

## Validación del método empírico para la obtención de densidad de madera de especies altoandinas

Alberto Macancela-Herrera<sup>1\*</sup>, Pedro X. Astudillo<sup>2</sup>, Byron Ortega-Pillajo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología-Escuela de Biología, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

\* Autor para correspondencia/ corresponding author, e-mail: [alberto.macancelah@ucuenca.edu.ec](mailto:alberto.macancelah@ucuenca.edu.ec)

## Validation of the empirical method for obtaining wood density of high Andean species

### Resumen

Las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), han aumentado de forma constante en la atmósfera durante los últimos 20 años. Este gas es considerado uno de los principales responsables del calentamiento global. Se conoce que el CO<sub>2</sub> es absorbido por la vegetación, por lo que es uno de los principales sumideros de carbono. En este contexto, la densidad de madera es un indicador de la cantidad de carbono que la vegetación toma de la atmósfera. Por ello, se han desarrollado distintas metodologías para estimar este parámetro en la madera. Actualmente, se pretende hacer uso de metodologías no invasivas que causen el menor daño posible a las plantas que no requieran herramientas o equipos costosos y que, además, permitan ahorrar tiempo al momento de medir la densidad de madera. Por este motivo, el presente estudio tuvo dos objetivos. El primero, comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y el método por desplazamiento de agua; y el segundo, demostrar la validez del método empírico como metodología para la medición de densidad de madera para especies altoandinas. Para realizar los análisis estadísticos, las especies fueron agrupadas según su hábito de crecimiento (arbóreas y arbustivas). De igual manera, se analizaron en conjunto los dos hábitos de crecimiento. La comparación de medias de las metodologías estudiadas demostró que las densidades de madera no muestran diferencias estadísticas ( $p$  valor > 0.05). Adicionalmente, los resultados de la regresión lineal mostraron ajustes por encima del 85 % para especies arbóreas, arbustivas y agrupadas, lo cual demuestra la alta similaridad en los valores de la densidad de madera obtenida a través de las dos metodologías. Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones reportadas para otras latitudes, por lo que se sugiere el uso del método empírico para medir la densidad de madera en especies altoandinas.

**Palabras clave:** dendrometría, carbono, bosques andinos, sumidero, especies nativas.

### Abstract

Greenhouse gas emissions, including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), have steadily increased in the atmosphere over the past 20 years. This gas is considered one of the main causes of global warming. CO<sub>2</sub> is known to be absorbed by vegetation, making it one of the main carbon sinks. In this context, wood density is an indicator of the amount of carbon that vegetation absorbs from the atmosphere. Therefore, different methodologies have been



Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /  
Edited by:  
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /  
Received:  
16/01/2025

Aceptado /  
Accepted:  
05/05/2025

Publicado en línea /  
Published online:  
21/10/2025



developed to estimate this parameter in wood. Currently, the goal is to use non-invasive methodologies that cause the least possible damage to plants, do not require expensive equipment, and also save time when measuring wood density. For this reason, this study aimed to compare wood density obtained through the empirical method and the water displacement method and demonstrate the validity of the empirical method as a methodology for measuring wood density for high Andean species. To perform the statistical analyses, species were grouped according to their growth habit (tree and shrub). Similarly, both growth habits were analyzed together. Comparison of means across the studied methodologies showed no statistical differences in wood densities ( $p$  value  $> 0.05$ ). Additionally, the linear regression results showed fits above 85 % for tree, shrub, and grouped species, demonstrating the high similarity in wood density values obtained using the two methodologies. The results obtained are consistent with research reported for other latitudes, and therefore the use of an empirical method is suggested to measure wood density in high Andean species.

**Keywords:** dendrometry, carbon, andean forest, sink, native species.

---

## INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) es uno de los principales gases responsables del calentamiento global [1]. Las emisiones de este gas han registrado un aumento desde 2004 hasta 2024 de un 11.4 % [2]. Si el aumento de carbono es excesivo, es necesario tomar medidas apropiadas para desacelerarlo, puesto que los efectos negativos no solo se manifestarán en el clima [3], sino también en el mal funcionamiento de los ecosistemas, como ya se ha demostrado en años anteriores [4]. Además, se ha demostrado que la vegetación tiene la capacidad de absorber carbono a través de la fotosíntesis, lo que le permite mayor generación de biomasa [5, 6, 7] y contribuye a estabilizar el ciclo del carbono [8]. En consecuencia, la densidad de la madera es un parámetro que permite estimar cuánto carbono absorbe la vegetación [9, 10].

La densidad de madera es considerada un indicador de importancia ecológica [11], debido a que su caracterización permite conocer la calidad de madera y la capacidad de almacenamiento de carbono [12, 13, 14]. Sin embargo, la calidad depende de los tejidos y células de las que se encuentre constituida [15], y varía en función de la especie [16]. Además, se conoce que el clima en el cual habita la vegetación leñosa puede influir en características de la dureza y peso de la madera [17, 18]. Por ejemplo, en los trópicos se ha registrado que, por las condiciones de precipitación y temperatura, la vegetación leñosa desarrolla mayor densidad de madera en comparación con otras regiones del planeta [19].

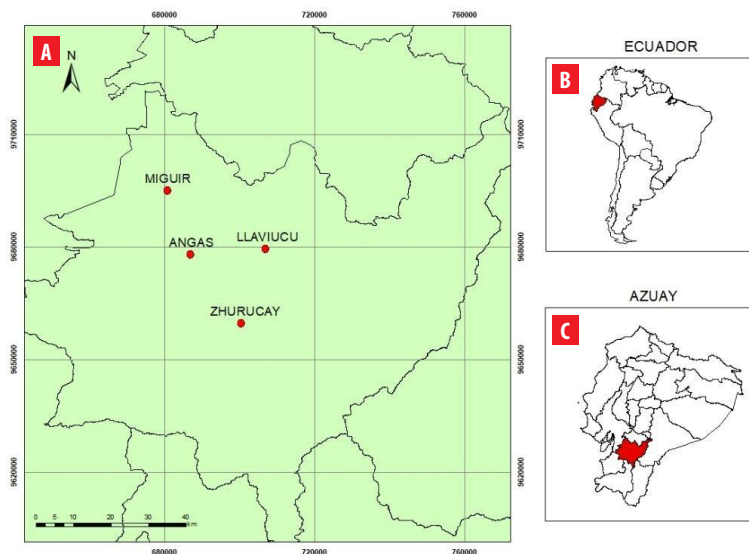
Las metodologías para estudiar la densidad de madera en las que se destruye por completo el árbol o arbusto han sido ampliamente aplicadas (i.e., al cortar el tronco en forma de anillos) [20]. Sin embargo, los métodos que permiten obtener la densidad de madera mediante técnicas no destructivas, rápidas, precisas y económicas son limitadas [21, 22]. Investigaciones recientes aplican metodologías no invasivas como son rayos X con densitómetro y difractómetro [23], así como otras estiman la densidad de madera a partir de imágenes 3D; no obstante, estas técnicas requieren de instrumentación especial y sus costos son elevados [24, 25].

Métodos no destructivos como el empírico y por desplazamiento de agua, permiten obtener la densidad de madera a través de una muestra de madera con el uso de barrenas forestales. En el primero, método empírico o geométrico, la densidad se obtiene al considerar a la muestra como un cilindro y aplicar la relación entre el peso y volumen [26, 27]. El segundo, método por desplazamiento de agua, también calcula la densidad de madera a través de la relación entre el peso y volumen de agua desplazada de la muestra de madera. Este último es un método muy utilizado, aunque requiere mayor tiempo para calcular la densidad de madera y su costo puede ser mayor al hacer uso de otros equipos en relación con el método empírico [27, 28].

En consecuencia, es fundamental recopilar información precisa sobre la densidad de la madera mediante metodologías accesibles, tanto en términos de tiempo como de costos, y que, además, sean menos invasivas. Esto es importante debido al incremento de los censos forestales y a que numerosas especies se encuentran catalogadas en alguna categoría de amenaza de extinción [29]. Hasta la fecha, existen pocos estudios que demuestren la efectividad del método empírico, el cual ha sido probado en especies de otras regiones del trópico, como en Kenia [26], pero no en especies altoandinas. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivos: i) comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y método por desplazamiento de agua, y ii) demostrar la validez del método empírico como metodología para la medición de densidad de madera en especies altoandinas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio



**FIGURA 1.** Mapa del área de estudio: **A)** Ubicación de los cuatro sitios para el monitoreo de densidad de madera en bosques altoandinos de los Andes occidentales, **B)** ubicación de Ecuador dentro de Sudamérica y **C)** Ubicación de la provincia del Azuay en el Ecuador.



El estudio se desarrolló en cuatro bosques altoandinos de los Andes occidentales de la provincia del Azuay, Ecuador como lo muestra la Figura 1. Entre los meses de febrero y mayo de 2019 se monitorearon las localidades de: Llaviucu (2°50'38"S 79°06'59"O - 3200 m s. n. m.), Zhurucay (3°08'4"OS 79°15'07"O - 3400 m s. n. m.), Angas (2°55'59"S 79°21'00"O - 3500 m s. n. m.) y Migüir (2°46'55"S 79°16'12"O - 3500 m s. n. m.). Estos bosques se caracterizan por la presencia de niebla [30], así como por altas tasas de riqueza y endemismo, con predominio de especies de hábito arbóreo y arbustivo [31]. El presente estudio se diferencia de otros debido a que los sitios de estudio, por las características de flora y su extensión, la cantidad de carbono absorbido puede llegar a ser mayor a otros.

### Colección y procesamiento de muestras

Se seleccionaron nueve especies leñosas de mayor abundancia que se encuentran compartidas en los cuatro sitios de estudio. La Tabla 1 indica las especies consideradas para el estudio: cinco fueron especies de hábito de crecimiento arbóreas y cuatro especies de hábito de crecimiento arbustivas. Por especie se seleccionaron 20 individuos (cinco en cada sitio), lo que da como resultado 180 muestras. Sólo se consideraron plantas con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 5 cm, con la finalidad de que permita la extracción de una muestra de madera válida [32, 33].

Todas las muestras de madera fueron obtenidas a la altura del DAP con la ayuda de barrenas forestales, instrumentos con punta enroscada que permiten extraer un núcleo de madera de un tronco leñoso. Se emplearon barrenas de la marca Haglöf 16" y Jim Gem 10" [34]. Posteriormente, cada muestra extraída se cubrió con papel aluminio para evitar su deshidratación y se almacenó en bolsas humedecidas. En el laboratorio, las muestras se secaron en estufa a 60° C durante 72 horas y, finalmente, se pesaron.

**Tabla 1.** Lista de especies monitoreadas para estimar la densidad de madera en bosques altoandinos de los Andes occidentales.

Especies	n	Familia	Hábito de crecimiento
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	20	Betulaceae	Árbol
<i>Brugmansia sanguinea</i> (Ruiz & Pav.) D. Don	20	Solanaceae	Arbusto
<i>Escallonia myrtilloides</i> L.f.	20	Escalloniaceae	Árbol
<i>Hedyosmum luteynii</i> Todzia.	20	Chloranthaceae	Árbol
<i>Morella pubescens</i> Benth.	20	Myricaceae	Arbusto
<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (Kunth) McVaugh	20	Myrtaceae	Árbol
<i>Oreocallis grandiflora</i> (Lam.) R.Br.	20	Proteaceae	Arbusto
<i>Vallea stipularis</i> L.f.	20	Elaeocarpaceae	Arbusto
<i>Weinmannia fagaroides</i> Kunth	20	Cononiaceae	Árbol

n: número de individuos de los que se recolectó la muestra de madera.



## Estimación de la densidad de madera

### Método empírico o geométrico

Para este método se considera la muestra de madera como un cilindro [26], la ecuación 1 la describe a continuación:

$$v = \frac{4}{\pi d^2} l \quad (1)$$

En donde,  $v$  es el volumen del cilindro,  $l$  es la longitud de la muestra y,  $r$  es el radio de la muestra.

### Método por desplazamiento de agua

Se registra el peso que se obtiene al sumergir la muestra de madera dentro de un tubo de ensayo con agua destilada, para esto, es necesario una balanza analítica (precisión = 0.0001g). A continuación, se despeja el volumen ( $v$ ) de la ecuación 2, en donde  $p$  es el peso que se acaba de obtener y  $d$ , la densidad del agua destilada ( $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). Finalmente, para ambos métodos, se divide el peso para el volumen, como lo indica la ecuación 2. Sin embargo,  $p$  será el peso de la muestra de madera secada a  $60^\circ\text{C}$  por 72 horas y  $V$  es el volumen obtenido anteriormente [35].

$$d = \frac{p}{v} \quad (2)$$

### Análisis estadístico

Para describir los métodos, se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión por hábito de crecimiento y para todas las especies. Para comparar la densidad de madera obtenida a través del método empírico y el método por desplazamiento de agua para cada hábito de crecimiento (arbóreo y arbustivo) se hizo uso de pruebas de *t-student* pareadas con un umbral  $\alpha < 0.05$ . Para validar el método empírico a partir del método por desplazamiento de agua, se generaron regresiones lineales, y, además, se evaluaron métricas de ajustes de estas [26, 33]. Las mismas pruebas estadísticas se realizaron al agrupar los datos de densidad de madera de los dos hábitos de crecimiento. Los análisis estadísticos y gráficas se llevaron a cabo en el programa estadístico R [36].

## RESULTADOS

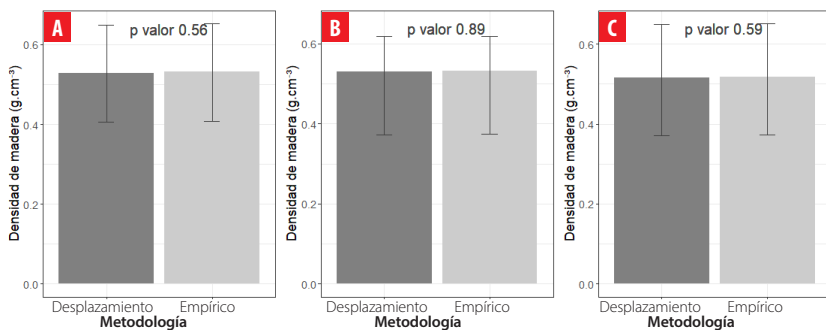
Acorde a la Tabla 2, la media y desviación estándar (DE) de la densidad de madera por el método empírico y por el método por desplazamiento de agua fueron muy similares entre sí (empírico =  $0.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.1$ ; desplazamiento =  $0.53\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.14$ ), aunque en razón del coeficiente de varianza (CV), los datos apenas se dispersan en los dos métodos  $\sim 4\%$ . Un comportamiento muy similar se evidenció para la densidad de madera de especies arbustiva, aunque la media en los dos métodos son las mismas y se comprobó menor dispersión de los datos (empírico =  $0.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.12$ ; desplazamiento =  $0.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm \text{DE} = 0.12$ ).

**Tabla 2.** Comparación de la estimación de la densidad de madera entre el método empírico y el método por desplazamiento de agua para hábitos de crecimiento arbóreo, arbustivo y datos agrupados.

Hábito	Método	Media	Mediana	DE	CV	Mínimo	Máximo
Árbol	Desplazamiento	0.52	0.48	0.14	0.038	0.27	0.99
	Empírico	0.53	0.48	0.15	0.045	0.27	0.97
Arbusto	Desplazamiento	0.49	0.52	0.12	0.029	0.24	0.76
	Empírico	0.49	0.52	0.12	0.030	0.23	0.76
Agrupado	Desplazamiento	0.51	0.50	0.14	0.039	0.24	0.99
	Empírico	0.51	0.50	0.14	0.039	0.23	0.97

DE: desviación estándar. CV: coeficiente de variación.

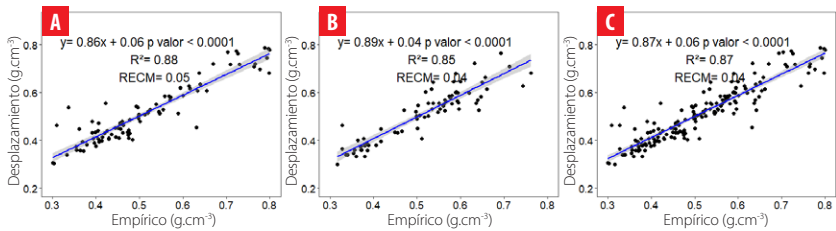
La comparación de medias para especies arbóreas entre las dos metodologías (Figura 2a) demostró que no se diferencian estadísticamente ( $p$  valor  $> 0.05$ ), puesto que sus medias fueron similares ( $0.52 \text{ g.cm}^{-3}$  desplazamiento y  $0.53 \text{ g.cm}^{-3}$  empírico). Asimismo, se comprobó que tampoco difieren significativamente ( $p$  valor  $> 0.05$ ) las medias de las densidades de madera para especies arbustivas, incluso sus medias son las mismas (desplazamiento y empírico:  $0.49 \text{ g.cm}^{-3}$ ), según se puede observar en la Figura 2b. La Figura 2c confirma que, al evaluar los datos en conjunto, los resultados obtenidos son muy similares al analizar por hábito de crecimiento, incluso la desviación estándar por grupo es muy similar. Estos resultados sugieren que los valores de las dos metodologías, al ser idénticos, pueden ser aplicadas en la vegetación altoandina.



**FIGURA 2.** Comparación de medias de la estimación de madera entre el método empírico y método por desplazamiento de agua para hábitos de crecimiento. a) hábito arbóreo, b) hábito arbustivo, c) datos en conjunto.

## Relación entre el método empírico y método por desplazamiento de agua

Las regresiones lineales obtenidas muestran ajustes altos y valores de la raíz del error cuadrático medio (RECM) bajos. La Figura 3a confirma que la estimación de la densidad de madera del método por desplazamiento de agua para especies arbóreas aumenta significativamente mientras aumenta la densidad estimada por el método empírico, este mismo patrón ocurre con especies de hábito arbustivo (Figura 3b). Finalmente, al agrupar todos los dos hábitos de crecimiento, se observan ajustes muy similares a los anteriores. Esto se puede observar en la Figura 3c.



**FIGURA 3.** Gráfica de dispersión con línea de tendencia de la densidad de madera del método por desplazamiento de agua con el método empírico. a) Hábito arbóreo, b) Hábito arbustivo. c) Datos en conjunto.

## DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio coinciden con los de otras investigaciones al reconocer el uso del método empírico como metodología válida para estimar la densidad de madera, sin embargo, anteriormente solamente se había validado con especies de otras latitudes y no altoandinas. Los hallazgos en este estudio han demostrado que no existen diferencias estadísticas entre los valores de la densidad de madera tanto para especies arbóreas como arbustivas. Asimismo, se ha demostrado que el ajuste entre los dos métodos es alto, lo cual sugiere que se puede hacer uso del método empírico para obtener densidad de madera.

En un estudio previo [25] al comparar un método no destructivo (método empírico) con un destructivo (corte de disco) no se hallaron diferencias significativas de la densidad de madera entre las dos metodologías, pero cuando se analizaron las densidades de madera por hábito de crecimiento, se obtuvieron resultados contrarios. En el presente estudio, la misma tendencia se halló al no encontrar diferencias estadísticas entre el método empírico y por desplazamiento de agua cuando se analizó sin agrupamiento, pero tampoco se obtuvieron diferencias cuando se evaluó por hábito de crecimiento. Esto se debe a la alta similitud de la densidad de madera obtenida por el método empírico con otras metodologías. Esta característica del método ya se ha resaltado en investigaciones anteriores [26, 37, 38].

Por otra parte, se ha demostrado que la densidad de madera obtenida a través del método empírico en especies del género *Pinus* tienen el mismo comportamiento con metodologías que hacen uso de equipos costosos [39]. En el estudio actual, las tres regresiones lineales realizadas entre las dos metodologías mostraron ajustes por encima del 85 % de variabilidad (Figura 3). Esto nos permite inferir que el método empírico puede ser aplicado a especies altoandinas como de zonas templadas.

Una especie de la familia Fabaceae [40] alcanzó ajustes muy similares al obtenido en el presente estudio al comparar el método empírico y el método del resistógrafo. Los resultados generaron regresiones con ajustes de hasta el 74 % y RECM bajos, lo cual asegura el uso del método empírico. Otras investigaciones recomiendan el uso del método empírico, puesto que es un método no destructivo, por la facilidad de la extracción y cálculo del volumen de la muestra en campo (2 hasta 10 minutos por muestra) [25, 40, 41], además porque es idóneo para especies con maderas duras o densas [42].



El método por desplazamiento de agua ha sido empleado para modelar la madera de distintas especies, debido a que en esta metodología está inmersa propiedades del tejido (e.g. *cambium* y fibras), mientras que, en el método empírico se considera a la muestra de madera como un cilindro perfecto [8, 43]. Debido a lo dicho anteriormente, en los resultados se observan variaciones entre las dos metodologías, aunque estas son mínimas (Tabla 2), lo cual demuestra la efectividad de hacer uso del método empírico. No obstante, esta metodología tiene limitaciones como el tamaño mínimo de la muestra (mayor a 5 cm de DAP), al igual que la deshidratación pronta en plantas jóvenes en las que las cortezas son delgadas [26, 44].

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de la comparación de medias, se concluye que la densidad de madera de la vegetación leñosa obtenida a través de dos metodologías no difiere significativamente, debido a que los valores mostraron fuertes similitudes al evaluar por hábito de crecimiento y en conjunto.

Los ajustes de las regresiones lineales están por encima del 85 %, asimismo, los valores del error de cada una de las regresiones mostraron ser bajos, por lo que se recomienda el uso del método empírico para especies arbóreas y arbustivas altoandinas.

Además, se recomienda hacer uso de la metodología empírica debido a que el procedimiento, tiempo e incluso uso de equipos es menor al invertido en el método por desplazamiento de agua u otros.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Semillas y Ecología Forestal de la Universidad de Cuenca, al departamento de movilización de la Universidad de Cuenca y a ETAPA EP.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Alberto Macancela Herrera y Byron Ortega Pillajo concibieron la investigación, metodología y realizaron el trabajo de campo.

Alberto Macancela Herrera y Pedro X. Astudillo realizaron el análisis de datos y redactaron el manuscrito.

## DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos se encuentran disponibles en el repositorio de Zenodo con DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17096770>

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés sobre esta investigación

## REFERENCIAS

- [1] Macedo, P., & Madaleno, M. (2022). Global temperature and carbon dioxide nexus: Evidence from a maximum entropy approach. *Energies*, 16(1), 277. <https://doi.org/10.3390/en16010277>
- [2] Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., De Los Ríos-Escalante, P. R., Farooqi, Z., Ali, L., & Shafiq, M. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University Science*, 35(5), 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>
- [3] Peres, C. B., Resende, P. M., Nunes, L. J., & Moraes, L. C. D. (2022). Advances in carbon capture and use (CCU) technologies: a comprehensive review and CO2 mitigation potential analysis. *Clean technologies*, 4(4), 1193-1207. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>
- [4] Buotte, P. C., Law, B. E., Ripple, W. J., & Berner, L. T. (2020). Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/eap.2039>
- [5] Panchal, P., Preece, C., Peñuelas, J., & Giri, J. (2022). Soil carbon sequestration by root exudates. *Trends in Plant Science*, 27(8), 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009>
- [6] Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V. D., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant nutrition under climate change and soil carbon sequestration. *Sustainability*, 14(2), 914. <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- [7] Zhang, J., Wang, X. Jun, Wang, J. Ping, & Wang, W. xia. (2014). Carbon and nitrogen contents in typical plants and soil profiles in Yanqi basin of Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 648–656. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60723-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60723-6)
- [8] Tony, F., Thibaut, F., Guillaume, G., Julie, B., & Robert, S. (2019). Modelling wood density and modulus of elasticity in white spruce plantations in eastern Québec. *The Forestry Chronicle*, 95(3), 196–206. <https://doi.org/10.5558/tfc2019-028>
- [9] Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- [10] Yeboah, D., Burton, A. J., Storer, A. J., & Opuni-Frimpong, E. (2014). Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests*, 45(1), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9390-8>
- [11] Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x>
- [12] Phillips, O. L., Sullivan, M. J., Baker, T. R., Monteagudo Mendoza, A., Vargas, P. N., & Vásquez, R. (2019). Species matter: wood density influences tropical forest biomass at multiple scales. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 913–935. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09540-0>
- [13] Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D., & Herbohn, J. (2014). Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. *Forest Ecology and Management*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>
- [14] Nadkarni, N. M., & Wheelwright, N. T. (Eds.). (2000). *Monteverde: ecology and conservation of a tropical cloud forest*. Oxford University Press. <http://digitalcommons.bowdoin.edu/scholars-bookshelf/1>
- [15] De Mil, T., Tarelkin, Y., Hahn, S., Hubau, W., Deklerck, V., Debeir, O., Van Acker, J., De Cannière, C., Beeckman, H., & Van Den Bulcke, J. (2018). Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees. *Forests*, 9(12), 763. <https://doi.org/10.3390/f9120763>
- [16] Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejada, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21, 77–216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- [17] Bouslimi, B., Koubaa, A., & Bergeron, Y. (2022). Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec Forest. *Forests*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [18] Nabais, C., Hansen, J. K., David-Schwartz, R., Klisz, M., Lopez, R., & Rozenberg, P. (2018). The effect of climate on wood density: what provenance trials tell us?. *Forest Ecology and Management*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.040>



- [19] Yang, H., Wang, S., Son, R., Lee, H., Benson, V., Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, Y., Kattge, J., Boenisch, G., Schepaschenko, D., Karaszewski, Z., Stereńczak, K., Moreno-Martínez, A., Nabais, C., Birnbaum, P., Vieilledent, G., Weber, U., Birnbaum, P., Vieilledent, G., Weber, U., Carvalhais. (2024). Global patterns of tree wood density. *Global Change Biology*, 30(3), 1–13. <https://doi.org/10.1111/gcb.17224>
- [20] Sapkota, T.B., Jat, M.L., Jat, R.K., Kapoor, P., Stirling, C. (2016). Yield Estimation of Food and Non-food Crops in Smallholder Production Systems. In: Rosenstock, T., Rufino, M., Butterbach-Bahl, K., Wollenberg, L., Richards, M. (eds) *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1_8)
- [21] Gao, S., Wang, X., Wiemann, M. C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., & Wang, L. (2017). A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 74(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- [22] Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H., & Sun, D. (2015). Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. *Forests*, 6(4), 1274–1300. <https://doi.org/10.3390/f6041274>
- [23] Gaitan-Alvarez, J., Moya, R., & Berrocal, A. (2019). The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. *Dendrochronologia*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.004>
- [24] Demol, M., Calders, K., Krishna Moorthy, S. M., Van den Bulcke, J., Verbeeck, H., & Gielen, B. (2021). Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning. *Trees*, 35(2) <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [25] Jacquin, P., Longuetaud, F., Leban, J. M., & Mothe, F. (2017). X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*, 42, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>
- [26] Olale, K., Yenesew, A., Jamnadass, R., Sila, A., & Shepherd, K. (2019). A simple field based method for rapid wood density estimation for selected tree species in Western Kenya. *Scientific African*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00149>
- [27] Zobel, B., & Jett, J. (1995). *Genetics of wood production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5>
- [28] Musule, R., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. D. R., Houbbron, E. P., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Desarrollo y evaluación de un método racional y no destructivo para la toma de muestras de maderas blandas utilizadas en análisis químicos. *Madera Bosques*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411427>
- [29] Noh, J. K., Echeverría, C., Kleemann, J., Koo, H., Fürst, C., & Cuenca, P. (2020). Warning about conservation status of forest ecosystems in tropical Andes: National assessment based on IUCN criteria. *PLoS One*, 15(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237877>
- [30] Musule, R., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. D. R., Houbbron, E. P., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Development and evaluation of a rational and nondestructive sampling methodology for softwoods used in chemical analyses. *Madera Bosques*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411427>
- [31] Tejedor Garavito, N., Dávila, Á. E., Caro, A. S., Murakami, A. A., Baldeón, A., Beltrán, H., Blundo, C., Espinoza, B. T. E., Claros, F. A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Khela, S., León, B., Cuadros, L. T. M. A., Camacho, L. R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, R. M., Newton, A. C., Pacheco, S., Reynel, C., Ulloa, C., Cruz, V. O. (2014). *A regional Red List of montane tree species of the tropical Andes: Trees at the top of the world*. Botanic Gardens Conservation International. <https://www.bgci.org/resources/bgci-tools-and-resources/the-regional-red-list-of-montane-tree-species-of-the-tropical-andes/>
- [32] Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- [33] Francis, J. K. (1994). Wood density samples from Tropical Hardwoods. *Tree Planters' Notes*, 45(1), 10-12.
- [34] Kagawa, A., & Fujiwara, T. (2018). Smart increment borer: a portable device for automated sampling of tree-ring cores. *Journal of Wood Science*, 64(1), 52–58. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1668-6>
- [35] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2022). *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials*. Annual Book of ASTM Standards, 93. [https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs\\_ora/20221211/astm/ASTM%20D2395-17%20\(2022\).pdf](https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20221211/astm/ASTM%20D2395-17%20(2022).pdf)



- [36] R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [37] Tonouéwa, J. F. M. F., Biaou, S. S. H., Assèdé, E. S. P., Langbour, P., & Balagueman, O. R. (2022). Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100419>
- [38] Kord, B., Hassankhani, M., & Pourpasha, M. M. (2015). Empirical statistical model for predicting wood properties of *Paulownia fortunei*. Part 1: Physical and biometrical properties. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 17(4). <https://doi.org/10.4067/S0718-221X20150050000080>
- [39] Manzo, S. V., & Hernández, J. V. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y bosques*, 3(1), 81-87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- [40] Syofyan, L., & Maideliza, T. (2019). Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected fabaceae trees in west sumatra secondary forest, Indonesia. *KnE Engineering*, 190-203. <https://doi.org/10.18502/keg.v1i2.4444>
- [41] Joseph, J., James, D., Chai, L. T., Korom, A., Wong, W. V. C., Maripa, R. D., & Phua, M. H. (2022). Assessing intraspecific wood density variations of [*Syzygium* sp. in tropical forest of Southwest Sabah. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1053(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1053/1/012014>
- [42] Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2018). Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PLoS ONE*, 13(9), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- [43] Olale, O. K. (2012). *Prediction of wood density and carbon-nitrogen content in tropical agroforestry tree species in western Kenya using infrared spectroscopy* [Doctoral dissertation, University of Nairobi]. Institutional Repository- University of Nairobi. <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/10634>
- [44] Gough, G., & Barnes, R. D. (1984). A comparison of three methods of wood density assessment in a *pinus elliottii* progeny test. *South African Forestry Journal*, 128(1), 22–25. <https://doi.org/10.1080/00382167.1984.9628921>