



Anisotropía en la resistividad eléctrica de tres maderas mexicanas

Anisotropy in the electrical resistivity of three Mexican wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*} , Sonia Correa Jurado¹, Nancy Eloísa Rodríguez Olalde¹, Faustino Ruiz Aquino²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

²Universidad de la Sierra Juárez

Historial

Manuscrito recibido: 15 de septiembre de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Javier Ramón Sotomayor Castellanos.

javier.sotomayor@umich.mx

ORCID: 0000-0002-1527-8801

Resumen

El objetivo de la investigación fue medir la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. Se tomaron doce muestras de madera sólida de cada una de las especies y se analizaron para determinar la densidad, el contenido de humedad y la resistencia eléctrica. Las probetas de pequeñas dimensiones fueron sometidas a cuatro tensiones y se determinó su resistividad eléctrica. La magnitud de la resistividad eléctrica varía según la especie y direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal. La heterogeneidad y la estructura anatómica de la madera, así como el tipo y la orientación de las solicitaciones aplicadas, explican la variación entre especies y direcciones.

Palabras clave: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla*, densidad de la madera, heterogeneidad de la madera.

Introducción

La madera es un conductor de masa (*p. ej.* agua) (Rodríguez-Zaccaro y Groover, 2019; Alvarado y Terrazas, 2023), de ondas mecánicas (*p. ej.* sonido) (Bertoldo *et al.*, 2023; Bucur, 2023), así como de fluidos térmicos (*p. ej.* calor) (Chen *et al.*, 2023; Trochonowicz y Szostak, 2023) y de transmisión de corriente eléctrica (*p. ej.* voltaje) (Kirker *et al.*, 2026; Fredriksson *et al.*, 2021). Estos fenómenos de conducción y transporte en la madera están interconectados y se han documentado especie por especie, variable por variable y para temas de investigación específicos. Por consiguiente, los datos experimentales en la literatura incluyen amplias magnitudes y particularidades, lo que dificulta la

Abstract

The objective of the research was to measure the electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, and *Quercus scytophylla*. Twelve solid wood samples were taken from each species and analyzed to determine density, moisture content, and electrical resistance. The small-sized samples were subjected to four electric tensions, and their electrical resistivity was determined. The magnitude of electrical resistivity varies according to the species and the directions of radial, tangential, and longitudinal anisotropy. The heterogeneity and anatomical structure of wood, as well as the type and orientation of the applied stresses, explain the variation between species and directions.

Keywords: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla*, wood density, wood heterogeneity.

comparación de resultados.

El fenómeno de la transmisión de los protones y electrones a través de un soporte material, en este caso la madera, es considerado erróneamente como un fluido eléctrico (Zelinka *et al.*, 2015; Quintela y Redondo, 2024). El cuerpo de conocimiento sobre este tema de investigación hace referencia especialmente a su correspondencia con el contenido de humedad en la madera (Conde *et al.*, 2021), la detección de biodeterioro (Martin y Günther, 2013), la inspección de árboles (Ganthaler *et al.*, 2019) y sus aplicaciones en la funcionalización de la pared celular (Panzarasa y Burgert, 2022; Łukawski *et al.*, 2023).

Los factores que afectan la medición de la resistencia

eléctrica en la madera son, por una parte, factores intrínsecos. Principalmente su contenido de humedad, la especie, la temperatura, la anisotropía, la composición química, la densidad y la estructura anatómica. De igual manera, las condiciones empíricas que alteran las mediciones son los tipos de electrodos y de la configuración de contacto, la magnitud y duración del voltaje aplicado, así como la forma y dimensiones de la probeta (Hafsa *et al.*, 2019; Baránski *et al.*, 2021; Daouk *et al.* 2021; van Blokland y Adamopoulos, 2022).

Al igual que otras propiedades físico-mecánicas de la madera, su resistividad eléctrica está relacionada con tres de las principales propiedades básicas del material:

- La variabilidad de la madera se refiere a las discrepancias observadas en la magnitud de los parámetros físicos entre especies, árboles y ubicación relativa en cada individuo (Moore y Cown, 2015);
- La heterogeneidad, la cual se manifiesta en la variación en la magnitud de las propiedades físicas en un volumen mínimo representativo de madera, en función de su ubicación relativa en el árbol y/o en el plano leñoso, y en concordancia con las diversas escalas de observación en su estructura jerárquica: El volumen mínimo representativo en una escala macroscópica, el anillo de crecimiento en un nivel meso, y en una escala microscópica, la pared celular y su composición química (Arriaga *et al.*, 2023);
- La anisotropía, una característica que alude igualmente a la variación en la magnitud de sus propiedades físicas, pero esta vez en función de la orientación de medición. Las direcciones radial, tangencial y longitudinal son privilegiadas en relación con el plano leñoso. Esta característica se manifiesta igualmente en las diversas escalas de observación de la organización jerárquica de la madera (Hofstetter y Gamstedt, 2009; Golovin *et al.*, 2022).

Según las diferentes direcciones de observación, la anisotropía de la madera modifica las magnitudes de sus características físicas (Sotomayor *et al.*, 2010; Nursultanov *et al.*, 2020) y mecánicas (Mascia y Lahr, 2006). Para simplificar el análisis, se transforma la geometría referida a los ejes materiales de un volumen elemental de madera (**Figura 1**) en un sistema de coordenadas geométricas en tres direcciones ortogonales: Radial (R), Tangencial (T) y Longitudinal (L).

En el mismo sentido, para caracterizar las propiedades eléctricas de la madera se utiliza la analogía electromecánica entre un sistema de fuerzas mecánicas

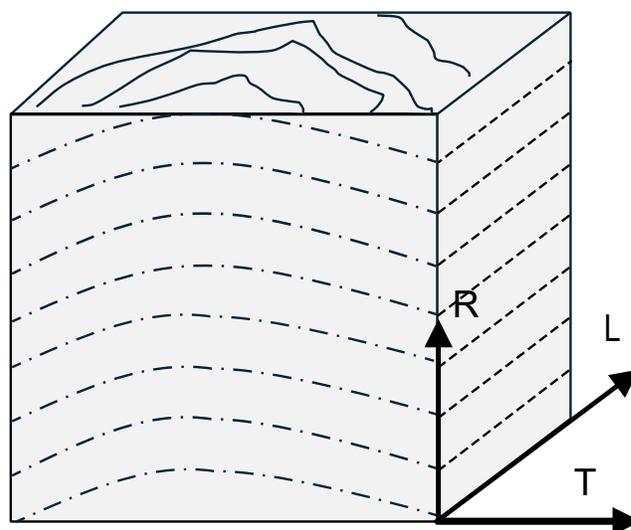


Figura 1. Modelo anisotrópico de un volumen de madera. R = Dirección radial, T = Dirección tangencial, L = Dirección longitudinal.

en equilibrio (Ecuación 1) y un circuito eléctrico elemental (Ecuación 2) (**Figura 2**) (Polocoşer *et al.*, 2017).

La determinación del módulo elástico es el objetivo principal de la caracterización mecánica de la madera. La resistividad es el parámetro de utilidad práctica en la caracterización de las propiedades eléctricas. Se puede determinar la resistencia del circuito aplicando la ley de Ohm (Ecuación 3, Fredriksson *et al.*, 2015) por afinidad entre los dos modelos de la analogía electromecánica (**Figura 2**).

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Donde:

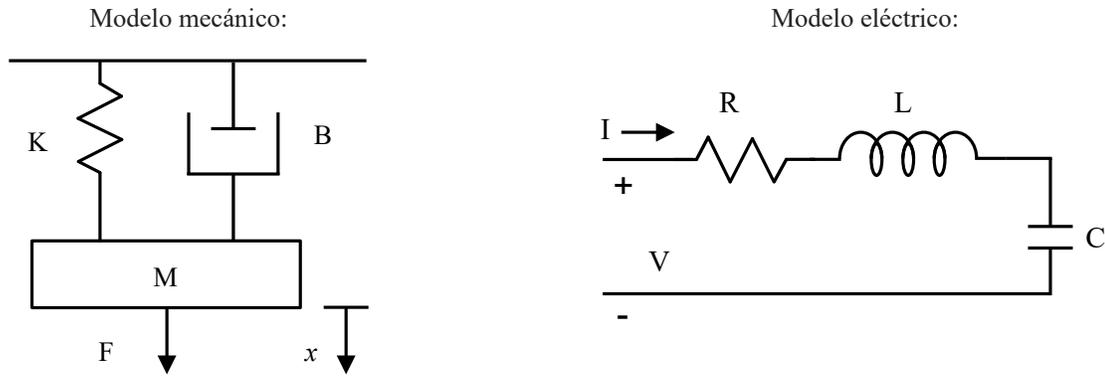
R = Resistencia

V = Voltaje

I = Corriente

La resistencia eléctrica de la madera, también conocida como resistencia eléctrica específica, se mide mediante la resistencia óhmica de una probeta en un área de sección transversal y a una distancia determinada entre los electrodos y/o posiciones de aplicación de voltaje. La resistencia eléctrica de la madera es una propiedad intrínseca del material (Hafsa *et al.*, 2021). Por lo tanto, para su medición, primero debe analizarse su resistencia eléctrica.

Los datos sobre la resistencia eléctrica se han



Ecuación de movimiento:

$$F = M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + B \frac{\partial x}{\partial t} + K x \quad (1)$$

F = Fuerza

K = Constante elástica

B = Coeficiente de amortiguamiento

M = Masa

x = Desplazamiento

Ecuación de malla:

$$V = L \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + R \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{q}{C} \quad (2)$$

V = Voltaje

L = Inductancia

R = Resistencia

C = Capacitancia

q = Carga

I = Corriente con: $\frac{\partial q}{\partial t}$

Figura 2. Analogía electromecánica.

documentado en diversas especies y casos de estudio. Los resultados de este parámetro son específicos para el tamaño de las probetas, el contenido de humedad en la madera y la configuración específica de las probetas porque es de carácter extensivo (Gao *et al.*, 2018). Además, el voltaje utilizado en las pruebas crea incertidumbre adicional en los resultados, situación que implica realizar estudios completos respaldados por análisis estadísticos y controlar las fuentes de variación (Slávik *et al.*, 2019).

El objetivo de esta investigación fue determinar la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var *pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. y *Quercus scytophylla* Liebm. Para lograr este objetivo, se preparó un experimento completamente homogéneo, al azar y balanceado, y se utilizó un método de laboratorio innovador para caracterizar probetas de pequeñas dimensiones.

Materiales y métodos

Las pruebas de laboratorio modificaron el protocolo experimental reportado por Sotomayor *et al.* (2022). Para la presente investigación se fabricó un dispositivo para sujetar las probetas, se utilizó un aparato más potente

para medir la resistencia eléctrica y se aplicaron cuatro tensiones de prueba (voltajes). El material experimental proviene del mismo lote de madera de los autores citados pero las probetas son diferentes. Así, los resultados aquí presentados son originales e inéditos. Se prepararon doce probetas de madera sólida de cada una de las especies *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Sus dimensiones fueron 20 mm por 20 mm por 20 mm. En lo posible se procuró que sus aristas coincidieran con las direcciones de anisotropía definidas en la **Figura 1**. Las especies en estudio tienen importantes usos actuales y potenciales. Las características tecnológicas de estas maderas están descritas en Rendón *et al.* (2021).

La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento a temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65%, hasta que adquirió un peso constante. La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de la probeta al momento del ensayo (International Organization for Standardization, 2014a). Después de las pruebas de resistividad eléctrica, el contenido de humedad de la madera se determinó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en el estado anhidro (International Organization for Standardization, 2014b).

Para realizar las pruebas de resistividad eléctrica, cada probeta se calibró con un cepillo rotativo de 12", marca *Youba Induction Motor* y con potencia de 1,5 H.P. en sus seis caras y luego se posicionó entre los soportes y superficies de contacto del dispositivo, como se muestra en la **Figura 3**.

El dispositivo aplicó presión suficiente para asegurar un flujo estable de corriente directa según la dirección y el acomodo de la probeta. Esto se logró mediante un contacto uniforme entre la madera y las placas de cobre de 0.9 mm de espesor con una resistividad eléctrica de $1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ (**Figura 4**).

Esta configuración asume que la madera es uniforme en toda la probeta, tanto en su estructura física como en su sección transversal. Además, considera que el campo eléctrico y la densidad de corriente son constantes y paralelos a la dirección de medición en todo el volumen de la probeta.

Para cada dirección de anisotropía, se computó la resistencia eléctrica con un medidor de aislamiento marca Fluke, modelo 1560 (Francia). Se aplicaron voltajes de 500, 1000, 2500 y 5000 voltios con una duración de cada prueba de diez segundos. Durante el procedimiento se observó que todas las tensiones de prueba inducían mediciones de resistencia eléctrica repetitivas y estables. La temperatura de la madera durante las pruebas fue de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Temperatura del laboratorio). En cada prueba se realizaron tres mediciones, y con su promedio se calculó la resistividad eléctrica mediante la ecuación 4 (Mastantuoni *et al.*, 2024).



Figura 3. Pruebas de resistividad eléctrica.

$$\rho = R_{CH} \cdot \left(\frac{A}{L} \right) \quad (4)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega \text{ m}$)

R_{CH} = Resistencia eléctrica (Ω)

A = Área transversal a la dirección del flujo eléctrico (m^2)

L = Distancia entre las placas de aplicación del voltaje (m)

En lo subsecuente, al símbolo de la resistividad eléctrica ρ se le asocian los subíndices R, T y L para explicitar que la dirección del flujo eléctrico se midió en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente: ρ_R, ρ_T, ρ_L .

Diseño experimental

Se establecieron tres unidades experimentales (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*), calculando la resistividad de cada especie según la ecuación 4 y luego los resultados se agruparon por resistividad radial (R), resistividad tangencial (T) y resistividad longitudinal (L). Cada grupo experimentó cuatro tensiones diferentes: 500, 1000, 2500 y 5000 voltios. Por lo tanto, se formaron 36 muestras, cada una con tres especies, tres direcciones y cuatro tensiones.

Se realizaron pruebas de normalidad de las distribuciones en cada una de las muestras. El criterio de demarcación para considerar una distribución normal fue valores del sesgo estandarizado (SE) y apuntamiento

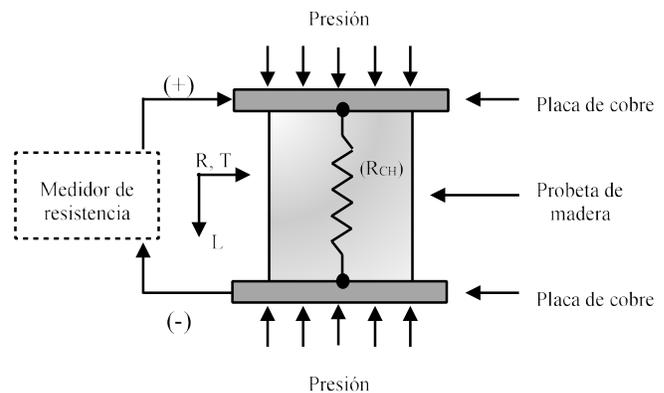


Figura 4. Configuración de las pruebas de resistividad eléctrica. RCH = Resistencia eléctrica; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal (Sotomayor *et al.*, 2022).

estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2, +2]$. Para la densidad (ρ_{CH}) y las resistividades eléctricas se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). El contenido de humedad (CH) es una variable controlada. Se efectuaron pruebas de verificación y análisis de varianza con la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ donde σ es la desviación estándar y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. El criterio de demarcación fueron valores de $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$, para considerar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95% de confianza. Se realizaron pruebas de diferencias de medianas (x) de Kruskal-Wallis (K-W) cuando este criterio no se cumplió. Se utilizaron la hipótesis nula: $H_0: x_1 = x_2$, donde x es la mediana y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas.

Se practicaron pruebas de rangos múltiples (RM) con el criterio de demarcación de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de X .

Resultados y discusión

Los resultados de las pruebas de normalidad indican que las muestras cumplen con el criterio de demarcación para considerar que sus distribuciones son normales (**Tabla 1**). Caso excepcional son las resistividades de *T. rosea* para los voltajes de 500 y 1000 voltios que no satisficieron el criterio de demarcación $[-2 < SE, AE < +2]$ resultado que condujo a realizar pruebas de Kruskal-Wallis. Las pruebas de verificación de varianza muestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar. Estos resultados permitieron practicar los análisis de varianza entre las resistividades correspondientes a los diferentes voltajes y diferenciar los resultados especie por especie. Un resultado similar se obtuvo de las pruebas de Kruskal-Wallis para las resistividades de *T. rosea* y *Q. scytophylla* para sus direcciones longitudinales. Empero, las resistividades longitudinales de *T. rosea* y *Q. scytophylla* denotan diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$) cuando son determinadas con voltajes diferentes.

Los resultados del análisis de varianza muestran que no hay diferencias significativas entre las resistividades determinadas con diferentes voltajes (**Tabla 1**). Los grupos homogéneos determinados con las pruebas de

rangos múltiples establecen que las resistividades de *T. rosea* se agrupan en voltajes de 500 y 1000 voltios y se distinguen de las determinadas con voltajes de 1000, 2500 y 5000 voltios; igualmente, las resistividades longitudinales de *Q. scytophylla* se agrupan por pares: 500 y 1000 voltios, 1000 y 2500 voltios y 2500 y 5000 voltios. De manera similar, las pruebas de múltiples rangos señalan que, para las direcciones radial y tangencial de las tres especies, las medias de las resistividades se agrupan y no manifiestan diferencias entre ellas, un resultado que se alinea con el análisis de variabilidad. En el mismo sentido, para las direcciones longitudinal de *P. pseudostrobus* sus resultados correspondientes a los cuatro voltajes se agrupan en una sola columna. En otras palabras, no existen diferencias estadísticas entre ellos.

Comparado con *P. pseudostrobus* y *T. rosea*, la madera con mayor densidad de *Q. scytophylla* tiene una resistividad mayor (**Tabla 2; Figura 5**). Los contenidos de humedad de las tres especies son similares entre ellas y varían del 7% al 8%. Las densidades de *P. pseudostrobus* y *T. rosea* son semejantes, así como sus coeficientes de variación CV de 2% (**Tabla 2; Figura 6**). La densidad de *Q. scytophylla*, por otro lado, es 29% mayor que la de las especies anteriores y exhibe un CV igualmente pequeño de 1%. Estos resultados son similares a los reportados por Sotomayor *et al.* (2022) para las mismas especies estudiadas en la presente investigación y exhiben valores aceptables para este parámetro al interior de una misma especie.

Se observan pequeñas variaciones porcentuales entre las resistividades de cada especie, a pesar de que el análisis de varianza indica que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes voltajes (**Tabla 3**). Las direcciones longitudinales de *T. rosea* y *Q. scytophylla* se corresponden con las del análisis estadístico, lo que indica que hay diferencias significativas entre estas muestras. Estos son dos casos distintos. Los coeficientes de variación de la resistividad oscilan entre el 11% y el 45%. Estos valores son relativamente altos para las características físicas de la madera, pero para su resistencia y/o resistividad son similares a los reportados en la bibliografía. Por ejemplo, Gao *et al.* (2018) determinaron la resistencia eléctrica longitudinal de *Populus davidiana* con un coeficiente de variación del 9% ($\rho_{CH} = 350 \text{ kg m}^{-3}$, CH = 10%).

La variación en los valores correspondientes a las re-

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico.

| Direcciones de anisotropía | Voltajes (Voltios) | SE [-2, +2] | AE [-2, +2] | Ver-var P _(α = 0.05) | Anova P _(α = 0.05) | K-W P _(α = 0.05) | RM | | |
|----------------------------|--------------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----|---|---|
| <i>Pinus pseudostrobus</i> | | | | | | | | | |
| Radial | 500 | 1,132 | -0,1488 | 0,998 | 0,997 | | X | | |
| | 1000 | 1,108 | -0,1504 | | | | X | | |
| | 2500 | 1,133 | -0,1144 | | | | X | | |
| | 5000 | 1,119 | -0,0456 | | | | X | | |
| Tangencial | 500 | 1,353 | -0,2571 | 0,985 | 0,996 | | X | | |
| | 1000 | 1,608 | 0,2759 | | | | X | | |
| | 2500 | 1,498 | 0,0912 | | | | X | | |
| | 5000 | 1,611 | 0,3045 | | | | X | | |
| Longitudinal | 500 | 1,031 | -0,3537 | 0,996 | 0,690 | | X | | |
| | 1000 | 0,994 | -0,3491 | | | | X | | |
| | 2500 | 1,137 | -0,1105 | | | | X | | |
| | 5000 | 1,039 | -0,2183 | | | | X | | |
| <i>Tabebuia rosea</i> | | | | | | | | | |
| Radial | 500 | -0,405 | -0,238 | 0,993 | 0,506 | | X | | |
| | 1000 | -0,703 | -0,101 | | | | X | | |
| | 2500 | -1,112 | -0,411 | | | | X | | |
| | 5000 | -0,922 | -0,829 | | | | X | | |
| Tangencial | 500 | 2,450 | 3,522 | 0,969 | 0,883 | | X | | |
| | 1000 | 2,267 | 3,224 | | | | X | | |
| | 2500 | 1,022 | 1,308 | | | | X | | |
| | 5000 | -0,321 | -0,284 | | | | X | | |
| Longitudinal | 500 | 0,521 | -0,506 | 0,329 | 0,020* | 0,765 | X | | |
| | 1000 | 0,608 | -0,168 | | | | X | X | |
| | 2500 | -0,106 | -0,339 | | | | | X | |
| | 5000 | -0,493 | -0,393 | | | | | X | |
| <i>Quercus scytophylla</i> | | | | | | | | | |
| Radial | 500 | 0,275 | -0,670 | 0,992 | 0,424 | | X | | |
| | 1000 | 0,402 | -0,803 | | | | X | | |
| | 2500 | 0,380 | -0,448 | | | | X | | |
| | 5000 | 0,335 | -0,248 | | | | X | | |
| Tangencial | 500 | 0,431 | -0,919 | 0,934 | 0,845 | | X | | |
| | 1000 | 0,369 | -0,911 | | | | X | | |
| | 2500 | 0,361 | -0,921 | | | | X | | |
| | 5000 | 0,455 | -0,840 | | | | X | | |
| Longitudinal | 500 | 1,659 | 0,792 | 0,204 | 0,005* | | X | | |
| | 1000 | 1,533 | 0,538 | | | | X | X | |
| | 2500 | 1,438 | -0,066 | | | | | X | X |
| | 5000 | 1,550 | -0,326 | | | | | | X |

SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Kruskal-Wallis; RM = Rangos múltiples; * P_(α = 0,05) < 0,05: Sí existe diferencia estadísticamente significativa.

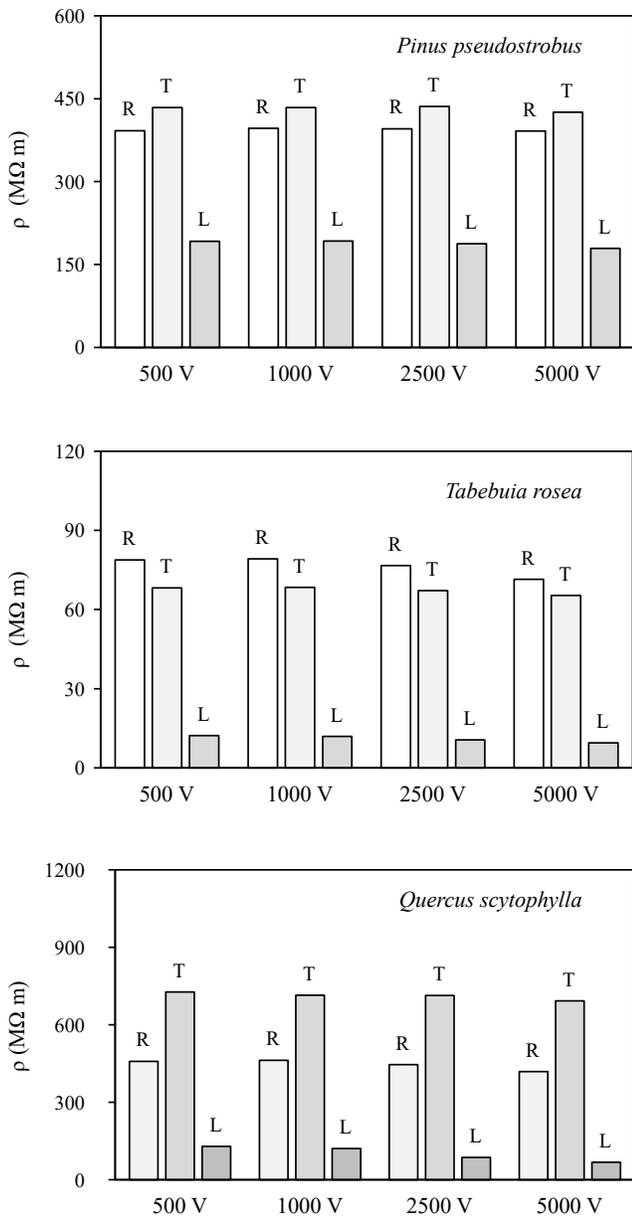


Figura 5. Comparativos de la resistividad eléctrica (ρ) en función del voltaje (V) para las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Preparados con datos de la **Tabla 2**.

sistividades puede ser atribuida a los factores siguientes:

- La diversidad en la estructura anatómica de las especies: los diferentes componentes estructurales del plano leñoso variaron en tamaño, forma y ubicación. La corriente eléctrica recorrió el volumen de la madera en condiciones desiguales según el tipo y la orientación relativa de cada elemento anatómico de cada especie.
- Heterogeneidad de la madera: las probetas eran pequeñas y su estructura anatómica puede considerarse

Tabla 2. Resultados de la densidad, del contenido de humedad, de la resistividad eléctrica y de los voltajes.

| | | Densidad | Voltajes | | | |
|----------------------------|----------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | 500 V | 1000 V | 2500 V | 5000 V |
| Direcciones de anisotropía | | ρ_{CH} | ρ | ρ | ρ | ρ |
| Contenidos de humedad (CH) | | (kg m^{-3}) | ($\text{M}\Omega \text{ m}$) |
| <i>Pinus pseudostrubus</i> | | | | | | |
| Radial CH = 8% | μ | 552 | 392 | 397 | 395 | 391 |
| | σ | 13 | 87 | 88 | 86 | 84 |
| | CV | (2) | (22) | (22) | (22) | (21) |
| Tangencial CH = 8% | μ | - | 434 | 434 | 436 | 426 |
| | σ | - | 118 | 112 | 116 | 115 |
| | CV | - | (27) | (26) | (27) | (27) |
| Longitudinal CH = 8% | μ | - | 192 | 192 | 187 | 179 |
| | σ | - | 31 | 31 | 30 | 29 |
| | CV | - | (16) | (16) | (16) | (16) |
| <i>Tabebuia rosea</i> | | | | | | |
| Radial CH = 7% | μ | 555 | 79 | 79 | 77 | 71 |
| | σ | 8 | 15 | 15 | 14 | 12 |
| | CV | (2) | (19) | (19) | (18) | (17) |
| Tangencial CH = 7% | μ | - | 68 | 68 | 67 | 65 |
| | σ | - | 11 | 11 | 9 | 7 |
| | CV | - | (17) | (16) | (13) | (11) |
| Longitudinal CH = 7% | μ | - | 12 | 12 | 11 | 9 |
| | σ | - | 3 | 2 | 2 | 2 |
| | CV | - | (21) | (21) | (18) | (17) |
| <i>Quercus scytophylla</i> | | | | | | |
| Radial CH = 7% | μ | 716 | 459 | 463 | 446 | 419 |
| | σ | 8 | 75 | 69 | 69 | 70 |
| | CV | (1) | (16) | (15) | (16) | (17) |
| Tangencial CH = 7% | μ | - | 727 | 715 | 714 | 692 |
| | σ | - | 103 | 99 | 95 | 86 |
| | CV | - | (14) | (14) | (13) | (12) |
| Longitudinal CH = 7% | μ | - | 129 | 121 | 87 | 68 |
| | σ | - | 59 | 53 | 33 | 27 |
| | CV | - | (45) | (44) | (38) | (40) |

ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; ρ = Resistividad eléctrica; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis.

homogénea macroscópicamente. Sin embargo, en una escala microscópica, el arreglo de las células y/o los tejidos de crecimiento no uniformes y/o no continuos

Tabla 3. Diferencias porcentuales entre las resistividades eléctricas según los voltajes aplicados.

| Direcciones de anisotropía | Voltajes % (1000/500) | Voltajes % (2500/500) | Voltajes % (5000/500) |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>Pinus pseudostrobus</i> | | | |
| Radial | 0 | 0 | -2 |
| Tangencial | 0 | 0 | -2 |
| Longitudinal | 0 | -3 | -7 |
| <i>Tabebuia rosea</i> | | | |
| Radial | 1 | -3 | -9 |
| Tangencial | -2 | -2 | -5 |
| Longitudinal | -7 | -33 | -47 |
| <i>Quercus scytophylla</i> | | | |
| Radial | 1 | -3 | -9 |
| Tangencial | 0 | -1 | -4 |
| Longitudinal | -3 | -13 | -23 |

alteró el flujo de la corriente eléctrica localmente.

- Tipo de sollicitación: se evaluaron las resistencias en una configuración básica y se compararon cuatro voltajes. En la literatura se reportan procedimientos sofisticados en los cuales factores intrínsecos a la madera y a las condiciones de ensayo provocan una variación aparente, en comparación con la resistividad determinada con una sollicitación simple.
- La orientación de la sollicitación: las probetas se recortaron y alinearon en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, que son direcciones privilegiadas estructuralmente donde la anisotropía de la madera es fundamental. Sin embargo, no se puede afirmar que las direcciones de anisotropía estén alineadas con la combinación y acomodo de los diferentes tipos de células en la madera, ni con los anillos de crecimiento.

El protocolo experimental implementó un control riguroso de los factores que pudieran influir en las mediciones con el objetivo de minimizar la variación en las magnitudes de las resistencias y compararlas de acuerdo con sus direcciones de anisotropía.

La **Tabla 4** muestra las anisotropías entre direcciones longitudinal y tangencial, longitudinal y tangencial y longitudinal/longitudinal, las últimas calculadas como referencia. Para *P. pseudostrobus* las anisotropías de la resistividad promedio entre las direcciones radial y

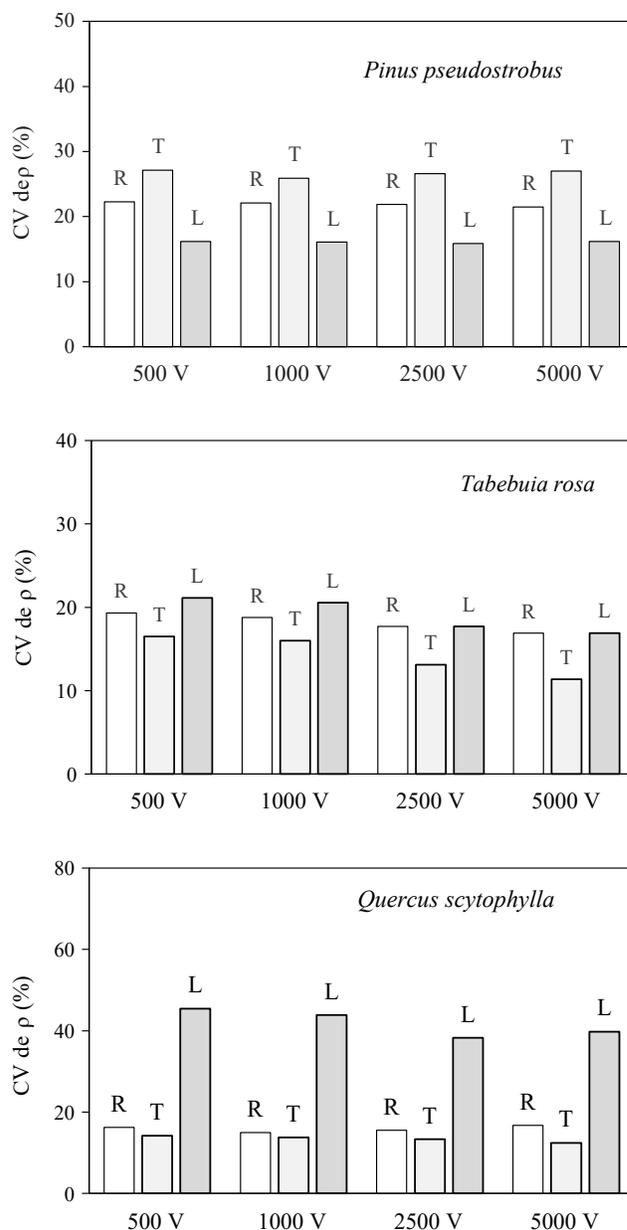


Figura 6. Comparativos del coeficiente de variación (CV) de la resistividad eléctrica (ρ) en función del voltaje (V) para las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Preparados con datos de la Tabla 2.

tangencial respecto a la longitudinal (ρ_R / ρ_L y ρ_T / ρ_L) van de 2,10 a 2,30. Estas magnitudes aumentan para *T. rosea* y *Q. scytophylla* y fluctúan de 4,67 a 7,48. Respecto al voltaje aplicado, los promedios de las anisotropías correspondientes a 500 y 1000 voltios se varían de 4,24 a 4,40. En cambio, para voltajes de 2500 y 5000 voltios fluctúan entre 5,20 y 5,89.

Existe evidencia empírica de que las características de la estructura anatómica de la madera controlan las

Tabla 4. Relaciones de anisotropía de las resistividades eléctricas.

| Anisotropías | Voltaje | Voltaje | Voltaje | Voltaje | Promedios de direcciones R, T, L. |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------|
| | 500 | 1000 | 2500 | 5000 | |
| <i>Pinus pseudostrabus</i> | | | | | |
| ρ_L/ρ_L (Referencia) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| ρ_R/ρ_L | 2,04 | 2,06 | 2,11 | 2,18 | 2,10 |
| ρ_T/ρ_L | 2,26 | 2,26 | 2,33 | 2,37 | 2,30 |
| <i>Tabebuia rosea</i> | | | | | |
| ρ_L/ρ_L (Referencia) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| ρ_R/ρ_L | 6,41 | 6,63 | 7,18 | 7,53 | 6,94 |
| ρ_T/ρ_L | 5,55 | 5,72 | 6,29 | 6,89 | 6,11 |
| <i>Quercus scytophylla</i> | | | | | |
| ρ_L/ρ_L (Referencia) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| ρ_R/ρ_L | 3,55 | 3,84 | 5,12 | 6,16 | 4,67 |
| ρ_T/ρ_L | 5,62 | 5,92 | 8,19 | 10,18 | 7,48 |
| Promedios de voltajes | 4,24 | 4,40 | 5,20 | 5,89 | 4,93 |

ρ_R = Resistividad radial; ρ_T = Resistividad tangencial; ρ_L = Resistividad longitudinal.

propiedades físicas y mecánicas (Toong *et al.*, 2014). A manera de síntesis de los modelos de la estructura celular de la madera y su aplicación en analogías con una malla de resistencia eléctrica (Jiang *et al.*, 2003; Zelinka *et al.*, 2007; Žigon *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023), la **Figura 7** presenta las secciones transversales de madera del plano transversal (tangencial-radial) de la madera gimnosperma de *Cryptomeria japonica* y angiosperma *Fagus crenata* (Banco de características tecnológicas de maderas mexicanas del Laboratorio

de Mecánica de la Madera, FITECMA). La madera gimnosperma presenta una clara diferencia entre los tejidos de madera tardía y temprana a nivel micro anatómico (**Figura 7a**). Por su parte, en la especie angiosperma se distinguen los acomodados y dimensiones de las células en una escala meso anatómica organizadas en capas (**Figura 7b**).

Para argumentar el efecto de la estructura anatómica de la madera en su anisotropía de las magnitudes de la resistividad eléctrica, se propone el modelo simplificado

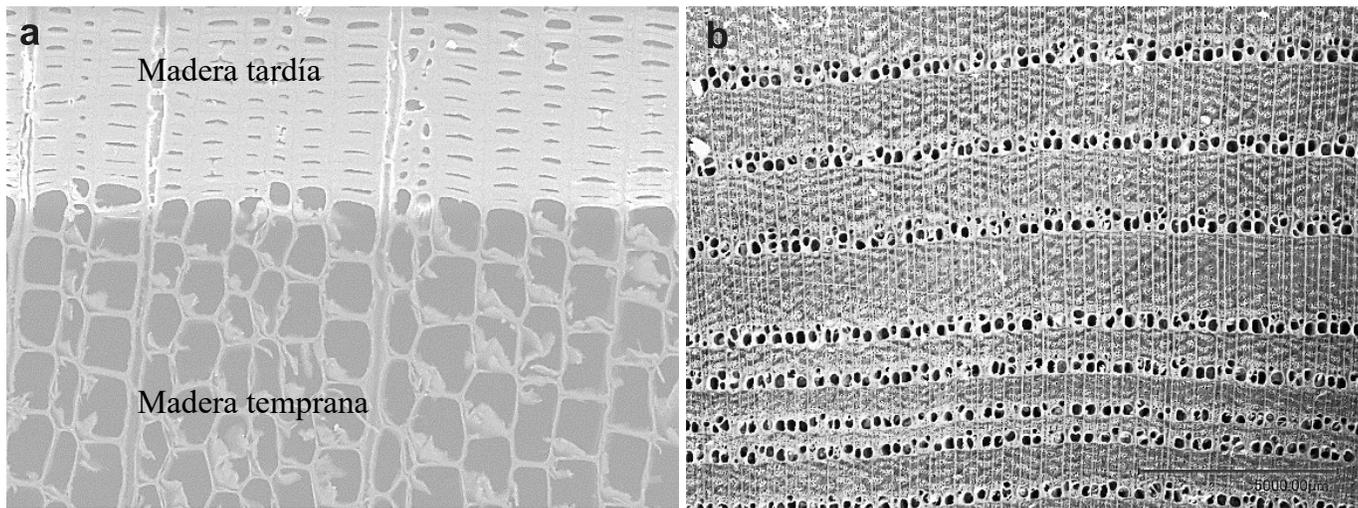


Figura 7. Secciones transversales de madera. a) Sección microscópica del plano transversal (tangencial-radial) de la madera de *Cryptomeria japonica*. Amplificación 400 veces. b) Sección mesoscópica del plano transversal (tangencial-radial) de la madera de *Fagus crenata*. Amplificación 200 veces.

de la estructura celular en el plano tangencial-radial (**Figura 8**) y en el plano tangencial-longitudinal (**Figura 9**). Desde otra escala de observación meso anatómica, el modelo estructural del plano tangencial-radial representa la corriente eléctrica fluyendo en las direcciones tangencial y/o radial (**Figura 10**) a través de dos capas de crecimiento anual de la madera.

La madera es una sustancia aislante, es decir es un material que resiste al movimiento de la carga eléctrica. Los electrones de valencia de los aislantes, como la madera, están fuertemente restringidos y no pueden moverse libremente por su estructura. El mecanismo de conducción eléctrica en la madera depende de la presencia de iones, como portadores de carga en la pared celular, y de las propiedades de porosidad del plano leñoso, lo que resulta en un mecanismo de percolación a través del cual se produce el movimiento de iones (Zelinka *et al.*, 2015; Fredriksson *et al.*, 2021). Así, la estructura anatómica (Jiang *et al.*, 2003) y su composición química (Jakes *et al.*, 2013) juegan igualmente un papel importante en los fenómenos de transferencia del flujo eléctrico.

El flujo de la corriente eléctrica a través de la madera se idealiza transitando a través de tres microestructuras: En el plano transversal, es decir en las direcciones radial

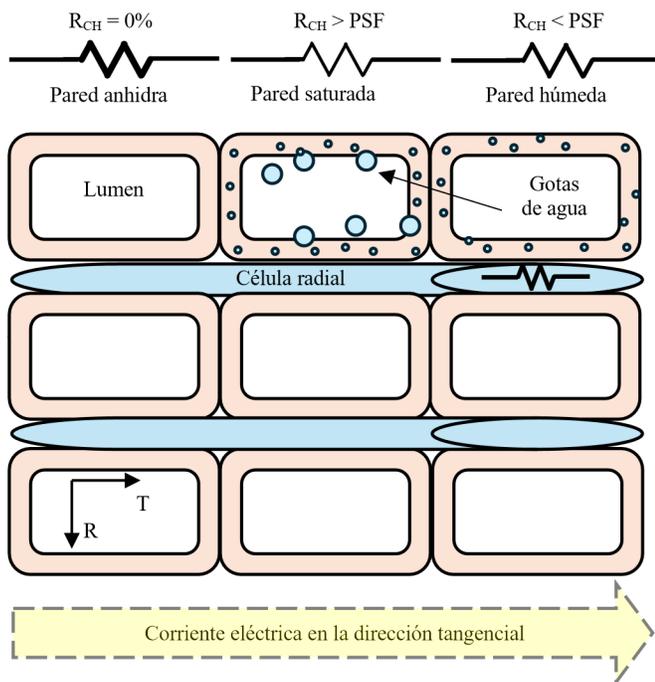


Figura 8. Modelo de la microestructura celular de la madera en el plano tangencial-radial. R_{CH} = Resistencia eléctrica, CH = Contenido de humedad, PSF = Punto de saturación de la fibra ($CH > 30\%$), R = Dirección radial, T = Dirección tangencial.

y/o tangencial, la corriente eléctrica utiliza las paredes celulares como medio para desplazar iones. En el caso de especies angiospermas estas células se asemejan a las traqueidas y en el caso de las gimnospermas son los elementos de vaso. Por otra parte, la corriente eléctrica fluye a través de las células acomodadas en la dirección longitudinal, definidas de esta manera porque su dimensión más larga es paralela al eje principal de crecimiento del árbol. Como tercera estructura se definen los espacios intercelulares y de los lúmenes que también intervienen en el modelo.

En la dirección longitudinal la corriente eléctrica se desplaza a lo largo de las células longitudinales y transversalmente a las radiales. En cambio, en la dirección tangencial y/o radial, la corriente se desplaza transversalmente a través de las paredes celulares longitudinales, pero a lo largo de las células radiales.

Estas tres microestructuras pueden estar vacíos, contener microgotas y/o vapor de agua correspondientes con tres estados de humedad de la madera: seco ($CH \approx 0\%$), húmedo ($0\% < CH < PSF$) y/o saturado ($CH > PSF$). De tal forma que la resistencia de cada parte de una célula y/o lumen varía enormemente al momento de su medición. Aunado a esto, se considera la composición química y otros constituyentes de cada tipo de microestructura los cuales son particulares para cada especie.

Como resultado, cada probeta observada tiene una densidad particular dependiendo de la cantidad de masa de materia lignocelulósica que contenga respecto a los espacios vacíos. Además, la magnitud en las mediciones de la resistencia eléctrica variará por el efecto del

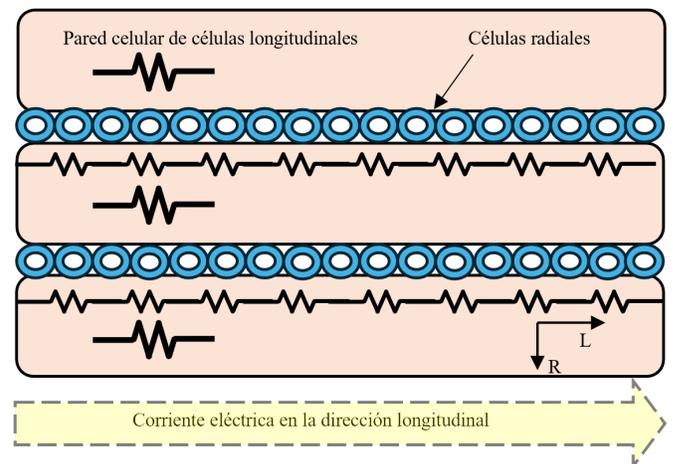


Figura 9. Modelo de la microestructura celular de la madera en el plano tangencial-longitudinal.

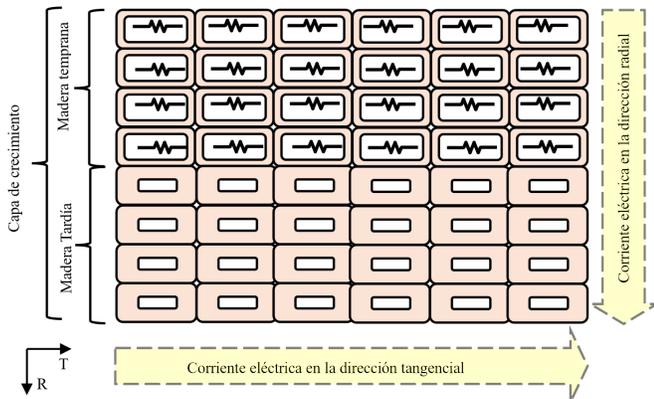


Figura 10. Modelo de una capa de crecimiento anual de la madera en el plano tangencial-radial.

contenido de humedad presente en la madera. De tal forma, que cada uno de estos componentes anatómicos tiene una resistencia propia R_{CH} resultado de su composición material combinada con la humedad. La combinación de diferentes tipos, tamaños y acomodos de las células de la estructura anatómica de la madera resulta en una amplia variabilidad de estructuras por modelar, proponer analogías y aplicar la teoría de mallas eléctricas.

Cada célula es considerada un resistor que controla el flujo de corriente eléctrica dependiente de sus características propias y de su contenido de humedad y de la orientación en el plano leñoso. Cada célula se idealiza como una resistencia funcionando en serie y/o en paralelo (**Figura 11**). Al agrupar células y tejidos leñosos en una unidad de volumen de la madera, es decir en la probeta, se crea por analogía, un resistor con una resistencia específica o resistividad volumétrica equivalente a la resistencia en el modelo eléctrico

propuesto en la **Figura 2** y utilizada en la Ecuación 4. En el contexto del modelo propuesto en la presente investigación, la resistividad eléctrica de la madera varía según la especie, el contenido de humedad de la madera y sus direcciones de anisotropía.

La heterogeneidad en las cuantificaciones de resistencias eléctricas, atribuible a la estructura anatómica de las diversas especies examinadas, se justifica a través de las consideraciones previamente mencionadas. Estas discrepancias se manifiestan tanto dentro como entre especies. No obstante, cabe destacar que las evaluaciones estadísticas de normalidad y verificación de varianza indican que las muestras de las tres especies son homogéneas y distribuidas de manera uniforme (**Tabla 1**). Sin embargo, los coeficientes de variación son elevados en comparación con otras características físicas de la madera (Sotomayor, 2015).

Adicionalmente, como elementos que influyen en la fluctuación de los valores de resistividad eléctrica, en el presente estudio se deben considerar la densidad de cada madera, su contenido de humedad durante las pruebas y el voltaje aplicado. En madera seca que contiene hasta el 7% de contenido de humedad, la disminución de la resistividad eléctrica es aproximadamente cinco veces mayor para un incremento del 1% de humedad. Desde el 7% hasta el punto de saturación de la fibra, la variación de la resistividad se incrementa de dos a cuatro veces por cada incremento del 1% en el contenido de humedad (Baránski *et al.*, 2021).

Esta información podría proporcionar una explicación para las discrepancias entre los valores para las mismas especies reportados en Sotomayor *et al.* (2022) y los de

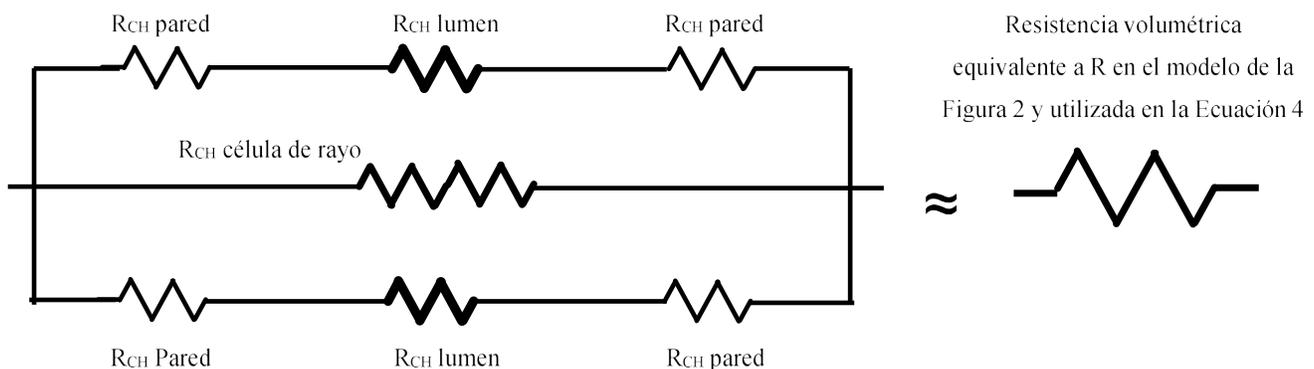


Figura 11. Analogía de la estructura anatómica de las figuras 6, 7, 8 y 9 con una red de resistencias eléctricas y su resistencia volumétrica (R). R_{CH} = Resistencia eléctrica.

la presente investigación. Los autores mencionados que trabajaron con especies similares reportan los siguientes contenidos de humedad: *P. pseudostrobus* 13%, *T. rosea* 11% y *Q. cytophylla* 15%. Por el contrario, los contenidos de humedad en la presente investigación fueron, respectivamente: *P. pseudostrobus* 8%, *T. rosea* 7% y *Q. cytophylla* 7%. Las discrepancias en términos de humedad son superiores a las observadas en el presente estudio. Por lo tanto, las magnitudes de los resultados detallados en la **Tabla 2** superan 8% en promedio a los de la investigación mencionada.

Conclusiones

La resistividad eléctrica de las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. cytophylla* puede ser evaluada mediante la utilización de muestras de dimensiones reducidas, aplicando voltajes de 500, 1000, 2500 y 5000 voltios. La resistividad eléctrica constituye una propiedad inherente de la madera y su magnitud fluctúa en función de la especie. Este parámetro manifiesta una anisotropía en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera. Es recomendable establecer los valores de las resistividades eléctricas entre especies mediante métodos de prueba equivalentes y/o normalizados. Los hallazgos deben incorporar datos relativos a la densidad de la madera y su nivel de humedad.

La utilización de elementos de madera orientados en las direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal resulta inusual en el ejercicio de la Ingeniería en Tecnología de la Madera. En consecuencia, es esencial considerar que las resistividades aquí expuestas aluden a condiciones ideales de determinación, y el parámetro a tomar en cuenta se determinará con base en la función que la pieza de madera desempeñará en un proyecto concreto de diseño o producción de productos de valor añadido.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán (Proyecto ICTI-PICIR23-153) y por la Coordinación de la Investigación Científica (Programa de Investigación CIC-UMSNH 2024-2025) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Referencias

- Alvarado MV, Terrazas T (2023). Tree species differ in plant economic spectrum traits in the tropical dry forest of Mexico. *PLoS ONE* 18(11):e0293430. doi:10.1371/journal.pone.0293430.
- Arriaga F, Wang X, Íñiguez-González G, Llana DF, Esteban M, Niemi P (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests* 14:1202. doi:10.3390/f14061202.
- Barański J, Suchta A, Barańska S, Klement I, Vilkovská T, Vilkovský P (2021). Wood moisture-content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood. *Sensors* 21:7033. doi:10.3390/s21217033.
- Bertoldo C, Pereira GA, Gonçalves R (2023). Effect of reducing the size and number of faces of polyhedral specimen on wood characterization by ultrasound. *Materials* 16:4870. doi:10.3390/ma16134870.
- Bucur V (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests* 14:1545. doi:10.3390/f14081545.
- Chen Y-H., Ho S-T., Lin H-C. (2023). Evaluation of physico-mechanical properties and thermal conduction to energy-saving effects of wood compression layered structural materials. *Polymers* 15:3208. doi:10.3390/polym15153208.
- Conde-García M, Conde-García M, Fernández-Golfín JJ (2021). Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. *Forest Systems* 30(1):e002. doi:10.5424/fs/2021301-17798.
- Daouk B, Baldwin C, and Cruickshank CA (2021). Determining the impact of sensor orientation on moisture content measurements in eastern white pine. *Journal of Physics: Conference Series* 2069:012047. doi:10.1088/1742-6596/2069/1/012047.
- Fredriksson M, Claesson J, Wadsö L (2015). The influence of specimen size and distance to a surface on resistive moisture content measurements in wood. *Mathematical Problems in Engineering* 215758:1-7. doi:10.1155/2015/215758.
- Fredriksson M, Thybring EE, Zelinka SL (2021). Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. *Holzforschung*, 75(6):517-525. doi:10.1515/hf-2020-0138.
- Ganthaler A, Sailer J, Bär A, Losso A, Mayr S (2019). Noninvasive analysis of tree stems by electrical resistivity tomography: unraveling the effects of temperature, water status, and electrode installation. *Frontiers in Plant Science* 10:1455. doi:10.3389/fpls.2019.01455.

- Gao S, Bao Z, Wang L, Yue X (2018). Comparison of voltammetry and digital bridge methods for electrical resistance measurements in wood. *Computers and Electronics in Agriculture* 145:161-168. doi:10.1016/j.compag.2017.11.004.
- Golovin YI, Gusev AA, Golovin DY, Matveev SM, Vasyukova IA (2022). Multiscale mechanical performance of wood: from nano- to macro-scale across structure hierarchy and size effects. *Nanomaterials* 12:1139. doi:10.3390/nano12071139.
- Hafsa W, Angellier N, Takarli M, Pop O (2021). A mixed experimental-numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in wood tested using the example of Douglas fir. *Wood Science and Technology* 55(4):697-718. doi:10.1007/s00226-021-01281-x.
- Hafsa W, Angellier N, Takarli M, Pop. O. (2019). Monitoring of timber structures: moisture content evaluation by using electrical resistivity method. In: *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Guimarães, Portugal. pp. 659-670. <https://amu.hal.science/hal-04059350>.
- Hofstetter K, Gamstedt EK (2009). Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review. *Holzforschung* 63:130-138. doi:10.1515/HF.2009.018.
- International Organization for Standardization (2014a). ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- International Organization for Standardization (2014b). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60064.html>.
- Jakes JE, Plaza N, Stone DS, Hunt CG, Glass SV, Zelinka SL (2013). Mechanism of transport through wood cell wall polymers. *Journal of Forest Products and Industries* 2(6):1013. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_jakes002.pdf.
- Jiang ZH, Chen Z, Fen BH, Hou Z. Q., Chen GH (2003). Modeling oven-dry softwood resistivity based on the resistor network theory. *Holzforschung* 57(4):415-420. doi:10.1515/HF.2003.061.
- Kirker GT, Bishell AB, Zelinka SL (2016). Electrical properties of wood colonized by *Gloeophyllum trabeum*. *International Biodeterioration and Biodegradation* 114:110e115. doi:10.1016/j.ibiod.2016.06.004
- Łukawski D, Hochmańska-Kaniewska P, Janiszewska-Latterini D, Lekawa-Raus A (2023). Functional materials based on wood, carbon nanotubes, and graphene: manufacturing, applications, and green perspectives. *Wood Science and Technology* 57:989-1037. doi:10.1007/s00226-023-01484-4.
- Martin T (2012). Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products* 70:45-53. doi:10.1007/s00107-010-0493-z.
- Martin T, Günther T (2013). Complex Resistivity Tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees. *European Journal of Forest Research* 132(5-6):765-776. doi:10.1007/s10342-013-0711-4.
- Mascia NT, Lahr FA R. (2006). Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. *Materials Research* 9(3):301-310. doi:10.1590/S1516-14392006000300010.
- Mastantuoni GG, Tran VC, Garemark J, Dreimol CH, Engquist I, Berglund LA, Zhou Q (2024). Rationally designed conductive wood with mechanoresponsive electrical resistance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 178:107970. doi:10.1016/j.compositesa.2023.107970.
- Moore J, Cown D (2015). Wood quality variability – what is it, what are the consequences and what we can do about it? *New Zealand Journal of Forestry* 59(4):3-9.
- Nursultanov N, Heffernan WJ B., Altaner C, Pang S (2020). Anisotropic electrical conductivity of green timber within 20-90 °C temperature range. *Wood Science and Technology* 54:1181-1196. doi:10.1007/s00226-020-01212-2.
- Panzarasa G, and Burgert I (2022). Designing functional wood materials for novel engineering applications. *Holzforschung* 76(2):211-222. doi:10.1515/hf-2021-0125.
- Polocoşer T, Kasal B, Stöcke F (2017). State-of-the-art: intermediate and high strain rate testing of solid wood. *Wood Science and Technology* 51:1479-1534. doi:10.1007/s00226-017-0925-6.
- Quintela FR, Redondo Melchor RC (2024). Diccionario de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Salamanca. <https://electricidad.usal.es/Diccionario>.
- Rendón Correa A, Dorantes Hernández F, Mejía Valencia S, Alamilla Fonseca LN (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/15522.pdf>.
- Rodriguez-Zaccaro FD, Groover A (2019). Wood and water: How trees modify wood development to cope with drought.

- Plants Peoples Planet PPP* 1(4):346-355. doi:10.1002/ppp3.29.
- Slávik R, Čekon M, Štefaňák J (2019). A nondestructive indirect approach to long-term wood moisture monitoring based on electrical methods. *Materials* 12:2373. doi:10.3390/ma12152373.
- Sotomayor Castellanos JR (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. doi:10.13140/RG.2.1.3497.4884.
- Sotomayor Castellanos JR, García Mariscal JL, Moya Lara CE, Olgún Cerón JB (2010). Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera* 6(3):3-32.
- Sotomayor Castellanos JR, Macedo Alquicira I, Mendoza González E (2022). Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. *INNOTEC* e621. doi:10.26461/24.07.
- Toong W, Ratnasingam J, Roslan MKM, Halis R (2014). The prediction of wood properties from anatomical characteristics: The case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources* 9(3):5184-5197. doi:10.15376/biores.9.3.5184-5197.
- Tran VC, Mastantuoni GG, Belaineh D, Aminzadeh S, Berglund LA, Berggren M, Zhou Q, Engquist I (2022). Utilizing native lignin as redox-active material in conductive wood for electronic and energy storage applications. *Journal of Materials Chemistry A* 10:15677-15688. doi:10.1039/D1TA10366K.
- Tran VC, Mastantuoni GG, Zabhipour M, Li L, Berglund L, Berggren M, Zhou Q, Engquist I (2023). Electrical current modulation in wood electrochemical transistor. *PNAS* 120(18):e2218380120. doi:10.1073/pnas.2218380120.
- Trochonowicz M, Szostak B (2023). The impact of density, temperature, moisture, and test direction on the thermal conductivity coefficient in pine wood. *Budownictwo i Architektura* 22(4):5-13. doi:10.35784/bud-arch.5452
- van Blokland J, Adamopoulos S (2022). Electrical resistance characteristics of thermally modified wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 80:749-752. doi:10.1007/s00107-022-01813-7.
- Zelinka SL, Stone DS, Rammer DR (2007). Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content. *Wood and Fiber Science* 39(4):556-565. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1601>.
- Zelinka S, Gleber S, Vogt S, Rodríguez López G, Jakes J (2015). Threshold for ion movements in wood cell walls below fiber saturation observed by X-ray fluorescence microscopy (XFM). *Holzforschung* 69(4):441-448. doi:10.1515/hf-2014-0138.
- Žigon J, Petrič M, Dahle S (2021). Dielectric and surface properties of wood modified with NaCl aqueous solutions and treated with FE-DBD atmospheric plasma. *European Journal of Wood and Wood Products* 79:1117-1128. doi:10.1007/s00107-021-01708-z.