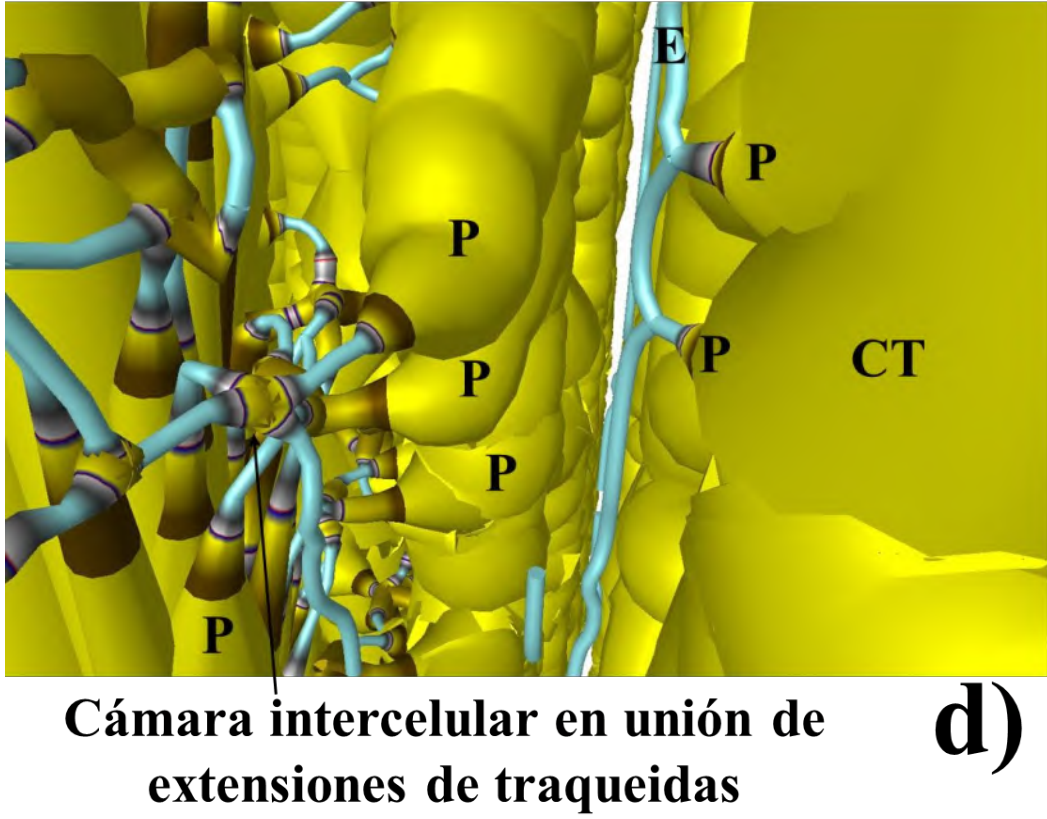
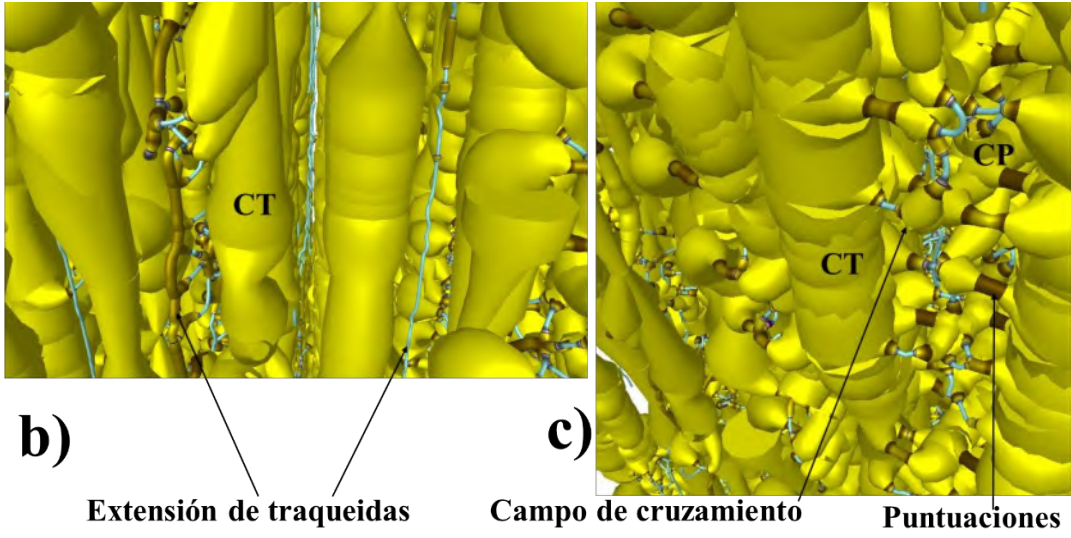
Para las simulaciones numéricas de flujo se utilizaron las imágenes tridimensionales binarias, donde la pared celular determinó las condiciones de frontera para el dominio computacional. En el módulo de simulación de flujo del software AVIZO™ se realizaron las simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics). En las hipótesis simplificadoras se estableció un flujo de régimen laminar, monofásico, incompresible, un medio indeformable, libre de tensiones capilares. En la configuración experimental se mantuvo el mismo caudal en la entrada y la salida, con un diferencial de presión de 50000 Pa, viscosidad del fluido de 0.001 Pa.s y un criterio de convergencia de 0.0001. Las simulaciones fueron realizadas en dirección radial, tangencial y longitudinal, en la dirección inactiva el módulo del software sella las caras con una capa de voxels para evitar el flujo en esa dirección. Las líneas de flujo se observaron comparando las velocidades en las tres direcciones, utilizando para ello un mismo rango de velocidades de referencia comparativa.

3.4 Análisis de las ramificaciones del lumen

Podemos observar claramente la reconstrucción de lo que aparentan ser espacios intercelulares (color azul) conectados a las cavidades de traqueidas a través de las cámaras de las puntuaciones (Fig. 3). Los espacios en azul son en realidad extensiones de las traqueidas o de los radios. Las extensiones conforman un sistema de canal continuo en orientación longitudinal, de aquí se desprenden canales del mismo diámetro individualizados y conectados a las cámaras con mayor diámetro de las puntuaciones ciegas, análogo a conexiones en paralelo (Fig. 3a). Ocasionalmente existen tramos de extensiones con ensanchamiento (color café) orientados longitudinalmente (Fig. 3b). En los campos de cruzamiento, las puntuaciones simples corresponden a los conductos en color café de mayor diámetro, sin embargo, también existe conexión (semiareoladas) entre traqueidas y células de parénquima o traqueidas radiales a través de segmentos de espacio intercelular (Fig. 3c). En las puntuaciones ciegas cercanas a las extremidades de las traqueidas el conducto continúa a través de las extensiones a la traqueida superior adjunta, cuando se forman

cúmulos de traqueida adjuntas, las extensiones en sus extremos continúan para unirse en una sola cámara, desde aquí se distribuye hacia puntuaciones ciegas de la siguiente traqueida superior adjunta (Fig. 3d). Incluso, en el canal de unión entre solo dos traqueidas, también forma una cámara en el centro del enlace. Esto puede ser evidencia del efecto de altas presiones concentradas en estos puntos (presión perpendicular en superficie de traqueida) cuando el fluido se desplaza durante el ascenso por transpiración entre traqueidas adyacentes, debido a la conservación de la continuidad en la dinámica de fluidos. En la reconstrucción de la continuidad de las cavidades celulares y sus extensiones no se generaron ramificaciones inexistentes, producto de la sensibilidad del mapa de distancia (Fig. 3e). Las ramificaciones son congruentes con la estructura celular. En el lumen se encuentran pequeños restos de depósitos los cuales son detectados como condiciones de frontera por el mapa de distancia, por este motivo en estos puntos aparece el lumen sin rellenar (Fig. 3f). Sin embargo, no es un obstáculo para dar lectura a la continuidad de las cavidades y sus extensiones. Los resultados muestran que las extensiones o puntas afiladas conforman una red intercomunicada con las puntuaciones ciegas a lo largo de las traqueidas. Por lo tanto, dicha red queda interconectada con las cavidades celulares de las traqueidas (CT) y las cavidades del parénquima radial (CP), como lo muestra la figura 3c.





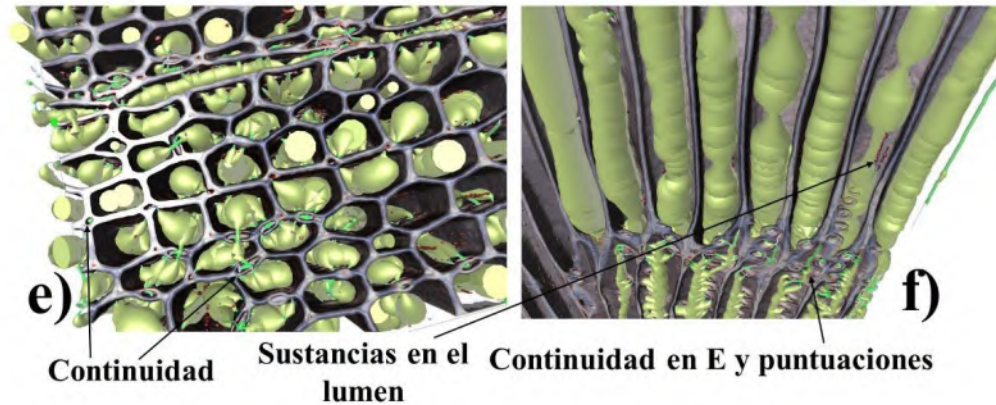


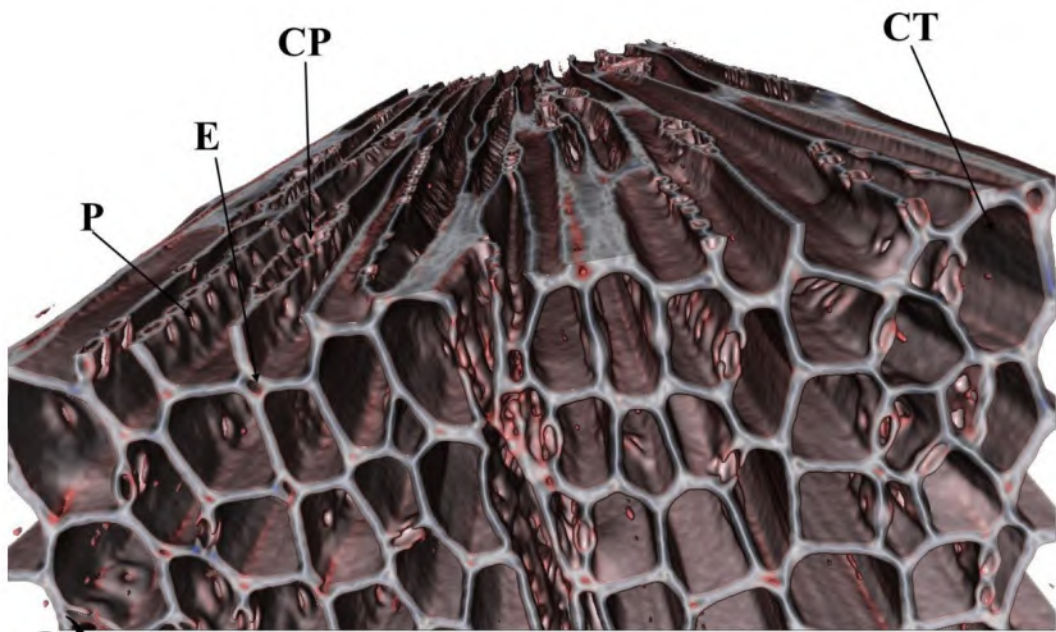
Figura 3: Reconstrucción de continuidad de las cavidades celulares, espacios y extensiones celulares en microestructura de madera de *Pinus devoniana* imágenes TC: a) Continuidad entre lumen, puntuación, espacios de extensiones y cámaras de extensiones, b) Tipos de extensiones, c) Continuidad en campos de cruzamiento, d) Cámaras entre espacios de extensiones, e) Comprobación de las ramificaciones en microestructura transversal, f) Comprobación de las ramificaciones en microestructura de zona de traslape de traqueidas; Cavidad de parénquima (CP), extensión (E), cavidad de traqueida (CT), puntuación (P).

3.5 Análisis de la microestructura de la madera

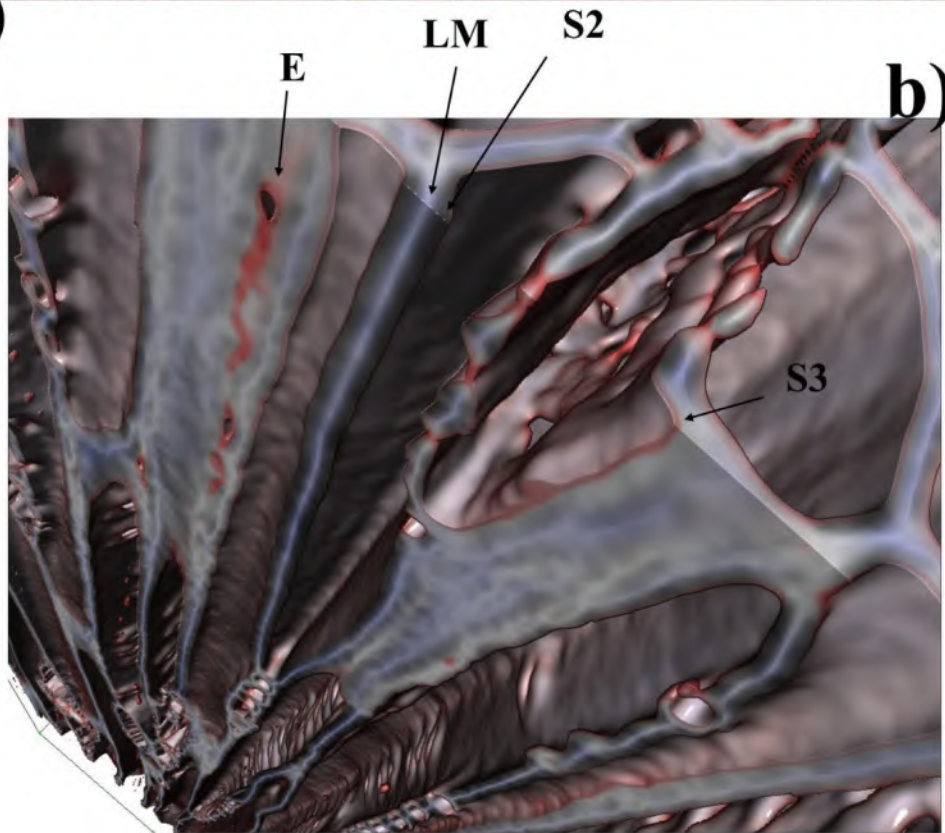
La imagen de tomografía de la madera de *Pinus devoniana* se obtuvo con suficiente definición para realizar las simulaciones numéricas del flujo masivo en sus cavidades celulares y extensiones (Fig. 4a). Debido a la posible obstrucción con membranas en las puntuaciones areoladas, se asume como una condición de máximo flujo en estos puntos, es decir, la presencia de membranas o bloqueos, forzaría aún más a fluir el flujo a través de las puntuaciones ciegas, extensiones celulares o a través de puntuaciones simples en el parénquima. En las simulaciones no se integraron las propiedades químicas del tejido, por este motivo se asume que el valor absoluto del potencial de presión del fluido debe ser mayor que la suma algebraica del potencial de fuerzas capilares, potencial gravitatorio y potencial osmótico (flujo por difusión en las membranas), esta condición de energía libre del agua, debe cumplirse para que suceda la transpiración con altas tasas de flujo (flujo masivo).

En la figura 4a, observamos el contorno del lumen en traqueidas, el cual no se presenta redondeado, esto muestra que el tejido leñoso no es de compresión. Lo cual es congruente, ya que la muestra de madera en estudio procede de un árbol con fuste recto y de terreno con poca

pendiente (5 %). Sin embargo, los espacios observados entre las esquinas de los vórtices de traqueidas (Fig. 4a) son en realidad el final de los extremos de las traqueidas (extensiones) con puntas afiladas o extensiones entre radios alineados. En un corte paralelo a lo largo de una de estas extensiones (E) se puede observar que está rodeado por depósitos, identificados en color rosa intenso (Fig. 4a, 4b), mismos que en muy pocas ocasiones obstruye el espacio transversalmente (Fig. 4a), ya que un dato importante observado es que las sustancias se adhieren a la superficie de la extensión rodeada de lamela media (LM), dejando el centro libre al paso de fluidos. El poro lateral observado en el corte a la extensión de la figura 4a, en realidad corresponde a que la profundidad del corte virtual dejó al descubierto el centro de la extensión por la inclinación de la traqueida. Se logró diferenciar la sustancia adherida a la extensión del resto de las capas de la pared celular mostradas en la figura 4b, debido a la separación virtual de componentes empleada en la presente investigación. En esta imagen (Fig. 4b) se observa la lamela media LM en color blanco uniendo las paredes celulares, en colores gris la capa S2, la capa S3 en color rosa claro y la sustancia adherida a la LM en color rosa intenso. La capa primaria poco visible, probablemente correspondería al color gris tenue unido al blanco (Fig. 4b). La rugosidad de la superficie de la pared celular también se observa presente para efecto de las simulaciones en las figuras (4c) y las extensiones interconectadas (Fig. 4c, 4d).



a)



b)

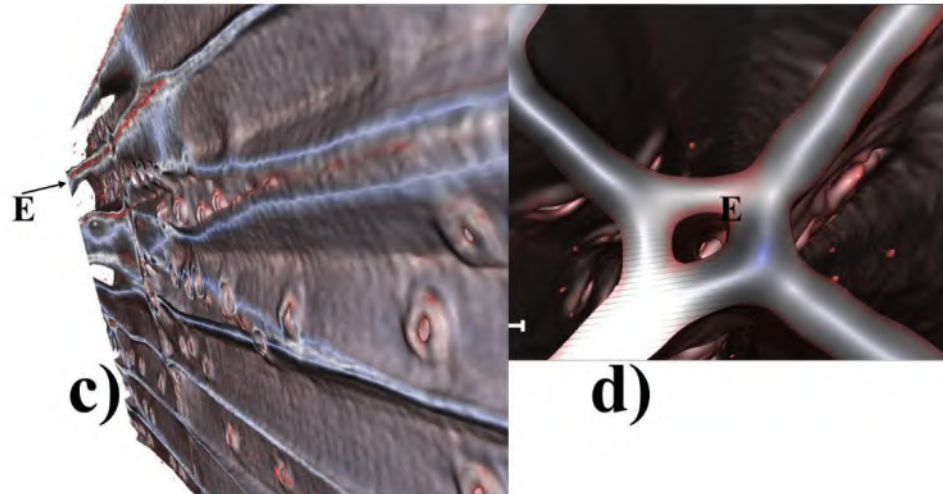


Figure 4: Microestructura de madera de *Pinus devoniana* imágenes TC: a) Cavidades celulares en la microestructura, b) Capas de la pared celular de *Pinus devoniana* identificadas con TC, c) Conectividad de extensiones y rugosidad de pared, d) Extensión en esquina de traqueidas; Lamela media (LM), extensión (E), capa de la madera (S2) y (S3), cavidad de parénquima (CP), cavidad de traqueida (CT), puntuación (P).

3.6 Análisis de gradientes de presión

Las presiones en el flujo longitudinal (animación 1), presentan un gradiente aproximadamente similar en los distintos diámetros de los lúmenes, esto corresponde a la caída de presión cuando el fluido ya se encuentra dentro de las traqueidas, es decir, se observa la presión máxima (color rojo), aplicada directamente en el interior de los lúmenes seccionados transversalmente. De forma general, el gradiente es similar en diámetros mayores en este gráfico. En el primer acercamiento del corte virtual (animación 1), se observa la presión en un lumen no seccionado (completo) de traqueida a diferente altura, el cual presenta un gradiente distinto, prematuro y abrupto, esto se debe a la fuerte caída de presión cuando el fluido ingresa de una traqueida a otra. Este comportamiento de la presión, en realidad representa el comportamiento típico y común en todas las traqueidas cuando el fluido se desplaza entre estas a través de puntuaciones, como lo muestra la animación 1. Esta fuerte reducción de potencial de presión se observa como un cambio a la escala en color azul (animación 1). También se observa la propagación de la presión entre el lumen de esta traqueida y el espacio de una extensión adjunta, en la parte inferior. Posteriormente se muestra el desarrollo de las presiones durante el flujo de fluido (animación 1), se observa la rápida caída de presión de una traqueida completa que recibe máxima presión en el extremo

superior, confirmando el comportamiento típico de la presión en traqueidas, la cual es incrementada o restablecida cuando se continúa aplicando presión desde el exterior del sistema. Esto finalmente se observa en la parte central del volumen, como el establecimiento de una presión con valores medios (animación 1). Lo que correspondería a suministrar fluido a presión constante desde la raíz al xilema activo, un hecho difícil de sustentar en la práctica de la transpiración. Las puntuaciones al igual que los radios comparten las mismas presiones que el lumen de traqueidas, en cada caso específico, esto es debido a que la simulación de flujo es en dirección longitudinal (animación 1).

["E:\PINO\vidios\longitu\VIDIO 1.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

En el desplazamiento a través del gradiente de presión longitudinal (animación 2), se observa que este cambia aproximadamente igual en traqueidas axiales o radiales, células epiteliales, canal resinífero y en células de parénquima, estas últimas con poca diferencia (Fig. 5a). Esta igualdad, muestra que las distintas células comparten entre sí, el gradiente de presión en el flujo longitudinal (animación 2). Por el contrario, en los espacios de las extensiones se mantiene aproximadamente constante de principio a fin (animación 2), con un valor medio respecto del diferencial de presión aplicado al sistema, como resultado de menor pérdida de presión en estos espacios y demostrando eficacia de flujo. Aun cuando estos reducidos conductos representen un obstáculo para mantener el caudal, aquí el flujo presenta menor diferencial de presión respecto la presión de salida del sistema. Esto lo hace menos propenso a generar resistencia al desplazamiento del fluido, ya que, de acuerdo a la presión desarrollada, mantiene aproximadamente constante la energía libre. Lo que muestran estos resultados principalmente es mayor pérdida de presión en lúmenes y en las puntuaciones, y menor en los espacios de las extensiones de traqueidas o de radios (animación 2). Facilitando que el flujo elija las extensiones, sobre todo si la presión entre lúmenes adyacentes es similar, como se muestra más adelante en el texto y si la puntuación tiene membrana. Por otra parte, en estas extensiones el potencial por capilaridad tendría menor efecto en la retención del fluido, debido al reducido diámetro, sumando más energía libre. La animación 3, muestra inicialmente una condición de baja presión que corresponde a una situación análoga en la cual, el xilema activo ha perdido el potencial de presión e inicia la recarga, análogo al horario nocturno de baja transpiración en el árbol. En la simulación se observa el desarrollo de las presiones en aumento y desplazamiento progresivo dentro de las

células de traqueida (animación 3). Sin embargo, es posible destacar que cuando la presión llega al final de la traqueida, justo en la zona donde se localizan las últimas puntuaciones ciegas interconectadas con el espacio de las extensiones de la traqueida, la presión del fluido se desplaza por el interior de la extensión antes de ingresar a la siguiente traqueida superior adjunta (animación 3). La consecuencia de este fenómeno de flujo es como lo muestra la animación 3, la aparición instantánea de presión en las extensiones del siguiente grupo de traqueidas superiores adjuntas. Esto es debido a la velocidad superior en estos espacios, pero principalmente porque las extensiones conforman un sistema abierto de conducción (flujo líquido masivo) y las traqueidas un sistema separado por membranas (flujo líquido por difusión). El desplazamiento de presión hacia el interior de las siguientes traqueidas en posición superior, inicia con la redistribución del fluido masivo mediante las cámaras que interconectan las extensiones de distintas traqueidas, mostradas en la figura 3. Este hecho es muy relevante, ya que muestra que, en condiciones de baja presión o presión negativa, el flujo estaría siendo suministrado a través de las extensiones en cada traqueida o radio y con esto, el alivio a la cavitación dentro de los lúmenes, independientemente de la presión negativa dentro de los lúmenes generada por los solutos (animación 3). A medida que avanza y se incrementa la presión, también es posible observar que, en un sistema de baja presión, es mayor la presión en las extensiones respecto de los lúmenes, después de haber ingresado la presión dentro del lumen (animación 3). Posteriormente, se llega a una condición de alta presión, análogo al horario diurno en un árbol con xilema activo recargado, donde la radiación solar inicia el proceso de transpiración y el estrés hídrico. Aquí observamos el efecto inverso, es decir que, a medida que va disminuyendo la presión y se va formando la presión negativa en los lúmenes, en el espacio de las extensiones permanece un estado de alta presión, esto sucede antes de pasar a las traqueidas inferiores adjuntas y debido a la diferencia entre el diámetro de la extensión y los lúmenes, ya que la presión negativa se aplicó directamente dentro de los lúmenes seccionados (animación 3). Sin embargo, cuando la baja presión pasa de las traqueidas anteriores a las posteriores a través de las cámaras unidas a las extensiones, nuevamente se presenta el fenómeno de flujo (animación 3). Es en la extensión en donde se presenta primero la baja presión (animación 3). Esto confirma que es a través de la extensión por donde el fluido inicia el desplazamiento en un sistema de alta presión. Es decir, en un sistema de alta presión la extensión funciona como un sistema de baja presión, el cual succionara el fluido de los lúmenes, amplificando las probabilidades de cavitación dentro de

los lúmenes (animación 3). Finalmente, el desplazamiento a través del volumen, muestra que este fenómeno es similar en todo el tejido analizado (animación 3). El comportamiento de la presión, cuando cruza de una traqueida inferior a una superior a través de las cámaras y extensiones conectadas a las puntuaciones ciegas de las traqueidas, es en realidad el comúnmente presentado en las traqueidas completas.

["E:\PINO\videos\longitu\2parte\VIDIO 2.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

["E:\PINO\videos\longitu\3parte\VIDIO 3.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

El desarrollo de la presión en dirección radial muestra claramente el gradiente de presión a medida que el flujo se desplaza en dirección longitudinal para poder pasar a través de las puntuaciones en dirección radial en cualquier tipo de célula (animación 4). En el acercamiento se muestra claramente el gradiente más pronunciado al pasar del lumen a la cámara de la puntuación y la salida de la puntuación con una gran caída de presión en el siguiente lumen, en cualquier tipo de células incluidos los radios (animación 4). Posteriormente en el desplazamiento en el volumen, se observa a las extensiones mantener aproximadamente una presión media respecto del diferencial de presión aplicado, al igual que se mantuvo en dirección longitudinal (animación 4). El gradiente en células axiales y transversales es muy similar, comparten prácticamente la misma presión, con gradientes pronunciados al pasar de una célula de parénquima radial a la siguiente (animación 4). Incluso la influencia de las 2 células epiteliales y el canal resinífero sobre el gradiente radial en células axiales (Fig. 5b), es tal que, se observa una diagonal en el gradiente de las traqueidas, siendo más pronunciado a medida que se aleja del canal resinífero radial (animación 4). Finalmente, en la condición de baja y alta presión se observa cómo el comportamiento del gradiente de presión en las extensiones es similar que su comportamiento en el flujo longitudinal (animación 4).

["E:\PINO\videos\radial\VIDIO 4.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

En dirección tangencial, el gradiente de presión desarrollado es menos pronunciado que en otras direcciones, como resultado de la menor cantidad de puntuaciones en las caras radiales de las traqueidas y porque el flujo es básicamente a través de las puntuaciones semiareoladas en los campos de cruzamiento, conservando un poco más la energía libre del fluido en esta dirección (animación 5). Posteriormente en el desplazamiento en el volumen (Fig. 5c), se observa a las

extensiones mantener una presión media respecto del diferencial aplicado, al igual que en dirección radial y longitudinal (animación 5). Sin embargo, en la condición de baja y alta presión no se observa el fenómeno de presión en las extensiones presentados en dirección radial y longitudinal (animación 5). Esto se debe probablemente a que, en esta dirección no se localizan las puntuaciones ciegas interconectadas con las extensiones.

"E:\PINO\vidios\tange\VIDIO 5.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367

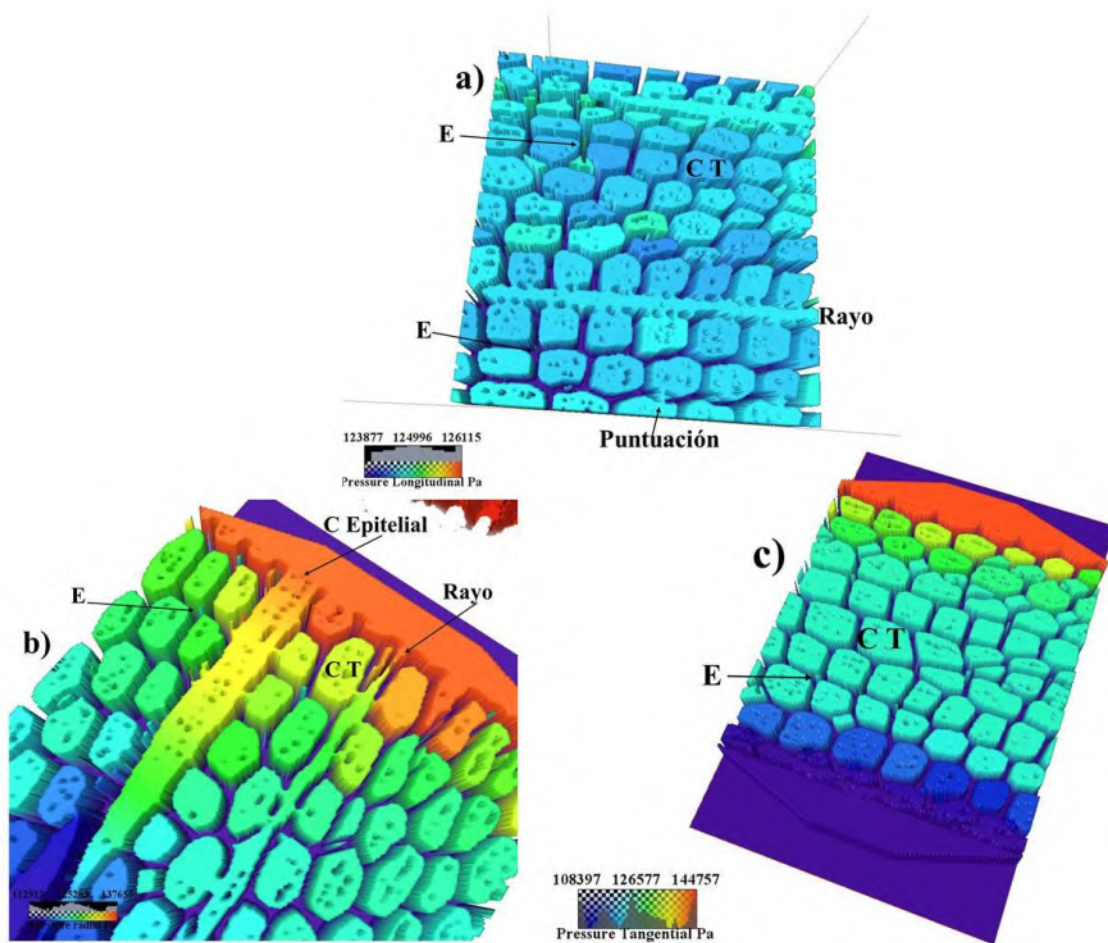


Figura 5: Gráficos de presión en microestructura de madera de *Pinus devoniana* imágenes TC: a) Gradiente de presión en dirección de flujo longitudinal, b) Gradiente de presión en dirección de flujo radial, c) Gradiente de presión en dirección de flujo tangencial; Célula (C), extensión (E), cavidad de traqueida (CT).

Las extensiones observadas en esta especie, corresponden a las puntas de traqueidas o espacios

en los radios (Animación 6). La línea azul es un corte ortogonal sobre las extensiones (Animación 6), el acercamiento muestra las cavidades de puntuaciones ciegas en dos lúmenes de traqueida opuestas conectadas en el fondo con el espacio de la extensión de una tercera traqueida. Posteriormente el segundo acercamiento (animación6), le da seguimiento a una extensión de una traqueida, mostrando que tiene continuidad y conexión directa con la siguiente traqueida (extremo no sellado), visible en color negro en el extremo de la traqueida. La segunda etapa de la animación muestra al espacio intercelular uniendo las extremidades (superior - inferior) de más de 2 radios (Animación 6). En el desplazamiento a través de los radios en dirección radial, se observa periódicamente este tipo de conexión, cada vez que el radio interseca a la extensión de una traqueida axial, debido a que las extensiones de las traqueidas se conectan con los radios, es decir, se encuentran alineados e interconectados longitudinalmente formando un solo sistema (Animación 6).

["E:\PINO\videos\VIDIO 6.mpg": DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

No obstante, cuando la traqueida tiene el extremo comúnmente sellado, esta tiene una conexión a pequeñas cámaras (mostradas anteriormente) en los extremos (animación 7), la cual puede estar sellada o conectada a traqueidas o radios (animación 7). Esto lo podemos corroborar con el desarrollo de la presión (Animación 8), en el acercamiento a una puntuación conectada a una pequeña cámara y a su vez, a una pequeña extensión, el cual interconecta a los extremos laterales de dos lúmenes de traqueidas adyacentes inferiores y superior (Animación 8). Dando seguimiento a este mismo lumen superior (animación 9), observamos en el extremo de la traqueida, que las líneas de flujo entran en estos espacios en los extremos, sin desviarse fuera del lumen en los pares de puntuaciones que encuentra en su trayectoria previa al extremo. Como lo muestran los gráficos de presión (animaciones 9), esto se debe a que la presión entre traqueidas vecinas es similar, evitando flujo lateral, reforzando el hecho del diferencial de presión que existe entre los pares de puntuaciones y los espacios de extensiones que interconectan traqueidas y/o radios medulares.

["E:\PINO\videos\VIDIO 7.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

["E:\PINO\videos\longitu\4parte\VIDIO 8.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

["E:\PINO\videos\longitu\4parte\VIDIO 9.mpg": DOI: 10.5281/zenodo.12775367](#)

En la simulación del tejido que contiene traqueidas completas en su interior, en madera temprana y tardía (Fig. 6), las líneas de flujo se observan con un comportamiento característico de pérdida de velocidad a mayor desplazamiento longitudinal, debido a la interacción con el tejido de células seccionadas transversalmente (Animación 10). El rango de velocidades obtenido en la simulación fue mostrando originalmente en líneas de flujo lentas de color morado en todo el tejido. Por este motivo, se recurrió a disminuir el rango de velocidades para poder sensibilizar y mostrar gráficamente las diferencias de velocidad entre tejidos (Animación 10). En general, la trayectoria del flujo se observa por el tejido con menores obstáculos (células abiertas al exterior), lo cual se refleja como poco flujo a través de las puntuaciones y poco flujo en sitios con traqueidas completas, como en la madera tardía (Animación 10). En el primer acercamiento (Animación 10), se muestran las líneas de flujo llegar a un grupo de lúmenes con depósitos. Posteriormente en el segundo acercamiento, se le da seguimiento a un par de traqueidas completas que inician en forma de pequeño lumen y terminan de igual forma (Animación 10). Al enfocar las líneas de flujo desde la parte superior de los depósitos y las traqueidas completas, se observa la falta de líneas de flujo en estos sitios, debido a que el flujo elige el camino fácil de las traqueidas abiertas seccionadas (Animación 10). Sin embargo, en el xilema el flujo estará restringido a pasar entre células y espacios de extensiones, así que el comportamiento es en realidad el mostrado dentro de las traqueidas en el gráfico de la animación 9. Por esta misma causa, el comportamiento de la presión nos proporciona una mayor comprensión de la interacción del flujo. Posteriormente en esta misma animación 10, se muestra el gradiente de presión, iniciando por la salida del sistema (el final) y desplazándose hacia la entrada. Tomando como punto de referencia el mayor diámetro del canal resinífero axial, es posible observar en la entrada del sistema que el gradiente de presión (pérdida) se presenta a medida que se va incrementando el diámetro de los conductos (Animación 10). Esto puede ser explicado porque el fluido en los diámetros menores tiene menor masa, por lo tanto, la mayor masa en diámetros mayores les da mayor potencial de presión al inicio. Sin embargo, la pérdida de potencial de presión es inversa, cuanto más pequeño es el diámetro del conducto menor pérdida de potencial de presión se tiene. En el gráfico de presión esto se observa claramente en el desplazamiento hacia la salida del sistema, las traqueidas de menor diámetro en madera tardía, las traqueidas menores en madera temprana en el extremo visible del anillo de crecimiento y los espacios de los extremos, son los que conservan mayor presión a más distancia, confirmando que los espacios en extensiones de conexión son los que conservan a mayor

distancia el potencial de presión (Animación 10). El efecto en el canal resinífero axial de mayor diámetro es una pérdida de presión retardada en la entrada del sistema y una pérdida de presión mucho más pronunciada con el desplazamiento que el resto de los elementos del xilema, debido al mayor consumo de potencial de presión que requiere un diámetro mayor para el desplazamiento del fluido (Animación 10). Este comportamiento, demuestra que el flujo hacia la parte superior del árbol en el lumen de las traqueidas, requerirá mayor potencial de presión que en los espacios de extensiones. Consecuentemente, la cavitación no necesariamente se presentará en el flujo dentro de las extensiones con mayor potencial de presión. El comportamiento en este gráfico (Animación 10) es similar al presentado en los gráficos de mayor resolución (Animación 2) en un volumen más pequeño.

"E:\PINO\PINO4.06\vidio\VIDIO 10.mpg" DOI: 10.5281/zenodo.12775367

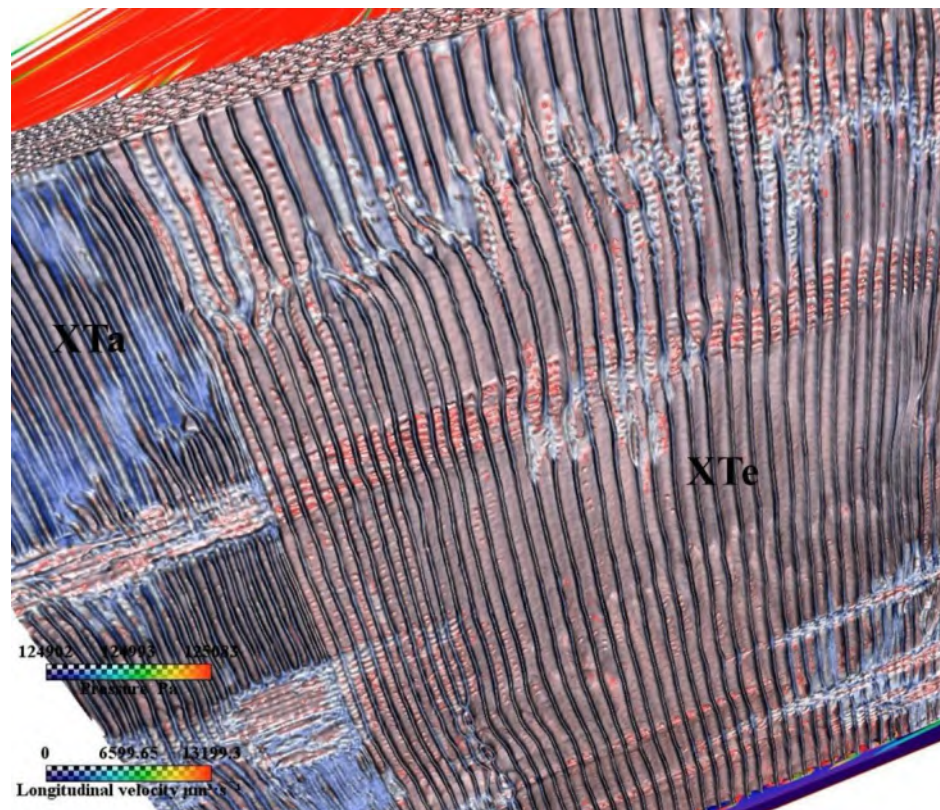


Figura 6: Microestructura de madera de *Pinus devoniana* en imágenes TC con vóxel de 4 μm. Xilema tardío (XTa), Xilema temprano (XTe).

El flujo en dirección radial, muestra menor dificultad de desplazamiento a través de las células de radio (Fig. 7a). Sin embargo, también se observa alta dependencia de desplazamientos longitudinales (Fig. 7a) que cruzan con mayor dificultad a través de los pares de puntuaciones de traqueidas en la cara radial y en la cara tangencial.

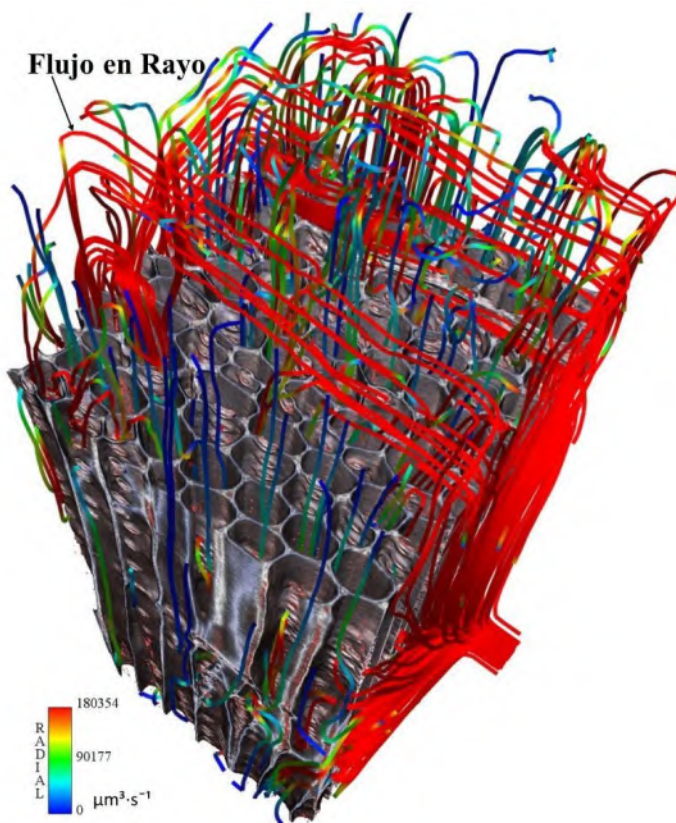


Figura 7: Flujo radial en microestructura de madera de *Pinus devoniana* imágenes TC.

En dirección tangencial, el flujo se presenta por los pares de puntuaciones (Fig. 8 a, b) y continúa longitudinalmente por el lumen de las traqueidas. Cuando encuentra un campo de cruzamiento entonces continúa tangencialmente con poca dificultad al cruce con células del rayo (Fig. 8 a, b). Aquí las puntuaciones funcionan como vías de escape preferente para el flujo, lo que genera una gran dependencia del flujo a cruzar a través de los pares de puntuaciones, con lo cual se ralentiza el flujo y se complica su trayectoria (Fig. 8 a, b) como en la parte central en color azul de la

imagen. En el tejido también se observa al flujo en el espacio de una extensión en el rayo. Entra por un rayo y en la punta superior del rayo alineada con una extensión, continua su trayectoria por una puntuación de traqueida radial que se une o conduce al espacio de una extensión (Fig. 8b). Es decir, esto es evidencia de que las extensiones pueden funcionar como capilares de succión para el fluido. La periodicidad de las extensiones conectadas y alineadas sobre el radio (en traqueidas radiales y parénquima radial), descrita anteriormente en la animación 6, se puede observar en esta imagen (Fig. 8b), las flechas blancas señalan las líneas de flujo longitudinales, que se desprenden del flujo en el radio periódicamente en los cruces con extensiones de traqueidas.

El flujo tangencial también tiene dificultad para filtrar dentro del canal resinífero y las células epiteliales, se observa evitando estas zonas (Fig. 8b). Esto es debido a la resina que cubre la superficie del canal y falta de conectividad. La reducción de sección en el cruce de las puntuaciones genera la aceleración observada en color rojo en las líneas de flujo, esto debe ser interpretado como puntos de pérdida de potencial de presión. Sin embargo, si la presión del fluido es similar en el lumen de 2 traqueidas adjuntas, el flujo se anula en los pares de puntuaciones y se dirige hacia las puntuaciones ciegas conectadas a las extensiones.

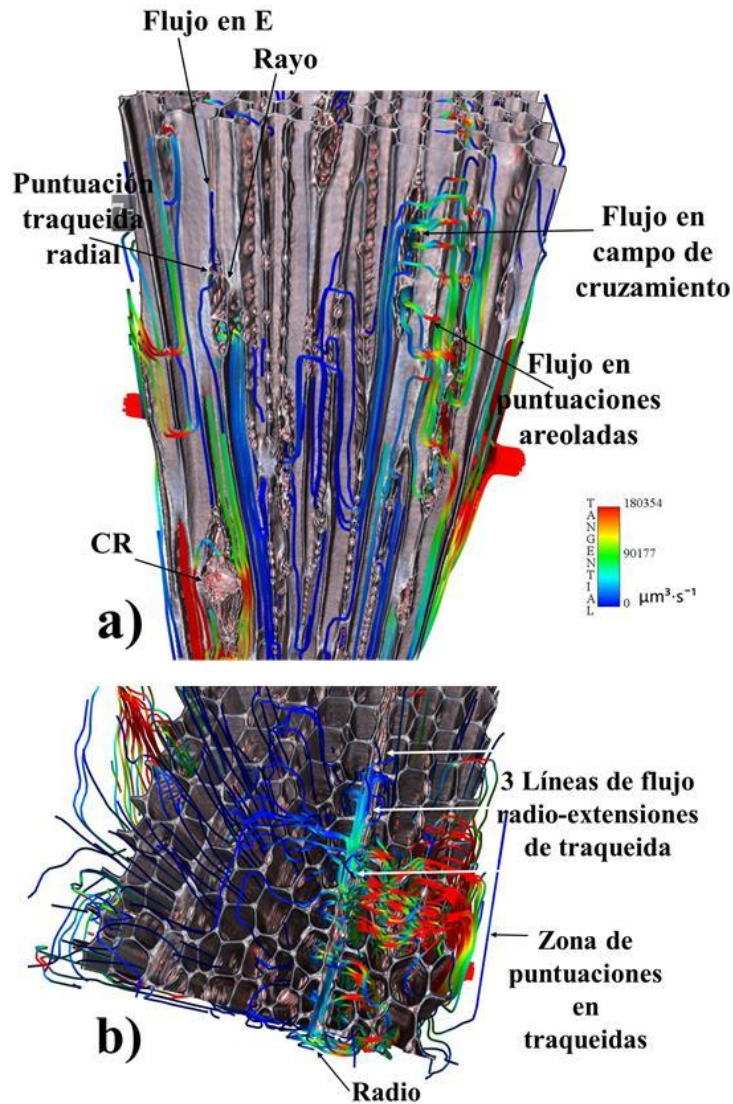


Figura 8: Flujo tangencial en microestructura de madera de *Pinus devoniana* imágenes TC: a) Líneas de flujo en continuación rayo-extensión, b) Flujo periódico en los rayos y extensiones de traqueidas; Canal resinífero (CR), extensión (E).

3.7 Relación de variables

Se tomaron aleatoriamente 12 cortes virtuales distintos de la imagen de tomografía, con secciones y longitudes distintas (cuadro 4), esto a fin de poner a prueba la capacidad de predicción de las variables independientes en condiciones variables de tamaño y forma. Puesto que, se observó gran influencia en el valor de permeabilidad, debido a estas dos variables externas al sistema y como medida de control. Se tomaron 12 cortes virtuales más, de la imagen principal de forma

aleatoria, pero con secciones y longitud similares (cuadro 5). Los valores obtenidos de permeabilidad en dirección longitudinal a los anillos de crecimiento de la madera fueron utilizados en los modelos de regresión y son mostrados en el cuadro 4 y cuadro 5.

Cuadro 4. Simulaciones numéricas de permeabilidad en distintos tamaños de probeta

Número de corte virtual	Dimensión (pixel)	K Longitudinal (μm^2)	K Tangencial (μm^2)	K Radial (μm^2)
1	77x618x907	92	29.52	0.09
2	140x140x932	84.85	0.19	0.46
3	133x133x943	87.69	0.15	0.59
4	153x153x950	70.06	0.17	0.58
5	130x170x967	85.14	0.28	0.23
6	180x180x936	55.10	0.15	0.52
7	200x200x946	57.61	0.14	0.32
8	190x190x951	60.92	0.14	0.45
9	180x178x955	57.28	0.12	0.47
10	234x246x951	55.06	0.18	0.56
11	365x254x254	7.44	0.16	0.60
12	633x40x870	101.47	0.01	31.29

Cuadro 5. Simulaciones numéricas de permeabilidad en un mismo tamaño de probetas

Numero de corte virtual	Dimensión (pixel)	K Longitudinal (μm^2)
1	140x140x800	54.93
2	140x140x800	56.73
3	140x140x800	53.93
4	140x140x800	54.18
5	140x140x800	55.42
6	140x140x800	55.70
7	140x140x800	60.06
8	140x140x800	54.67
9	140x140x800	53.77
10	140x140x800	53.24
11	140x140x800	49.03
12	140x140x800	56.07

Los modelos de regresión simple son mostrados en el cuadro 6, donde se integran las variables primarias y la interacción entre variables secundarias más sobresalientes de las regresiones

realizadas. Entre las variables primarias destacan la superficie promedio del espacio vacío o poro, que de acuerdo con el coeficiente de regresión β tiene una buena relación con la permeabilidad longitudinal (KL) y el coeficiente de determinación R^2 , que explica medianamente los cambios en la KL de manera significativa. La superficie porosa se refiere al promedio de la suma total de la superficie medida en cada corte de la pila de imágenes en dirección longitudinal correspondiente a los voxeles con valor cero en la imagen binaria de cada corte. Este promedio, incluye no únicamente los valores de los lúmenes de traqueidas o fibras, ya que incluye, además, todo espacio vacío dispuesto como sección transversal del conducto que el flujo longitudinal dispone para su trayectoria. Es decir, contempla el promedio de la sección de todos los caminos posibles para KL, y no únicamente el camino más corto. De esta manera, se consideran los valores de las secciones de las cavidades de todo tipo de células y del total de ellas. Esto es importante para el flujo masivo, ya que el desplazamiento de este obedece o se dirige hacia sitios de más baja presión o en su defecto hacia los únicos caminos disponibles por el efecto de un diferencial de presión y no porque el camino sea el más corto.

Como variable primaria, también se destaca la asociación y el porcentaje de explicación que tiene el promedio de la superficie de las puntuaciones del volumen o igualmente la fracción del volumen de las puntuaciones. Para calcular estas dos variables primarias, se incluye el valor de la superficie de las cámaras en las puntuaciones y la superficie de las puntuaciones mismas. Es de llamar la atención que la asociación que tienen con KL es negativa, esto puede ser explicado porque si bien es cierto que las puntuaciones son indispensables para el flujo masivo a través de los elementos celulares, también es cierto que la presencia de gran cantidad de estas implica mayor caída de presión del fluido. Para el caso de la superficie promedio de la puntuación, esto debería explicarse porque en la medición se incluyó la cámara y no únicamente la puntuación, la cámara de más superficie estaría suponiendo mayor caída de presión del fluido dentro de esta. Un análisis más profundo de la interacción que tiene la anatomía en estos puntos en tratado en el capítulo 9 de esta investigación.

Las variables primarias, como la conectividad de las cavidades, la superficie específica del volumen o la fracción de volumen de las cavidades, resultaron con un R^2 no significativo. Sin embargo, estas variables primarias son consideradas en las entradas de los modelos de regresión múltiple, más adelante tratados, y en interacción en regresión simple porque en la interacción con otras variables independientes tienen un papel importante.

En lo que respecta a las variables secundarias y a su interacción, el grado de asociación es bueno (cuadro 6) para la tortuosidad anisotrópica (T_a). Como se mencionó anteriormente, este tipo de tortuosidad se plantea y propone en la presente investigación, en respuesta a que la tortuosidad geométrica brinda como resultado el camino más corto para un fluido. Se ha observado que los valores de KL son discrepantes con los valores de tortuosidad geométrica, en tales circunstancias el fluido no obedece al camino más corto, más bien obedece a fuerzas de otra índole. En este sentido, la T_a es determinado considerando la totalidad de caminos existentes en el volumen analizado y los espacios de las cavidades disponibles para ello. La relación de estas dos variables conserva una relación de aspecto anisotrópico, el cual es definido por la anisotropía misma de la madera. Se ha observado que el tamaño del volumen o de la sección transversal del volumen analizado, tiene gran efecto en el valor de permeabilidad adquirido en las simulaciones numéricas, el planteamiento de esta tortuosidad (T_a) es para establecer una medida de control para esta problemática. La T_a es calculada con la relación de la superficie específica del volumen entre el promedio de la superficie porosa. Debido a que la superficie porosa incrementara la tortuosidad a medida que esta disminuya y la superficie específica del volumen incrementara la tortuosidad del camino a medida que esta se incremente, es posible asociar a estas dos variables como medida de tortuosidad del espacio poroso en el tejido. Este tipo de medición hace posible considerar el total de caminos opcionales al flujo dentro de un volumen analizado y considerar, además, las constricciones del conducto. La superficie específica del volumen es medida con el conteo del total de vóxeles que cubren la superficie interna del volumen, es decir, es la superficie que cubre a toda la pared celular y las demás superficies generadas por compuestos diversos que se encuentren dentro del volumen. De tal manera que, si existen grandes ramificaciones en el conducto se incrementará esta superficie y con esto el conducto será más tortuoso. Sin embargo, la superficie específica del volumen por sí sola no determina el camino a seguir del fluido, pero relacionada con el área de poro (cavidades) disponible es posible que refleje mejor la capacidad de flujo masivo del volumen. El resultado de T_a muestra un porcentaje medianamente influyente del .520 pero significativo para la permeabilidad longitudinal (cuadro 6), el valor es inferior que el de la superficie porosa, pero en condiciones variables entre especies maderables, podría tener mejores predicciones a saber. La relación que muestra es positiva, sin embargo, debe interpretarse como negativa si recordamos que es de relación inversa.

Los modelos restantes que relacionan variables independientes en su mayoría mejoraron su

coeficiente de determinación (cuadro 6), de estos 13 modelos restantes, 8 son modelos con buenas asociaciones y R2 cercanos a valores altos, de estos 8 se tiene 2 conformados por asociaciones exponenciales. Los 5 restantes tienen un R2 no significativo, 3 de ellos de asociación exponencial (cuadro 6).

Cuadro 6. Regresiones lineales simples en volúmenes distintos

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K_L (μm^2)^a					
Variables independientes		β	R^2	P (Sig.)	
Superficie específica del volumen (μm^2)	SVA	-.124	.015	.702	
Superficie porosa (μm^2)	AP	-.781	.609	.003	
Tortuosidad aniso trópica	Ta	.721	.520	.008	
Conectividad porosa	C	-.114	.013	.725	
Fracción de volumen	VF	.297	.088	.348	
Fracción de volumen x conectividad	VF · C	.283	-.012	.373	
Superficie de puntuaciones (μm^2)	AP	-.830	.688	.001	
Fracción de volumen de puntuaciones	VF P	-.645	.416	.024	
(Conectividad/ Tortuosidad a.) x Fracción de volumen	VF (C/Ta)	-.754	.569	.005	

Superficie de puntuación x ((Conectividad/Tortuosidad a.) x Fracción de volumen) (μm^2)	$AP (VF (C/Ta))$	-.778	.605	.003	
Fracción de volumen de puntuación x Tortuosidad a.	$VF P \cdot Ta$	.225	.050	.483	
Fracción de volumen de puntuación x (Fracción de volumen x conectividad)	$VF P \cdot VF \cdot C$	-.661	.437	.019	
Superficie de puntuación x fracción de volumen (μm^2)	$AP \cdot VF$	-.773	.598	.003	
Fracción de volumen de puntuación x fracción de volumen p.	$VF P \cdot VF$	-.661	.437	.019	
Superficie de puntuación x conectividad x fracción de volumen (μm^2)	$AP \cdot VF \cdot C$	-.773	.597	.003	
(Superficie de puntuación) ^{Conectividad} (μm^2)	$(AP)^C$	-.822	.675	.001	
(Fracción de volumen de puntuación) ^{Conectividad}	$(VF P)^C$	-.643	.413	.024	

(Superficie de puntuación) ^{Fracción de volumen} (μm^2)	(AP) ^{VF}	-.293	.086	.355	
(Fracción de volumen de puntuación) ^{Fracción de volumen}	(VF P) ^{VF}	-.560	.313	.058	
(Tortuosidad a.) ^{Fracción de volumen de puntuación}	(Ta) ^{VF P}	-.353	.125	.260	

a. Variable dependiente: β_0 .

En todos los casos de regresión múltiple se utilizó el método de entrada forzada o manual. Los siguientes 8 modelos arrojaron valores no significativos de aportación de las variables predictoras al modelo, salvo alguna de las variables, aun cuando R^2 ajustada fuera significativa (cuadros 7 a 14). Por lo que son plenamente descartados.

Cuadro 7. Regresiones múltiples, modelo 1

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
Superficie porosa (μm^2)	-365 (-.597 a -.133)	-.981	.007	1.62	
Fracción de volumen	-55.86 (-800.63 a 688.90)	-.042	.864	1.30	
Conectividad porosa	1043.67 (-3781.68 a 5869.02)	.111	.625	1.10	
Superficie específica del volumen (μm^2)	2.03E-6 (.000 a .000)	.333	.208	1.34	
R ² ajustado	.528 P (Sig.) .051	β_0 -854.64	Durbin-Watson	.862	

Cuadro 8. Regresiones múltiples, modelo 2

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
VF (C/Ta)	-2137.76 (-6839.58 a 2564.04)	-.300	.325	2.57	
AP	-.829 (-2.22 a .562)	-.457	.206	3.46	
VF P	-3085.29 (-10724.10 a 4553.51)	-.217	.379	1.70	
R ² ajustado	.650	P (Sig.) .009	β_o 212.916	Durbin-Watson 2.143	

Cuadro 9. Regresiones múltiples, modelo 3

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
VF P · Ta	32.89 (-21.39 a 87.18)	.495	.200	1.39	
C	-467.62 (-7086.74 a 6151.50)	-.050	.875	1.03	
VF	733.69 (-335.87 a 1803.26)	.551	.152	1.34	
R ² ajustado	.011	P (Sig.) .483	β_o -38.37	Durbin-Watson 1.27	

Cuadro 10. Regresiones múltiples, modelo 4

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
VF P · VF · C	-15841.23 (-30763.82 a -918.64)	-.749	.040	3.26	
Ta	.333 (.046 a .620)	.507	.028	1.25	

VF	-402.84 (-1300.99 a 495.31)	-.303	.331	2.98	
R ² ajustado	.685	P (Sig.) .006	β _o 389.69	Durbin-Watson 1.84	

Cuadro 11. Regresiones múltiples, modelo 5

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm²)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β _e	P (Sig.)	VIF	
AP · VF	-1.34 (-3.26 a .568)	-.520	.144	2.35	
Ta	.238 (-.266 a .742)	.362	.308	2.53	
C	986.01 (-3817.28 a 5789.30)	.105	.649	1.12	
R ² ajustado	.520	P (Sig.) .003	β _o -817.30	Durbin-Watson 1.44	

Cuadro 12. Regresiones múltiples, modelo 6

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm²)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β _e	P (Sig.)	VIF	
(AP) ^c	-1.03 (-2.36 a .298)	-.573	.111	2.86	
Ta	.179 (-.293 a .651)	.272	.404	2.70	
VF	207.59 (-411.91 a 827.09)	.156	.462	1.13	
R ² ajustado	.606	P (Sig.) .001	β _o 24.94	Durbin-Watson 1.94	

Cuadro 13. Regresiones múltiples, modelo 7

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm²)^a					
--	--	--	--	--	--

Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
$(AP)^{VF}$	.303 (-3.97 a 4.57)	.044	.874	1.26	
Ta	.0516 (.088 a .944)	.785	.024	1.37	
C	1274.64 (-4232.54 a 6781.82)	.136	.608	1.11	
R ² ajustado	.364 P (Sig.) .089	β_o -1292.32	Durbin-Watson .661		

Cuadro 14. Regresiones múltiples, modelo 8

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
$(Ta)^{VF P}$	-923.53 (-4747.37 a 2900.30)	-.307	.593	2.86	
C	-1087.98 (-8224.19 a 6048.23)	-.116	.734	1.00	
VF	76.62 (-1615.40 a 1768.65)	.058	.919	2.82	
R ² ajustado	-.184 P (Sig.) .260	β_o 2050.25	Durbin-Watson 2.22		

En los cuatro modelos mostrados en el cuadro 15, fue recurrente la contribución de la tortuosidad anisotrópica. En el primer modelo se obtiene un valor R² ajustado muy cercano a un valor alto de predicción y significativo. Así mismo, la aportación de las dos variables al modelo es muy similar (β_e) y en ambos casos significativa. La independencia de los residuos es prácticamente 1.5 lo que demuestra el supuesto de independencia, los factores de inflación de la varianza de cada variable son de apenas por arriba de uno lo que indica que no existe la colinealidad. El supuesto de normalidad de los residuos se muestra en la fig. 9, se observa que los residuos están distribuidos aproximadamente normal, un poco desplazados, sin embargo, este supuesto podría ser aceptado

debido a la poca desviación. El supuesto de homocedasticidad lo podemos observar en el diagrama de dispersión P-P de la fig. 10 la dispersión de la varianza se observa similar a lo largo de x.

En general los cuatro modelos del cuadro 15 presentan valores muy similares de predicción, significancia y de supuestos, lo que valida el planteamiento de variables que pudieran estar controlando el flujo en la madera y utilizadas en la presente investigación.

Cuadro 15. Regresiones múltiples, modelos con tortuosidad anisotrópica

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Variables independientes	β (95% IC)	β_e	P (Sig.)	VIF	
Ta	.385 (.118 a .652)	-.586	.010	1.085	
VF P	-6825.379 (-12602.002 a -1048.756)	-.480	.026	1.085	
R ² ajustado	.673	P (Sig.) .003	β_o 54.636	Durbin-Watson	1.49
Ta	.380 (.117 a .642)	.578	.010	1.092	
VF P · VF	-10396.613 (-18835.917 a -1957.308)	-.493	.021	1.092	
R ² ajustado	.685	P (Sig.) .002	β_o 60.646	Durbin-Watson	1.58
Ta	.390 (.128 a .651)	.593	.008	1.07	
(VF P) ^c	-6854.09 (-12448.129 a -1260.052)	-.487	.022	1.07	
R ² ajustado	.685	P (Sig.) .002	β_o 60.646	Durbin-Watson	1.58
Ta	.415 (.134 a .695)	.631	.009	1.04	
(VF P) ^{VF}	-1514.361 (-3030.091 a 1.370)	-.427	.050	1.04	

R² ajustado

.626 P (Sig.) .005

β_0 43.013

Durbin-Watson 1.20

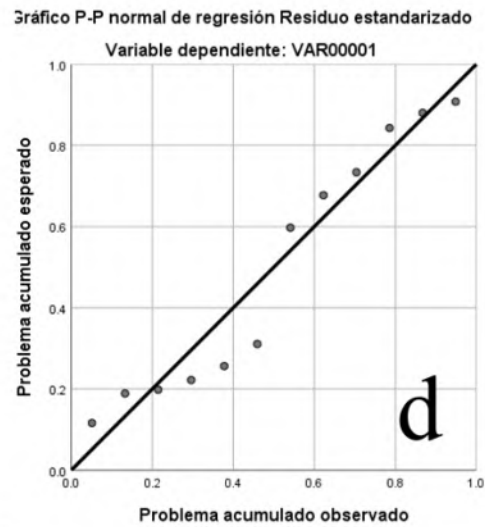
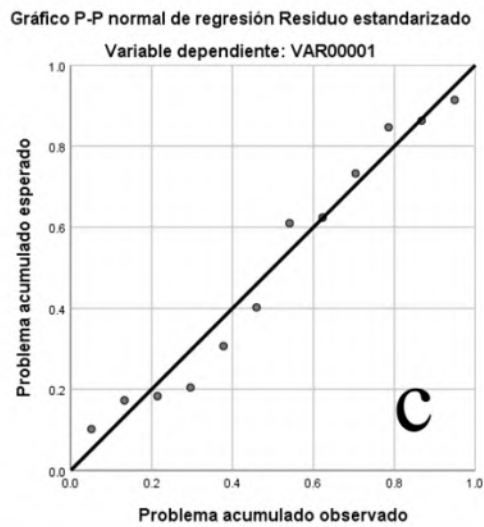
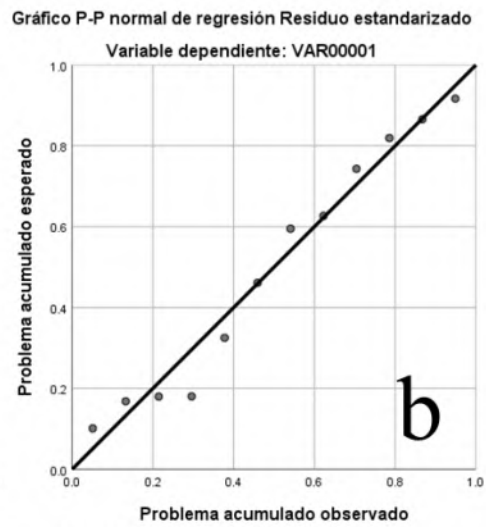
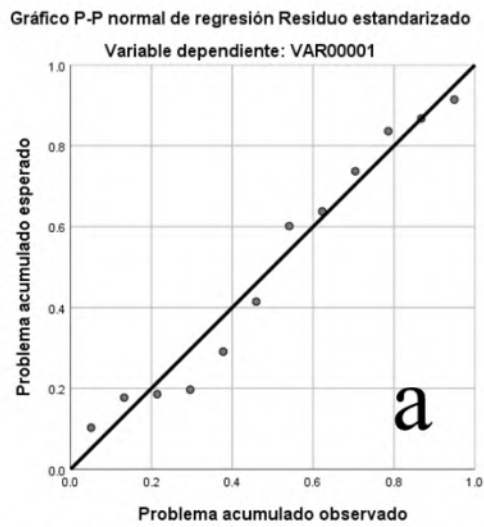


Figura 9. Gráficos P-P de normalidad: a) Modelo uno, b) Modelo dos, c) Modelo tres, d) Modelo cuatro.

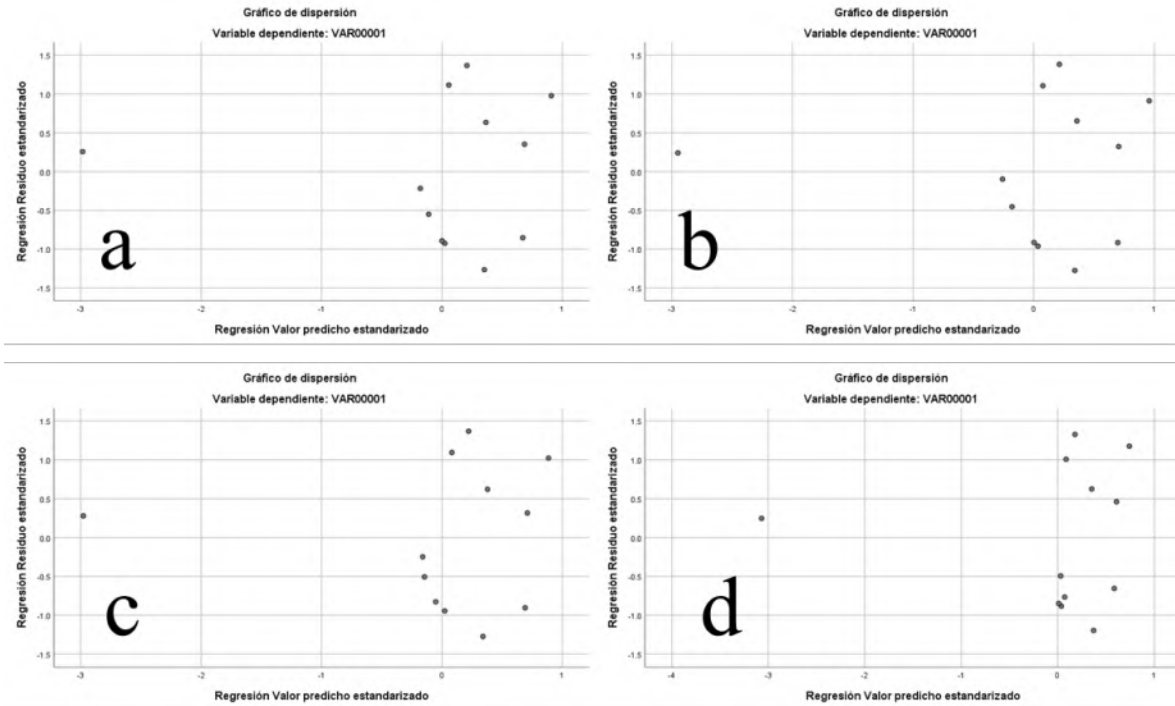


Figura 10. Gráficos de dispersión de residuos: a) Modelo uno, b) Modelo dos, c) Modelo tres, d) Modelo cuatro.

En las mediciones con volumen similar en los 12 cortes virtuales, se obtuvieron regresiones lineales (cuadro 16) con valores significativos de R² únicamente para la variable superficie porosa y la fracción de volumen de cavidades. El resto de las variables no tienen un valor significativo, estos resultados se pueden observar en el cuadro 16. La baja variabilidad entre mediciones podría ser debido a la cercanía entre cortes analizados y ser la responsable de dicha circunstancia.

En general todos los valores de los modelos de regresión múltiple también resultaron no significativos, muy probablemente por la misma causa (cuadro 17).

Cuadro 16. Regresiones simples, con volumen igual

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2) ^a					
Variables independientes		β	R ²	P (Sig.)	
Superficie específica del volumen (μm^2)	SAV	-.305	.093	.335	

Superficie porosa (μm^2)	AP	.621	.609	.031	
Tortuosidad aniso trópica	Ta	-.399	.159	.199	
Conectividad porosa	C	-.507	.257	.092	
Fracción de volumen	VF	.606	.367	.037	
Fracción de volumen x conectividad	VF · C	.510	.260	.091	
Superficie de puntuaciones (μm^2)	AP	.239	.057	.454	
Fracción de volumen de puntuaciones	VF P	.057	.003	.859	
(Conectividad/Tortuosidad a.) x Fracción de volumen	VF (C/Ta)	.457	.209	.136	
Superficie de puntuación x ((Conectividad/Tortuosidad a.) x Fracción de volumen)	AP (VF (C/Ta))	.399	.159	.199	
Fracción de volumen de puntuación x Tortuosidad a.	VF P · Ta	-.045	.002	.889	
Fracción de volumen de puntuación x (Fracción de volumen x conectividad)	VF P · VF · C	.092	.009	.775	

Superficie de puntuación x fracción de volumen	$AP \cdot VF$	.298	.089	.347	
Fracción de volumen de puntuación x fracción de volumen p.	$VF P \cdot VF$	.102	.010	.751	
Superficie de puntuación x conectividad x fracción de volumen	$AP \cdot VF \cdot C$	.170	.029	.597	
(Superficie de puntuación) ^{Conectividad}	$(AP)^C$	.284	.081	.371	
(Fracción de volumen de puntuación) ^{Conectividad}	$(VF P)^C$	.168	.028	.601	
(Superficie de puntuación) ^{Fracción de volumen}	$(AP)^{VF}$	.105	.011	.746	
(Fracción de volumen de puntuación) ^{Fracción de volumen}	$(VF P)^{VF}$	.446	.199	.146	
(Tortuosidad a.) ^{Fracción de volumen de puntuación}	$(Ta)^{VF P}$	-.158	.025	.623	

a. Variable dependiente: β_0 -

Cuadro 17. Regresiones múltiples, con volumen igual

V. dependiente: Permeabilidad longitudinal K (μm^2)^a					
Modelos	R ² ajustado	P (Sig.)	β_e	P (Sig.)	VIF

AP			3.19	.051	54.97
VF	.629	.023	.846	.040	3.35
C			-.532	.033	1.19
SAV			-2.03	.153	47.73
VF (C/Ta)					
AP	.068	.136	---	---	---
VF P					
VF P · Ta					
VF	.323	.112	---	---	---
C					
VF P · VF · C					
Ta	.229	.180	---	---	---
VF					
AP · VF					
Ta	.157	.347	---	---	---
C					
(AP) ^C					
Ta	.241	.171	---	---	---
VF					
(AP) ^{VF}					
Ta	.204	.202	---	---	---
C					
(Ta) ^{VF P}					
C	.312	.119	---	---	---
VF					
Ta					
VF P	.065	.299	---	---	---
Ta					
VF P · VF	.073	.288	---	---	---
Ta					
(VF P) ^C	.085	.272	---	---	---
Ta					
(VF P) ^{VF}	.010	.387	---	---	---

3.8 Conclusión

El arreglo de la microestructura de *Pinus devoniana* y la función de la celda básica en el flujo de fluido continuo, observado en la presente investigación permiten estimar que la interfaz del fluido

entre el lumen (traqueidas o radios) y las extensiones de las puntas afiladas de las traqueidas, es un sitio con distinto gradiente de presión. Los espacios intercelulares en las esquinas de las traqueidas observados, corresponden en realidad a las extensiones de las traqueidas en sus extremidades que unen con otras traqueidas o con células de rayos medulares, a través de cámaras de espacio intercelular. También se identificaron extensiones que unen a pares de radios medulares (células de parénquima radial o traqueidas radiales) alineados longitudinalmente en sus extremos superior e inferior con una puntuación areolada de por medio. Además, las extensiones también corresponden a las extremidades de las traqueidas conectadas en el radio periódicamente a lo largo de este. El resto de las esquinas de las traqueidas presentan la mayor densidad (color azul) sin espacio intercelular, corroborando que no es madera de compresión.

Las simulaciones mostraron que en los conductos con mucho menor diámetro el fluido pierde menos presión (alrededor del 40 % del diferencial aplicado), así en los segmentos de las extensiones de traqueidas se mantiene mayor presión, disponiendo de mayor energía libre constante a lo largo del flujo. Por lo que existe menor gradiente de presión entre el flujo de estos segmentos y la salida del sistema (presión atmosférica). Para este efecto, las simulaciones mostraron fuertes caídas de presión en los pares de puntuaciones, pero en general el flujo longitudinal evita los pares de puntuaciones por la presión similar en lúmenes y pares de puntuaciones adyacentes. Restando importancia a las propiedades de porosidad de las membranas de puntuaciones y obligando al flujo a continuar por las puntuaciones ciegas y las extensiones con menor pérdida de presión que en los pares de puntuaciones.

Los modelos de regresión mostraron variables con altas relaciones con la permeabilidad que son significativas en el control al comportamiento de flujo. El uso de dichas variables en modelos de permeabilidad, podrían ser respaldadas por esta relación.

3.9 Referencias

Hacke, U. G., Lachenbruch, B., Pittermann, J., Mayr, S., Domec, J. C., & Schulte, P. J. (2015). The hydraulic architecture of conifers. *Functional and ecological xylem anatomy*, 39-75.

Capítulo 4: PERMEABILIDAD EXPERIMENTAL

4.1 Permeabilidad en *Fraxinus uhdei*

Los resultados experimentales de la permeabilidad gaseosa son mostrados en función de su densidad. La permeabilidad en dirección longitudinal del *Fraxinus uhdei*, no presentó una tendencia clara, exceptuando las muestras de la zona central de la rodaja (Centro) que se observan con mayor densidad que las muestras de la zona cercana a la corteza (Exterior). Esto, a pesar de la mayor cantidad de leño tardío en las zonas de crecimiento, en la zona exterior. Mostrando una posible relación inversa con la permeabilidad. La mayor densidad en el centro podría afectar fuertemente al modelo de permeabilidad si la distribución del tamaño de las estructuras anatómicas no corresponde con esta. Es decir, si la pared celular de la parte interna de la rodaja es menos gruesa. La alteración en la densidad podría ser causada por la presencia de extractivos en mayor cantidad de la zona central y en cuyo caso, la curva de densidad estaría invertida. Debido a que las muestras de esta medición provienen de un árbol de crecimiento normal de aproximadamente 16 años, es posible que la zona central haya iniciado la duraminación, toda vez que se evitó la zona medular o juvenil.

Para establecer los parámetros del modelo, es necesario el análisis microestructural de las distintas zonas leñosas de la figura 1, lo cual es parte del cronograma del siguiente semestre. La falta de tendencia clara en los valores de permeabilidad, indican la dificultad para localizar la problemática de flujo a partir de únicamente la densidad de la madera. En última instancia, poder definir el mejoramiento de un proceso de flujo requiere sus fundamentos en las problemáticas de flujo bien identificadas. Es decir, los resultados de permeabilidad experimental son insuficientes para determinar si la problemática en un proceso de flujo puede ser resuelta por métodos difusivos en la pared celular o de flujo en las cavidades. Los puntos de permeabilidad con valores de 10000 mD, corresponden a valores que quedaron fuera del rango de medición del límite superior del equipo, en este caso muestras centrales y externas presentaron mayor permeabilidad.

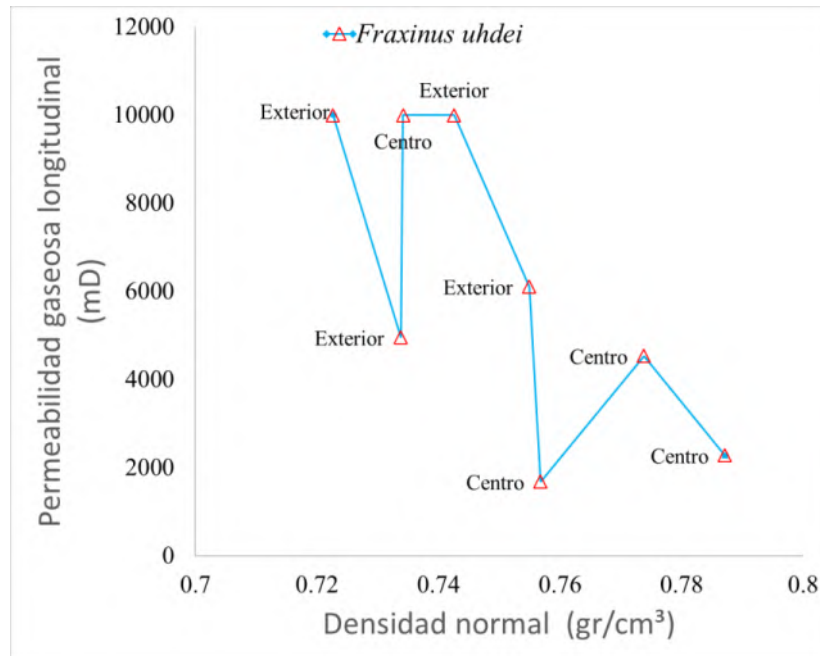


Figura 1. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en dirección longitudinal.

La permeabilidad en la dirección radial y tangencial del Fresno (*Fraxinus uhdei*), como era de esperarse, fue mayor a 10000 mD inferior que la longitudinal. Esto es una consecuencia clara del tamaño similar utilizado en todas las probetas, en cualquier dirección, debido a la baja permeabilidad en dirección perpendicular a la fibra. Generalmente en dirección perpendicular son utilizadas probetas con menor longitud que en dirección paralela por su baja permeabilidad. Sin embargo, aquí la longitud considerable de las probetas dio como resultado algunos puntos de permeabilidad radial y tangencial por debajo del rango de lectura del equipo de medición (Fig. 2), localizados con valor inferior a 0.01 mD tanto en el centro como en el exterior. Las probetas radiales presentaron mayor densidad que las tangenciales, debido a su mayor cantidad de leño tardío. Esto confirma que sí pueden existir otras causas además de la densidad, responsables de la permeabilidad en la dirección longitudinal observada anteriormente. Aun con esta diferencia en densidad, la permeabilidad radial y tangencial no presentaron una tendencia clara (Fig. 2), al igual que en la longitudinal. A excepción de la permeabilidad tangencial de la zona exterior (cercana a la corteza), que a mayor densidad presentó mayor permeabilidad, el resto de probetas del centro o del exterior no presentan ninguna tendencia.

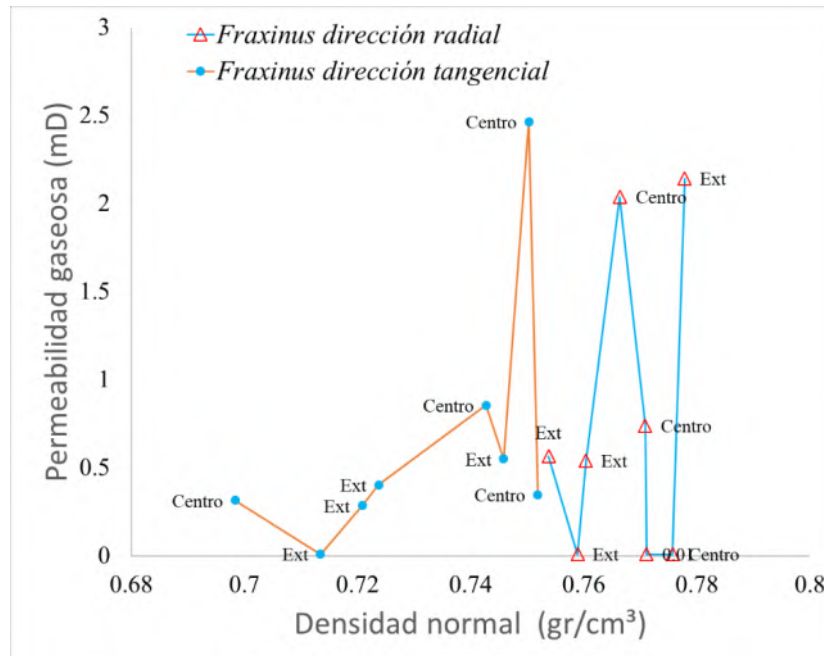


Figura 2. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en dirección radial y tangencial.

4.2 Permeabilidad en *Abies religiosa*

La permeabilidad longitudinal del Oyamel (*Abies religiosa*), fue notoriamente inferior en comparación con el Fresno (Fig. 3). Se tiene amplio conocimiento tradicional de lo impermeable al líquido de esta especie, lo cual es congruente con estos resultados. Se observa la tendencia clara de mayor permeabilidad con mayor densidad (Fig. 3) y de una zona intermedia en la albura con anillos más anchos, hacia la zona inmediata a la corteza (Exterior) con anillos más estrechos. Esta tendencia también es problemática para establecer un modelo de permeabilidad, ya que los diámetros del lumen de las traqueidas en la zona intermedia muy probablemente serán mayores que en la zona externa, lo cual supondría menor flujo en esta última de acuerdo a los modelos clásicos, contrario a los resultados experimentales. Nuevamente esto está indicando la limitación del flujo de algo más que la dimensión de las cavidades, por lo cual se requiere de la permeabilidad simulada de estos puntos y de su análisis microestructural.

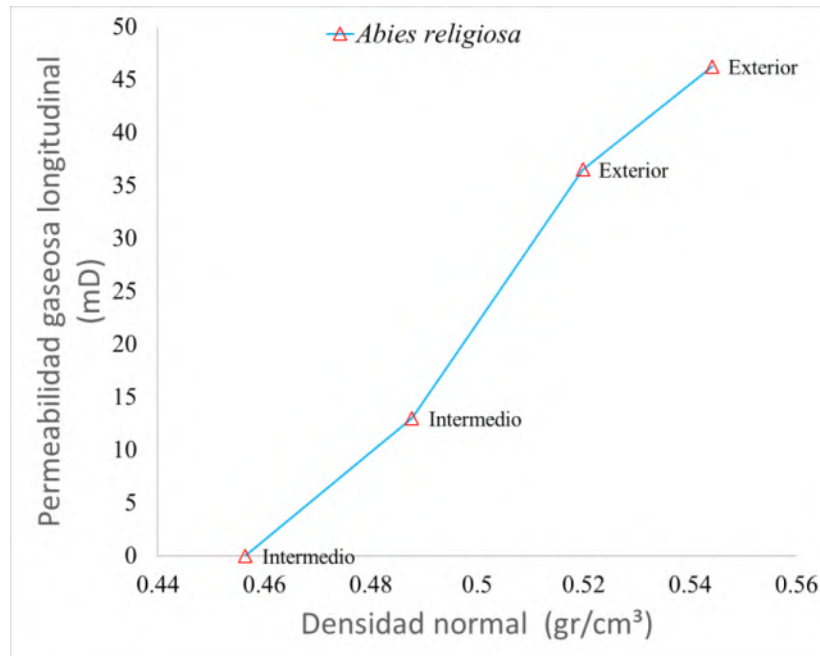


Figura 3. Permeabilidad gaseosa de *Abies religiosa* en dirección longitudinal.

En la dirección tangencial y radial, la permeabilidad gaseosa quedó por debajo del límite inferior del rango de medición del equipo (0.01 mD), a excepción de una probeta radial de la zona centro con mayor cantidad de anillos y de 0.124 mD. La probeta de la zona externa que se observa con un valor de 4.76 mD, corresponde a una probeta fracturada y posteriormente unida con adhesivo, lo cual se debe a permeabilidad por fisuras.

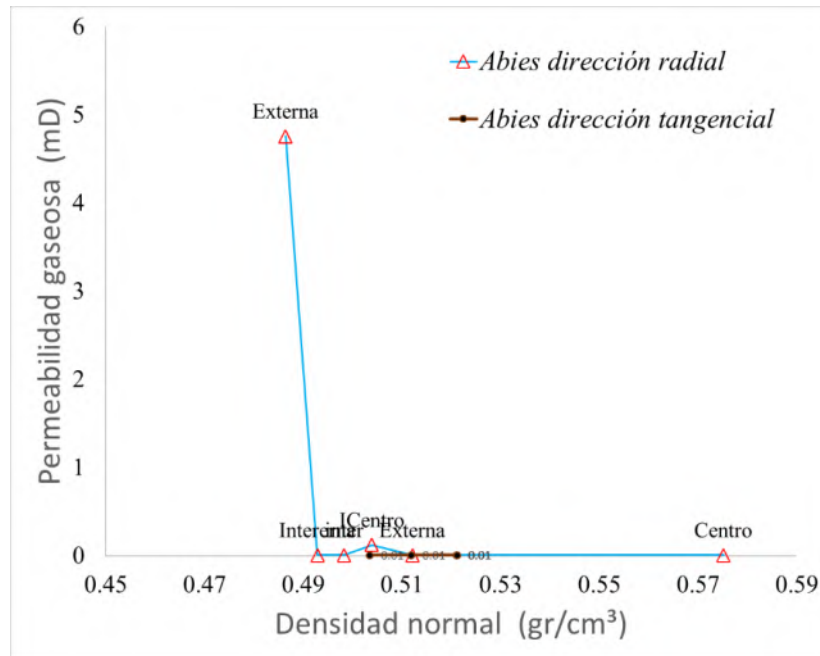


Figura 4. Permeabilidad gaseosa de *Abies religiosa* en dirección radial y tangencial.

4.3 Comparaciones de permeabilidad experimental y permeabilidad de simulación numérica

La permeabilidad obtenida por simulación numérica puede divergir de la experimental, debido a la discretización numérica de las ecuaciones, el umbral o método utilizado en la binarización de la imagen, la heterogeneidad propia del tejido, el tamaño y forma de los volúmenes analizados, entre otros. Los resultados obtenidos en la permeabilidad longitudinal gaseosa de madera de *Fraxinus udei* son comparados en las figuras 5 a, b, c. En madera de la zona externa adjunta a la corteza, con un corte virtual que comprende varios vasos y gran cantidad de tejido leñoso (Fig. 5 c), el flujo fue principalmente a través de los vasos, incluso cuando los vasos presentan gran cantidad de obstáculos al flujo (Fig. 5 a, b). Sin embargo, uno de los vasos observa gran contribución al flujo (total flujo azul), al no presentar obstáculos (Fig. 5 a, b) y refleja su efecto en los 9366 mD de permeabilidad numérica (K_n), una cifra cercana exponencialmente a los 4954 mD obtenidos de permeabilidad gaseosa (K) longitudinal en esta probeta. El valor de convergencia utilizado durante las iteraciones fue de 0.0001, no obstante utilizar cortes virtuales de gran tamaño con esta resolución, requiere capacidades de computo muy exigentes y tiene el inconveniente de acrecentar la probabilidad de lecturas de permeabilidad cercanas a los máximos dentro del rango. Como lo muestra el vaso con flujo sin obstáculos en azul (Fig. 5 a, b), sin dar

lectura a los puntos críticos de flujo que determinar gran parte del valor de permeabilidad, como se mostrara más adelante.

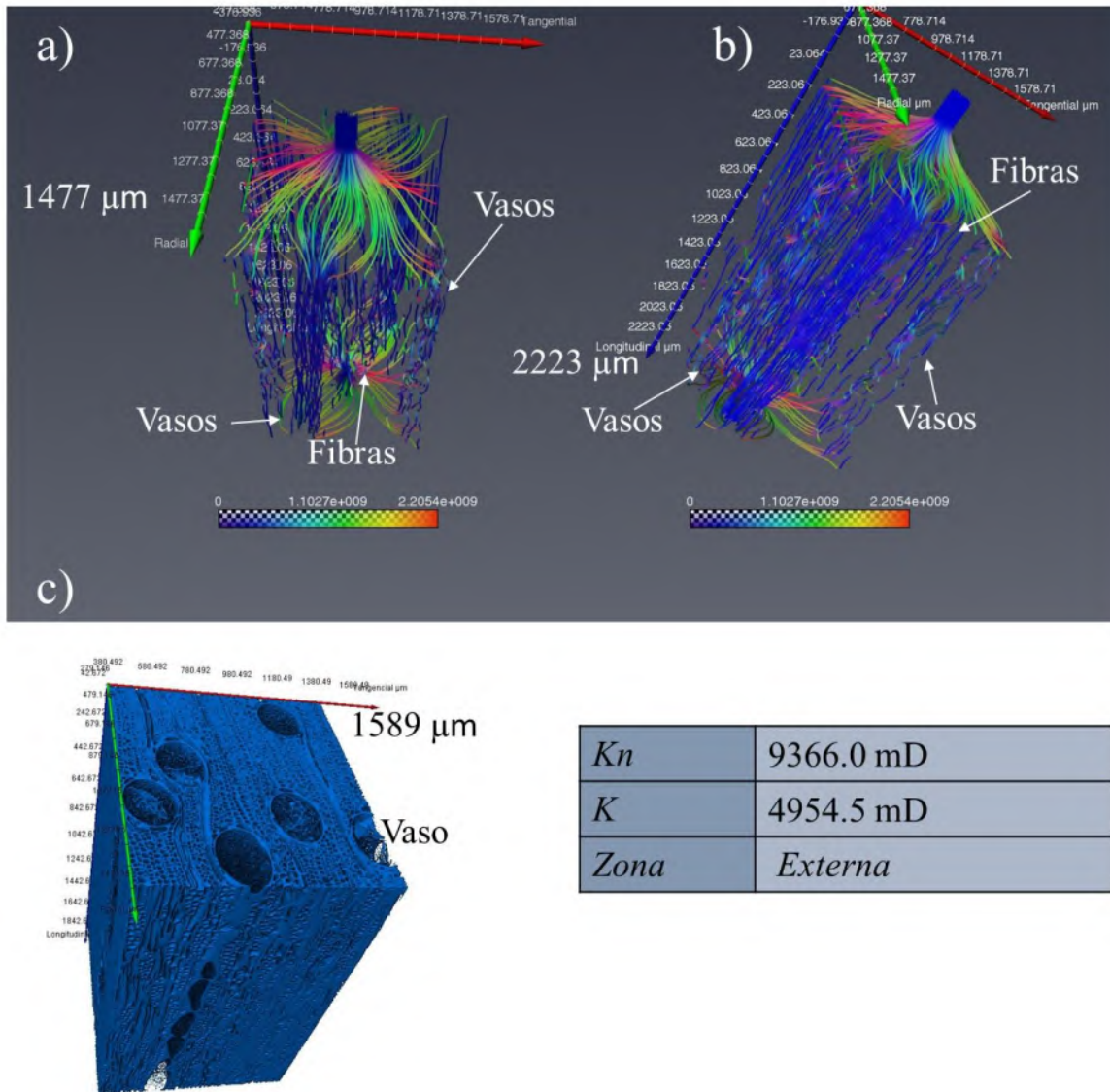


Figura 5. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en dirección longitudinal.

En la figura 6 se muestran los resultados de permeabilidad en la misma probeta de la zona externa, pero en esta ocasión con la simulación en un corte virtual más pequeño, de un solo vaso (Fig. 6 a, b) en la cual, se obtienen valores muy superiores con el factor de convergencia 0.0001 a la permeabilidad gaseosa de 4954 mD. En el corte con vaso (v), la permeabilidad numérica Kn fue

de 51371 mD y en el mismo corte sin vaso fue de 142472 mD, un valor muy sobrevaluado. Con un factor de convergencia de 0.00001 donde se incrementan las iteraciones, Kn en tejido con el vaso fue de 9458 mD y sin vaso de 3490 mD, valores más próximos a K y confinan más el sitio del tejido que determina la permeabilidad. Aquí nuevamente los segmentos del vaso que no tienen obstáculos en su interior y el parénquima paratraqueal tienen gran influencia sobre el mayor valor de Kn. Por su parte, Kn del tejido sin vaso, tiene bastante proximidad con K, no obstante, el flujo preferencial cuando participa todo el tejido es a través de los vasos.

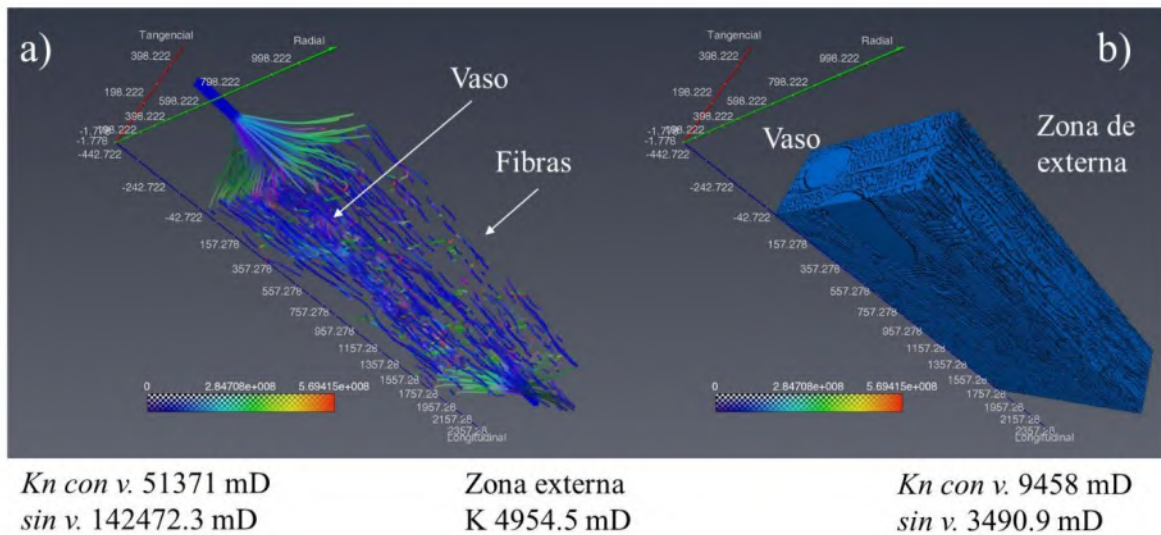


Figura 6. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* con cambios en el factor modificado de convergencia.

En la probeta de la zona centro (adjunta y libre de medula) que presento una K gaseosa de 1683 mD, mostrando gran participación de las fibras y parénquima en el flujo (Fig 7 a, b), con un factor de convergencia utilizado en el resto de las mediciones de 0.00001 se obtuvieron valores de Kn de 2674 mD para corte con vaso y 2946 mD sin vaso. Kn del tejido sin vaso (Fig. 7 d) fue ligeramente mayor aun cuando este tejido tiene células más pequeñas y gruesas, propias de madera tardía, a diferencia del tejido circundante del vaso (Fig. 7 c) propio de madera temprana o dicho propiamente del cambio de zona de crecimiento. El valor inferior del tejido con vaso muestra que este puede ser más complejo cuando interviene la estructura del vaso con obstrucciones.

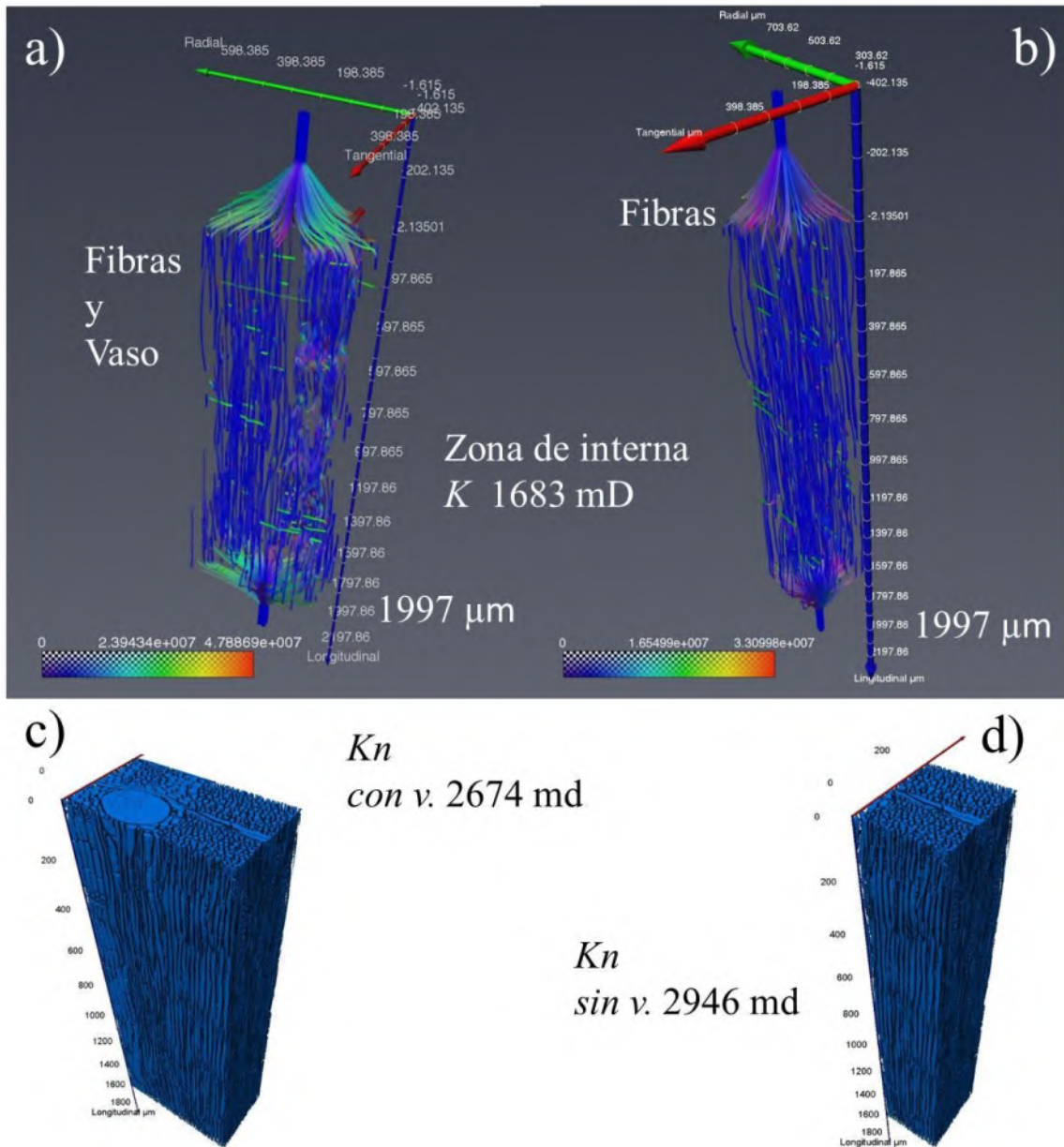


Figura 7. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en la zona interna de la rodaja.

En una segunda probeta de la zona central de la rodaja se obtuvo una K gaseosa de 2280 mD. De los cortes virtuales con vaso (Fig. 8 a, b) se obtuvieron valores distintos de Kn , para el corte que contiene un grupo de pequeños vasos terminales (Fig. 8 b) con muy poca obstrucción (Fig. 8 c) el flujo es principalmente a través de los vasos y Kn fue de 9563 mD. Nuevamente se alcanza este valor característico, a diferencia de K 2280 mD. Sin embargo, en el corte virtual donde el

vaso tiene en su conducto alta obstrucción (Fig. 8 a), el flujo se ve severamente afectado en estos puntos (Fig. 8 d), generando mayor participación de fibras y parénquima que en la figura 8 c. Este tipo de estructura se presenta como la de mayor problemática en esta especie, con un valor de Kn de 665 Md. Por lo que las probetas de esta especie presentaron permeabilidades gaseosas fuera del rango de lectura del permeámetro, que es de 10000 Md. Esta permeabilidad deberá estar determinada por tejidos con vasos sin obstrucciones (Fig. 8 b). Por otro lado, la verdadera problemática en la permeabilidad de esta especie deberá estar determinada por el tejido con vasos que tienen conductos altamente obstruidos (Fig. 8 a), generando valores de K incluso inferiores a 0.01 mD, como los obtenidos en K gaseosa en probetas de esta especie. Esto es evidencia de que, si fueran las fibras y el parénquima los tejidos que controlaran la permeabilidad, no se obtendrían estos bajos valores, ya que el flujo sería ininterrumpido. Por lo que, aun cuando se observa la participación del tejido de fibras y parénquima como en la figura arriba mostrada (Fig. 7), sería un mejor parámetro la zona crítica de los vasos. Por tal motivo es posible confinar la problemática de flujo a un segmento crítico de flujo representativo en el vaso obstruido (Fig. 8 e). El valor obtenido de Kn en este segmento es de 1521 mD a diferencia de los 2280 mD en K, pero con buena proximidad dentro del rango.

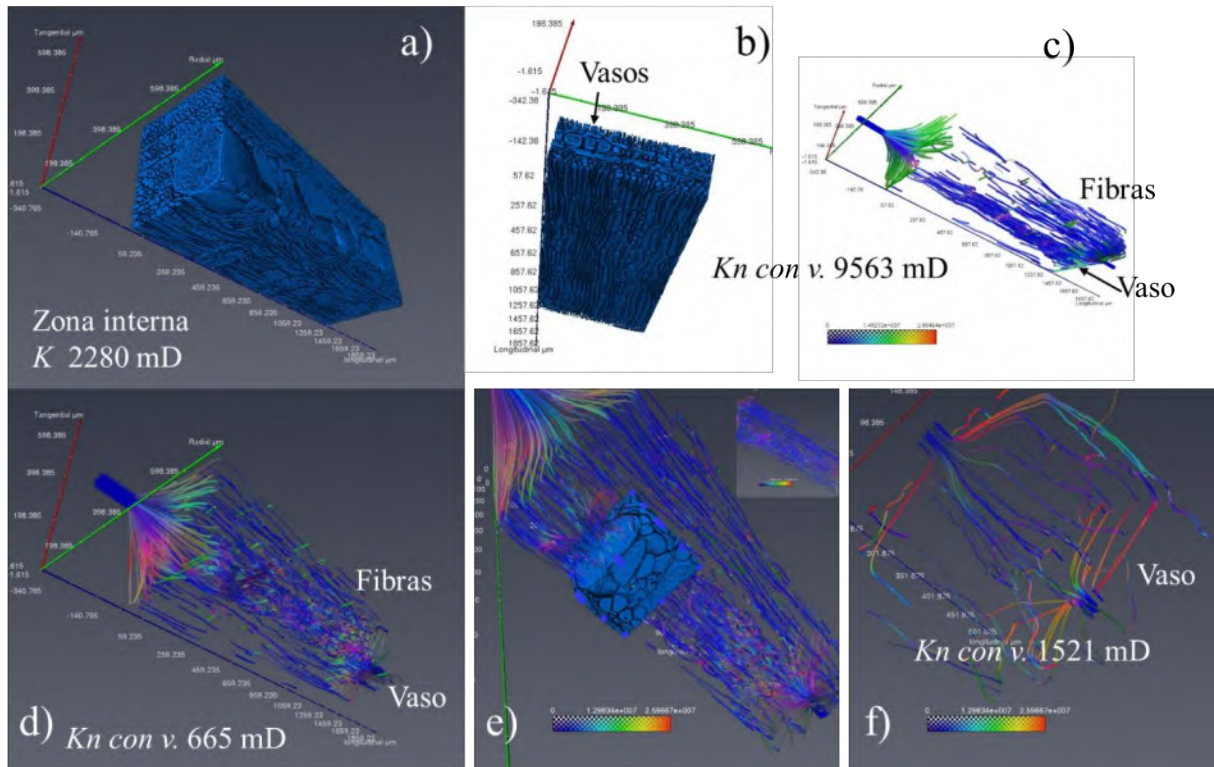


Figura 8. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en segmentos críticos.

En esta misma probeta, pero de tejido sin vasos (Fig. 9 a), se obtuvo un valor Kn de 958 mD (Fig. 9 b) con el mismo factor de convergencia a diferencia de K 2280 mD. Localizando el segmento más crítico en el traslape entre puntas de las fibras (Fig. 9 c), con un Kn de 351 mD (Fig. 9 d) y un factor de 0.00001. Estos segmentos también podrían ser utilizados como segmentos críticos. Sin embargo, el valor de Kn en estos segmentos podría no variar, por lo que no sería el factor que varíe los valores de Kn, como en el caso de los segmentos de vaso.

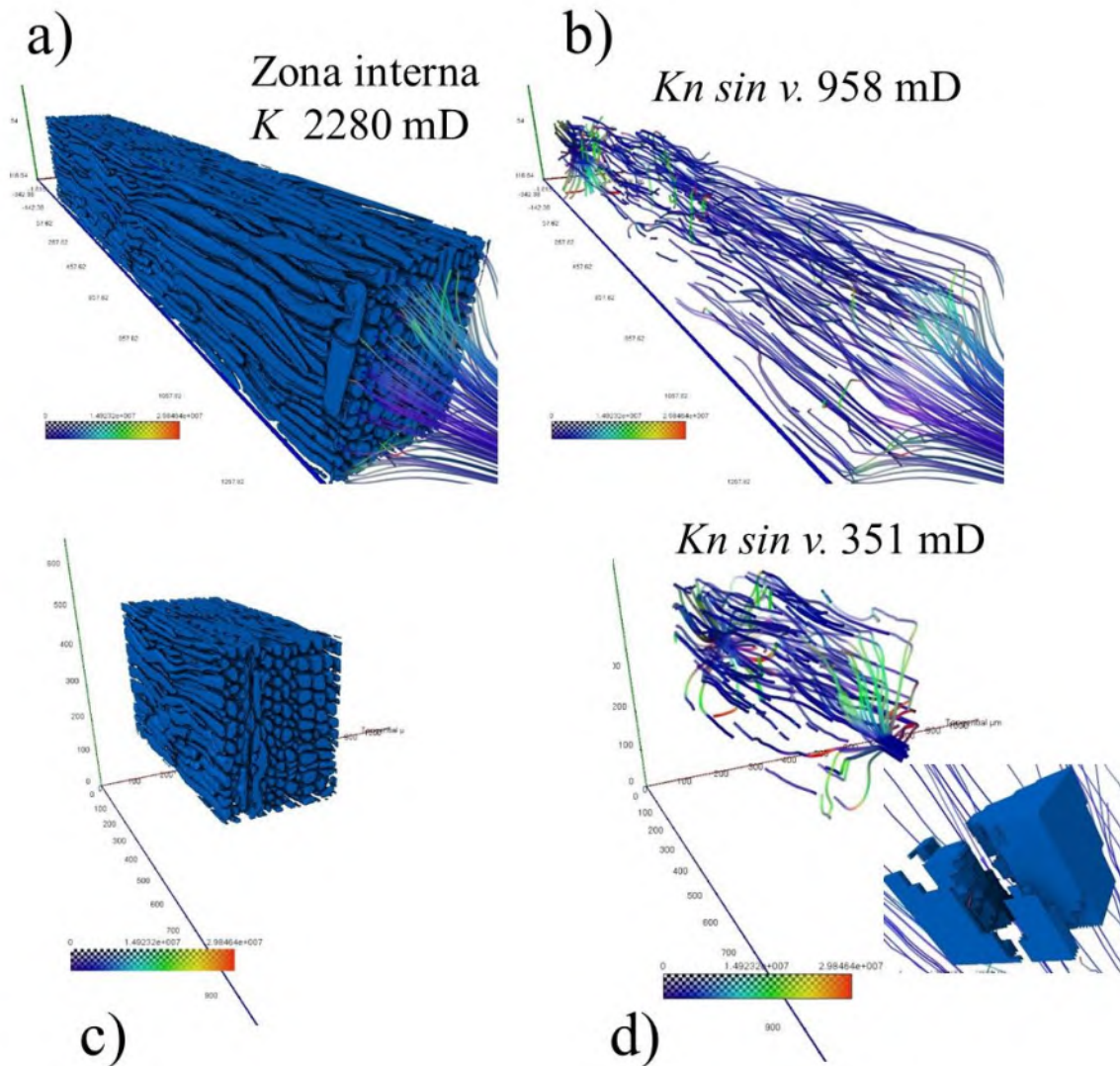


Figura 9. Permeabilidad gaseosa en fibras y parenquimade *Fraxinus uhdei*.

En la siguiente figura se muestra al segmento de vaso (Fig. 10 a), tomado como segmento crítico de la figura (Fig. 9). Una vez localizado el segmento crítico representativo en esta especie, fue posible establecer un índice de la permeabilidad de esta madera. Para lo cual, se procedió a utilizar el volumen total como porosidad o fracción de volumen (FV), que en tal caso será siempre 1 (Fig. 10 b). Por lo que el valor Kn obtenido en este volumen es K máxima (Kmax), el cual se utilizó como marco de referencia para calcular el índice. El valor obtenido de Kmax fue de 8321.3 mD (Fig. 10 c, d). En tal caso es posible observar que las líneas de flujo también entran a través del volumen de lo que antes fue la pared celular (Fig. 10 e). Simulado a igual factor de

convergencia 0.00001 validado en esta investigación, al igual que el segmento de tejido crítico.

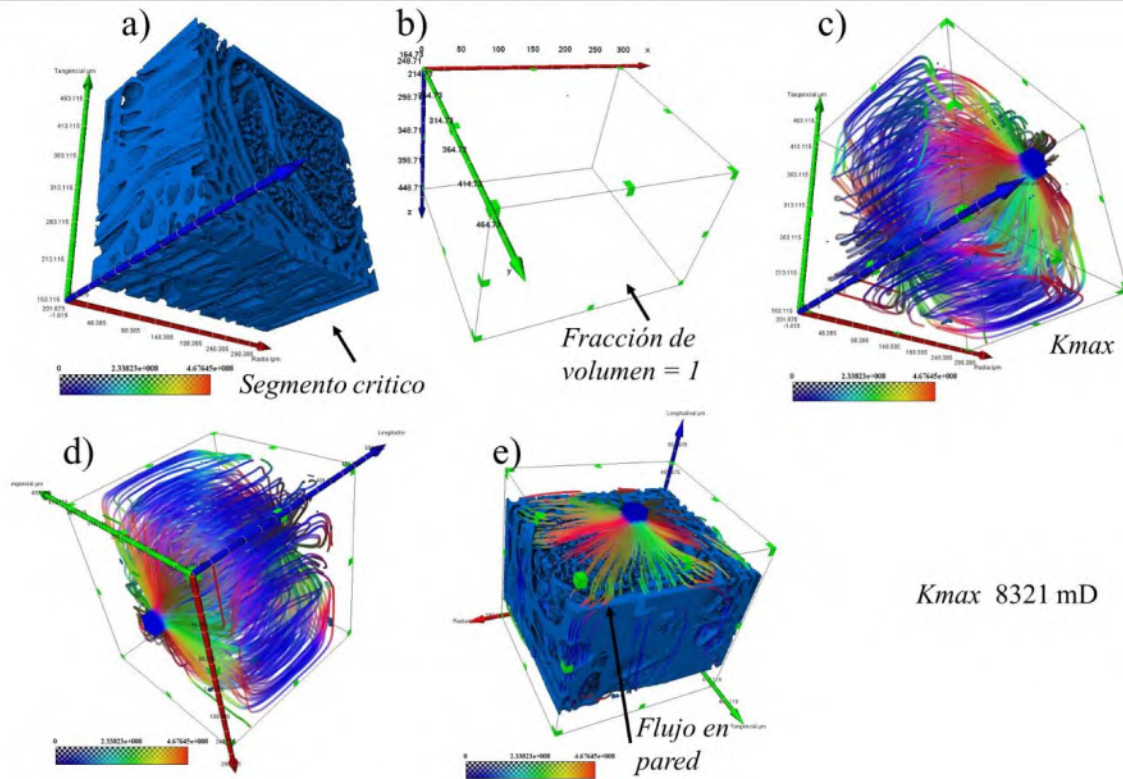


Figura 10. Permeabilidad gaseosa de *Fraxinus uhdei* en el segmento crítico.

Posteriormente se obtuvo el valor del índice de permeabilidad (I) de esta madera con la siguiente relación o cociente (Ecuación 1) adimensional.

$$I = \frac{K_c}{K_t}$$

Dónde:

(Ec. 1)

I = Índice de permeabilidad numérica. (Adimensional)

K_c = Permeabilidad en el segmento crítico. (miliDarcys)

K_t = Permeabilidad total en el volumen total del segmento crítico. (miliDarcys)

En este caso, K_c fue de 1521.4 mD, K_t fue de 8321.3 mD. El valor obtenido de I fue de 0.18. A partir de este índice, fue posible calcular la tabla de valores de permeabilidad con los

correspondientes valores de fracción de volumen. En capítulos anteriores de la presente investigación, se determinaron las correlaciones entre distintas variables y los valores de permeabilidad. Se obtuvieron buenas correlaciones, sin embargo, con bastantes mediciones y no precisamente lineales. Tal es el caso de la porosidad o fracción de volumen, donde para una misma porosidad, una con obstáculos en sus conductos y otra sin ellos, obtenemos distinta permeabilidad. Por tal motivo, en la presente investigación se recurrió a calcular un índice de permeabilidad asociado a una fracción de volumen. El cual permite estimar las permeabilidades de esta especie en otras condiciones o zonas específicas del árbol, con los datos obtenidos aquí mismo y la metodología planteada para tal fin. Esto también es debido a que se requiera un método práctico una vez establecidos los valores de índice de permeabilidad en una especie maderable. Para estimar los valores de permeabilidad se construyó una tabla de valores con las siguientes ecuaciones.

$$I_e = \frac{I \cdot FV}{FV_I}$$

Dónde: (Ec. 2)

I_e = Índice de permeabilidad estimada para la tabla. (Adimensional)

I = Índice de permeabilidad numérica establecida para la especie. (Adimensional)

FV = Fracción de volumen poroso posibles en la tabla. (Adimensional)

FV_I = Fracción de volumen poroso establecido para la especie en el segmento crítico. (Adimensional)

En este caso, I fue de 0.18, FV fueron valores supuestos consecutivos los cuales serán los valores a cotejar cuando a una madera de la misma especie y zona de albura o duramen se requiera estimar su permeabilidad. El procedimiento consiste en adquirir una imagen 3D de esta madera y medir la fracción de volumen en un segmento crítico del vaso. FV_I en esta especie fue de 0.64 en el segmento crítico del vaso. Con un valor supuesto de FV de 0.60, en la presente investigación se obtiene un valor ejemplo de I_e de 0.16. Para la estimación de la permeabilidad en la tabla se realizó con la siguiente ecuación.

$$Ke = \frac{I_e K_C}{I}$$

Dónde: (Ec. 3)

K_e = Permeabilidad estimada en la tabla. (miliDacrys)

I_e = Índice de permeabilidad estimada para la tabla. (Adimensional)

K_C = Permeabilidad en el segmento crítico preestablecido para la especie. (miliDarcys)

I = Índice de permeabilidad numérica establecida para la especie. (Adimensional)

La tabla de permeabilidades estimadas para muestras con una fracción de volumen del segmento crítico previamente medida se muestra a continuación (Cuadro 18).

Cuadro 18. Permeabilidades estimadas de *Fraxinus uhdei* en dirección longitudinal

$I_e = \frac{I FV}{FV_i}$									$Ke = \frac{I_e K_C}{I}$
0.0844								712.97	
0.0956							808.03		
0.1125						950.63			
0.1266					1069.45				
0.1406				1188.28					
0.1547			1307.11						
0.1688		1425.94							
I 0.18	K_C 1521								
	FV_i 0.64	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	FV supuesto

4.3.1 Valores de permeabilidad gaseosa y simulada en *Fraxinus uhdei*

En la figura 11 se muestra la comparación de los valores de permeabilidad gaseosa (Kg) y permeabilidad simulada longitudinal. Los valores más alejados de los experimentales son los simulados en secciones de tejido con vaso y segmentos de tejido. En los cortes virtuales de mayor volumen o contenido de tejido, los valores se encuentran dentro del mismo rango exponencial de $1e3$ con tendencia al Kg. Sin embargo, los valores en el gran volumen son superiores en todas las probetas medidas. Como lo muestra la Figura 11, en el tejido se obtienen valores próximos y

distantes de Kg. Los segmentos de tejido más corto, en donde se concentra mayor cantidad de puntuaciones, se obtuvieron valores bastante próximos a Kg pero no consistentes, ya que en las probetas F01 y F11 salieron del rango de Kg. Los valores más consistentes, dentro del rango de Kg y bastante próximos, son los simulados en el segmento de vaso que incluye platina, parénquima axial y fibras.

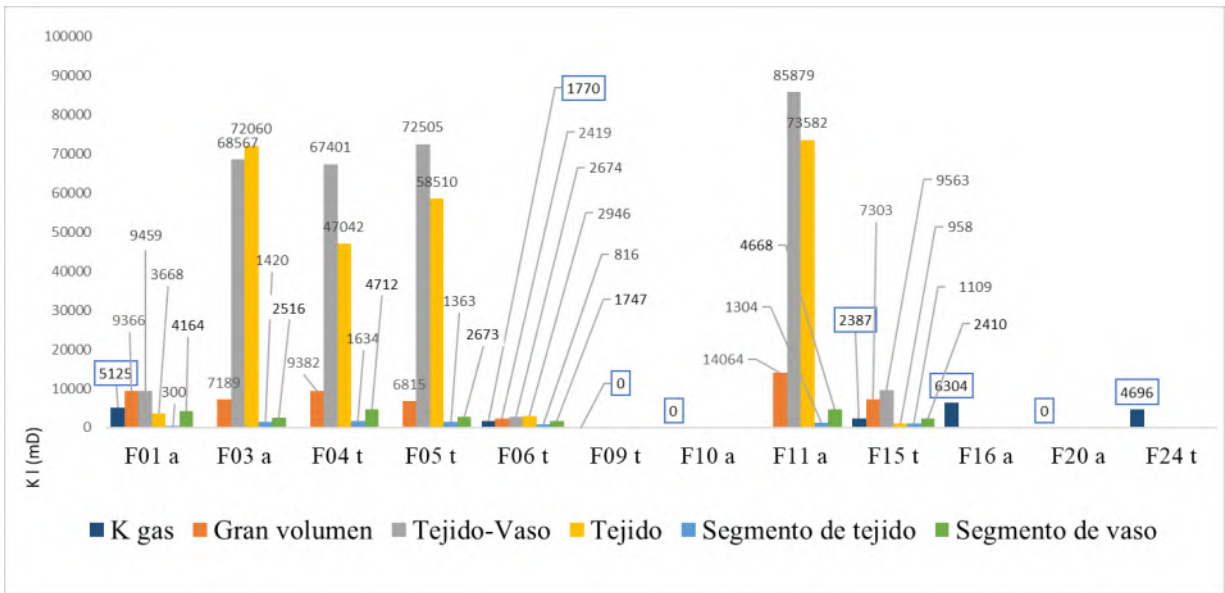


Figura 11. Permeabilidad longitudinal gaseosa y simulada numéricamente de *Fraxinus uhdei*.

En la permeabilidad en dirección radial (Fig. 12), los valores más cercanos a Kg los arrojó el segmento de tejido. Sin embargo, no fue consistente en todas las simulaciones dando valores fuera del rango de Kg en F11. El resto los cortes virtuales arrojaron valores alejados y fuera del rango de Kg.

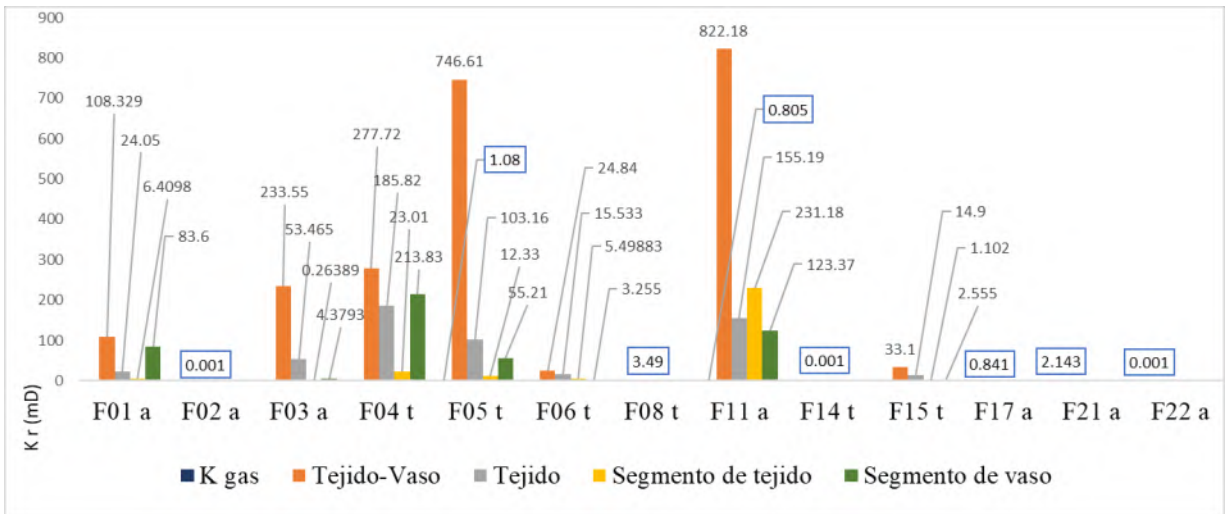


Figura 12. Permeabilidad radial gaseosa y simulada numéricamente de *Fraxinus uhdei*.

Los resultados en la permeabilidad tangencial indican valores próximos entre Kg y los valores del segmento de tejido. Al igual que en permeabilidad radial, el valor se alejó en una de las probetas (Fig. 13), elevándose hasta los 55 miliDarcys (mD). Los cortes virtuales del tejido con vaso, tejido con fibras completas y segmento de vaso arrojaron valores distantes de la permeabilidad tangencial gaseosa para esta especie.

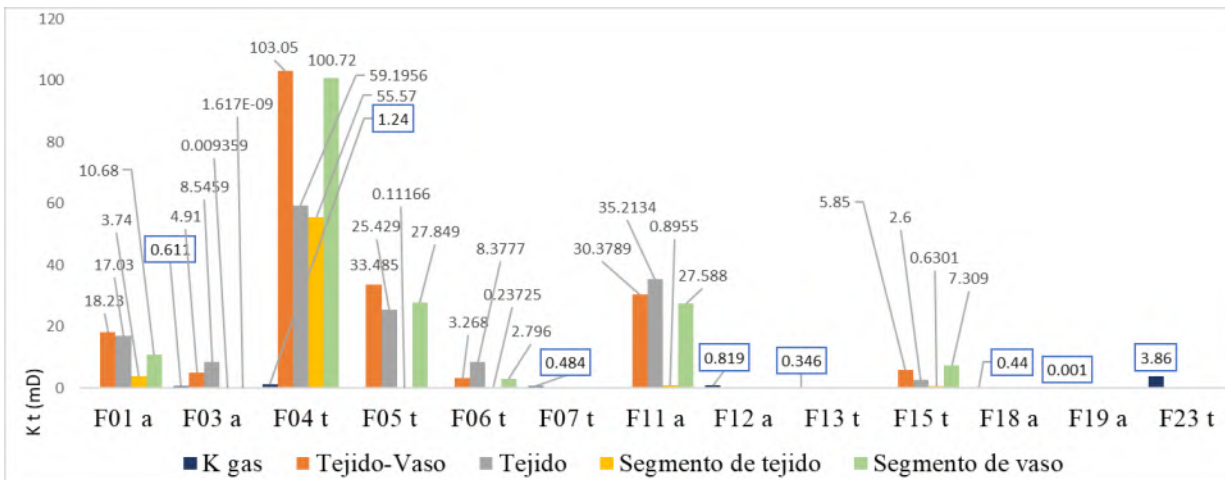


Figura 13. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de *Fraxinus uhdei*.

4.3.2 Valores de permeabilidad gaseosa y simulada en *Abies religiosa*

Los resultados de permeabilidad longitudinal en madera de conífera muestran gran diferencia

con Kg al simular en volumen que comprende traqueidas completas, como se observa en la Figura 14. Alcanzando valores de permeabilidad simulada de hasta 17569 Md, un valor muy fuera del rango obtenido en Kg. Los valores obtenidos en las simulaciones en los extremos de las traqueidas con puntuaciones incluidas hacia el final de estos, se mantuvo dentro del rango de Kg consistentemente, en todas las probetas y con gran proximidad.

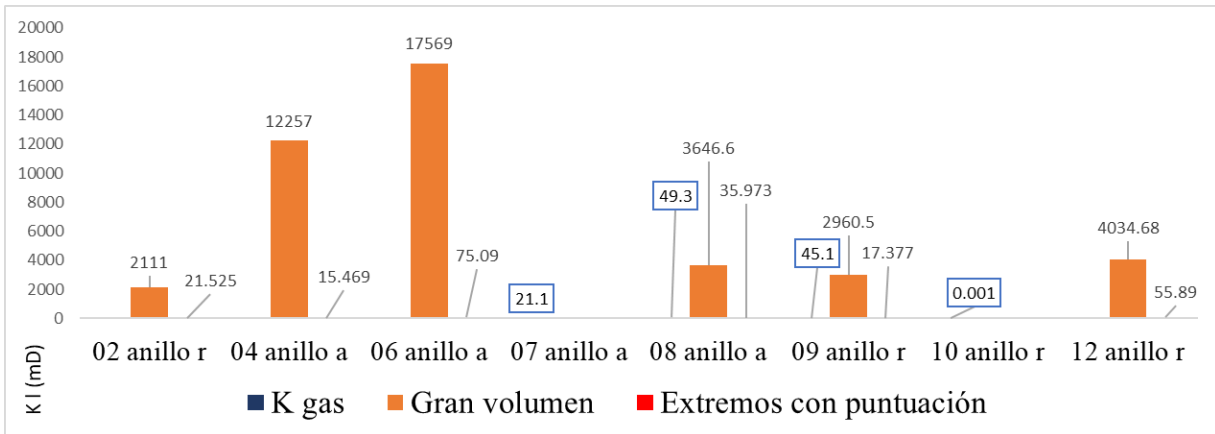


Figura 14. Permeabilidad longitudinal gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

En la permeabilidad radial de esta especie los resultados muestran (Fig. 15) que el valor en el segmento de tejido está fuera del rango de Kg, en algunas probetas muy por arriba de este. Caso contrario muestran los valores simulados en los extremos de las traqueidas con puntuaciones localizadas en estos mismos extremos. Aquí los valores son bastante próximos a Kg, dentro del rango y consistentes.

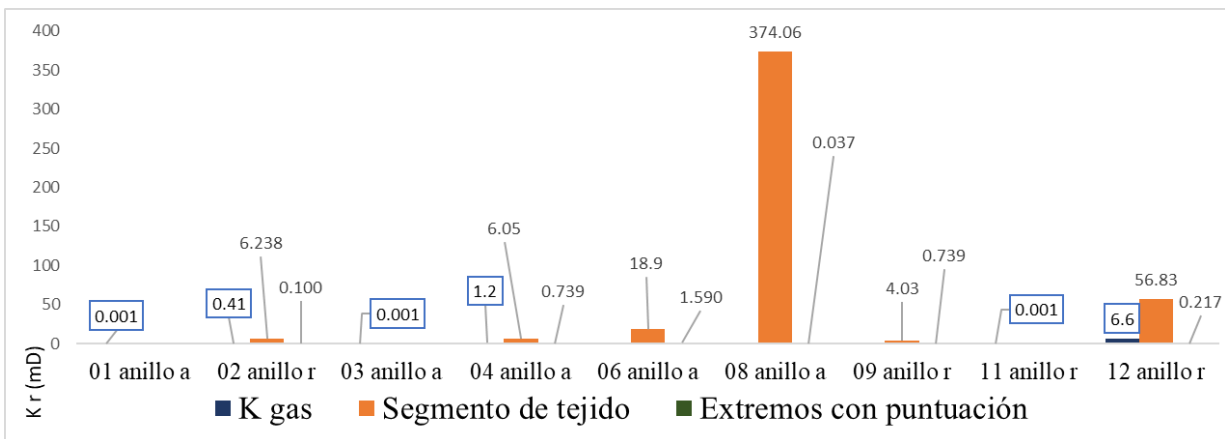


Figura 15. Permeabilidad radial gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

Los resultados en la permeabilidad tangencial indican proximidad, de los valores de los extremos de traqueidas con respecto a K_g , también son bastante consistentes y se encuentran dentro del rango de K_g (Fig. 16). En los segmentos de tejido los valores se muestran fuera del rango de K_g .

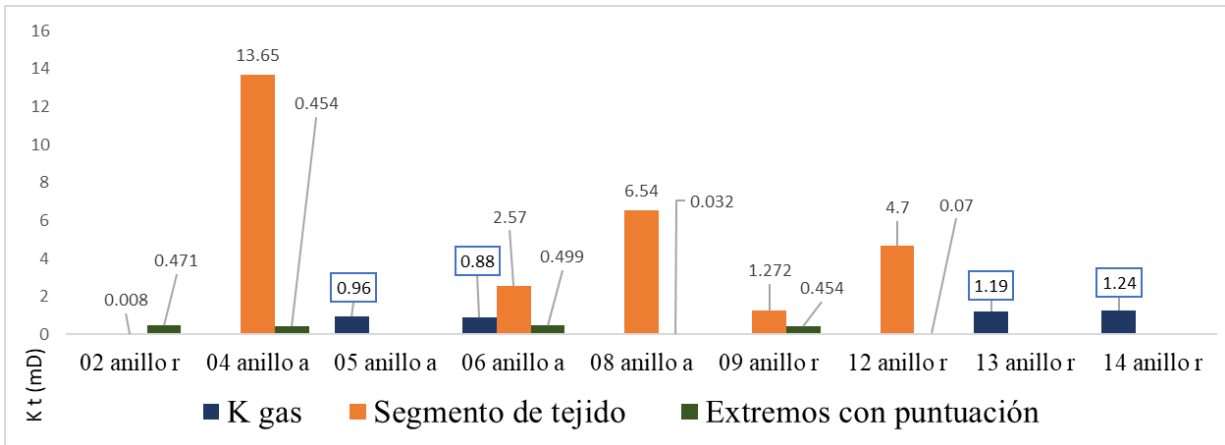


Figura 16. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

4.3.3 Iteraciones

Los gráficos de las iteraciones realizadas en las simulaciones alcanzaron valores de hasta más de 800000 (Anexos). Sin embargo, no mostraron un rango que garantice un mínimo de iteraciones de manera homogénea para cualquier dirección de simulación de flujo. De manera general, los volúmenes de mayor tamaño se resolvieron con menor número de iteraciones y a menor volumen fue posible mayor cantidad de iteraciones. Esto fue debido en parte por la cantidad de datos computacionales requeridos.

4.3.4 Extensiones en traqueidas de *Abies religiosa*

En la Figura 17 se muestra que esta especie tiene extensiones en los extremos de las traqueidas. Es posible observar la gran longitud de estas extensiones (Fig. 17 a), las cuales se extienden hasta conectar con el radio (Fig. 17 b) y además interconecta distintas traqueidas a través de puntuaciones en sus extremos (Fig. 17 c). Estas puntuaciones en extensiones se muestran en la Fig. 17 d y e.

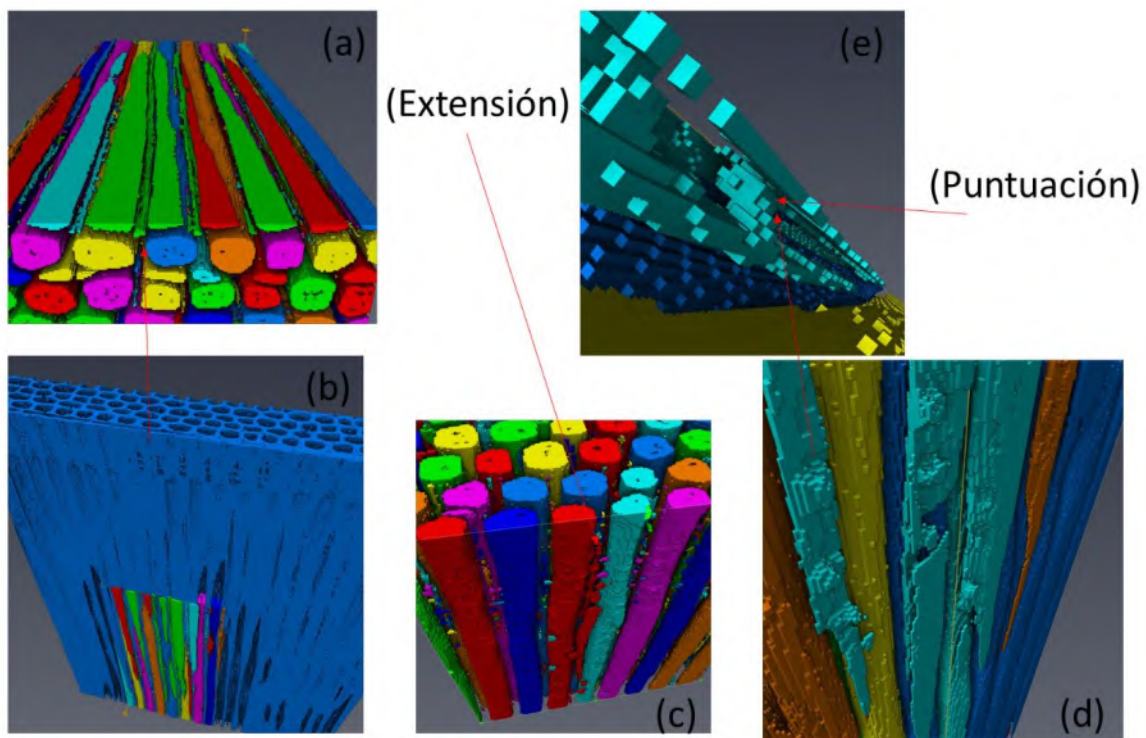


Figura 17. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

Al obtener las mediciones de permeabilidad simulada con grupos de traqueidas (Fig. 18 a), estas arrojaron valores más bajos que K_g , debido probablemente a la suma de obstáculos causada por las puntuaciones. Así mismo al simular en un cruce de extensiones el valor K_I suele ser inferior que K_g (Fig. 18 b). Cuando la simulación está dentro de únicamente una puntuación, los valores K también son inferiores a K_g (Fig. 18 c). El valor más próximo a K_g se obtuvo con la simulación un extremo de traqueida (Fig. 18 d).

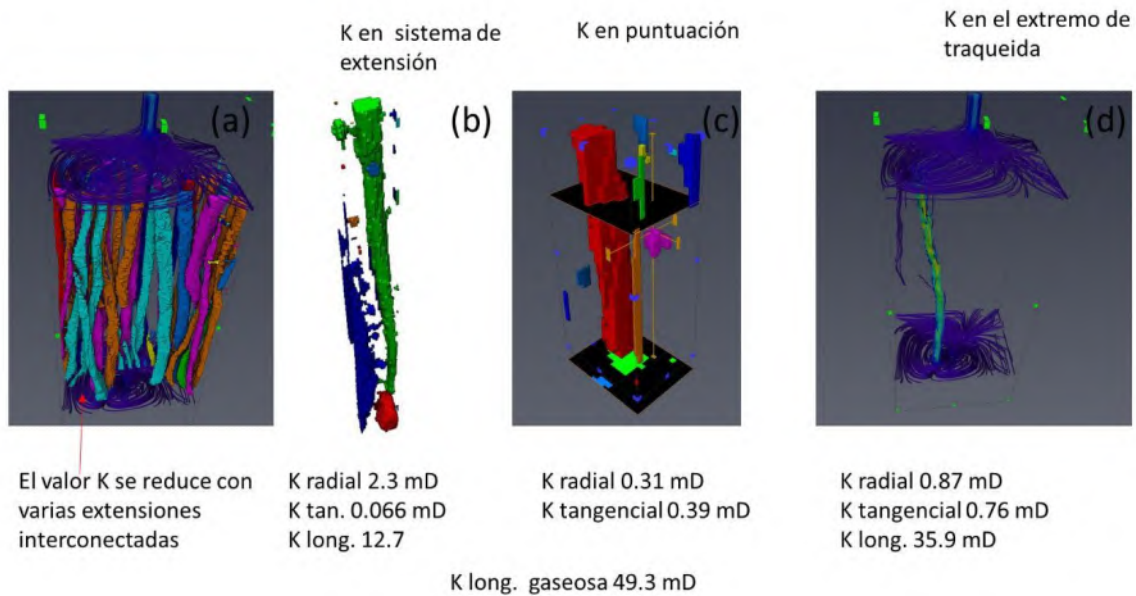


Figura 18. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

Las mediciones en los extremos de traqueidas arrojaron resultados coherentes cuando la medición se realiza en traqueidas con puntuaciones en los extremos (Fig. 19 a), en cambio cuando se utilizaron traqueidas sin puntuaciones en las extensiones (Fig. 19 b) o con puntuaciones hasta antes de iniciar la extensión (Fig. 19 c) los valores de K simulada se alejaron de K_g . La cantidad de traqueidas como las mostradas en la figura 19 b y c, deberán ser la causa de valores bajos de permeabilidad. Por este motivo, durante la simulación se seleccionaron traqueidas como la mostrada en la Figura 19 a.

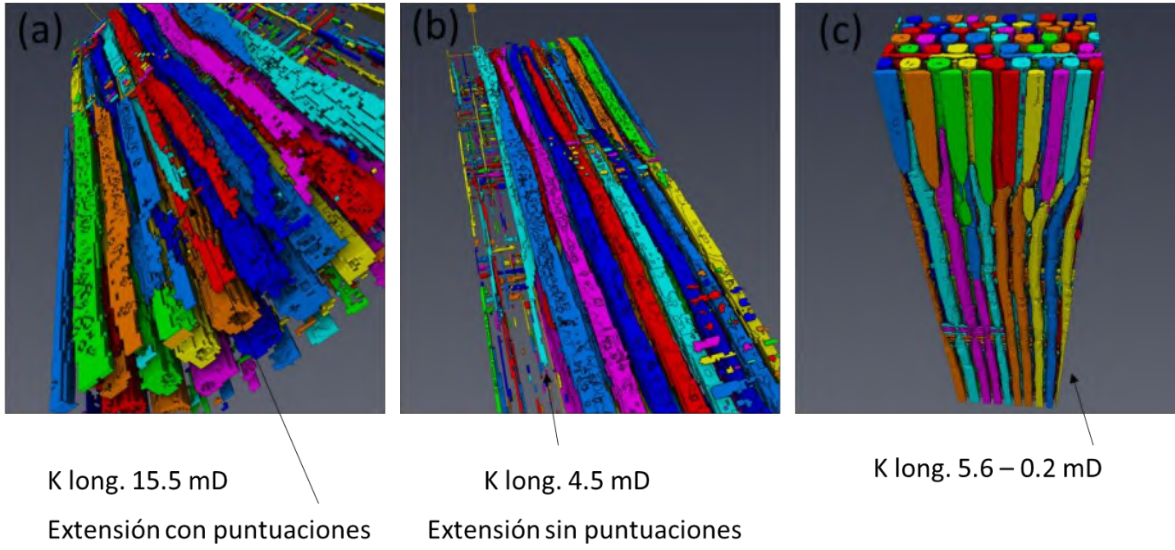


Figura 19. Permeabilidad tangencial gaseosa y simulada numéricamente de *Abies religiosa*.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tamaño empleado de probeta tiene efectos importantes en la medición de los parámetros que controlan al flujo. Las imágenes de probetas con diámetros cercanos a los 5 mm de diámetro alteran el cálculo de los parámetros dificultando la medición de los que requieren mayores definiciones, como los son los elementos que conforman las puntuaciones, las rugosidades de la pared celular y la pared misma. La medición de los parámetros con probetas de diámetros inferiores a 2 mm presenta mayor precisión en las líneas de flujo y por tanto en las velocidades o caídas de presión. El flujo masivo con probetas más pequeñas presenta distintas trayectorias de flujo en las cavidades de la madera, lo que demuestra que los parámetros anatómicos son concebidos de manera distinta a muestras de diámetros cercanos a los 5 mm.

En el análisis de una latifoliada con vasos obstruidos por materiales distintos a las platinas, las simulaciones mostraron que el flujo presenta una trayectoria relevante a través de las fibras. El poco flujo en este tipo de tejido, puede ser estimado por las simulaciones en mayor resolución. En latifoliadas con vasos no obstruidos, pueden ser empleadas más eficientemente menores resoluciones que enfoquen las cavidades de vasos y radios.

En una conífera, la resolución de los extremos y las membranas en puntuaciones de las traqueidas, así como la longitud de las mismas, afectan fuertemente el tipo de flujo en las simulaciones.

Las dimensiones de las secciones transversales y la longitud de los volúmenes utilizados en las simulaciones de permeabilidad afectan significativamente los valores de esta variable dependiente, debido a los factores de la anatomía de la madera como la anisotropía.

La resistencia al flujo presentada por los obstáculos de la madera actúa como un conjunto y no de manera aislada.

El análisis de los gradientes de presión, contribuye de manera importante para esclarecer el comportamiento de las líneas de flujo.

Los modelos estadísticos de regresión múltiple muestran que la interacción entre variables que controlan el flujo, son capaces de pronosticar los cambios significativamente.

Se planteó y propuso una tortuosidad influenciada por la anisotropía de la madera, para controlar los efectos del tamaño de los volúmenes en la medición de la permeabilidad. Esta tortuosidad demostró tener buenas propiedades de asociación y contemplar todos los caminos posibles de flujo masivo y el total de volumen para ello.

Se obtuvieron cuatro modelos de regresión con porcentajes de varianza explicada muy cercanos a valores altos y todos significativos.

En los cuatro modelos de regresión obtenidos, la variable de maniobra fue la tortuosidad anisotrópica, con aportación significativa en todos los modelos.

REFERENCIAS

- Ahmed, S. A., Chun, S. K., Miller, R. B., Chong, S. H., & Kim, A. J. (2011). Liquid penetration in different cells of two hardwood species. *Journal of wood science*, 57, 179-188.
- Baecker, V. (2010). Image processing and analysis with Image J and MRI Cell Image Analyzer. *Montpellier RIO Imaging*, 1-93.
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Guardiola-Albert, C., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Rodríguez-Morata, C. (2013) June. Aplicación de la tomografía axial computarizada (TAC) para el análisis de la estructura interna de árboles afectados por avenidas torrenciales. VI Congreso Forestal Español.
- Bolton, A. J., & Petty, J. A. (1978). A model describing axial flow of liquids through conifer wood. *Wood Science and Technology*, 12(1), 37-48.
- Bramhall, G., & Wilson, J. W. (1971). Axial gas permeability of Douglas fir microsections dried by various techniques. *Wood Science*, 3(4), 223-230.
- Bultreys, T., De Boever, W., & Cnudde, V. (2016). Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art. *Earth-Science Reviews*, 155, 93-128.
- Comstock, G. L. (1965). Longitudinal permeability of green eastern hemlock. *Forest Products Journal*, 15(10), 441-449.
- Erickson, H. D. (1970). Permeability of southern pine wood-a review. *Wood Science*, 2(3), 149-58.
- Fernández Oro, J. M. F. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté.
- Furuno, T., Imamura, Y., & Kajita, H. (2004). The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Science and Technology*, 37, 349-361.
- Fujikawa, S., & Ishida, S. (1975). Ultrastructure of ray parenchyma cell wall of softwood.
- Hansmann, C. H., Wimmer, W. G. R., & Teischinger, A. (2002). Permeability of wood-A review. *Drevarsky Vyskum*, 47(4), 1-16.
- Kininmonth, J. A. (1971). Permeability and fine structure of certain hardwoods and effects on

- drying. I. Transverse permeability of wood to micro-filtered water.
- Krabbenhøft, K. (2004). Moisture transport in wood: A study of physical-mathematical models and their numerical implementation.
- Krabbenhøft, K., & Damkilde, L. (2004). Double porosity models for the description of water infiltration in wood. *Wood Science and Technology*, 38, 641-659.
- Kuroda, N., & Siau, J. F. (1988). Evidence of nonlinear flow in softwoods from wood permeability measurements. *Wood and fiber science*, 162-169.
- Langrish TAG, Walker JCF (1993) Transport processes in wood. In: Walker JCF (ed) Primary wood processing, principles and practice, 2nd edn. USDA, Madison, pp 121–152
- Leggate, W., Shirmohammadi, M., McGavin, R. L., Chandra, K. A., Knackstedt, M., Knuefing, L., & Turner, M. (2020). Influence of wood's anatomical and resin traits on the radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) wood in Australia. *BioResources*, 15(3), 6851-6873.
- Louërat, M., Ayouz, M., & Perré, P. (2018). Difusión de calor y humedad en paneles de abeto y madera calculados a partir de morfologías 3D utilizando el método Lattice Boltzmann. *Revista Internacional de Ciencias Térmicas*, 130,471-483.
- Mantanis, G. I., & Young, R. A. (1997). Wetting of wood. *Wood science and Technology*, 31, 339-353.
- Marcos, A. G., de Pisón Ascacíbar, F. J. M., Elías, F. A., Limas, M. C., Meré, J. B. O., & González, E. P. V. (2006). Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial. *Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial*.
- Matsunaga, H., Kiguchi, M., & Evans, P. D. (2009). Microdistribution of copper-carbonate and iron oxide nanoparticles in treated wood. *Journal of Nanoparticle Research*, 11, 1087-1098.
- McKinley, P., Kamke, F. A., Sinha, A., De Andrade, V., & Jakes, J. E. (2018). Analysis of adhesive penetration into wood using nano-X-ray computed tomography. *Wood and Fiber Science*, 50(1).
- Miller, M. L., Roddy, A. B., Brodersen, C. R., McElrone, A. J., & Johnson, D. M. (2020). Anatomical and hydraulic responses to desiccation in emergent conifer seedlings. *American journal of botany*, 107(8), 1177-1188.
- Montero, C., Rozas, C., & Picarte, C. (2020). Simulation of drying process in *Eucalyptus nitens*

- sawn-wood using the diffusive model in a one-dimensional and isothermal conditions. *Scientia Forestalis*, (126).
- Moretón Fernández, Á. (2016). Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio.
- Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. Pearson Educación
- Nixon, M., & Aguado, A. (2019). *Feature extraction and image processing for computer vision*. Academic press.
- Owoyemi, J. M. (2010). The influence of preservative viscosity on fluid absorption by Gmelina arborea wood. *For. For. Prod. J*, 3, 32-39.
- Perré, P., Rémond, R., & Turner, I. W. (2007). Comprehensive drying models based on volume averaging: background, application and perspective. *Modern drying technology*, 1, 1-55.
- Perré, P., & Turner, I. W. (1999). A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of heat and mass transfer*, 42(24), 4501-4521.
- Petty, J. A., & Preston, R. D. (1969). The dimensions and number of pit membrane pores in conifer wood. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 172(1027), 137-151.
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1998). *Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones* 3ª ed. Madrid España.
- Resch, H., & Ecklund, B. A. (1964). Permeability of wood: exemplified by measurements on redwood. *Forest products journal*, 5, 199-206.
- Rivera Ramos, J. G., Espinoza Herrera, R., Arteaga, D., Cruz de León, J., & Olmos, L. (2021). Microstructural analysis of Eucalyptus nitens wood through computed microtomography. *Wood Material Science & Engineering*, 16(5), 344-357.
- Siau JF (1984) *Transport processes in wood*. Springer, Heidelberg.
- Siau, J. F., & Petty, J. A. (1979). Corrections for capillaries used in permeability measurements of wood. *Wood Science and Technology*, 13(3), 179-185.
- Siau, J. F., Smith, W. B., & Meyer, J. A. (1978). Wood-polymer composites from southern hardwoods. *Wood Science*.
- Tao, Y., Li, Z., & Li, P. (2020). A design and fabrication method for wood-inspired composites by micro X-ray computed tomography and 3D printing. *Applied Sciences*, 10(4), 1400.
- Tarmian, A., & Perre, P. (2009). Air permeability in longitudinal and radial directions of

- compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L.
- Tarmian, A., Zahedi Tajrishi, I., Oladi, R., & Efhamisisi, D. (2020). Treatability of wood for pressure treatment processes: a literature review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 635-660.
- Tondi, G., Thévenon, M. F., Mies, B., Standfest, G., Petutschnigg, A., & Wieland, S. (2013). Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity and wood anatomy in wood infiltration. *Wood science and technology*, 47, 615-626.
- Usta, I. (2005). A review of the configuration of bordered pits to stimulate the fluid flow. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7(2), 121-132.
- Wardrop, A. B., & Davies, G. W. (1961). Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood.
- Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.03.003>
- Yörür, H., & Kayahan, K. (2018). Improving impregnation and penetration properties of refractory woods through cryogenic treatment. *BioRes* 13(1):1829–1842.

6 APÉNDICES

6.1 Lista de publicaciones

- Apendice I Rivera Ramos, J. G., Espinoza Herrera, R., Arteaga, D., Cruz de Leon, J., & Olmos, L. (2023). Analyzing the bulk flow through porosity of *Dalbergia ruddae* wood by coupling 3D image analysis and numerical simulations. *Wood Material Science & Engineering*, 18(4), 1521-1533.
- Apendice II Rivera-Ramos, J. G., Cruz de León, J., Arteaga, D., Espinoza-Herrera, R., Arreola García, E., Arroyo-Albiter, M., & Olmos, L. (2024). Influence of Anatomical Spatial Architecture of *Pinus devoniana* on Pressure Gradients Inferred from Coupling Three-Dimensional CT Imaging and Numerical Flow Simulations. *Forests*, 15(8), 1403.
- Apendice III Rivera-Ramos, J. G., Cruz de León, J., Olmos, L., Espinoza-Herrera, R., & Arteaga, D. (2025). Anatomical characterization of *Fraxinus uhdei* wood by coupling computed microtomography and SEM. *MRS Advances*, 10(1), 59-64.
- Apendice IV Herrera, R. E., Olmos, L., García, E. A., Ramos, J. G. R., Olivera, J. A. Á., & Arteaga, D. (2025). 3D tomographic study of the collapse of *Eucalyptus nitens* wood derived from drying process. *MRS Advances*, 10(5), 581-585.

Juan Gabriel Rivera Ramos

Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplando análisis de imágenes 3D co...

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:522957769

Fecha de entrega

4 nov 2025, 2:09 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

4 nov 2025, 2:18 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplando análisis....pdf

Tamaño del archivo

6.8 MB

119 páginas

29.503 palabras

163.919 caracteres


9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Juan Gabriel Rivera Ramos

Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplando análisis de imágenes 3D co...

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:522957769

Fecha de entrega

4 nov 2025, 2:09 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

4 nov 2025, 2:16 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplando análisis....pdf

Tamaño del archivo

6.8 MB

119 páginas




29.503 palabras

163.919 caracteres

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera	
Título del trabajo	Investigación del flujo de fluidos a través de madera de coníferas y latifoliadas acoplado análisis de imágenes 3D con simulaciones numéricas	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Juan Gabriel Rivera Ramos	8903321e
Director	Jorge Enrique Ambriz Parra	jorge.ambriz@umich.mx
Codirector	Luis Rafael Olmos Navarrete	luis.olmos@umich.mx
Coordinador del programa	Crisanto Velázquez Becerra	cvelazquez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	si	Artículos citados
Traducción a otra lengua	si	Abstract
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Juan Gabriel Rivera Ramos
Lugar y fecha	Morelia Mich. 04/11/2025