

EFECTO DE LAS ZONAS DE VIDA Y LA ALTURA RELATIVA EN LA DENSIDAD ANHIDRA DE *SWIETENIA MAHAGONI* ROXB Y *SWIETENIA MACROPHYLLA* JACQ. PLANTADAS EN LA SIERRA, REPÚBLICA DOMINICANA

Data de aceite: 02/05/2024

Santiago W. Bueno-López

Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra. Vice-rectory of Research and Innovation, Santiago de los Caballeros, Dominican Republic
<https://orcid.org/0000-0002-8508-9184>

Luis Rene Caraballo Rojas

Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra. Vice-rectory of Research and Innovation, Santiago de los Caballeros, Dominican Republic
<https://orcid.org/0000-0003-0812-1045>

Juan G. Torres

Consortio Forestal Serrano San José de las Matas, Santiago, Dominican Republic
<https://orcid.org/0000-0002-3392-9014>

RESUMEN: Este estudio ha proporcionado un análisis de factores que inciden en la variación en la densidad anhidra en árboles de *Swietenia macrophylla* Roxb y *Swietenia mahogani* Jacq., plantadas en tres zonas de vida (ZV) de la región La Sierra, República Dominicana. Ambas especies son muy importantes para los programas de reforestación en la zona de estudio, pero aún no está claro si las diferencias de las características de su madera pueden atribuirse a factores inter e intraespecíficos.

Nuestro objetivo fue estudiar la variación de la densidad (anhidra) de la madera de estas dos especies, basándonos en métodos estadísticos robustos, y densitometría convencional. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas mixto, utilizando como factores inter-sujetos la especie y ZV, y como factor intra-sujetos, la altura relativa (AR) en el fuste. El análisis de la varianza en términos del modelo de efectos de los factores fue expresado en términos de un modelo de regresión, apropiado cuando la estructura de la matriz de las variables independientes no es simple, como en este caso. Las interacciones de tres vías y bidireccionales, y los efectos principales son estadísticamente significativos. La densidad anhidra fue mayor para *S. mahagoni*, menor en la ZV “seca” y disminuyó a medida que aumento la AR. Los promedios menores de densidad anhidra para las especies *S. mahagoni* y *S. macrophylla* fueron 0,649 g/cm³ y 0,676 g/cm³, respectivamente, ambos observados en la ZV “seca” a AR de 0,8. Los promedios mayores correspondientes fueron 0,951 g/cm³ y 0,876 g/cm³, ambos observados en la ZV “húmeda” a AR de 0,1.

PALABRAS-CLAVE: maderas tropicales, altura relativa fuste, densitometría convencional, anova repetida mixta, regresión lineal.

EFFECT OF LIFE ZONES AND RELATIVE HEIGHT ON THE ANHYDROUS DENSITY OF *SWIETENIA MAHAGONI* ROXB AND *SWIETENIA MACROPHYLLA* JACQ. PLANTED IN LA SIERRA, DOMINICAN REPUBLIC

ABSTRACT: This study provides an analysis of factors affecting variation of the anhydrous density property within trees and between the species *Swietenia macrophylla* Roxb and *Swietenia mahagoni* Jacq., growing in three different life zones in La Sierra region, Dominican Republic. These species are very important for the reforestation programs that are carried out in the study area, although little is known about the difference in their wood characteristics within this region. Our objective was to study the anhydrous density of stem wood from these two species, based on robust statistical methods, and conventional densitometry. A mixed repeated measurement analysis (ANOVA) was employed using species and life zone as inter-subject factors, and relative height as an intra-subject factor. The analysis of variance in terms of the factor effects model was expressed in terms of a regression model that allows the assessment of multifactor analysis when the matrix structure of independent variables is not simple as in this case. Results show that three-way interactions, simple bidirectional, and simple main effects are statistically significant. When compare among species, anhydrous density was higher for *S. mahagoni* than for *S. macrophylla*; was lowest in the “dry” life zone; and diminished as relative height within the tree stem increased. Lowest average anhydrous density for *S. mahagoni* and *S. macrophylla* were, respectively, 0,649 g/cm³ and 6,76 g/cm³, both values observed in the “dry” live zone at 0,8 relative height. The respective corresponding highest averages were 0,951 and 0,876 g/cm³, both observed within the “humid” live zone at RH of 0,1.

KEYWORDS: tropical woods, stem wood, conventional densitometry, repeated mixed anova, lineal regression.

INTRODUCCIÓN

La percepción de la calidad de la madera varía, y es difícil definir en una sola declaración; posiblemente la definición más sucinta es que es “una medida de la adecuación de la madera para un uso determinado” (Schimleck *et al.*, 2018). Una de las propiedades físicas más importantes de la madera es su densidad, asociada directamente a las propiedades mecánicas y durabilidad de este material. Esta depende de componentes genéticos y ambientales y se correlaciona con otras propiedades como la rigidez y el rendimiento de la pulpa. (Kimberley *et al.*, 2015). La densidad de la madera es influenciada por el hábitat, los tratamientos silvícolas y la genética. Varía entre individuos en un rodal, entre especies y ambientes; desde el duramen hasta la corteza, dentro de los anillos anuales, y desde las raíces a la copa dentro del mismo árbol (Longi *et al.*, 2018; Kimberley *et al.*, 2017).

La densidad de la madera afecta su calidad y rendimiento. Con el fin de desarrollar estrategias para lograr productos finales, los administradores forestales y los procesadores de madera requieren conocer sobre la variación de la densidad de la madera en sitios diferentes. El conocimiento detallado de su variación es un requisito previo para el establecimiento de plantaciones comerciales de especies con alto potencial para diversos usos finales (Anoop *et al.*, 2014), y para optimizar el valor en su procesamiento (Auty *et al.*, 2014).

Las especies consideradas en este estudio son, *Swietenia macrophylla* Roxb (caoba de hoja grande) y *Swietenia mahogani* Jacq. (caoba de hojas pequeñas). Pertenecen a la familia Meliaceae, y su madera es una de las más valiosas del mundo. Las primeras plantaciones de *S. macrophylla* en República Dominicana fueron establecidas en el área de estudio en 1983, como parte de los programas de reforestación que realiza la ONG Plan Sierra, en sus esfuerzos por contrarrestar el deterioro ecológico de la región. *S. mahogani* es una especie nativa de la isla Hispaniola. Estas maderas tropicales han sido ampliamente utilizadas por más de 500 años en la construcción de componentes y muebles (De Almeida *et al.*, 2019) aunque la densidad de su madera como la de muchas especies de árboles tropicales, sigue siendo desconocida (Djomo *et al.*, 2017).

Los objetivos de este estudio fueron: caracterizar la densidad anhidra en muestras de madera de dos especies de caoba, *S. macrophylla* y *S. mahogani* en plantaciones establecidas en La Sierra, República Dominicana; comparar mediante análisis del modelo ANOVA mixto de tres vías los efectos de las dos especies, tres zonas de vida (ZV) y en cada árbol, tres AR (0,1; 0,5; y 0,8), en la variación de la densidad anhidra de la madera del fuste y construir un modelo de regresión equivalente al enfoque del análisis de varianza en términos del modelo de efectos, para predecir la densidad anhidra en cada combinación de los niveles del factor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Los datos colectados para este estudio observacional comparativo provienen de seis plantaciones de *S. mahogony* y *S. macrophylla*, localizadas dentro de la región conocida como La Sierra, República Dominicana (porción este de La Hispaniola. Dos plantaciones de cada especie fueron seleccionadas dentro de cada una de las siguientes zonas de vida (ZV) según la caracterización Holdridge (1987): Bosque Seco Subtropical, por simplicidad aquí designado como zona “seca”; Bosque Húmedo Subtropical, que desde aquí se designará como zona “intermedia”; y finalmente el Bosque Subtropical Muy Húmedo, que denominaremos zona “húmeda” (Figura 1). La región La Sierra se localiza específicamente entre las coordenadas UTM 251,748 m E - 325,795 m E y 2,116,888 m N - 2,156,996 m N. Las pendientes en esta zona varían entre cero y 70 por ciento. La elevación oscila entre 400 metros y más de 1000 metros sobre el nivel del mar. La temperatura media anual es de 24 °C, con una variación entre el máximo y el mínimo de menos de 10 °C (Figura 2) (Bueno-López 2009), y los suelos son en su mayoría poco profundos, bien drenados, con textura arenosa regular.

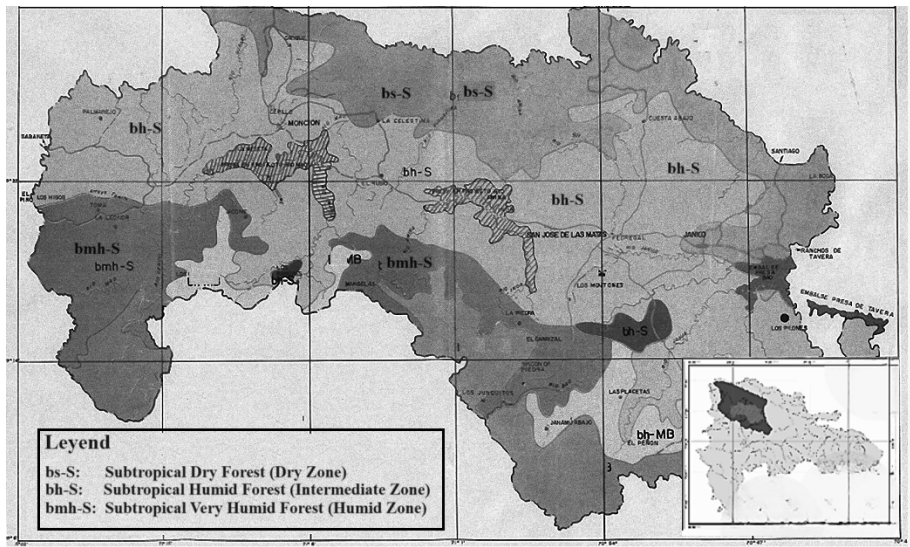


Figura 1. Zonas de vida según Holdridge (1987) en el área de estudio.

Se seleccionaron 36 árboles con edades entre 5 y 35 años para cada especie, 12 en cada plantación y ZV. Debido a problemas que se presentaron en el procesamiento de las muestras, se descartaron 6 árboles de *S. mahagony* y 9 árboles de *S. macrophylla*. La selección final fue la siguiente: De *S. mahagony* se consideraron finalmente 9 árboles en la zona “seca”, 10 en la “intermedia” y 11 en la “húmeda”. De *S. macrophylla* se seleccionaron 9 en cada zona.

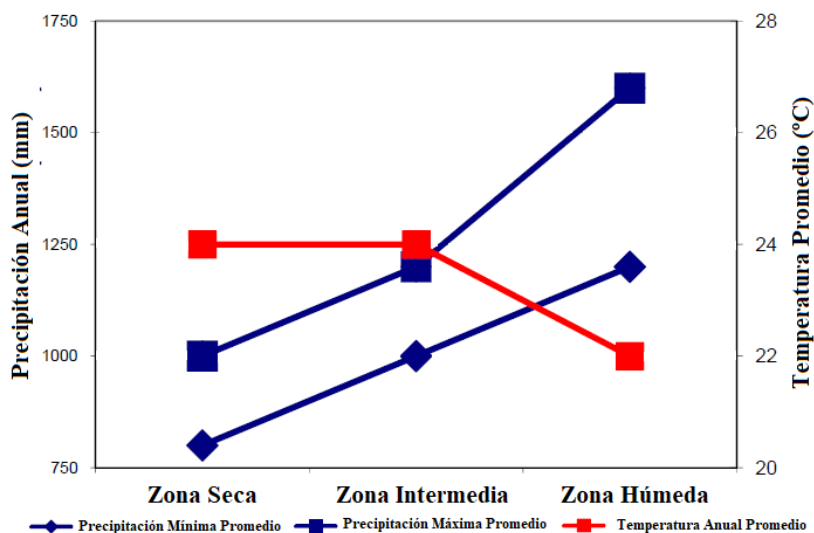


Figura 2. Precipitación anual mínima y máxima promedio y temperatura anual promedio en el área de estudio.

Proceso de selección de las muestras de madera

Para el muestreo de la madera del fuste a tres AR, se seleccionaron árboles que pertenecieran a la clase de diámetro cuadrático medio considerando clases de edad específicas (5-15, 16-25, 26-35). Para cada árbol, se obtuvieron mediante muestreo destructivo, discos de una pulgada de espesor a cada AR. En cada disco, tres submuestras de madera fueron disectadas, una porción del duramen y dos porciones de la albura.

El volumen anhidro (seco) de cada submuestra (cm³) se midió inmediatamente después de estas ser secadas al horno a 110 °C por un periodo de 24 horas, utilizando un densitómetro (QMS Inc., Knoxville, TN, EE. UU.); el peso seco (g) se obtuvo mediante balanza de alta precisión; y la densidad anhidra (g/cm³) se obtuvo como la relación entre masa y volumen de la madera completamente seca. La densidad anhidra (DA) de las submuestras a cada AR fue promediada para conformar una muestra compuesta. La DA de madera se reporta para cada muestra compuesta en cada AR (0,1; 0,5; 0,8), de cada árbol individual.

Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA mixto de tres vías con el fin de comprender los efectos de *S. mahagoni* y *S. macrophylla*; tres zonas de vida (ZV), “seca”, “intermedia” y “húmeda”; y el factor inter-sujetos “AR” (AR) con tres niveles, 0,1; 0,5 y 0,8., en la densidad anhidra (DA) del fuste. Utilizamos el procedimiento GLM para medidas repetidas en SPSS (IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. 2017), que permite investigar las interacciones entre factores, así como los efectos de los factores individuales. Además, proporciona análisis univariados y multivariados para los datos de las medidas repetidas.

Las pruebas post hoc para evaluar las diferencias entre promedios específicos se llevaron a cabo utilizando la corrección Bonferroni (1936) la cual ajusta el nivel de significación estadística considerado de 0,05; de acuerdo al número de comparaciones realizadas. Las medias marginales estimadas que proporcionan estimaciones de los valores promedios previstos para las celdas del modelo se reportan en un gráfico de perfil (gráfico de interacción). Las sumas de cuadrados Tipo III son las utilizadas por defecto por el proceso GLM, adecuadas a nuestro estudio, debido a que los grupos investigados no son homogéneos.

Abordamos el enfoque de regresión para el análisis de la varianza, en términos del modelo de efectos de los factores. El enfoque de regresión es útil para analizar estudios multifactoriales cuando la estructura de la matriz de las variables independientes no es simple (Kutner *et al.*, 2005). El modelo de efectos de los factores es (Ec. 1):

$$Y_{ijk} = \mu. + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ikj} \quad [1]$$

donde,

Y_{ijk} = promedio para la densidad anhidra a AR independientes 0,1; 0,5 y 0,8.

μ = promedio general constante,

α_i = Los factores principales de la especie en el nivel i th, son constantes sujetos a la restricción $\sum \alpha_i = 0$.

β_j = Los factores principales de la ZV en el nivel j th, son constantes sujetos a la restricción $\sum \beta_j = 0$.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Los efectos de la interacción cuando el factor “especie” esta en el nivel i th y el factor “ZV” está en el nivel j th, son constantes y sujetos a las restricciones:

$$\sum_i (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, b$$

$$\sum_j (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad i = 1, \dots, a$$

ε_{ijk} = son independientes $N(0, \sigma^2)$.

Las respuestas promedio del modelo [1] están dadas por (Ec. 2):

$$E [Y_{ijk}] = \mu . . + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} \quad [2]$$

Debido a la restricción $\sum \alpha_i = 0$, solo se necesitan $a - 1$ parámetros α_i en el modelo de regresión. El factor inter-sujetos α_i denota la “especie” con dos niveles (*S. macrophylla* y *S. mahagony*), de manera que solo un parámetro lo representa. Además, debido a la restricción $\sum_j (\alpha\beta)_{ij} = 0$, solo se necesitan $b - 1$ parámetros β_j . El factor inter-sujetos β_j denota la “ZV” con tres niveles (“seca”, “intermedia” y “húmeda”) de manera que dos parámetros lo representan para el análisis de la varianza en términos del modelo de efectos de los factores inter-sujetos.

Para los parámetros de la interacción, debido a las interrelaciones entre las restricciones pertinentes, solo $(a - 1) (b - 1) = 2$ términos $(\alpha\beta)_{ij}$ son requeridos. El modelo “completo” ANOVA de los dos factores inter-sujetos para cada nivel de AR es (Ec. 3):

$$Y_{ijk} = \mu . . + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad i = 1, 2; j = 1, 2, 3 \quad [3]$$

Para expresar este modelo en términos de regresión, utilizamos variables indicadoras que toman valores de 1, -1 o 0, como se explica a continuación. Específicamente, necesitamos $a - 1 = 2 - 1 = 1$ variable indicadora para los efectos principales del factor A, y $b - 1 = 3 - 1 = 2$ variables indicadoras para el efectos principales del factor B. Los términos de interacción corresponden a los productos cruzados de las variables indicadoras para los efectos principales del factor A y del factor B. Específicamente, el modelo “completo” de regresión equivalente al modelo ANOVA [3] es (Ec. 4):

$$Y_{ijk} = \mu . . + \alpha_1 X_{ijk1} + \beta_1 X_{ijk2} + \beta_2 X_{ijk3} + (\alpha\beta)_{11} X_{ijk1} X_{ijk2} + (\alpha\beta)_{12} X_{ijk1} X_{ijk3} + \varepsilon_{ijk} \quad [4]$$

donde:

$X_{ijk1} =$	1	si la observación es del nivel 1 (<i>S. mahagoni</i>) para el factor A (Especie)
	-1	si la observación es del nivel 2 (<i>S. macrophylla</i>) para el factor A (Especie)
$X_{ijk2} =$	1	si la observación es del nivel 1 (ZV "seca") para el factor B (ZV)
	-1	si la observación es del nivel 3 (ZV "húmeda") para el factor B (ZV)
	0	Lo contrario
$X_{ijk3} =$	1	si la observación es del nivel 2 (ZV "intermedia") para el factor B (ZV)
	-1	si la observación es del nivel 3 (ZV "húmeda") para el factor B (ZV)
	0	Lo contrario

Los coeficientes de regresión en [4] son los parámetros del modelo ANOVA cuyos estimadores se presentan a continuación (Ec. 5):

$$\begin{aligned}
 \mu_{...} &= \bar{Y}_{...} \\
 \alpha_1 &= \mu_{1.} - \mu_{...} = \bar{Y}_{1..} - \bar{Y}_{...} \\
 \beta_1 &= \mu_{.1} - \mu_{...} = \bar{Y}_{.1.} - \bar{Y}_{...} \\
 \beta_2 &= \mu_{.2} - \mu_{...} = \bar{Y}_{.2.} - \bar{Y}_{...} \\
 (\alpha\beta)_{11} &= \mu_{11} - \mu_{1.} - \mu_{.1} + \mu_{...} = \bar{Y}_{11.} - \bar{Y}_{1..} - \bar{Y}_{.1.} + \bar{Y}_{...} \\
 (\alpha\beta)_{12} &= \mu_{12} - \mu_{1.} - \mu_{.2} + \mu_{...} = \bar{Y}_{12.} - \bar{Y}_{1..} - \bar{Y}_{.2.} + \bar{Y}_{...}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Los parámetros restantes del modelo ANOVA no son necesarios en el modelo de regresión debido a las restricciones. Debido a estas restricciones tendríamos que (Ec. 6):

$$\begin{aligned}
 \alpha_2 &= -\alpha_1 \\
 \beta_3 &= -\beta_1 - \beta_2 \\
 (\alpha\beta)_{13} &= -(\alpha\beta)_{11} - (\alpha\beta)_{12} \\
 (\alpha\beta)_{21} &= -(\alpha\beta)_{11}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Supuestos

Los supuestos; variable dependiente medida a nivel continuo, dos factores inter-sujetos (independientes) medidos a nivel categórico, y presencia de al menos un factor intra-sujetos (independiente), son inherentes a nuestros datos. Los valores atípicos fueron evaluados mediante diagramas de caja. El supuesto de normalidad fue evaluado utilizando la prueba de Shapiro y Wilk (1965) que es apropiada para cuando se tienen menos de 50 observaciones (Elliott y Woodward, 2007), para cada combinación de grupos de los tres factores; especie, ZV (intra-sujetos) y AR (inter-sujetos). El supuesto de homogeneidad de las varianzas fue evaluado utilizando la prueba de Levene (1960), y el de esfericidad mediante la prueba de Mauchly (1940).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección de diferentes árboles hace las observaciones independientes. Las observaciones realizadas a diferentes AR dentro de un mismo árbol son inherentemente correlacionadas. La herramienta de análisis de medidas repetidas tiende a corregir esta violación al supuesto de independencia, utilizando sumas de cuadrados apropiadas. Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk (1965) indican que se cumplen el supuesto de normalidad en cada combinación de grupos de los tres factores, especie y ZV y AR (Tabla 1). La presencia de valores atípicos evaluados por la inspección de los gráficos de caja (no mostrados) no detecta su presencia.

ZV	AR	<i>S. macrophylla</i>			<i>S. mahagony</i>		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Seca	0.1	0.965	9	0.854	0.949	9	0.681
	0.5	0.956	9	0.756	0.918	9	0.377
	0.8	0.954	9	0.733	0.874	9	0.135
Intermedia	0.1	0.888	9	0.190	0.974	10	0.922
	0.5	0.954	9	0.731	0.948	10	0.643
	0.8	0.961	9	0.806	0.945	10	0.604
Húmeda	0.1	0.967	9	0.867	0.959	11	0.765
	0.5	0.926	9	0.444	0.895	11	0.159
	0.8	0.985	9	0.986	0.892	11	0.146

Tabla 1. Resultados de aplicar la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para las observaciones en cada especie del factor intra-sujetos. Se comprueba que en cada nivel de la variable AR y ZV, estas siguen una distribución normal multivariada.

La prueba de Levene (1960) para la homogeneidad de varianzas es estadísticamente significativa (Valor-P < 0,05) para los niveles 0,5 y 0,8 de la variable intra-sujetos, AR. No se cumple el supuesto de homogeneidad, din embargo, el ANOVA mixto de tres vías es robusto a la heterogeneidad de la varianza en estas circunstancias. Lo esencial de los diseños de medidas repetidas es que, en lugar de la homogeneidad de la varianza, se cumpla el supuesto de esfericidad evaluada por la prueba de Mauchly, que permite verificar si la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación orto-normalizada es proporcional a una matriz de identidad

En la “Tabla 2” se muestra el resultado de esta prueba. Indican que la hipótesis nula prevalece y que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación orto-normalizada es proporcional a una matriz de identidad. El nivel de significancia para 2 gl es 0,288, de manera que, para los análisis de la interacción entre factores, los efectos principales y simples podemos proceder asumiendo el supuesto de esfericidad, sin tener que ajustar los grados de libertad.

Efecto inter sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Épsilon		
					Greenhouse Geisser	Huynh Feldt	Límite inferior
AR	0,951	2,488	2	0,288	0,954	1,000	0,500

Tabla 2. Resultado de la prueba de Mauchly que prueba la hipótesis nula que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación orto-normalizada es proporcional a una matriz de identidad.

En la “Tabla 3” se muestran las estadísticas descriptivas relevantes para la relación entre el factor intra-sujetos, “AR” y los factores inter-sujetos “especie” y “ZV”, y la variable dependiente “DA”. Las estimaciones incluyen los estadísticos descriptivos promedios para las 18 combinaciones de los factores.

Especie	Zona	Altura Relativa	Media	Error estándar	Intervalo de confianza al 95%	
					Inferior	Superior
S. mahagony	Seca	1	0,813	0,010	0,793	0,833
		2	0,650	0,010	0,629	0,671
		3	0,649	0,011	0,628	0,671
	Intermedia	1	0,890	0,009	0,872	0,909
		2	0,795	0,010	0,775	0,815
		3	0,767	0,010	0,747	0,788
	Húmeda	1	0,951	0,009	0,933	0,969
		2	0,899	0,009	0,880	0,918
		3	0,676	0,010	0,656	0,695
S. macrophylla	Seca	1	0,807	0,010	0,788	0,827
		2	0,738	0,010	0,717	0,759
		3	0,676	0,011	0,655	0,698
	Intermedia	1	0,796	0,010	0,776	0,816
		2	0,761	0,010	0,740	0,782
		3	0,741	0,011	0,720	0,763
	Húmeda	1	0,876	0,010	0,856	0,896
		2	0,835	0,010	0,814	0,856
		3	0,767	0,011	0,745	0,788

Tabla 3. Estadísticos descriptivos generales de la relación entre factores intra-sujetos e inter-sujetos de la variación de la densidad anhidra en dos especies de caoba, *S. mahagony* y *S. macrophylla*, en tres zonas de vida de la región La Sierra, República Dominicana.

Los promedios menores de densidad anhidra para las especies *S. mahagony* y *S. macrophylla* fueron 0,649 g/cm³ y 0,676 g/cm³, respectivamente, ambos observados en la ZV “seca” a una AR de 0,8. Los promedios mayores correspondientes fueron 0,951 g/cm³ y 0,876 g/cm³, ambos observados en la ZV “húmeda” a una AR de 0,1. *S. macrophylla* exhibe una tasa de crecimiento más rápida en comparación con la de *S. mahagony*. Esta tasa de

crecimiento ha sido reportada como responsable de variaciones en la densidad promedio del fuste de especies maderables (Djomo *et al.*, 2017). Las especies de crecimiento lento suelen exhibir madera más densa (Lamy *et al.*, 2012; Piispanen *et al.*, 2014; Lego *et al.*, 2018). Todos los promedios de densidad anhidra se visualizan conspicuamente la gráfica de perfil (Figura 3), en la que se incluye un panel para cada ZV y el eje de la abscisa identifica los tres niveles del factor intra-sujetos, AR.

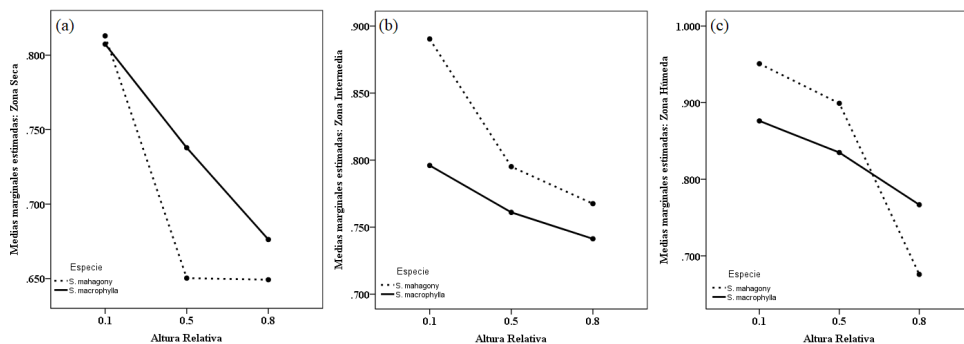


Figura 3. Promedios observados de la densidad anhidra para la combinación de los factores inter-sujetos, especie y ZV, y el factor intra-sujetos AR. Los paneles (a), (b) y (c) corresponden a las zonas de vida “seca”, “intermedia” y “húmeda”, respectivamente.

La interacción de tres vías definida por AR*Especie*ZV se puede visualizar mejor en el gráfico de promedios de los factores, como se muestra en la “Figura 3”. Para las tres zonas de vida, la densidad anhidra (DA) disminuye al aumentar la AR y las líneas que identifican a las especies no son paralelas. Esto sugiere un efecto de interacción. Para la ZV “seca” (panel a) las densidades de ambas especies son similares a AR 0,1. Sin embargo, a AR 0,5; la diferencia es sustancial y se nota que no hay diferencias para los promedios de densidad de *S. mahagoni* a AR 0,5 y 0,8. El panel (b) muestra diferencias sustanciales entre los promedios de densidad de ambas especies a AR 0,1 y porciones casi paralelas de las líneas entre AR 0,5 y 0,8. La DA es un factor que puede considerarse como ordenable en escala de medición y la especie es un factor cualitativo. Por lo tanto, la interacción en el panel (c) puede describirse como no ordinal porque las curvas de promedios se intersecan. La densidad es sensible a estímulos ambientales como el estrés por humedad (Auty *et al.*, 2014). Diferentes aspectos eco fisiológicos como las condiciones climáticas, bióticas, abióticas y edáficas son factores que interactúan afectando la densidad de la madera, y entre ellos, la humedad del suelo juega un papel importante controlándola (Nazarí *et al.*, 2020).

Los resultados bajo esfericidad asumida se presentan en la “Tabla 4”. Se incluye el factor intra-sujetos (AR) y sus interacciones con los factores inter-sujetos. Hay una interacción de tres vías estadísticamente significativa entre la AR, las especies y las zonas de vida, $F(2,102) = 15,419$, $Valor-P \leq 0,000$, $parcial n^2 = 0,377$. Las interacciones bidireccionales son estadísticamente significativas entre los factores inter-sujetos y el factor intra-sujetos.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
AR	0,579	2	0,289	301,067	0,000	0,855	602,134	1,000
AR * E	0,057	2	0,028	29,547	0,000	0,367	59,093	1,000
AR * ZV	0,111	4	0,028	28,916	0,000	0,531	115,662	1,000
AR * E * ZV	0,059	4	0,015	15,419	0,000	0,377	61,677	1,000
Error (AR)	0,098	102	0,001					

A: Origen; **B:** Suma de cuadrados Tipo III; **C:** grados de libertad; **D:** Cuadrático promedio; **E:** estadístico F; **F:** significancia estadística (nivel alfa = 0,05); **G:** Eta parcial al cuadrado; **H:** Parámetro de no centralidad; **I:** Potencia observada; AR = AR; E = Especie; ZV = ZV.

Tabla 4. Pruebas de efectos inter-sujetos para la variable dependiente densidad anhidra (DA) con esfericidad asumida. Se incluye el factor intra-sujetos (AR) y sus interacciones con los factores inter-sujetos.

Las interacciones bidireccionales simples de los factores inter-sujetos (Especie*ZV), evaluadas en los tres niveles del factor intra-sujetos (AR). fueron analizadas por separado mediante ANOVA de dos vías, considerando por separado los efectos de las interacciones inter-sujetos para cada uno de los tres niveles en AR. Debido a la corrección Bonferroni, la significancia estadística para estos tres efectos principales simples se declara con $Valor-P=0,05/3=0,016$.

A lo largo del árbol, la densidad promedio varió significativamente desde la base a la parte superior, mostrando una tendencia decreciente con la altura en el tallo, siendo este patrón previamente observado en estudios reportados por Auty *et al.* (2014); Djomo *et al.* (2017); y Lego *et al.* (2018). La madera juvenil se forma bajo la influencia de la corona viva y tiene menor resistencia y rigidez que la madera madura en la base del árbol (Auty *et al.*, 2014). Las porciones del tronco más recientes, como en la corona superior, tienen una densidad de madera más baja.

Hubo interacción bidireccional simple estadísticamente significativa entre los factores especie*ZV en los tres niveles de AR. En el nivel AR = 0,1, $F(2,51) = 11,512$; $Valor-P \leq 0,000$. En el nivel AR = 0,5, $F(2,51) = 30,890$; $Valor-P \leq 0,000$. En el nivel AR = 0,8, $F(2,51) = 16,229$; $Valor-P \leq 0,000$. Los términos de error para las tres interacciones bidireccionales simples son diferentes, (0,044; 0,049 y 0,052, respectivamente) al utilizar el error “restringido” en vez del “agrupado”. El término de error “restringido” es particularmente útil en esta situación al no cumplirse el supuesto de homogeneidad de las varianzas.

Procedimos a determinar si hay efectos principales simples estadísticamente significativos de la especie en cada nivel de ZV. Para la AR 0,1 hubo efectos principales simples estadísticamente significativos de las ZV “intermedia” y “húmeda” para las especies, con los resultados respectivos siguientes: $F(1,51) = 45,598$; $Valor-P \leq 0,000$; $F(1,51) = 37,791$; $Valor-P \leq 0,000$. y . Para la AR 0,5 hubo efectos principales simples estadísticamente significativos de las tres ZV, “seca”, “intermedia” y “húmeda” para las especies, con los resultados respectivos siguientes: $F(1,51) = 35558$; $Valor-P \leq 0,000$;

$F(1,51) = 5,679$; $Valor-P \leq 0,021$; y $F(1,51) = 21,077$; $Valor-P \leq 0,000$. Finalmente, para la AR 0,8 hubo un solo efecto principal simple estadísticamente significativo para la ZV, “húmeda”, con $F(1,51) = 39,834$; $Valor-P \leq 0,000$;

En la “Tabla 5” se reportan todas las comparaciones posibles (por pares) para efectos principales simples entre cada promedio de grupo. Las correcciones de Bonferroni se hicieron con comparaciones dentro de cada efecto principal simple. Se reportan los *Valores-P* ajustados.

AR	Zona	(I) Especie	(J) Especie	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
							Límite inferior	Límite superior
0,1	Seca	mahagony	macrophylla	0,006	0,014	0,690	-0,022	0,033
	Intermedia	mahagony	macrophylla	0,094 [*]	0,014	0,000	0,067	0,122
	Húmeda	mahagony	macrophylla	0,075 [*]	0,013	0,000	0,048	0,101
0,5	Seca	mahagony	macrophylla	-0,088 [*]	0,015	0,000	-0,117	-0,058
	Intermedia	mahagony	macrophylla	0,034 [*]	0,014	0,021	0,005	0,063
	Húmeda	mahagony	macrophylla	0,064 [*]	0,014	0,000	0,036	0,092
0,8	Seca	mahagony	macrophylla	-0,027	0,015	0,080	-0,057	0,003
	Intermedia	mahagony	macrophylla	0,026	0,015	0,081	-0,003	0,056
	Húmeda	mahagony	macrophylla	-0,091 [*]	0,014	0,000	-0,120	-0,062

* = La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05; B = Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Tabla 5. Reporte de todas las comparaciones posibles entre cada promedio de grupo, basadas en medias marginales estimadas.

La “Tabla 5” muestra que para la AR a 0,1 en los árboles, la densidad anhidra es estadísticamente significativa y mayor para *S. mahagony* en comparación con *S. macrophylla* en las ZV “intermedia” y “húmeda”. Las diferencias de promedios son respectivamente $(0,094 \pm 0,014) \text{ g/cm}^3$ y $(0,075 \pm 0,013) \text{ g/cm}^3$. El *Valor-P* correspondiente para cada una de estas diferencias de promedios es 0,000. Para el segundo nivel del factor inter-sujetos, AR a 0,5, la densidad anhidra es estadísticamente significativa y menor para *S. mahagony* en comparación con *S. macrophylla* en las ZV “seca”; y es estadísticamente significativa y mayor para las ZV “intermedia” y “húmeda”. Hay varias razones para esta variación, incluyendo las condiciones ambientales y los tratamientos silviculturales (Fernández y Cornejo, 2016). Las diferencias de medias son respectivamente $(-0,088 \pm 0,015) \text{ g/cm}^3$, $(0,034 \pm 0,014) \text{ g/cm}^3$ y $(0,064 \pm 0,014) \text{ g/cm}^3$. Los *Valores-P* correspondientes son, respectivamente, 0,000, 0,021 y 0,000. Finalmente, en el tercer nivel de la AR a 0,8, la densidad anhidra es estadísticamente significativa y menor para *S. mahagony* en comparación con *S. macrophylla* en la ZV “húmeda”, con una diferencia de medias de $(-0,91 \pm 0,014) \text{ g/cm}^3$, y un *Valor-P* de 0,000. Este patrón fue consistente con lo reportado

por Fajardo (2018) estudiando la especie *Nothofagus pumilio* en La Patagonia. El rango máximo en la gravedad específica que relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con humedad igual o mayor a 30%, reportada por Koehler (2017) para el género *Swietenia* de 0,344 a 0,903 g/cm³.

DESARROLLO DEL MODELO DE REGRESIÓN

La “Tabla 6” muestra los resultados del enfoque de análisis de regresión correspondiente al análisis de la varianza en términos del modelo de efectos de los factores. Para ilustrar, se incluyen los parámetros estimados para este enfoque que utiliza de manera independiente el factor intra-sujetos (AR) para predecir la densidad anhidra en cada uno de sus niveles para la especie *S. mahagony*, considerando la necesidad de discriminar por especie y ZV. La función de regresión ajustada para el modelo de regresión “completo”, cuando la AR es 0,5 es (Ec. 7):

$$Y_{ijk} = 0,780 + 0,002 X_{ijk1} - 0,086 X_{ijk2} - 0,002 X_{ijk3} - 0,046 X_{ijk1}X_{ijk2} + 0,015 X_{ijk1}X_{ijk3} \quad [7]$$

Los valores ajustados para el modelo “completo” son equivalente a los promedios estimados de la combinación de factores inter-sujetos. Las codificaciones para el primer árbol de la especie *S. mahagony* en la zona “seca” ($i = 1, j = 1, k = 1$) son: $X_1 = 1, X_2 = 1$ y $X_3 = 0$, de modo que los productos cruzados $X_1X_2 = 1$ y $X_1X_3 = 0$. La gran media en este caso es $\mu... = \bar{Y} = 0,835$ Las estimaciones de los coeficientes de regresión necesarios son:

$$\alpha_1 = 0,064; \beta_1 = -0,097; \beta_2 = -0,074; (\alpha\beta)_{11} = -0,152; \text{ y } (\alpha\beta)_{12} = 0,117.$$

Para la primera observación ($k = 1$) en los niveles $i = 1, j = 1$ de los factores A (Especie) y B (ZV), respectivamente tenemos la función de regresión ajustada (Ec. 8):

$$\hat{Y}_{111} = 0,835 + 0,064 (1) - 0,097 (1) - 0,074 (0) - 0,152 (1) + 0,117 (0) \quad [8]$$

En el caso de la observación (árbol) ($k = 4$) en los niveles $i = 2, j = 3$, las codificaciones para este árbol de la especie *S. macrophylla* en la zona “húmeda” son: $X_1 = -1, X_2 = -1$ y $X_3 = -1$, de modo que los productos cruzados $X_1X_2 = 1$ y $X_1X_3 = 1$. La función de regresión ajustada es (Ec. 9):

$$\hat{Y}_{234} = 0,835 + 0,064 (-1) - 0,097 (-1) - 0,074 (-1) - 0,152 (1) + 0,117 (1) \quad [9]$$

Parámetro	Efecto	DA a 0,1 AR				DA a 0,5 AR				DA a 0,8 AR			
		B	Error estándar	t	Sig.	B	Error estándar	t	Sig.	B	Error estándar	t	Sig.
Intercepción	$\mu...$	0,876	0,010	89,23	0,000	0,835	0,010	80,42	0,000	0,767	0,011	71,73	0,000
S. mahagoni	α_1	0,075	0,013	5,64	0,000	0,064	0,014	4,59	0,000	-0,091	0,014	-6,31	0,000
Zona Seca	β_1	-0,069	0,014	-4,95	0,000	-0,097	0,015	-6,61	0,000	-0,091	0,015	-5,99	0,000
Zona Intermedia	β_2	-0,080	0,014	-5,77	0,000	-0,074	0,015	-5,03	0,000	-0,025	0,015	-1,68	0,098
S. mahagoni * Zona Seca	$(\alpha\beta)_{11}$	-0,069	0,019	-3,60	0,001	-0,152	0,020	-7,48	0,000	0,064	0,021	3,06	0,004
S. mahagoni * Zona Intermedia	$(\alpha\beta)_{12}$	0,020	0,019	1,04	0,303	0,117	0,021	5,69	0,000	0,117	0,021	5,69	0,000

B = Coeficientes; t = estadístico; Sig. = significancia estadística.

Tabla 6. Parámetros estimados mediante el enfoque de regresión, para medidas repetidas de la ANOVA mixta de la variable dependiente densidad anhidra a AR 0,1; 0,5 y 0,8.

CONCLUSIONES

La densidad promedio de un tronco de árbol se ve afectada por muchos factores, como las especies de árboles, la ubicación geográfica y otros factores ambientales, la edad de los árboles, la tasa de crecimiento y los factores genéticos. El ANOVA mixto de tres vías muestra una interacción a tres vías estadísticamente significativa entre especie, ZV, y AR, $F(2,102) = 15,419$, $Valor-P \leq 0,000$; parcial $\eta^2 = 0,377$. La significación estadística de las tres interacciones bidireccionales simples fue aceptada en un nivel alfa ajustado por Bonferroni de 0,016. Hubo interacción bidireccional simple estadísticamente significativa entre los factores especie*ZV en los tres niveles de AR. En el nivel AR = 0,1; $F(2,51) = 11,512$, $Valor-P \leq 0,000$; . En el nivel AR = 0,5; $F(2,51) = 30,890$, $Valor-P \leq 0,000$; . En el nivel AR = 0,8; $F(2,51) = 16,229$, $Valor-P \leq 0,000$. Siete de los nueve efectos principales simples fueron estadísticamente significativos en las pruebas univariadas de los efectos inter-sujetos. Todas las comparaciones por pares se realizaron para efectos principales simples y 7 fueron estadísticamente significativas.

Las variaciones estadísticamente significativas pueden atribuirse a los factores inter-sujetos, “especies”, y “zonas de vida” son inmutables, mientras que el efecto de la AR puede cambiar en la medida que los árboles crezcan en altura. Los resultados del estadístico Eta Cuadrado Parcial indican que el efecto de la variable intra-sujetos AR en la variabilidad de la densidad anhidra de los árboles de caoba fue el mayor ($\eta^2 = 0,855$), seguido del efecto de la interacción AR*ZV ($\eta^2 = 0,531$). En tercer lugar, encontramos el efecto de la interacción de los tres factores ($\eta^2 = 0,377$) y por último el efecto de la interacción AR*Especie ($\eta^2 = 0,367$). Las reglas básicas generales son: Estos resultados son consistentes con lo reportado por Sarmiento *et al.* (2011) para árboles en Guayana Francesa en lo que respecta a las diferencias e interacciones a nivel de familia que en su estudio representaron más del 40% de la varianza total.

Entre las especies, la densidad anhidra fue mayor para *S. mahagoni* que para *S. macrophylla*, con una diferencia de promedios de $(0,010 \pm 0,005)$ g/cm³. La densidad anhidra fue menor en la ZV seca que en las demás zonas con una diferencia de medias con respecto a la ZV “intermedia” $(-0,070 \pm 0,006)$ g/cm³, y comparada a la ZV “húmeda” de $(-0,112 \pm 0,006)$ g/cm³. La diferencia de promedios entre la zona “intermedia” y la “húmeda” fue de $(-0,042 \pm 0,006)$ g/cm³. De manera que la densidad anhidra disminuyó con el aumento del contenido de humedad en las zonas. Para todos los árboles, la gravedad anhidra disminuyó a medidas que aumento la AR. Las diferencias de medias entre 0,1; 0,5 y 0,8 fueron $(0,076 \pm 0,005)$ g/cm³ y $(0,143 \pm 0,006)$ g/cm³, respectivamente. Las diferencia de medias entre 0,5 y 0,8 fue de $(0,067 \pm 0,006)$ g/cm³.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado financieramente por el Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología a través de su programa FONDOCyT, en la República Dominicana. La Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM) proporcionó acceso al laboratorio y apoyo administrativo. Plan Sierra, Inc. apoyó a través de la adquisición de materiales, la recopilación de datos y el personal de campo. Reconocemos el esfuerzo y aporte realizado por los departamentos de compras y el personal administrativo de la Vicerrectoría de Investigación e Innovación de la PUCMM.

REFERENCIAS

- Anoop, E.; Jijeesh, V.; Sindhumathi, C.M.; Jayasree, C.E. 2014. Wood physical, Anatomical and Mechanical properties of Big Leaf Mahogany (*Swietenia macrophylla* Roxb) a potential exotic for South India. *Res J Agric For Sci* 2(8), 7-13, http://www.isca.in/AGRI_FORESTRY/Archive/v2/i8/2.ISCA-RJAFS-2014-037.pdf.
- Auty, D.; Achim, A.; Macdonald, E.; Cameron, A.D.; Gardiner, B.A. 2014. Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry* 2014; 87, 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>.
- Bonferroni, C.E. 1936. *Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità*, Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze. <https://dx.doi.org/10.4135/9781412961288.n455>.
- Bueno-López, S. W. 2009. *Understanding Growth and Yield of Pinus occidentalis in La Sierra, Dominican Republic*. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. 286 pp. <https://www.proquest.com/openview/acf95dc01d6081728567d781349590c1/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.
- De Almeida, T.H.; De Almeida, D.H.; Christoforo, A.L.; Panzera, T.H.; Oliveira P.R.; Lahr, F.A.R. 2019. New analytical approach for estimating density of Brazilian tropical woods based on fundamental concepts. *Sci For Piracicaba* 47, 686-695. <https://www.ipef.br/.../cap10.pdf>.
- Djomo, A.N.; Ngoukwa, G.; Zapfack, L.; Chimi, C.D. 2017. Variation of wood density in tropical rainforest trees. *J For* 4(2), 16-26. <https://doi.org/10.18488/journal.101.2017.42.16.26>.
- Elliott, A.C.; Woodward, W.A. 2007. *Statistical analysis quick reference guidebook with SPSS examples*. 1st ed. London: Sage Publications. <https://dx.doi.org/10.4135/9781412985949>.
- Fajardo, A. 2018. Insights into intraspecific wood density variation and its relationship to growth, height and elevation in a tree line species. *Plant Bio* 20(3), 456-464. <https://doi.org/10.1111/plb.12701>.
- Fernández, M.P.; Cornejo, B. 2016. Is the first flowering event and corresponding maturity phase in trees related to radial wood density changes? *Trees* 30:859–870. <https://www.proquest.com/openview/ad46ceb7695f26e6033d87ad74feb89b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=326291>.
- Holdridge, L.R. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 415 pp. <https://repositorio.ica.int/handle/11324/7936>.

IBM Corp. (2017). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Released 2017. Armonk, NY: IBM Corp.

Kimberley, M.O.; Cown, D.J.; McKinley, R.B.; Moore, J.R.; Dowling, L.J. 2015. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. *N Z J For Sci* 45:22. <https://nzjforestryscience.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s40490-015-0053-8.pdf>.

Kimberley, M.O.; McKinley, R.B.; Cown, D.J.; Moore, J.R. 2017. Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir. *N Z J For Sci* 47:15. <https://nzjforestryscience.springeropen.com/articles/10.1186/s40490-017-0096-0>.

Koehler, A. 2017. *The identification of true mahogany, Certain So-Called Mahoganies, and Some Common Substitutes* (Classic Reprint). Bul. 1050. U.S. Department of Agriculture., Govt. Print. Off., Washington. 18 pp. <https://ccn.loc.gov/agr22000569>.

Kutner, M.H.; Nachtsheim, C.J.; Neter, J.K.; Li, W. 2005. *Applied Linear Regression Models*. 5th Edition. McGraw-Hill/Irwin, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY, 10020. ISBN 0-07-238688-6.

Lamy, J.B.; Lagane, F.; Plomion, C.; Cochard, H.; Delzon, S. 2012. Micro-evolutionary patterns of juvenile wood density in a pine species. *Plant Ecol* 213, 1781–1792. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11258-012-0133-2>.

Lego, K.; Sharma, C.L.; Sharma, M. 2018. Axial Variation of Wood Density in *Pinus merkusii* Jungh. y de Vriese. *J Tree Sci* 37(1), 1-10. <https://indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ts&volume=37&issue=1&article=001>.

Levene, H. 1960. *Robust tests for equality of variances*. In Ingram Olkin; Harold Hotelling (eds.). Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford University Press. 278–292 pp. <https://www.jstor.org/stable/2285659>.

Longi, E.L.; Galao, A.T.D.; Rajput, K.S.; De Melo, A.C.G. 2018. Anatomical investigation of root, stem and branch wood in 10-year-old *Inga laurina* in the context of anatomical adaptation to hydraulic and mechanical stresses. *Ann Bio* 40, 31-39. <https://www.semanticscholar.org/paper/Anatomical-investigation-of-root%2C-stem-and-branch-Longui-Gal%C3%A3o/7e1e1cb9f5729ddbc2a9647378208e78c138e3c3>.

Mauchly, J. W. 1940. Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. *The Ann Math Stat* 11(2), 204-209. <https://www.jstor.org/stable/2235878>.

Nazari, N.; Bahmani, M.; Kahyani, S.; Humar, M.; Koch, G. 2020. Geographic Variations of the Wood Density and Fiber Dimensions of the Persian Oak Wood. *Forests* 11(9), 1003. <https://doi.org/10.3390/f11091003>.

Piispanen, R.; Heinonen, J.; Valkonen, S.; Mäkinen, H.; Lundqvist, S.O.; Saranpää, P. 2014. Wood density of Norway spruce in uneven-aged stands. *Can J For Res* 44(2), 136-144. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0201>.

Shapiro, S.S.; Wilk, M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.

Schimleck, L.; Antony, F.; Dahlen, J.; Moore, J. 2018. Wood and Fiber Quality of Plantation-Grown Conifers: A Summary of Research with an Emphasis on Loblolly and Radiata Pine. *Forests* 9, 298; <https://doi:10.3390/f9060298>.