



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

BIOMASA SUBTERRÁNEA DE *Pinus patula*: ECUACIONES ALOMÉTRICAS Y EFECTOS DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

FRINET MEDRANO MERAZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe: Erinet Medrano Meraz

Alumna de esta institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor: Dr. Miguel Ángel López López por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis: Biomasa subterránea de *Pinus patula*: ecuaciones alométricas y efectos de algunas características del sitio y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la institución. El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 26 de junio de 2018



Firma de la Alumna



Dr. Miguel Ángel López López
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **“Biomasa subterránea de *Pinus patula*: ecuaciones alométricas y efectos de algunas características del sitio”**. Realizada por la alumna **Frinet Medrano Meraz** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

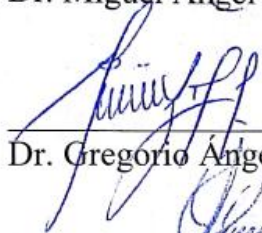
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



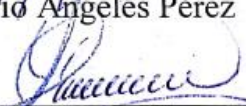
Dr. Miguel Ángel López López

ASESOR



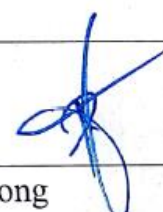
Dr. Gregorio Angeles Pérez

ASESOR



Dr. Francisco Cruz Cobos

ASESOR



Dr. Bernardus Hendricus Jozeph de Jong

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2018

Biomasa subterránea de *Pinus patula*: ecuaciones alométricas y efectos de algunas características del sitio

Frinet Medrano Meraz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

Los bosques desempeñan un papel importante en la mitigación del cambio climático, acumulan grandes cantidades de biomasa y participan en la regulación del ciclo mundial del carbono.

Con el objetivo de generar herramientas para contribuir a subsanar la escasez de información sobre la biomasa subterránea en bosques, en el presente estudio se desarrollaron ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono subterráneo, se establecieron relaciones entre biomasa aérea y subterránea y se examinó la relación entre la biomasa subterránea y la fertilidad del suelo. En diversos sitios del área de distribución de *Pinus patula*, se seleccionó y derribó siete árboles de dimensiones variadas de la especie en estudio, en los cuales se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total (HT) y diámetro de copa (DC). Se extrajo la totalidad de raíces finas y gruesas y se cuantificó la biomasa aérea por censo, muestreo o por alometría. Se determinó el cociente raíz/parte aérea y la proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total y se desarrollaron modelos para biomasa subterránea total, por componentes a nivel árbol y modelos a nivel de raíz individual. Además, se realizaron análisis de correlación y regresión lineal entre los componentes aéreos y subterráneos. El cociente raíz/parte aérea promedio fue de 0.20 y la proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total de los árboles en promedio fue de 16.7%. El modelo que presentó mejor ajuste, incluye el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) como variables independientes. Se encontraron asociaciones significativas entre los componentes subterráneos y aéreos, con coeficientes de correlación de Pearson que oscilaron de 0.65 a 0.99. La proporción de la biomasa

de fuste y raíces gruesas con respecto de la biomasa total, incrementa al aumentar el tamaño del árbol, mientras que la biomasa de ramas, follaje y raíces finas disminuye; sin embargo, la proporción de biomasa de raíces finas con respecto a la de follaje, aumenta al incrementar el DAP de los árboles. Las correlaciones entre las biomásas de raíces y las variables del suelo no fueron significativas.

Palabras claves: Alometría, cociente raíz/parte aérea, distribución de biomasa, suelo, raíces.

Belowground biomass of *Pinus patula*: allometric equations and effects of some site characteristics

Frinet Medrano Meraz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Forests play an important role in mitigating climate change, accumulate large amounts of biomass and participate in the regulation of the global carbon cycle. With the aim of generating tools to help amend the scarcity of information about belowground biomass in forests, in the present study, allometric equations were developed for the estimation of biomass and belowground carbon. Relationships between above- and belowground biomass were established and the relationship between belowground biomass and soil fertility was examined. In several sites within the natural range of *Pinus patula*, seven trees of this species, with varying dimensions, were selected and felled, and their diameter at breast height (DBH), total height (HT) and crown diameter (DC) were registered. The totality of fine and coarse roots was extracted and the aboveground biomass was quantified by census, sampling or by allometry. The root / aboveground biomass ratio and the proportion of belowground biomass were determined with respect to the total biomass, and models were developed for total belowground biomass, tree-level biomass of structural components, and individual root biomass. In addition, correlation and linear regression analyzes were performed between the above- and belowground components. The average root / aboveground biomass ratio was 0.20 and the proportion of belowground biomass with respect to the total biomass of the trees on average was 16.7%. The model that presented the best fit, included the diameter at breast height (DBH) and the total height (HT) as independent variables. Significant associations were found between the

belowground and aboveground components, with Pearson correlation coefficients ranging from 0.65 to 0.99. The proportion of stem biomass to coarse-root biomass increases with increasing tree size, while the biomass of branches, foliage and fine roots decreases with tree size; however, the proportion of fine root biomass with respect to foliage biomass increases with increasing DBH of the trees. Correlations between biomass of root components and the soil variables were not significant.

Keywords: *Allometry, root/aboveground ratio, biomass distribution, soil, roots.*

DEDICATORIA

A mi madre por darme amor, fortaleza, apoyo incondicional... por darme tanto.

A mis abuelitos y padres a la vez, a quienes admiro infinitamente y agradezco el cuidar de mí siempre.

A mis hermanos por su cariño, y alentarme a seguir.

A mis amigos fraternos, compañeros y profesores, extraordinarias personas que en definitiva hicieron más llevadera esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por esta vida llena de bendiciones y concederme llegar hasta aquí.

A mi familia y amigos, por su apoyo, cariño, comprensión y hacer más fácil mi estancia lejos de casa.

Al Dr. Miguel Ángel López López, por su enorme apoyo, dedicación y disponibilidad durante el desarrollo de esta investigación, por ser una excelente persona.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez, por sus valiosas sugerencias a lo largo de la investigación y por el apoyo económico a través del proyecto "Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México".

Al Dr. Francisco Cruz Cobos, por su apoyo y consejos desde hace ya algunos años y sus significativas aportaciones en esta investigación.

Al Dr. Bernardus Hendricus Jozeph De Jong, por su valiosa colaboración en la presente investigación.

A mis compañeros y profesores, excelentes personas de quienes aprendí bastante durante la maestría, y que ahora forman parte de mi formación no solo como estudiante sino también como persona.

A los estudiantes que realizaron su estancia en el posgrado de Ciencias Forestales, al personal de los viveros de Pueblo Nuevo e Insurgentes en Puebla, a las personas de Huayacocotla, Veracruz y Zacualtipán, Hidalgo que colaboraron en el trabajo de campo de esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados y Postgrado en Ciencias Forestales por permitirme ser parte de la institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	vi
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
CONTENIDO.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
LITERATURA CITADA.....	3
CAPITULO 1. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono subterráneos en <i>Pinus patula</i>.	6
1.1. RESUMEN.....	6
1.2. ABSTRACT.....	7
1.3. Introducción	8
1.4. Materiales y métodos	9
1.4.1. Área de Estudio.....	9
1.4.2. Diseño de muestreo	10
1.4.3. Variables evaluadas	11
1.4.3.1. Variables dasométricas	11
1.4.3.2. Obtención de biomasa subterránea.....	11
1.4.3.3. Estimación de biomasa aérea.....	12
1.4.3.4. Estimación del contenido de carbono	13
1.4.3.5. Análisis estadístico.....	13
1.5. Resultados y discusión	15
1.5.1. Ecuaciones para la estimación de biomasa subterránea total a nivel árbol	15
1.5.2. Ecuaciones para la estimación de carbono subterráneo total a nivel árbol	20
1.5.3. Ecuaciones de biomasa de los componentes subterráneos a nivel árbol	21
1.5.4. Biomasa de raíces individuales	26
1.6. Conclusiones	30

1.7. Literatura citada	31
CAPITULO 2. Relaciones alométricas y efectos de la fertilidad del suelo sobre la biomasa subterránea en <i>Pinus patula</i>.....	36
2.1. RESUMEN.....	36
2.2. ABSTRACT.....	37
2.3. Introducción	38
2.4. Materiales y métodos	39
2.4.1. Área de Estudio	39
2.4.2. Muestreo de árboles	40
2.4.3. Variables evaluadas	40
2.4.3.1. Variables dasométricas	40
2.4.3.2. Obtención de biomasa subterránea.....	41
2.4.3.3. Estimación de biomasa aérea.....	41
2.4.3.4. Análisis de suelo	42
2.4.3.5. Análisis estadístico	43
2.5. Resultados.....	43
2.5.1. Relaciones entre las biomásas de los componentes del árbol.....	44
2.5.2. Proporciones de biomasa.....	47
2.5.3. Relación entre biomasa de raíces y fertilidad del suelo.....	50
2.6. Discusión	51
2.6.1. Relaciones entre biomasa subterránea y biomasa aérea	51
2.6.2. Proporción de biomasa	52
2.6.3. Relaciones entre biomasa de raíces y fertilidad del suelo	54
2.7. Conclusiones	55
2.8. Literatura citada	56
CONCLUSIÓN GENERAL.....	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos seleccionados para ajustar la biomasa subterránea a nivel árbol.	14
Cuadro 2. Características dasométricas y biomasa de los componentes de los árboles muestra.	16
Cuadro 3. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa subterránea total de raíces a nivel árbol.	19
Cuadro 4. Contenido de carbono por componente en los árboles muestra.	21
Cuadro 5. Ecuaciones para la estimación de biomasa subterránea por componente a nivel árbol.	23
Cuadro 6. Principales variables descriptivas de las raíces individuales.	26
Cuadro 7. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de raíces individuales. ..	27
Cuadro 8. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de la raíz central y sus componentes.	28
Cuadro 9. Ubicación de los sitios de estudio.	40
Cuadro 10. Estadísticas descriptivas para las variables DAP, HT, DC, R y biomásas de los componentes aéreos y subterráneos para árboles de <i>Pinus patula</i>	44
Cuadro 11. Matriz de correlación entre biomásas de raíces finas, raíces gruesas, follaje, ramas y fuste.	45
Cuadro 12. Propiedades químicas del suelo de los sitios de muestreo.	50
Cuadro 13. Correlación de Pearson entre biomasa de RF, RG y BS con variables de los suelos de los sitios de muestreo.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo de <i>Pinus patula</i>	10
Figura 2. Comportamiento de la proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total en <i>Pinus patula</i>	17
Figura 3. Dispersión y línea de regresión de los valores observados de biomasa total de raíces con respecto al DAP en <i>Pinus patula</i>	18
Figura 4. Valores observados y predichos por el modelo 1 y 2 de los árboles muestra de <i>Pinus patula</i>	20
Figura 5. Regresión lineal entre la biomasa de raíces primarias gruesas, raíces secundarias gruesas y raíces terciarias finas en función de la biomasa de ramas, fuste y follaje de <i>Pinus patula</i>	46
Figura 6. Relación entre biomasa total, biomasa subterránea y biomasa aérea de <i>Pinus patula</i>	47
Figura 7. Proporciones relativas de biomasa de los componentes subterráneos y aéreos en los árboles muestra de <i>Pinus patula</i>	48
Figura 8. Proporción de biomasa de varios componentes de árboles de <i>Pinus patula</i> con respecto a RF (a) y RG (b).	49

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques desempeñan un papel importante en la mitigación del cambio climático (Bonan, 2008), puesto que pueden acumular grandes cantidades de biomasa (Wang *et al.*, 2008) y en ella fijar carbono (CO₂). De esta manera, participan en la regulación del ciclo mundial del CO₂ (Cairns *et al.*, 1997; Bonan, 2008; Wang *et al.*, 2008). Por esta razón, son necesarias estimaciones precisas de biomasa aérea y subterránea en diferentes especies, condiciones (Sinacore *et al.*, 2017; He *et al.*, 2018) y escalas geográficas (Koala *et al.*, 2017). Las ecuaciones alométricas son una herramienta esencial para estas estimaciones (Tashi *et al.*, 2017). Actualmente se han desarrollado múltiples ecuaciones de predicción de biomasa aérea mediante métodos bien establecidos, sin embargo, para el caso de biomasa subterránea son pocas (Cairns *et al.*, 1997; Razakamanarivo *et al.*, 2012).

El componente subterráneo es el menos estudiado, debido a las dificultades metodológicas que representa (Návar, 2015) y que resultan en procesos lentos y costosos; además no existe un acuerdo sobre el método preciso a utilizar (Brown, 2002; Gárate y Blanco, 2013; Addo-Danso *et al.*, 2016). Sin embargo, la biomasa subterránea representa hasta un 40% de la biomasa viva en bosques de coníferas (Litton *et al.*, 2003), y se considera un componente significativo de la biomasa forestal (Laclau, 2003; Varik *et al.*, 2013; Magalhães, 2015).

Si bien las estimaciones de biomasa aérea y subterránea son importantes para evaluar el impacto de los bosques en la mitigación del cambio climático (Agrawal *et al.*, 2011), lo son también para la comprensión de la distribución de la biomasa en los ecosistemas (Yang *et al.*, 2010), la respuesta de los árboles a las condiciones y tipos de suelo en donde se desarrollan (Wang *et al.*, 2014) y también para estudiar las relaciones alométricas entre el crecimiento y sus componentes (Gower *et al.*, 1999).

La teoría básica de las relaciones alométricas es que en muchos organismos, la tasa de crecimiento de una parte del organismo es proporcional a la de otra (Komiyama *et al.*, 2008), por lo que, la distribución de la asignación de biomasa subterránea también, es posible conocerla a partir de su análoga la biomasa aérea (Cairns *et al.*, 1997). Asimismo, es posible conocer el grado de asociación entre los diferentes componentes de la biomasa forestal.

Por los motivos anteriormente expuestos, los objetivos principales de esta investigación fueron: generar ecuaciones alométricas a nivel árbol y raíz individual para estimar biomasa y carbono subterráneos y examinar los efectos de algunas características del sitio en el componente subterráneo en *P. patula*, especie de importancia ecológica y económica. Otros objetivos del estudio fueron, evaluar relaciones alométricas entre la biomasa aérea y subterránea y determinar la proporción relativa de sus componentes. Se plantearon las siguientes hipótesis: 1) mediante ecuaciones alométricas es posible predecir correctamente la biomasa subterránea y el carbono respectivo de la especie en estudio y 2) existe relación funcional entre los componentes aéreos y componentes subterráneos, lo mismo que entre biomasa subterránea y fertilidad del suelo.

Los resultados que se presentan en este estudio, proporcionan ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono subterráneos, componente de la biomasa forestal difícil de estudiar; además facilitan las determinaciones de biomasa de los componentes subterráneos a partir de los componentes aéreos y también aportan información sobre la asignación de biomasa en las diferentes etapas de desarrollo y sobre la asociación morfológica y fisiológicamente relevante entre los componentes del árbol.

LITERATURA CITADA

- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>
- Agrawal, A., Nepstad, D., & Chhatre, A. (2011). Reducing emissions from deforestation and forest degradation. *Annual Review of Environment and Resources*, 36(1), 373–396. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042009-094508>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change : forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444–1450. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3)
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Gárate, M., & Blanco, J. A. (2013). Importancia de la caracterización de la biomasa de raíces en la simulación de ecosistemas forestales. *Ecosistemas*, 22(3), 66–73.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 29–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
- He, H., Zhang, C., Zhao, X., Fousseni, F., Wang, J., Dai, H., Yang S., & Zuo Q. (2018). Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. *PLOS ONE*, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226>
- Koala, J., Sawadogo, L., Savadogo, P., & Aynekulu, E. (2017). Allometric equations for below-ground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands, *Silva Fennica*, 51(3), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.14214/sf.1631>
- Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongpan, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>

- Laclau, P. (2003). Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantations. *Forest Ecology and Management*, 173(2003), 353–360. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00012-9)
- Litton, C. M., Ryan, M. G., Tinker, D. B., & Knight, D. H. (2003). Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(2), 351–363. <https://doi.org/10.1139/x02-181>
- Magalhães, T. M. (2015). Allometric equations for estimating belowground biomass of *Androstachys johnsonii* Prain. *Carbon Balance and Management*, 10(16). <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0027-4>
- Návar, J. (2015). Root stock biomass and productivity assessments of reforested pine stands in northern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 338, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.020>
- Razakamanarivo, R. H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M. A., Vieilledent, G., & Albrecht, A. (2012). Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020>
- Sinacore, K., Hall, J. S., Potvin, C., Royo, A. A., Ducey, M. J., & Ashton, M. S. (2017). Unearthing the hidden world of roots: Root biomass and architecture differ among species within the same guild. *PLOS ONE*, 12(10), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185934>
- Tashi, S., Keitel, C., Singh, B., & Adams, M. (2017). Allometric equations for biomass and carbon stocks of forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas. *Forestry*, 90(3), 445–454. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx003>
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., & Uri, V. (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management*, 302, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.033>
- Wang, L., Li, L., Chen, X., Tian, X., Wang, X., & Luo, G. (2014). Biomass allocation patterns across China's terrestrial biomes. *PLOS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093566>

- Wang, X., Fang, J., & Zhu, B. (2008). Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 255(12), 4007–4020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.055>
- Yang, Y., Fang, J., Ma, W., Guo, D., & Mohammat, A. (2010). Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 268–277. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00502.x>

CAPITULO 1. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono subterráneos en *Pinus patula*.

1.1.RESUMEN

Las ecuaciones alométricas son esenciales para la estimación de biomasa y carbono en los ecosistemas forestales. La información reportada para la parte subterránea es escasa debido a las dificultades metodológicas que representa su determinación. Con el objetivo de generar herramientas para subsanar esta deficiencia, en el presente estudio se desarrollaron ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa subterránea en el área de distribución de *Pinus patula*. En diversos sitios se seleccionaron y derribaron siete árboles de la especie seleccionada con dimensiones variadas, en los cuales se midieron el diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total (HT) y diámetro de copa (DC). Se extrajo la totalidad de raíces finas y gruesas, y se cuantificó la biomasa aérea por censo, muestreo o por alometría. Se determinó el cociente raíz/parte aérea y la proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total. Los modelos se desarrollaron para biomasa subterránea total, por componentes a nivel árbol y modelos a nivel de raíz individual. El cociente raíz/parte aérea promedio fue de 0.20 y la proporción de biomasa subterránea varió de 13.4 a 21.2% y aumentó al incrementar las dimensiones de los árboles. Los datos de biomasa subterránea total a nivel árbol, se ajustaron mejor al modelo que incluye el diámetro a la altura del pecho y la altura total como variables independientes y explicaron el 99% de la variación en biomasa subterránea, con un error relativo promedio de 6.1%. Se concluye que es posible utilizar relaciones alométricas para estimar la biomasa subterránea de *P. patula* en función del DAP y HT o al utilizar sólo el DAP.

Palabras claves: Alometría, cociente raíz/parte aérea, fijación de carbono, raíces gruesas, raíces finas.

1.2.ABSTRACT

Allometric equations are essential for estimating biomass and carbon in forest ecosystems. Published information is scarce for belowground biomass, due to the methodological challenges its determination represents. With the aim of generating tools to help amend this deficiency, in the present study, allometric equations were developed for the estimation of belowground biomass of *Pinus patula* within its distribution area. In several sites, seven *P.patula* trees with varying dimensions were selected, felled, and their diameter at breast height (DBH), total height (HT), and crown diameter (DC) were measured. The totality of fine and coarse roots was extracted and the aboveground biomass was quantified by census, sampling or by allometry. The root / aboveground ratio and the proportion of belowground biomass with respect to total biomass were determined. Models were developed for total belowground biomass, for components (i.e. fine, coarse, primary roots, etc.) at the tree level, and for components at the individual-root level. The average root / aboveground biomass ratio was 0.20 and the proportion of belowground biomass ranged from 13.4 to 21.2%, and increased with increasing tree dimensions. Belowground biomass data at the tree level, fitted better to the model that included the diameter at breast height and total height as independent variables, which explained 99% of the variation of belowground biomass, with an average relative error of 6.1 %. It is concluded that it is possible to use allometric equations to estimate the belowground biomass of *P. patula* from DBH and HT or even using only the DBH.

Keywords: *Allometry, root / aboveground biomass ratio, carbon fixation, coarse roots, fine roots.*

1.3.Introducción

La importancia de las ecuaciones alométricas en el ámbito forestal radica en que son esenciales para la estimación de biomasa y carbono (Tashi *et al.*, 2017), y por consiguiente, para evaluar el impacto de los bosques en la mitigación del cambio climático mediante la adopción de mecanismos y políticas ambientales (Agrawal, *et al.*, 2011). Estas ecuaciones relacionan la biomasa con el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura de los árboles u otras variables dendrométricas que en los inventarios forestales sean fáciles de medir (Razakamanarivo *et al.*, 2012; Henry *et al.*, 2013).

Actualmente se han desarrollado múltiples ecuaciones de predicción de biomasa aérea mediante métodos bien establecidos, por el contrario de biomasa subterránea son pocas (Cairns *et al.*, 1997; Razakamanarivo *et al.*, 2012). Es el componente menos estudiado debido a las dificultades metodológicas (Návar, 2015) que resultan en procesos lentos y costosos, además no existe un acuerdo sobre el método preciso a utilizar (Brown, 2002; Gárate y Blanco, 2013; Addo-Danso *et al.*, 2016).

Aunado a ello, se debe considerar que las ecuaciones alométricas deben ser determinadas para condiciones y especies locales específicas para minimizar errores de predicción (Sanquetta *et al.*, 2001; Zapata-Cuartas *et al.*, 2012). De acuerdo con Cole y Ewel (2006) las ecuaciones genéricas son deficientes para la aplicación a una especie o sitios específicos. De manera análoga Chave *et al.* (2014) y Koala *et al.* (2017) coinciden en que las ecuaciones específicas por especie proporcionan menor incertidumbre.

Sin embargo, la biomasa subterránea es considerada un importante sumidero de carbono que se debe incluir en las estimaciones de biomasa locales, regionales y globales (Varik *et al.*, 2013) y representa hasta 40% de biomasa viva en bosques de coníferas (Litton *et al.*, 2003). Por lo

anterior, el objetivo principal del estudio fue generar ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono subterráneos a nivel de árbol y raíces individuales de *P. patula*.

1.4. Materiales y métodos

1.4.1. Área de Estudio

Pinus patula se distribuye en México de manera natural desde los 24° a los 17° de latitud norte (Perry, 1991; Vela, 1980) en los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz se localizan las poblaciones más abundantes. Por lo tanto, el estudio se llevó a cabo en los municipios de Huayacocotla en Veracruz, Acaxochitlán y Zacualtipán en Hidalgo y Chignahuapan y Zacatlán en Puebla, entre las coordenadas 19°46'05.0"-20°37' 8.7" latitud norte y 98°00'21.9"-98°36'29.3" longitud oeste (Figura 1). La altitud promedio de los sitios de muestreo fluctuó de 2055 a 2600 m. De acuerdo con Vela (1980) en el área de distribución de *P. patula* las temperaturas más bajas se alcanzan en diciembre en algunos sitios y en otros en enero, mientras que los valores más altos se presentan en el mes de mayo. El promedio de las temperaturas mínimas varían entre 0.9 °C y 7.9 °C en los meses más fríos y máximas 20.3 °C y 27.2 °C en el mes más caliente. Los sitios en donde se desarrolla la especie son húmedos y bien drenados con precipitaciones anuales de entre 1000-1500 mm, crece en rodales puros y en asociación con *P. greggii*, *P. maximinoi*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *P. patula* var. *longepedunculata*, *Abies religiosa*, *P. montezumae*, *P. ayacahuite* var. *veichtii* y *Quercus spp.* (Perry, 1991). Los suelos son de moderadamente profundos a muy profundos; en cuanto a textura son francos y migajones en la parte superficial y arcillosa en las partes más profunda (Vela, 1980).

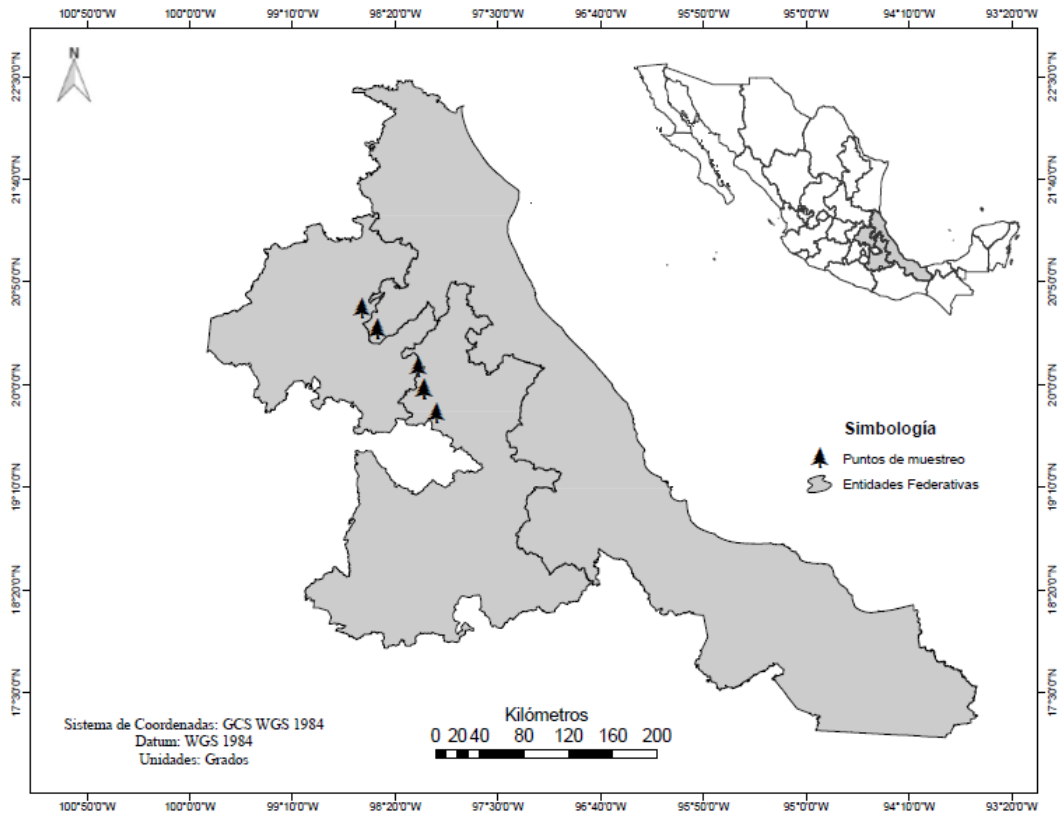


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo de *Pinus patula*

1.4.2. Diseño de muestreo

El estudio contempló la elaboración de dos grupos de ecuaciones alométricas: 1) ecuaciones de biomasa subterránea a nivel árbol y 2) ecuaciones de biomasa a nivel de raíz individual. En ambos casos, el muestreo fue destructivo y consistió en extraer las raíces de árboles sanos, con fuste recto (no bifurcados), sociológicamente ubicados en la categoría de árboles no suprimidos, distribuidos estratégicamente para tratar de representar la mayor parte del macizo principal del área de distribución natural de la especie. El muestreo de raíces se realizó de junio de 2016 a septiembre de 2017.

Para el primer grupo se seleccionaron siete árboles de *P. patula* de diferentes dimensiones, que incluyeron categorías diamétricas entre 1.5 y 57.0 cm. Para el segundo grupo, se extrajo un total de 66 raíces de diámetro basal variable y de diferentes árboles, entre los cuales se incluyeron las

raíces de los siete árboles utilizados para el primer grupo, con la finalidad de asegurar una amplia variabilidad morfológica de raíces.

1.4.3. Variables evaluadas

1.4.3.1. Variables dasométricas

Las variables que se midieron en cada uno de los árboles en pie fueron: en cm el diámetro a la altura del pecho (DAP), a 1.3 m de altura, con cinta diamétrica; en m se midió el diámetro de copa (DC) y la altura total (HT) con la ayuda de un flexómetro; esta última se midió una vez derribado el árbol. En el caso de las raíces individuales, en mm, se midió su diámetro basal (DB), con cinta diamétrica en raíces grandes o vernier digital en raíces pequeñas y conjuntamente, se determinó su longitud con flexómetro.

1.4.3.2. Obtención de biomasa subterránea

La biomasa de raíces gruesas ($DB > 2 \text{ mm}$) y finas ($DB < 2 \text{ mm}$), se determinó en todos los árboles, mediante censo. Se extrajo la totalidad de raíces con herramientas convencionales como pico, pala, barreta y herramientas de jardinería. En laboratorio, las raíces a nivel árbol, las raíces centrales e individuales, se clasificaron como primarias, secundarias y terciarias o de mayor grado. A su vez, estos grupos de raíces se reclasificaron en gruesas y finas, si su diámetro fue mayor o menor a 2 mm, respectivamente. Las raíces clasificadas se cortaron en trozos pequeños, se colocaron en bolsas de papel kraft perfectamente etiquetadas y se secaron en una estufa de circulación forzada Sheldon modelo 1675-S®) a 70 °C hasta obtener su peso constante y así también su peso seco o biomasa, con la ayuda de una balanza marca OHAUS con capacidad de 2 kg y precisión de 1 g. El proceso de clasificación y secado permitió obtener la biomasa de cada uno de los siguientes componentes de las raíces 1) raíz central o principal que es la raíz que emerge del tejido hipocótilo del tallo y de la cual emergen las raíces laterales, 2) raíces primarias,

3) raíces secundarias, 4) raíces terciarias, 5) raíces gruesas, 6) raíces finas, 7) raíces primarias gruesas, 8) raíces primarias finas, 9) raíces secundarias gruesas, 10) raíces secundarias finas, 11) raíces terciarias gruesas y 12) raíces terciarias finas.

1.4.3.3. Estimación de biomasa aérea

La biomasa de fuste, ramas y follaje en los siete árboles muestreados, se determinó de acuerdo al tamaño del árbol, con la finalidad de optimizar tiempo y costos. Mediante censo en los árboles pequeños (DAP < 10 cm), al secar todo el material hasta obtener su peso constante. En el caso del árbol de 16.4 cm de DAP, la biomasa aérea se estimó sumando la biomasa de sus componentes (fuste, ramas y follaje). A su vez, la biomasa de estos componentes se estimó mediante un muestreo de la masa húmeda total en cada uno de ellos para obtener el contenido de humedad. El contenido de humedad de cada unidad de muestreo se obtuvo mediante la ecuación 1. El peso seco de cada compartimiento aéreo se obtuvo mediante la ecuación 2.

$$CH \text{ MUESTRA} = (PH - PS) \times 100 / PH \quad (1)$$

$$PS \text{ CPMTO} = PH \text{ CPMTO} \times (100 - CH \text{ PROM}) / 100 \quad (2)$$

Donde CH MUESTRA, es el contenido de humedad de la muestra en %; PH, es el peso húmedo de la muestra en kg; PS, es el peso seco de la muestra en kg; PS CPMTO, es el peso seco del compartimiento del árbol en kg; PH CPMTO, es el peso húmedo del compartimiento del árbol en kg y CH PROM, es el contenido de humedad promedio en %.

En los árboles con DAP de 25.5, 35.5, 46.5 y 57 cm se estimó la biomasa aérea mediante las ecuaciones alométricas reportadas por Castellanos *et al.* (1996) para *P. patula*.

1.4.3.4. Estimación del contenido de carbono

El contenido de carbono subterráneo y aéreo del arbolado se estimó a partir de la multiplicación de los valores obtenidos de biomasa en este estudio y las concentraciones promedio de carbono determinadas por Díaz-Franco *et al.* (2007) para árbol total de *P. patula* (ecuación 3).

$$CCs = BT \times 50.31 \quad (3)$$

Donde CCs, es el contenido de carbono en la biomasa subterránea y aérea de los árboles muestra en kg; BT, es la biomasa total subterránea y aérea de los árboles muestra en kg; y 50.31, es la concentración de carbono en %.

1.4.3.5. Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos de biomasa, contenido de carbono y las variables medidas en los árboles muestra y en las raíces individuales, se realizó un análisis de regresión no lineal por mínimos cuadrados no lineales y de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios. Se generaron las ecuaciones alométricas para la predicción de biomasa y contenido de carbono total subterráneo. También se generaron ecuaciones por componente a nivel árbol y a nivel de raíz individual. Asimismo se generó una ecuación especial para la raíz central y sus componentes, puesto que este componente del árbol presenta una morfología distintiva.

Después de probar modelos frecuentes en el desarrollo de ecuaciones alométricas, tales como exponencial, coeficiente mérfico constante, variable combinada y variable combinada escalada; se optó por los modelos que describen adecuadamente la dispersión de los datos. Se seleccionó el modelo 1; (Schumacher y Hall, 1933) y el modelo 2 (Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997), por presentar los mejores ajustes y la sencillez de los mismos, además de ser de los más mencionados en la literatura alusiva al tema (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos seleccionados para ajustar la biomasa subterránea a nivel árbol.

Modelo	Ecuación
1	$Y = \beta_0 DAP^{\beta_1} HT^{\beta_2}$
2	$Y = \beta_0 DAP^{\beta_1}$

Donde Y, es la biomasa subterránea total de raíces y de los componentes en kg; DAP, es el diámetro a la altura del pecho en cm; HT, es la altura total del árbol en m; β_0 , β_1 y β_2 son parámetros a estimar de la regresión.

En las ecuaciones de biomasa y contenido de carbono total a nivel árbol, los modelos se ajustaron en su forma original y se tomaron como variables independientes el DAP y HT. No obstante, los datos de raíces individuales y de la raíz central, se ajustaron mejor al modelo 2, al utilizarlo en su forma lineal, mediante transformación logarítmica de las variables dependientes e independientes, por medio de la siguiente expresión:

$$\text{LN}(Y) = \text{LN}(\beta_0) + \beta_1 \text{LN}(DB) \quad (4)$$

Donde Y, es biomasa subterránea total de raíces y de los componentes en g; DB, es el diámetro basal en mm; β_0 y β_1 , son parámetros a estimar y LN, es logaritmo natural.

Las ecuaciones a nivel de raíz individual, se establecieron en función del diámetro basal de la raíz. La bondad de ajuste de los modelos se evaluó mediante los siguientes indicadores: coeficiente de determinación (R^2) en los modelos a nivel de raíz individual, raíz del cuadrado medio del error (RCME), coeficiente de determinación ajustado (R^2 Adj), y el criterio de información de Akaike (AIC). También se calculó el error relativo promedio en las ecuaciones a nivel árbol mediante la ecuación 5 propuesta por Djomo *et al.* (2010).

$$\text{ER} = 100 \times (\text{B PRED} - \text{B OBS}) / \text{B OBS} \quad (5)$$

Donde ER, es el error relativo en %; B PRED, es la biomasa predicha del arbolado en kg y B OBS, es la biomasa observada del arbolado en kg.

El ajuste de los modelos se realizó mediante los procedimientos MODEL y REG en el software estadístico SAS/ETS® (SAS Institute, Inc., 2011).

1.5.Resultados y discusión

1.5.1. Ecuaciones para la estimación de biomasa subterránea total a nivel árbol

Entre los árboles muestra, el DAP menor fue de 1.5 cm y el mayor de 57 cm. En consecuencia la biomasa total por árbol fluctuó de 0.44 kg hasta 1984.95 kg. El árbol más pequeño presentó 0.05 y 0.39 kg, y el árbol más grande 420.66 y 1564.29 kg de biomasa subterránea y aérea respectivamente. Así, el cociente raíz/parte aérea en los árboles muestra osciló de 0.13 a 0.27, con un promedio de 0.20 (Cuadro 2). En el estudio realizado por Sanquetta *et al.* (2011) se incluyeron dos especies del género *Pinus* y en promedio, los autores obtuvieron un cociente de 0.17, poco menor que el valor promedio en este estudio. En cambio Liepiņš *et al.* (2018) encontraron valores superiores, entre 0.20 a 0.25 en *Pinus sylvestris* L., mientras que para otras especies los valores fueron todavía mayores: 0.21-0.30 para *Picea abies* L. Karst, 0.23-0.34 para *Betula pendula* Roth y 0.21-0.39 para *Populus tremula* L. En plantaciones de *Pinus ponderosa* de 10 y 20 años se determinaron las relaciones promedio que variaron de 0.21 a 0.24 en los árboles muestra, a nivel de rodal fueron de 0.23 a 0.25. Los valores promedio más altos en ambos casos se determinaron en la plantación de menor edad (Laclau, 2003). Este comportamiento es similar al determinado por Peichl y Arain (2007), quienes encontraron que el cociente raíz/parte aérea disminuyó al aumentar la edad de rodales de *Pinus strobus* L. en Canadá.

Cuadro 2. Características dasométricas y biomasa de los componentes de los árboles muestra.

Árbol	DAP (cm)	HT (m)	DC (m)	BS (kg)	BA (kg)	BT (kg)	R	PBS (%)	PBA (%)
1	16.4	21.8	2.5	13.13	85.23	98.37	0.15	13.4	86.7
2	46.7	20.6	--	196.41	990.43	1186.84	0.20	16.6	83.5
3	1.5	2.5	1.2	0.05	0.39	0.44	0.13	12.1	88.0
4	9.0	9.8	2.7	3.19	16.20	19.38	0.20	16.4	83.6
5	25.5	16.6	6.4	61.12	247.70	308.81	0.25	19.8	80.2
6	35.5	20.7	9.3	111.39	528.33	639.72	0.21	17.4	82.6
7	57.0	32.5	8.0	420.66	1564.29	1984.95	0.27	21.2	78.8
Promedio	27.4	17.8	4.3	115.14	490.37	605.50	0.20	16.7	83.3

Donde: DAP es el diámetro a la altura del pecho; HT es la altura total; DC es el diámetro de copa; BS es la biomasa subterránea; BA es la biomasa aérea; BT: es la biomasa total y R es el cociente raíz / parte aérea; PBS es la proporción de biomasa subterránea respecto a BT; PBA es la proporción de biomasa aérea respecto a la BT.

En el presente estudio, la proporción de biomasa subterránea de *P. patula* con respecto a la biomasa total osciló entre 13.4 % y 21.2 %, con un promedio de 16.7 %, (Cuadro 2). Este valor es inferior al encontrado en *Vochysia guatemalensis* Donell-Smithii, en cuyo caso la biomasa subterránea representó 18.6% de la biomasa total (Fonseca *et al.*, 2012). Martínez *et al.* (2016) encontraron una proporción de biomasa de raíz de 17.57% con respecto a la biomasa total de árboles de *Pinus cooperi* de entre 8 y 13 años y diámetros basales de 7.6 a 12.2 cm. La proporción de biomasa subterránea encontrada por estos autores es parecida a la determinada en el presente estudio, aun cuando en el estudio de Martínez *et al.* (2016), el rango de dimensiones de los árboles muestra fue más reducido que el utilizado en el presente estudio.

La proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total de los árboles de *Pinus patula*, incrementó conforme aumentó el DAP ($p = 0.054$; Figura 2). Esta tendencia es similar a la reportada por Grier *et al.* (1981) para el caso de rodales de *Abies amabilis* Douglas *ex* J. Forbes. y a la encontrada por Magnani *et al.* (2000), quienes identificaron un aumento en la

biomasa de raíces finas al incrementar la edad de rodales de *Pinus sylvestris* L. de 7 a 59 años. Sin embargo, también para *Pinus sylvestris* L., la proporción de biomasa subterránea con respecto a la total, disminuyó con el tamaño de los árboles (Kenina *et al.*, 2018), lo que indica que tal proporción puede estar fuertemente determinada por la especie, pero además por las condiciones del sitio, pues estos autores utilizaron una metodología para la extracción de raíces, similar a la implementada en el presente estudio, con excepción de las raíces finas, mismas que no fueron determinadas en *P. sylvestris*.

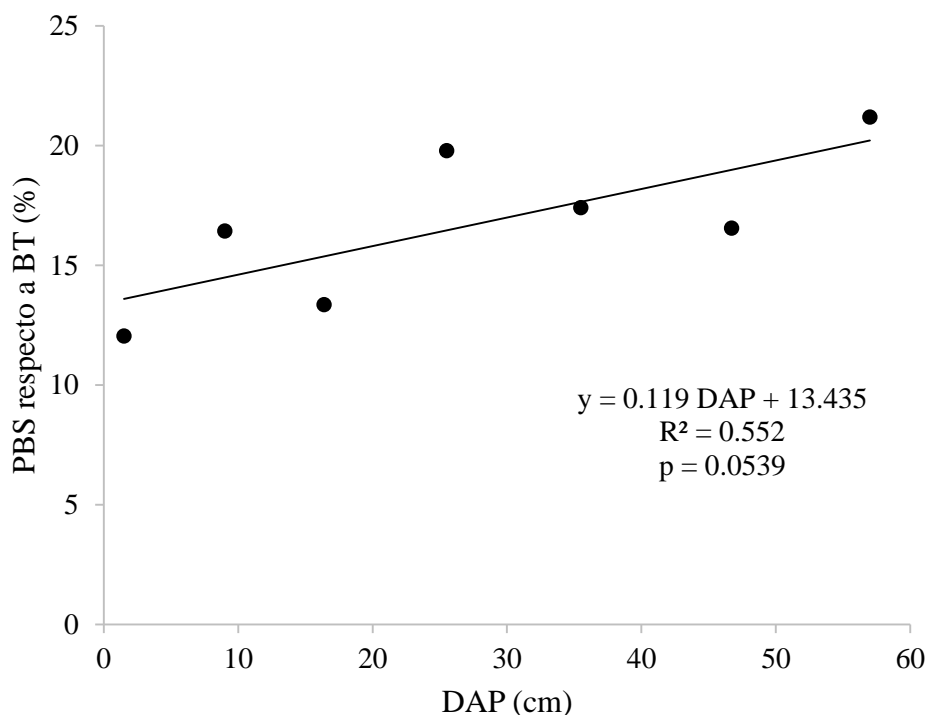


Figura 2. Comportamiento de la proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total en *Pinus patula*. PBS: proporción de biomasa subterránea; BT: biomasa total.

Las proporciones de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total de los árboles, al parecer dependen de la especie, pero son afectadas también por los métodos de muestreo de la biomasa tanto de la parte aérea como de la subterránea (Beets *et al.*, 2007; Brassard *et al.*, 2011).

Como consecuencia de las diferentes metodologías empleadas, las ecuaciones alométricas de raíces existentes presentan variaciones en su forma matemática e incertidumbre en sus estimaciones (Yuen *et al.*, 2016; Waring y Powers, 2017).

Al emplear por separado las variables explicativas HT, DC y DAP, fue ésta última la que presentó mayor asociación con la variable dependiente. En la distribución de los valores observados de biomasa subterránea de *P. patula* (Figura 3), se observa una relación potencial creciente de biomasa subterránea con respecto al DAP. Fonseca *et al.* (2009) considera que el DAP es la variable que mayor asociación tiene con la biomasa.

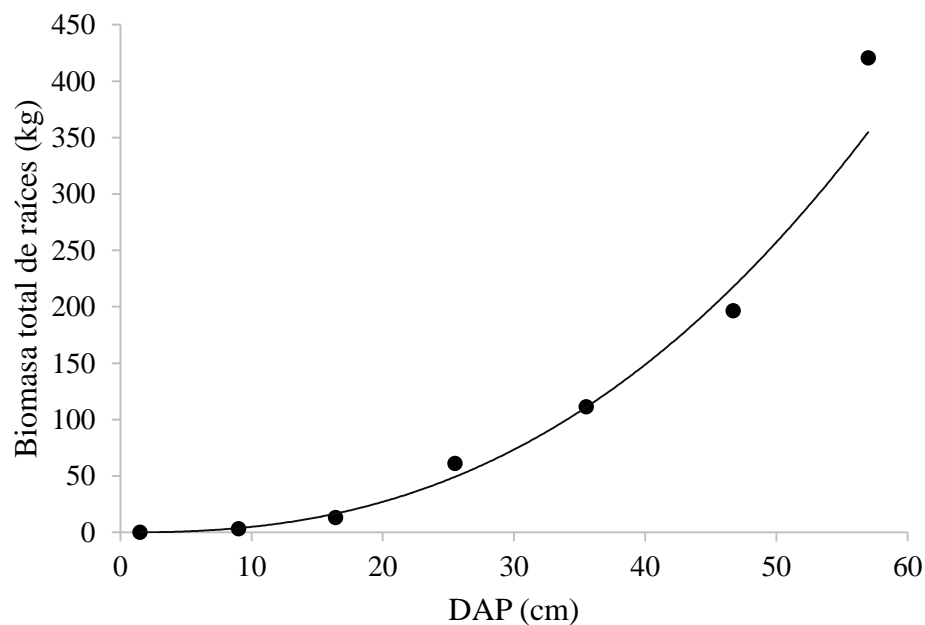


Figura 3. Dispersión y línea de regresión de los valores observados de biomasa total de raíces con respecto al DAP en *Pinus patula*.

Sin embargo en este estudio se utilizaron modelos de una y dos entradas, es decir, las ecuaciones de regresión generadas para la estimación de biomasa subterránea a nivel árbol estuvieron en

función del DAP y HT, con la finalidad de conocer el grado de contribución de la variable HT en el ajuste de los modelos, debido a que puede ser de utilidad para quienes cuentan con datos de éstas dos variables continuas.

De acuerdo con los estadísticos de evaluación ambos modelos presentaron buen ajuste, aunque éste fue superior para el modelo 1 que incluye la variable HT, por presentar RCME, AIC y error relativo promedio menores y una R^2 ajustada de 0.99, mientras que el modelo 2, presenta una R^2 ajustada de 0.98 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa subterránea total de raíces a nivel árbol.

Modelo	Parámetros estimados	Error estándar	PR > T	RCME	R^2 ajustada	AIC
1	β_0	0.00744	0.0035	0.0979	8.3955	0.9970
	β_1	2.078025	0.2061	0.0005		
	β_2	0.729446	0.1623	0.0109		
2	β_0	0.002319	0.0027	0.4212	18.5479	0.9852
	β_1	2.988337	0.2872	0.0001		
	Error relativo promedio (%)					
1		6.1				
2		-28.0				

La correlación lineal entre los valores observados y los valores predichos fue estadísticamente significativa ($r=0.99$, $p < 0.001$) en ambos modelos (Figura 4). El modelo 1 tiende a sobreestimar la biomasa de raíces respecto a los valores observados con un error relativo promedio de 6.1%, mientras que el modelo 2 la subestima con un error relativo promedio de - 28% (Cuadro 3). Djomo *et al.* (2010) reportaron valores diferentes a este estudio, en la estimación de biomasa aérea de especies mixtas, al emplear el modelo que sólo utiliza el DAP, obtienen un error promedio de 7.4%, semejante al error promedio del modelo 1 en este estudio que incluye la altura y el DAP.

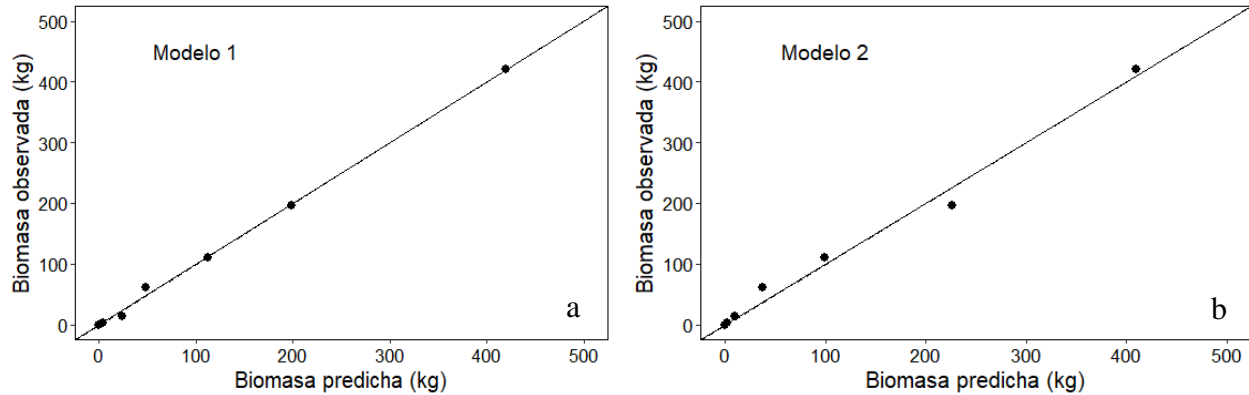


Figura 4. Valores observados y predichos por los modelos 1 (a) y 2 (b) de los árboles muestra de *Pinus patula*.

Nam *et al.* (2016) mencionan que se requiere no sólo de modelos precisos sino también que sean fáciles de usar. Además se prefiere el DAP como variable independiente ya que se considera fácil de medir y genera menor incertidumbre, mientras que en la medición de la HT la precisión es menor y la actividad es difícil (López, 2005). Por su parte, Peichl y Arain, (2007) mencionan que las mediciones del DAP son suficientes para la correcta estimación de biomasa subterránea y aérea. Sin embargo, es importante considerar el grado de error en las estimaciones, si bien el modelo 2 tiene un buen ajuste y es de estructura sencilla al utilizar sólo una variable independiente (DAP), en el modelo 1 al incluir la HT el error relativo promedio en las estimaciones es significativamente menor.

1.5.2. Ecuaciones para la estimación de carbono subterráneo total a nivel árbol

A partir de la concentración de carbono promedio (50.31%) para árbol total de la especie en estudio (Díaz-Franco *et al.*, 2007), se obtuvo el contenido de carbono del componente subterráneo para los árboles muestra (Cuadro 4).

Cuadro 4. Contenido de carbono por componente en los árboles muestra.

Árbol	Componente		
	Subterráneo	Aéreo	Total
1	6.61	42.88	49.49
2	98.81	498.29	597.10
3	0.03	0.20	0.22
4	1.60	8.15	9.75
5	30.75	124.62	155.36
6	56.04	265.80	321.84
7	211.63	786.99	998.63
Promedio	57.92	246.70	304.63

Se realizaron los ajustes de los datos a los mismos modelos utilizados en biomasa subterránea total y las ecuaciones generadas fueron estadísticamente significativas con R^2 ajustadas de 0.9970 y 0.9852 para los modelos 1 y 2 respectivamente. Las RCME fueron de 4.2238 en el modelo 1 y 9.3316 en el modelo 2 y los parámetros estimados se presentan en las ecuaciones 6 y 7.

$$CCs = 0.003743DAP^{2.078029}HT^{0.729454} \quad (6)$$

$$CCs = 0.001164 DAP^{2.988839} \quad (7)$$

Donde CCs, es el contenido de carbono subterráneo de los árboles muestra en kg y DAP es el diámetro a la altura del pecho en cm y HT es la altura total en m de los árboles muestra.

1.5.3. Ecuaciones de biomasa de los componentes subterráneos a nivel árbol

En general, la biomasa de las raíces más abundantes, las raíces primarias gruesas (RPG) y las raíces terciarias finas (RTF) presentan mayor dependencia con respecto al DAP, mientras que las raíces terciarias finas (RTF) presentan mayor dependencia con respecto al DAP, mientras que las raíces primarias finas (RPF) y las raíces secundarias finas (RSF) presentan menor dependencia del DAP. Para los componentes raíces terciarias gruesas (RTG) y raíces terciarias finas (RTF) los modelos fueron significativos, con coeficientes de determinación de 0.99 para el modelo 1. Para el modelo 2, los valores de R^2 fueron en RTG 0.95 y en RTF 0.86.

En el caso de los componentes de raíces finas (RF) y raíces primarias finas (RPF) no fue posible ajustar los datos a un modelo (Cuadro 5). La inexistencia de una correlación entre la biomasa de RF y el DAP o HT, es probable que se deba a que en la cuantificación de RF se incluyó a las RPF y la biomasa de éstas últimas es extremadamente reducida, independientemente del tamaño de los árboles; es probable que la inclusión de mayor cantidad de árboles en el modelo permita hacer el ajuste. En estudios previos se recomienda emplear modelos que sólo utilicen el DAP como variable independiente, puesto que al combinar el DAP y la HT la mejora en el ajuste del modelo es mínima (Mugasha *et al.*, 2013; Liepiņš *et al.*, 2018). Resultados semejantes se observan en el presente estudio, si bien en la mayoría de los casos el modelo 1 presenta R^2 mayores a 0.90 algunos de sus parámetros no son significativos ($p > 0.05$). Es posible que al usar el modelo 2, que sólo utiliza el DAP como variable independiente, sea suficiente para la explicación en las variaciones de las biomásas de los componentes de raíces, excepto para el caso de RSF, el ajuste de la ecuación para este componente, fue posible sólo al emplear las dos variables explicativas, y en los componentes que incluyen raíces terciarias, en estos casos el ajuste fue superior en el modelo que incluye HT.

Cuadro 5. Ecuaciones para la estimación de biomasa subterránea por componente a nivel árbol.

Componente		Modelo	Parámetros estimados	Error estándar	PR > T	RCME	R ² ajustada	
RC	Raíz central (kg)	1	β_0	0.0000600	0.0001	0.6217	6.7292	0.9874
			β_1	3.9811110	0.7807	0.0070		
			β_2	-0.3746600	0.4407	0.4432		
		2	β_0	0.0001830	0.0002	0.4369	6.4758	0.9883
			β_1	3.3859550	0.2970	<.0001		
			β_2	1.3600720	0.5241	0.0603		
RP	Raíces primarias (kg)	1	β_0	0.0042030	0.0055	0.4854	11.9914	0.9666
			β_1	1.4707080	0.5570	0.0575		
			β_2	1.3600720	0.5241	0.0603		
		2	β_0	0.0009930	0.0027	0.7308	18.8390	0.9175
			β_1	2.9842950	0.6913	0.0076		
			β_2	1.3600720	0.5241	0.0603		
RS	Raíces secundarias (kg)	1	β_0	0.0090020	0.0067	0.2522	2.7023	0.9857
			β_1	1.8744000	0.3278	0.0046		
			β_2	0.3563370	0.2838	0.2776		
		2	β_0	0.0077420	0.0066	0.2925	2.9109	0.9834
			β_1	2.2128640	0.2158	0.0002		
			β_2	0.3563370	0.2838	0.2776		
RT	Raíces terciarias (kg)	1	β_0	0.0000043	0.0000031	0.2477	0.2542	0.9984
			β_1	5.1071110	0.2999	<.0001		
			β_2	-1.5935400	0.1549	0.0005		
		2	β_0	0.0001750	0.0003	0.6309	1.3601	0.9552
			β_1	2.8317820	0.4927	0.0022		
			β_2	0.9858700	0.3927	0.0660		
RG	Raíces gruesas (kg)	1	β_0	0.0092690	0.0094	0.3808	13.3907	0.9795
			β_1	1.6827290	0.4441	0.0193		
			β_2	0.9858700	0.3927	0.0660		
		2	β_0	0.0037430	0.0070	0.6156	20.3311	0.9526
			β_1	1.6827290	0.4441	0.0193		

RF	Raíces finas (kg)	1	β_1	2.7443630	0.4712	0.0021		
			β_0	--	--	--	--	--
			β_1	--	--	--		
RPG	Raíces primarias gruesas (kg)	2	β_2	--	--	--		
			β_0	--	--	--	--	--
			β_1	--	--	--		
		1	β_0	0.0041990	0.0055	0.4856	11.9967	0.9665
			β_1	1.4709770	0.5573	0.0576		
RPF	Raíces primarias Finas (kg)	2	β_2	1.3599960	0.5243	0.0604		
			β_0	0.0009920	0.0027	0.7309	18.8409	0.9174
			β_1	2.9844800	0.6915	0.0076		
		1	β_0	--	--	--	--	--
			β_1	--	--	--		
RSG	Raíces secundarias gruesas (kg)	2	β_2	--	--	--		
			β_0	--	--	--	--	--
			β_1	--	--	--		
		1	β_0	0.0079110	0.0067	0.3031	2.9709	0.9829
			β_1	1.9356540	0.3719	0.0065		
RSF	Raíces secundarias finas (kg)	2	β_2	0.3217310	0.3162	0.3665		
			β_0	0.0068580	0.0062	0.3171	3.0321	0.9821
			β_1	2.2429310	0.2284	0.0002		
		1	β_0	0.0008570	0.0015	0.6014	0.0604	0.9606
			β_1	-2.9540300	0.4221	0.0022		
RTG	Raíces terciarias gruesas (kg)	2	β_2	4.9284020	0.8096	0.0037		
			β_0	--	--	--	--	--
			β_1	--	--	--		
		1	β_0	0.0000012	0.0000011	0.3368	0.2543	0.9982
			β_1	--	--	--		

			β_1	5.4687980	0.3705	0.0001		
			β_2	-1.6703400	0.1855	0.0008		
		2	β_0	0.0000920	0.0002	0.6422	1.2386	0.9574
			β_1	2.9746650	0.5092	0.0021		
RTF	Raíces terciarias finas (kg)	1	β_0	0.0009400	0.0004	0.1242	0.0334	0.9947
			β_1	3.2184360	0.2113	0.0001		
			β_2	-1.7539400	0.1595	0.0004		
		2	β_0	0.0013040	0.0025	0.6232	0.1711	0.8607
			β_1	1.6677210	0.4906	0.0193		

1.5.4. Biomasa de raíces individuales

El diámetro basal en las 66 raíces individuales varió de 6.8 a 155 mm, mientras que la longitud de las mismas osciló de 60 a 2173 cm, y se logró medir en solo 64 raíces. A su vez la biomasa total de raíces presentó la mayor variabilidad ($s = 3967.83$ g), seguida por la biomasa de raíces gruesas ($s = 3956.92$ g). Con respecto a la biomasa de raíces primarias finas, sólo cinco de las 66 raíces que se extrajeron presentaron este tipo de raíces, puesto que es un tipo de biomasa poco frecuente en los árboles (Cuadro 6).

Cuadro 6. Principales variables descriptivas de las raíces individuales.

	Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	N
DB	Diámetro basal (mm)	62.70	38.20	6.82	155	66
L	Longitud (cm)	469.49	403.04	60.00	2173	64
BTR	Biomasa total de la raíz (g)	3194.62	3967.83	12.16	18152	66
RP	Biomasa de raíces primarias (g)	2255.63	2786.67	7.30	14769	60
RS	Biomasa de raíces secundarias (g)	931.23	1458.14	3.00	8116	59
RT	Biomasa de raíces terciarias (g)	248.96	453.83	0.20	2468	58
RG	Biomasa de raíces gruesas (g)	3173.84	3956.92	10.31	18090	66
RF	Biomasa de raíces finas (g)	21.10	20.86	0.94	116	65
RPG	Biomasa de raíces primarias gruesas (g)	2255.47	2786.78	7.30	14769	60
RPF	Biomasa de raíces primarias finas (g)	1.87	1.19	0.33	3	5
RSG	Biomasa de raíces secundarias gruesas (g)	926.85	1458.53	2.00	8113	59
RSF	Biomasa de raíces secundarias finas (g)	5.28	4.40	1.00	19	49
RTG	Biomasa de raíces terciarias gruesas (g)	279.57	469.21	0.16	2411	48
RTF	Biomasa de raíces terciarias finas (g)	17.59	19.12343	0.20	110.00	58

Se estimó la biomasa de 66 raíces individuales y de sus componentes. Las ecuaciones que presentaron los mejores ajustes fueron BTR, RP, RS, RG, RPG y RSG, mismas que presentaron coeficientes de determinación mayores a 0.7. Todos los parámetros en las ecuaciones resultaron significativos ($p < 0.05$), con excepción de las ecuaciones para RF, RPF y RSF que en consecuencia presentaron los menores coeficientes de determinación (Cuadro 7).

Cuadro 7. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de raíces individuales.

Componente	Parámetros estimados		Error estándar	PR > T	RCME	R ²
LN (BTR)	β_0	-3.2520609	0.4230	<.0001	0.6418	0.9022
	β_1	2.5733946	0.1059	<.0001		
LN (RP)	β_0	-2.9407724	0.5147	<.0001	0.6699	0.8621
	β_1	2.4100952	0.1266	<.0001		
LN (RS)	β_0	-4.3977971	0.7805	<.0001	1.0153	0.7433
	β_1	2.4689828	0.1922	<.0001		
LN (RT)	β_0	-5.7397948	0.9800	<.0001	1.2069	0.6434
	β_1	2.4113553	0.2399	<.0001		
LN (RG)	β_0	-3.4970811	0.4323	<.0001	0.6559	0.9019
	β_1	2.6262348	0.1083	<.0001		
LN (RF)	β_0	-0.6805378	0.4860	0.1664	0.7368	0.4399
	β_1	0.8573772	0.1219	<.0001		
LN (RPG)	β_0	-2.9620879	0.5158	<.0001	0.6714	0.8620
	β_1	2.4148529	0.1269	<.0001		
LN (RPF)	β_0	2.6875030	0.8520	0.0511	0.3550	0.5839
	β_1	-0.4645310	0.2264	0.1325		
LN (RSG)	β_0	-5.1429965	0.8185	<.0001	1.0646	0.7496
	β_1	2.6321232	0.2015	<.0001		
LN (RSF)	β_0	1.5359927	0.5615	0.0088	0.7051	0.0003
	β_1	0.0169293	0.1398	0.9042		
LN (RTG)	β_0	-9.1809595	1.7626	<.0001	1.4057	0.5581
	β_1	3.1586332	0.4144	<.0001		
LN (RTF)	β_0	-1.7245263	0.5671	0.0036	0.6984	0.5020
	β_1	1.0430508	0.1388	<.0001		

En el caso particular de la raíz central, la correlación fue estadísticamente significativa ($p < 0.05$). Para los componentes BTR, RP, RT, RG, RPG, RSF y RTG, la variación del diámetro basal explica más del 90% de la variabilidad de la biomasa observada en los componentes. En el componente de RSG también existe correlación significativa, no obstante el diámetro basal de la raíz central explica en menor medida la variación de la biomasa. Las ecuaciones que presentaron parámetros no significativos fueron RS, RF y RTF. Para el componente de RPF no fue posible el

ajuste, debido a que la presencia de raíces finas en las raíces centrales es escasa, en especial en las raíces primarias (Cuadro 8).

Cuadro 8. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de la raíz central y sus componentes.

Componente	Parámetros estimados	Error estándar	PR > T	RCME	R ²	
LN (BTR)	β_0	-0.651856797	0.4998	<.0001	0.3509	0.9877
	β_1	2.976972136	0.1483	<.0001		
LN (RP)	β_0	-0.905225219	0.5927	0.2014	0.6699	0.9865
	β_1	2.989887041	0.1744	<.0001		
LN (RS)	β_0	-3.112844304	3.4604	0.4633	0.9197	0.7942
	β_1	2.699742836	0.9718	0.1088		
LN (RT)	β_0	-13.37030745	1.8928	0.0195	0.5031	0.9798
	β_1	5.23915334	0.5316	0.0101		
LN (RG)	β_0	-0.758802979	0.4986	0.2027	0.3469	0.9905
	β_1	2.991232165	0.1467	<.0001		
LN (RF)	β_0	-1.431667319	1.2584	0.3379	0.8462	0.7337
	β_1	1.116571194	0.3883	0.0638		
LN (RPG)	β_0	-0.905225219	0.5927	0.2014	0.4124	0.9866
	β_1	2.989887041	0.1744	<.0001		
LN (RPF)	β_0	--	--	--	--	--
	β_1	--	--	--		
LN (RSG)	β_0	-1.984345510	1.7350	0.3165	1.2072	0.8599
	β_1	2.530332060	0.5106	0.0077		
LN (RSF)	β_0	-2.818389128	0.7673	0.0668	0.2039	0.9314
	β_1	1.122956780	0.2155	0.0349		
LN (RTG)	β_0	-15.08499263	2.1697	0.0061	0.6339	0.9694
	β_1	5.75540138	0.5905	0.0023		
LN (RTF)	β_0	-1.388236953	1.3761	0.3874	0.9253	0.6711
	β_1	1.050756428	0.4247	0.0897		

De manera general, las ecuaciones por componentes a nivel árbol presentaron mejor ajuste que las ecuaciones a nivel de raíz individual. Al parecer la biomasa subterránea tiene alta relación con el DAP; en cambio, la dependencia de la biomasa de una raíz individual con respecto a su diámetro basal, aparentemente es débil, aunque tal correlación puede ser dependiente de la

especie. Ríos-Carrasco y Návar-Cháidez (2010) encontraron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84 para la biomasa de raíces de pino piñonero, en función de su diámetro basal. Es probable que la variación en la biomasa de las raíces individuales de *P. patula* en el presente estudio sea explicada por otros factores como la disponibilidad de agua y nutrientes o la compactación y tipo de suelo.

1.6. Conclusiones

El cociente raíz/parte aérea para árboles de *Pinus patula* osciló entre 0.13 y 0.27, con un valor promedio de 0.20. La proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total de los árboles en promedio fue de 16.7% y ésta incrementa conforme aumenta el DAP. Existe una relación potencial positiva creciente de biomasa subterránea con respecto al DAP. Los datos de biomasa subterránea total a nivel árbol, se ajustaron mejor al modelo 1, que incluye el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) como variables independientes, mientras que en las ecuaciones para estimar la biomasa subterránea de los componentes a nivel árbol al combinar el DAP y la HT la mejora en el ajuste del modelo fue mínima. Las ecuaciones por componentes a nivel árbol presentaron mejor ajuste que las ecuaciones a nivel de raíz individual. La biomasa de las raíces más abundantes, las raíces primarias gruesas (RPG) y las raíces terciarias finas (RTF) presentan mayor dependencia con respecto al DAP, mientras que en las menos frecuentes, las raíces primarias finas (RPF) y las raíces secundarias finas (RSF), la dependencia es menor.

1.7.Literatura citada

- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>
- Agrawal, A., Nepstad, D., & Chhatre, A. (2011). Reducing emissions from deforestation and forest degradation. *Annual Review of Environment and Resources*, 36(1), 373–396. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042009-094508>
- Beets, P. N., Pearce, S. H., Oliver, G. R., & Clinton, P. W. (2007). Root/shoot ratios for deriving below-ground biomass of *Pinus radiata* stands. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 37(2), 267–288.
- Brassard, B. W., Chen, H. Y. H., Bergeron, Y., & Paré, D. (2011). Coarse root biomass allometric equations for *Abies balsamea*, *Picea mariana*, *Pinus banksiana*, and *Populus tremuloides* in the boreal forest of Ontario, Canada. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4189–4196. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.045>
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3)
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Castellanos, J. F., Velázquez, A.M., Vargas J. H., Rodríguez C.F., & Fierros A.G. (1996). Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20, 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

- Cole, T. G., & Ewel, J. J. (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 229(1–3), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.017>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Djomo, A. N., Ibrahima, A., Saborowski, J., & Gravenhorst, G. (2010). Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1873–1885. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.034>
- Fonseca G. W., Alice G, F., & Rey B, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36–47. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006>
- Fonseca, W., Alice, F. E., & Rey-Benayas, J. M. (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197–211. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9>
- Gárate, M., & Blanco, J. A. (2013). Importancia de la caracterización de la biomasa de raíces en la simulación de ecosistemas forestales. *Ecosistemas*, 22(3), 66–73.
- Grier C. C., Vogt K. A., Keyes M. R., & Edmonds R. L. (1981). Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*. 11, 155–167. <https://doi.org/10.1139/x81-021>
- Henry, M., Bombelli, A., Trotta, C., Alessandrini, A., Birigazzi, L., Sola, G., Vieilledent, G., Santenoise, P., Longuetaud, F., Valentini, R., Picard, N., & Saint-André, L. (2013). GlobAllomeTree: International platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest*, 6, 326–330. <https://doi.org/10.3832/ifor0901-006>

- Kenina, L., Bardulis, A., Matisons, R., Kapostins, R., & Jansons, A. (2018). Belowground biomass models for young oligotrophic scots pine stands in Latvia. *IForest*, 11(2), 206–211. <https://doi.org/10.3832/ifor2553-010>
- Koala, J., Sawadogo, L., Savadogo, P., & Aynekulu, E. (2017). Allometric equations for below-ground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands, *Silva Fennica*, 51(3), 1–15. <https://doi.org/10.14214/sf.1631>
- Laclau, P. (2003). Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantations. *Forest Ecology and Management*, 173(2003), 353–360. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00012-9)
- Liepiņš, J., Lazdiņš, A., & Liepiņš, K. (2018). Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(1), 58–70. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923>
- Litton, C. M., Ryan, M. G., Tinker, D. B., & Knight, D. H. (2003). Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(2), 351–363. <https://doi.org/10.1139/x02-181>
- López, M. (2005). Un procedimiento alternativo al tradicional para la medición de alturas con clinómetro. *Madera y Bosques*, 11, 69–77. http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumenes/11.2/5.nota_tecnica.Lopez.2005.pdf
- Magnani, F., Mencuccini, M., & Grace, J. (2000). Age-related decline in stand productivity: The role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant, Cell and Environment*, 23(3), 251–263. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00537.x>
- Martínez Santiago, D., Solís Gonzales, Santiago Hernández, F. J., & Graciano Luna, J. de J. (2016). Ecuaciones para estimar biomasa aérea y subterránea en áreas reforestadas de *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Foresta Veracruzana*, 18(1), 25–32.
- Mugasha, W. A., Eid, T., Bollandasås, O. M., Malimbwi, R. E., Chamshama, S. A. O., Zahabu, E., & Katani, J. Z. (2013). Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310, 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.003>

- Nam, V. T., Van Kuijk, M., & Anten, N. P. R. (2016). Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam. *PLOS ONE*, 11(6), 6–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156827>
- Návar, J. (2015). Root stock biomass and productivity assessments of reforested pine stands in northern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 338, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.020>
- Peichl, M., & Arain, M. A. (2007). Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, 253(1–3), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.07.003>
- Perry, J. P. (1991). *Los pinos de México y América Central*. Timber Press, Portland.
- Razakamanarivo, R. H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M. A., Vieilledent, G., & Albrecht, A. (2012). Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020>
- Ríos-Carrasco, E., & Návar-Cháidez, J. de J. (2010). Root allometry of two subtropical plant communities of northeastern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(1), 123–134.
- Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., & Da Silva, F. (2011). Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 6, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-6>
- Sanquetta, C.R., Watzlawick, L.F., Arce, J.E., & de Mello, A. A. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de *Araucaria angustifolia* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 1-11.
- SAS Institute Inc. (2011). *SAS/STAT® 9.3. User's Guide*. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- Schumacher, F. X., & Hall, F. D. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719–734.
- Tashi, S., Keitel, C., Singh, B., & Adams, M. (2017). Allometric equations for biomass and carbon stocks of forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas. *Forestry*, 90(3), 445–454. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx003>

- Ter-Mikaelian, M. T., & Korzukhin, M. D. (1997). Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97(1), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00019-4)
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., & Uri, V. (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management*, 302, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.033>
- Vela, G. L. (1980). Contribución a la ecología de *Pinus patula* Schl. et Cham. Publicación especial No. 19. INIF/SARH. México.
- Waring, B. G., & Powers, J. S. (2017). Overlooking what is underground: Root:shoot ratios and coarse root allometric equations for tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 385, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.007>
- Yuen, J. Q., Fung, T., & Ziegler, A. D. (2016). Review of allometric equations for major land covers in SE Asia: Uncertainty and implications for above- and below-ground carbon estimates. *Forest Ecology and Management*, 360, 323–340. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.016>
- Zapata-Cuartas, M., Sierra, C. A., & Alleman, L. (2012). Probability distribution of allometric coefficients and Bayesian estimation of aboveground tree biomass. *Forest Ecology and Management*, 277, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.030>

CAPITULO 2. Relaciones alométricas y efectos de la fertilidad del suelo sobre la biomasa subterránea en *Pinus patula*

2.1. RESUMEN

Las estimaciones precisas de biomasa aérea y subterránea son importantes para predecir la captura de carbono y entender la distribución de biomasa en los ecosistemas forestales. Para evaluar relaciones alométricas entre biomasa aérea y subterránea, determinar proporciones relativas de sus componentes y analizar relaciones entre la biomasa subterránea y la fertilidad del suelo, se realizaron análisis de correlación y regresión lineal entre componentes. Para ello, en diversos sitios localizados en el área de distribución natural de *Pinus patula*, se seleccionaron y derribaron siete árboles, en los cuales previamente se midió el diámetro a la altura del pecho, altura total, diámetro de copa y se extrajo la totalidad de raíces finas y gruesas. La biomasa aérea se cuantificó por censo, muestreo o por alometría. Se encontraron asociaciones significativas entre los componentes subterráneos y aéreos, con coeficientes de correlación de Pearson que variaron de 0.65 a 0.99. La variación en la biomasa de los componentes aéreos explicó entre 85 y 98% de la variabilidad de los componentes subterráneos de diferente orden. La proporción de la biomasa de fuste y raíces gruesas incrementó con el tamaño del árbol, mientras que la de biomasa de ramas, follaje y raíces finas disminuyó. Las correlaciones entre las biomasa de raíces y variables del suelo no fueron estadísticamente significativas. Los resultados en este estudio facilitan las determinaciones de biomasa de los componentes subterráneos a partir de los componentes aéreos y aportan información sobre la asignación de biomasa en el árbol, así como sobre la relevancia morfofisiológica de la alometría.

Palabras claves: *Alometría, distribución de biomasa, raíces finas, raíces gruesas, regresión lineal.*

2.2. ABSTRACT

Precise estimates of above- and belowground biomass provide important information to predict carbon capture and understand biomass distribution patterns in forest ecosystems. In order to evaluate allometric relationships between above- and belowground biomass, to determine relative proportions of its components, and to analyze relationships between root biomass and soil fertility, correlation analyses and linear regressions between components were done. In order to do this, seven trees were selected and their diameter at breast height (DAP), total height (HT) and crown diameter (DC) were measured. Subsequently, the trees were felled and fine and coarse roots were extracted. Aboveground biomass was determined by census, sampling or allometry. Significant associations were found between below- and aboveground components, with Pearson correlation coefficients varying from 0.65 to 0.99. The variation of biomass of the aboveground tree components explained between 85 and 98% of the variability of the several-order roots. We found that the proportion of stem biomass and coarse roots increased with increasing tree size, while branch, foliage and fine root biomass decreased. Correlations between root biomass and soil variables were not statistically significant. The results in this study allow the determination of biomass of the belowground components from the biomass of the aboveground components, and provide information on the allocation of biomass within the tree, as well as on the relevance of morphophysiological allometry.

Key words: *Allometry, biomass distribution, fine roots, coarse roots, linear regression.*

2.3. Introducción

Las estimaciones precisas de biomasa aérea (BA) y biomasa subterránea (BS) son importantes para predecir la captura de carbono en diferentes especies, condiciones (He *et al.*, 2018; Sinacore *et al.*, 2017) y escalas geográficas (Koala *et al.*, 2017). Además, son necesarias para la comprensión de la distribución de la biomasa en los ecosistemas (Yang *et al.*, 2010).

La BS es un componente significativo de la biomasa forestal (Laclau, 2003; Magalhães, 2015) y desempeña un papel fundamental en el ciclo global del carbono (Wang *et al.*, 2014). Sin embargo, en las estimaciones de biomasa algunas veces no se considera, debido a que es difícil de medir (Laclau, 2003). Existe la necesidad de estudiar las relaciones entre el crecimiento y los componentes de la biomasa (Gower *et al.*, 1999), puesto que la información que relacione la estructura y la función de la BA con la estructura y la función de la BS es limitada (O' Grady *et al.*, 2006). Además, es necesario investigar sobre la asignación de biomasa y crecimiento de los árboles como respuesta al tipo de suelo en diferentes ecosistemas (Wang *et al.*, 2014; Johansson, 2007). Por ejemplo, se cree que en suelos fértiles existe una menor proporción de biomasa de raíces, en particular, biomasa de raíces finas (Finér *et al.*, 2007; Quinto *et al.*, 2016).

La teoría básica de las relaciones alométricas es que en muchos organismos, la tasa de crecimiento de una parte del organismo es proporcional a la de otra (Komiyama *et al.*, 2008). Es posible entonces conocer la distribución de la asignación de BS a partir de su análoga la BA (Cairns *et al.*, 1997). Así como el grado de asociación entre los diferentes componentes de la biomasa forestal.

Por los motivos anteriormente expuestos, los objetivos de este estudio fueron, evaluar relaciones alométricas entre la BA y BS y determinar la proporción relativa de sus componentes. Además,

analizar relaciones entre la biomasa subterránea y fertilidad del suelo en *P. patula*, especie de importancia ecológica y económica.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en los municipios de Huayacocotla en Veracruz, Acaxochitlán y Zacualtipán en Hidalgo y Chignahuapan y Zacatlán en Puebla, entre las coordenadas 19°46'05.0"-20°37' 8.7" latitud norte y 98°00'21.9"-98°36'29.3" longitud oeste. La altitud de los sitios de muestreo fluctuó de 2055 a 2600 m (Cuadro 9). De acuerdo con Vela (1980) en el área de distribución de *P. patula* las temperaturas más bajas se alcanzan en diciembre en algunos sitios y en otros en enero, mientras que los valores más altos se presentan en el mes de mayo. El promedio de las temperaturas mínimas varían entre 0.9 °C y 7.9 °C en los meses más fríos y máximas 20.3 °C y 27.2 °C en el mes más caliente. Los sitios en donde la especie se desarrolla son húmedos y bien drenados con precipitaciones anuales de entre 1000 - 1500 mm, crece en rodales puros y en asociación con *P. greggii*, *P. maximinoi*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *P. patula* var. *longepedunculata*, *Abies religiosa*, *P. montezumae*, *P. ayacahuite* var. *veitchii* y *Quercus spp.* (Perry, 1991). Los suelos son de moderadamente profundos a muy profundos, en cuanto a textura son francos y migajones en la parte superficial y arcillosa en las partes más profundas (Vela, 1980).

Cuadro 9. Ubicación de los sitios de estudio.

Sitio	Localidad	Coordenadas	Altitud (m)
1	Huayacocotla, Veracruz	20° 27' 20.6" N, 98° 29' 01.9" W	2467
2	Huayacocotla, Veracruz	20° 27' 21.9" N, 98° 29' 2.46" W	2463
3	Chignahuapan, Puebla	19° 46' 05.0" N, 98° 00' 21.9" W	2548
4	Acaxochitlán, Hidalgo	20° 08' 31.5" N, 98° 09' 08.0" W	2156
5	Chignahuapan, Puebla	19° 57' 38.1" N, 98° 06' 20.1" W	2600
6	Zacatlán, Puebla	19° 57' 58.2" N, 98° 06' 22.4" W	2580
7	Zacualtipán, Hidalgo	20° 37' 08.7" N, 98° 36' 29.3" W	2055

2.4.2. Muestreo de árboles

El muestreo se realizó de junio de 2016 a septiembre de 2017. Se seleccionaron siete árboles de *P. patula* de diferentes dimensiones, que incluyeron categorías diamétricas entre 1.5 y 57.0 cm. El muestreo fue destructivo y consistió en extraer las raíces de árboles sanos, con fuste recto (no bifurcados), sociológicamente ubicados en la categoría de árboles no suprimidos, distribuidos estratégicamente para tratar de representar la mayor parte del macizo principal, del área de distribución natural de la especie.

2.4.3. Variables evaluadas

2.4.3.1. Variables dasométricas

Las variables que se midieron en cada uno de los árboles en pie fueron: en cm el diámetro a la altura del pecho (DAP), se midió a 1.3 m de altura, con cinta diamétrica; en m se midió el diámetro de copa (DC) y la altura total (HT) con la ayuda de un flexómetro; esta última, una vez derribado el árbol. En el caso de las raíces individuales, en mm se midió su diámetro basal (DB), con cinta diamétrica en raíces grandes o vernier digital en raíces pequeñas y conjuntamente, se determinó su longitud con flexómetro.

2.4.3.2. Obtención de biomasa subterránea

La biomasa de raíces gruesas ($DB > 2 \text{ mm}$) y finas ($DB < 2 \text{ mm}$), se determinó en todos los árboles, mediante censo. Se extrajo la totalidad de raíces con herramientas convencionales como pico, pala, barreta y herramientas de jardinería. En laboratorio, las raíces a nivel árbol, las raíces centrales e individuales, se clasificaron como primarias, secundarias y terciarias o de mayor grado. A su vez, estos grupos de raíces se reclasificaron en gruesas y finas. Las raíces clasificadas se cortaron en trozos pequeños, se colocaron en bolsas de papel kraft perfectamente etiquetadas y se secaron en una estufa de circulación forzada Sheldon modelo 1675-S®) a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta obtener su peso constante, peso seco o biomasa, con la ayuda de una balanza marca OHAUS con capacidad de 2 kg y precisión de 1 g. El mencionado proceso de clasificación y secado permitió obtener la biomasa de cada uno de los siguientes componentes de las raíces 1) raíz central o principal, que es la raíz que emerge del tejido hipocótilo del tallo y de la cual emergen las raíces laterales, 2) raíces primarias, 3) raíces secundarias, 4) raíces terciarias, 5) raíces gruesas, 6) raíces finas, 7) raíces primarias gruesas, 8) raíces primarias finas, 9) raíces secundarias gruesas, 10) raíces secundarias finas, 11) raíces terciarias gruesas y 12) raíces terciarias finas.

2.4.3.3. Estimación de biomasa aérea

La biomasa de fuste, ramas y follaje en los siete árboles muestreados, se determinó de acuerdo al tamaño del árbol, con la finalidad de optimizar costos y tiempo. Mediante censo en los árboles pequeños ($DAP < 10 \text{ cm}$), al secar todo el material hasta obtener su peso constante. En el caso del árbol de 16.4 cm de DAP, la biomasa aérea se determinó sumando las biomásas de sus componentes (fuste, ramas y follaje), mismas que se estimaron mediante un muestreo de la masa húmeda total, en cada uno de ellos para obtener el contenido de humedad. El contenido de

humedad de cada unidad de muestreo se obtuvo mediante la ecuación 8. El peso seco de cada compartimiento aéreo se obtuvo mediante la ecuación 9.

$$CH \text{ MUESTRA} = (PH - PS) \times 100 / PH \quad (8)$$

$$PS \text{ CPMTO} = PH \text{ CPMTO} \times (100 - CH \text{ PROM}) / 100 \quad (9)$$

Donde CH MUESTRA, es el contenido de humedad de la muestra en %; PH, es el peso húmedo de la muestra en kg; PS, es el peso seco de la muestra en kg; PS CPMTO, es el peso seco del compartimiento del árbol en kg; PH CPMTO, es el peso húmedo del compartimiento del árbol en kg y CH PROM, es el contenido de humedad promedio de varias unidades de muestreo del compartimiento en %.

En los árboles con DAP de 25.5, 35.5, 46.5 y 57 cm se estimó la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas registradas por Castellanos *et al.* (1996) para *Pinus patula*.

2.4.3.4. Análisis de suelo

En el mes de noviembre de 2017, se obtuvieron tres muestras de suelo en los puntos cardinales y distancias aleatorias tomadas a partir del centro de cada uno de los siete árboles muestra. Las muestras de suelo se recolectaron retirando la capa de hojarasca del piso, cavando una cepa de 30 cm de profundidad y obteniendo una muestra de suelo representativa de los 30 cm superiores del perfil del suelo. Con las tres muestras correspondientes a cada árbol se conformó una muestra compuesta, la cual se envió al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados para su análisis químico. En el laboratorio se determinó el nitrógeno total (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn), además el pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El N se determinó por el método Kjeldahl, el P se extrajo por el método Bray; el K, Ca y Mg se obtuvieron por el método de saturación con acetato de amonio

1N pH7 y los micronutrientos se extrajeron con la solución DTPA 0.005M-TEA 0.1M-caCl₂ 0.01M (Soil and Plant Analysis Council, 2000).

El pH se determinó con medidor de pH, a partir de una pasta 1:2 (suelo: agua); la CE se determinó mediante un puente de conductividad; el contenido de materia orgánica se determinó por el método Walkley y Black (Rodríguez y Rodríguez, 2011) y la CIC se obtuvo por el método de saturación con acetato de amonio (AS-12; SEMARNAT, 2002).

2.4.3.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el software estadístico SAS/ETS® (SAS Institute, Inc., 2011). Se evaluó la relación entre las variables del componente subterráneo y aéreo, mediante el coeficiente de correlación de Pearson, posterior a ello se realizó un análisis de regresión lineal mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios, donde se evaluaron las relaciones entre la biomasa total, la biomasa subterránea y la biomasa aérea. Además se generaron ecuaciones que predicen la biomasa de componentes subterráneos de diferente orden a partir de componentes aéreos. Se consideraron las ecuaciones con parámetros significativos ($p < 0.01$). También se realizó un análisis de correlación para biomasa de raíces finas y gruesas con algunas variables de suelos. Los criterios estadísticos para evaluar la bondad de ajuste de los modelos fueron el coeficiente de determinación (R^2) y coeficiente de determinación ajustado (R^2 Adj) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME).

2.5. Resultados

El DAP de los árboles muestra fluctuó de 1.51 a 57 cm. La HT y DC en promedio fueron de 17.78 m y 4.99 respectivamente. La biomasa promedio en los componentes aéreos osciló de 9.45 a 436.31 kg, mientras que en los componentes subterráneos varió desde 0.01 hasta 71.92 kg. Sólo 4 árboles presentaron RPF y el árbol de diámetro menor no presentó RTG (Cuadro 10).

Cuadro 10. Estadísticas descriptivas para las variables DAP, HT, DC, R y biomاسas de los componentes aéreos y subterráneos para árboles de *Pinus patula*.

	Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	N
DAP	Diámetro a la altura del pecho (cm)	27.37	20.20	1.51	57.00	7
HT	Altura total (m)	17.78	9.55	2.50	32.48	7
BT	Biomasa total (kg)	605.50	741.27	0.44	1984.95	
BS	Biomasa subterránea (kg)	115.13	152.24	0.05	420.66	7
BA	Biomasa aérea (kg)	490.37	590.58	0.39	1564.28	7
FU	Biomasa de fuste (kg)	436.31	525.66	0.18	1393.05	7
RA	Biomasa de ramas (kg)	44.60	54.93	0.07	144.74	7
FO	Biomasa de follaje	9.45	10.08	0.14	26.50	7
RC	Biomasa de raíz central (kg)	42.62	59.84	0.03	160.56	7
RG	Biomasa de raíces gruesas (kg)	71.92	93.42	0.01	259.05	7
RF	Biomasa de raíces finas (kg)	0.59	0.46	0.01	1.15	7
RP	Biomasa de raíces primarias (kg)	49.06	65.57	0.02	183.38	7
RS	Biomasa de raíces secundarias (kg)	19.02	22.60	0.01	61.15	7
RT	Biomasa de raíces terciarias (kg)	4.45	6.43	0.001	15.58	7
RPG	Biomasa de raíces primarias gruesas (kg)	49.05	65.58	0.01	183.38	7
RPF	Biomasa de raíces primarias finas (kg)	0.01	0.001	0.001	0.01	4
RSG	Biomasa de raíces secundarias gruesas (kg)	18.82	22.69	0.0004	61.04	7
RSF	Biomasa de raíces secundarias finas (kg)	0.19	0.30	0.005	0.88	7
RTG	Biomasa de raíces terciarias gruesas (kg)	4.73	6.28	0.001	14.64	6
RTF	Biomasa de raíces terciarias finas (kg)	0.40	0.46	0.001	1.10	7

2.5.1. Relaciones entre las biomasa de los componentes del árbol

La correlación entre la biomasa de los componentes subterráneos y aéreos de los árboles fue estadísticamente significativa en la mayoría de los casos con un nivel de confiabilidad alto ($\alpha < 0.001$), con coeficientes de correlación de Pearson que variaron de 0.65 a 0.99. Existen correlaciones más estrechas entre las variables del componente aéreo, así como entre éstas y las

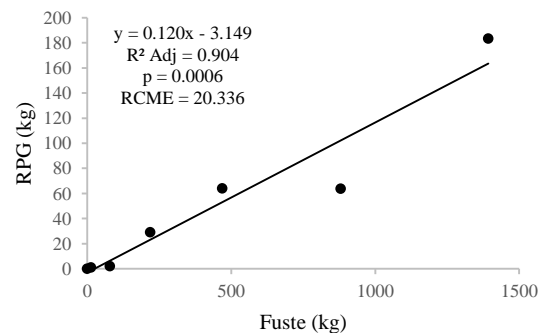
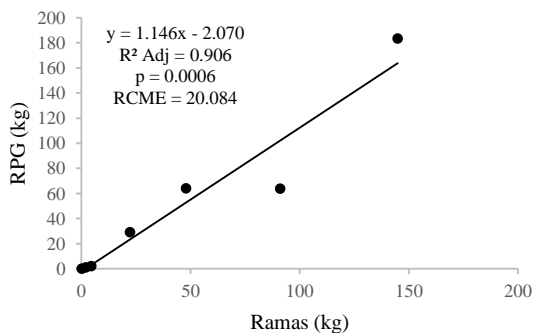
biomasas de RC y RG, mientras que las RF tienen una menor correlación con los componentes aéreos y subterráneos, en particular con RG (Cuadro 11).

Cuadro 11. Matriz de correlación de Pearson entre biomasas de raíces finas, raíces gruesas, follaje, ramas y fuste.

Variable	RF (kg)	RG (kg)	RC (kg)	FO (kg)	RA (kg)	FU (kg)
RF (kg)	1	0.652 ^{NS}	0.722*	0.745*	0.737*	0.752*
RG (kg)		1	0.964***	0.966***	0.978***	0.977***
RC (kg)			1	0.954***	0.980***	0.980***
FO (kg)				1	0.993***	0.993***
RA (kg)					1	0.999***
FU (kg)						1

Correlaciones estadísticamente significativas *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ y ^{NS}No significativo.

Los componentes aéreos explican entre 82 y 98% de la variabilidad de la biomasa de los componentes subterráneos de diferente orden. Se encontraron correlaciones lineales altamente significativas ($p < 0.001$) de la biomasa de RSG y RPG con respecto a la biomasa de ramas y fuste. La dependencia de la biomasa de RTF con respecto a la biomasa de ramas y follaje fue menor, con valores de R^2 Adj de 0.82 y 0.87 respectivamente ($p < 0.01$; Figura 5).



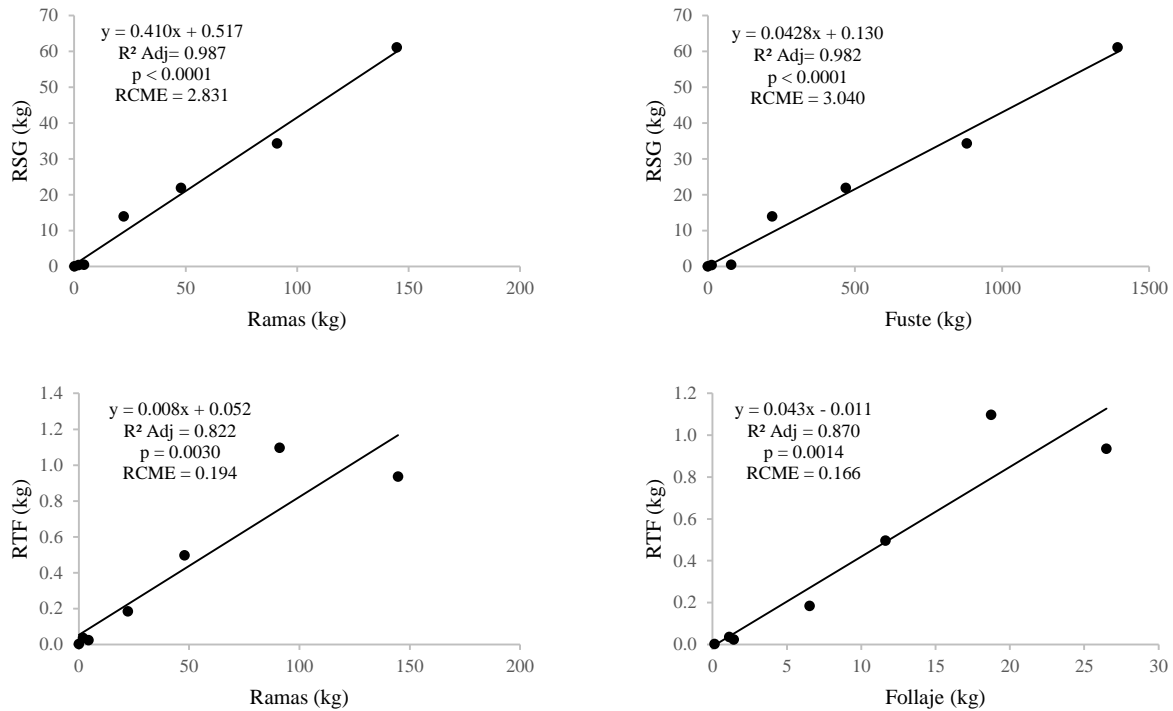


Figura 5. Regresión lineal entre la biomasa de raíces primarias gruesas, raíces secundarias gruesas y raíces terciarias finas en función de la biomasa de ramas, fuste y follaje de *Pinus patula*.

Las relaciones entre biomasa subterránea, aérea y total fueron estadísticamente significativas ($p < 0.0001$). Las biomazas total y aérea presentaron la mayor R^2 Adj con un valor de 0.998; lo mismo ocurrió para la biomasa total y la biomasa subterránea con una R^2 Adj de 0.981, mientras que la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea fue menor con una R^2 Adj de 0.969 (Figura 6).

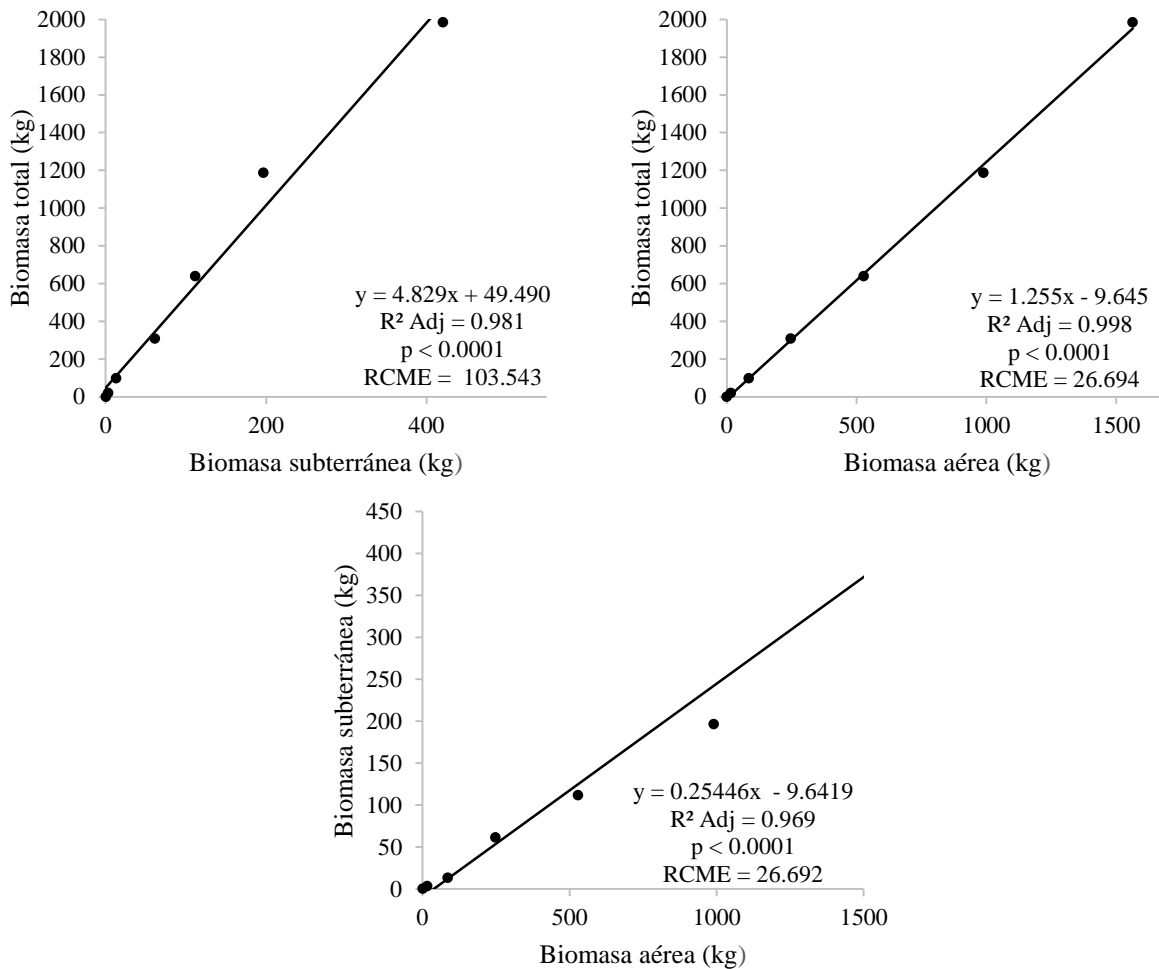


Figura 6. Relación entre biomasa total, biomasa subterránea y biomasa aérea de *Pinus patula*.

2.5.2. Proporciones de biomasa

Las proporciones de las biomásas de fuste y raíces gruesas con respecto a la biomasa total, tienden a incrementar al aumentar el tamaño del árbol, contrariamente a lo que ocurre con la biomasa de ramas, follaje y raíces finas, mismas que disminuyen (Figura 7). En la proporción de biomasa de la raíz central no se observa un comportamiento claro al aumentar el DAP. El árbol con DAP de 16.4 cm presentó la mayor proporción de biomasa de fuste y de raíz central. Las proporciones promedio de biomasa de los componentes en los árboles muestra fueron: la mayor en el fuste con 68.14%, en las ramas de 8.50%, en follaje de 6.68%, en raíces gruesas de 8.89%, en raíz central de 7.07% y la menor en raíces finas de 0.73%.

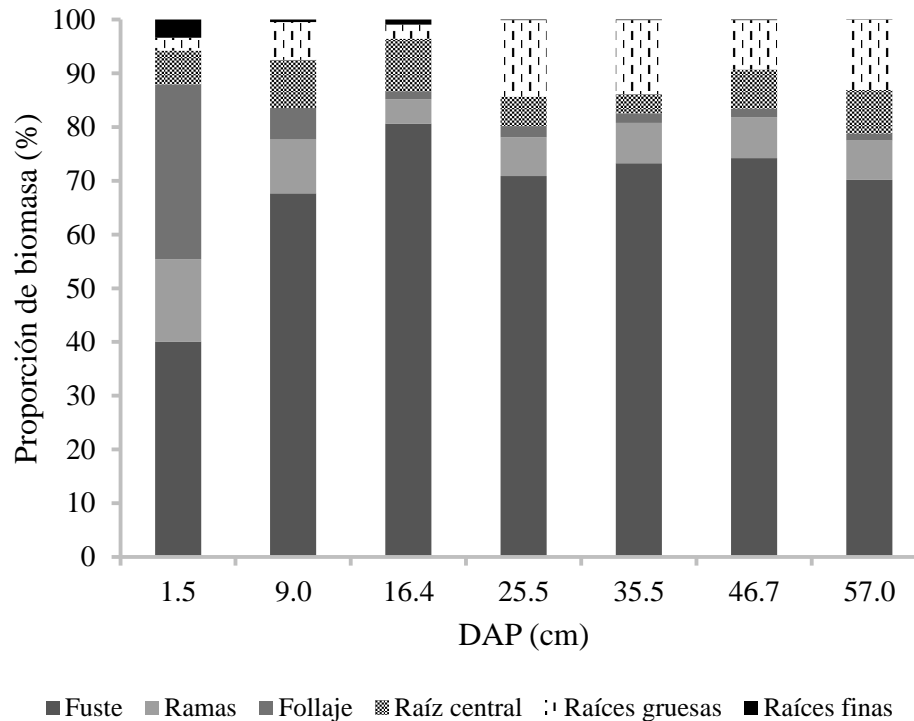


Figura 7. Proporciones relativas de biomasa de los componentes subterráneos y aéreos en los árboles muestra de *Pinus patula*.

El cociente biomasa de otros componentes / biomasa de RF incrementa a medida que aumenta el tamaño del árbol, es decir conforme aumenta el tamaño del árbol la biomasa de raíces finas disminuye respecto al resto de los componentes, mientras que la biomasa de los otros componentes presenta una mayor proporción de la biomasa total del árbol. Lo contrario ocurre con el cociente de los mismos componentes, con respecto a la biomasa de RG, aumenta su proporción conforme el árbol aumenta su tamaño (Figura 8). La tendencia se aprecia principalmente en los componentes aéreos. El comportamiento del árbol con DAP de 16.4 cm difiere notoriamente del resto de los árboles (Figura 8).

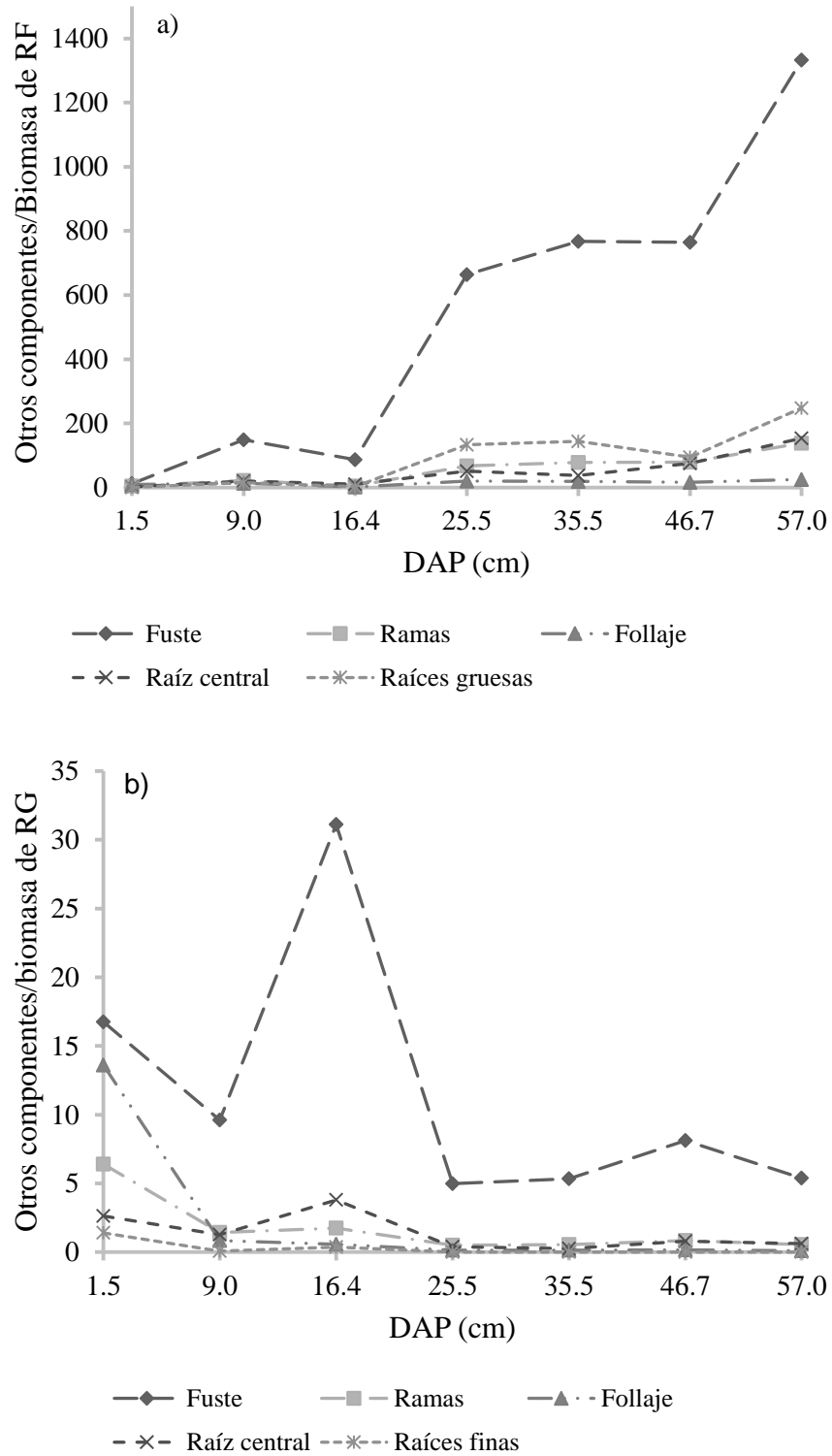


Figura 8. Proporción de biomasa de varios componentes de árboles de *Pinus patula* con respecto a RF (a) y RG (b).

2.5.3. Relación entre biomasa de raíces y fertilidad del suelo

Los suelos en los sitios fueron ácidos con valores de pH entre 3.57 y 4.84. La conductividad eléctrica (CE), osciló entre 0.35 y 0.74. Los porcentajes de materia orgánica y N fueron más bajos en los sitios 3, 4, 5 y 6. Los contenidos de P también fueron bajos (Cuadro 12).

Cuadro 12. Propiedades químicas del suelo de los sitios de muestreo.

	Sitio						
	1	2	3	4	5	6	7
pH	4.15	3.78	4.84	3.87	3.97	4.64	3.57
Conductividad Eléctrica (ds/m)	0.35	0.48	0.61	0.17	0.32	0.55	0.74
Materia Orgánica (%)	18.27	18.58	3.05	3.05	3.05	3.05	21.32
N (%)	0.47	0.16	0.02	0.00	0.01	0.01	0.08
P (ppm)	1.58	1.58	6.84	0.53	8.42	5.26	0.53
K (meq/100 g)	0.02	0.21	0.61	0.12	0.03	0.12	0.10
Ca (meq/100 g)	5.40	5.30	9.45	2.40	4.10	5.20	3.90
Mg (meq/100 g)	0.90	2.50	5.05	3.90	3.00	3.50	1.40
Fe (ppm)	17.92	31.11	8.45	2.23	14.04	19.30	36.50
Cu (ppm)	0.36	0.49	0.83	0.01	0.26	0.35	0.16
Zn (ppm)	0.31	1.15	0.64	0.56	0.21	0.46	0.46
Mn (ppm)	7.19	14.00	10.25	0.95	30.24	33.13	1.27
CIC (meq/100 g)	28.16	35.20	22.56	26.08	11.84	13.92	33.28

El análisis de correlación de Pearson realizado para biomasa de RF, RG, BS y las variables del suelo pH, CE y CIC, indicaron correlaciones no significativas ($p > 0.05$). Las variables RF, RG y BS presentaron una asociación negativa con el pH y K, mientras que en CE y CIC la asociación fue positiva en los tres casos. El coeficiente de correlación fue negativo para RG y BS con relación al N total y para RF y RG con respecto al P (Cuadro 13).

Cuadro 13. Correlación de Pearson entre biomasa de RF, RG y BS con variables de los suelos de los sitios de muestreo.

Variable	pH	CE (dS/m)	CIC (kg)	N	P	K
RF (kg)	-0.526	0.374	0.587	0.553	-0.527	-0.459
RG (kg)	-0.534	0.698	0.396	-0.140	-0.347	-0.234
BS (kg)	-0.584	0.683	0.482	-0.086	0.401	-0.221

2.6. Discusión

En árboles jóvenes se han realizado estudios sobre las relaciones entre los componentes aéreos y subterráneos (Adegbidhi *et al.*, 2002; Johansson, 2007; O’Grady *et al.*, 2006; Xiao y Ceulemans, 2004), sin embargo en árboles adultos son escasos debido a las dificultades que el trabajo de campo conlleva. Si bien en este estudio la muestra fue limitada, en él se consideraron categorías diamétricas entre 1.5 y 57.0 cm, que incluyen arboles jóvenes y adultos.

2.6.1. Relaciones entre biomasa subterránea y biomasa aérea

Los resultados obtenidos demuestran que existen correlaciones significativas entre los diferentes componentes subterráneos y aéreos del árbol. En particular la relación entre biomasa de raíces terciarias finas y follaje, si bien no fue la más alta, fue significativa, con R^2 Adj de 0.87. Se han encontrado relaciones lineales significativas entre estos dos componentes por parte de Zhou *et al.*, (2018) en diferentes especies, Jia *et al.*, (2015) en *Pinus tabuliformis* y O’Grady *et al.*, (2006) en *Eucalyptus globulus* (Labill.). Éstos componentes funcionan como medios importantes para la absorción e intercambio de recursos, por lo que el crecimiento y desarrollo de las raíces finas se ven afectados por la actividad y la cantidad de follaje y viceversa, lo que finalmente conduce al equilibrio estructural y funcional (Zhou *et al.*, 2018). Desde un punto de vista de eficiencia de las raíces finas, al aumentar las dimensiones de los árboles disminuye la eficiencia funcional de las raíces finas, puesto que se requiere de una mayor cantidad de éstas por unidad de masa de follaje.

Entre la biomasa subterránea, la biomasa aérea y la biomasa total se encontraron fuertes correlaciones. Sinacore *et al.*, (2017) concluyeron que es posible predecir la biomasa total a partir de la biomasa aérea y reportaron resultados similares a los de este estudio. En estudios previos también se reportan relaciones lineales significativas entre biomasa aérea y biomasa subterránea para diferentes especies (Wang *et al.*, 2014; He *et al.*, 2018) y por grupos de edad (Hui *et al.*, 2014). En general, la biomasa de la raíz está significativamente asociada con la biomasa aérea y la relación probablemente depende del tamaño y la densidad del arbolado (Jia *et al.*, 2015).

2.6.2. Proporción de biomasa

En los árboles muestra se observó que el fuste presenta la mayor proporción de biomasa respecto a la biomasa total (Figura 7). Como en otros estudios (He *et al.*, 2018; Soriano-Luna *et al.*, 2015; Xiao y Ceulemans, 2004), este componente de los árboles representó, en promedio, 68.14% de la biomasa total. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Soriano-Luna *et al.* (2015), quienes al estudiar la partición de biomasa aérea en *Pinus Patula*, reportaron una proporción promedio de 68.2% para la especie en estudio, y detectaron también la tendencia de la proporción en la biomasa de fuste a incrementar y en la de follaje y ramas a disminuir, al aumentar el DAP.

Vanninen *et al.*, (1996) encontraron resultados análogos a los del presente estudio en *Pinus sylvestris* L.; es decir, una disminución de la cantidad relativa de follaje y ramas, y también la de raíces finas con la edad y por ende con el tamaño del árbol. O'Grady *et al.*, (2006) mencionan que con el tiempo la biomasa de raíces finas se convierte en el componente proporcionalmente más pequeño de la biomasa total. Valores contrastantes reportan Xiao y Ceulemans (2004) para la misma especie (*Pinus sylvestris*). Estos autores encontraron menor proporción en biomasa de

fuste (33.9%) y mayor en biomasa de follaje (22%). Se cree que la razón principal de estas diferencias es el tamaño de los árboles, mismo que difiere del tamaño de los árboles considerados en el presente estudio.

El cociente biomasa de diferentes componentes del árbol / biomasa de RF, muestra que con el aumento de las dimensiones de los árboles, la biomasa de los componentes aéreos principalmente, aumenta respecto a la biomasa de RF, mientras que respecto a la biomasa de RG decrece. Resh *et al.* (2003) encontraron resultados similares, en donde la relación de RG / biomasa aérea disminuye con el tamaño del árbol, es decir la biomasa de RG aumenta.

Se cree que las raíces finas, cuya principal función es la absorción de agua y nutrientes, se tornan más eficientes para abastecer de estos recursos al resto de los componentes del árbol (fuste, follaje, ramas, raíz central y raíces gruesas), contrariamente a lo que ocurre con las raíces gruesas. A su vez, esto significa que son las raíces gruesas las que incrementan en biomasa respecto a los componentes aéreos con las dimensiones de los árboles. El aumento de la proporción de raíces gruesas con el tamaño de los árboles garantiza la estabilidad y el anclaje de los árboles, siendo estas de las funciones más importantes de las raíces gruesas (Resh *et al.*, 2003).

Los cambios de la distribución de biomasa y flujos de carbono de los componentes en los ecosistemas forestales, en las diferentes etapas de desarrollo, se deben considerar para lograr reducir las incertidumbres de cuantificación de biomasa y captura de carbono (Cao *et al.*, 2012; Peichl y Arain, 2007). La Figura 7 indica que, en el caso de *Pinus patula*, la alometría cambia con el tamaño de los árboles y probablemente con otras características del sitio, como lo señala el estudio de Li *et al.*, (2014).

2.6.3. Relaciones entre biomasa de raíces y fertilidad del suelo

Las correlaciones entre las biomásas de RF, RG y BS y las variables del suelo, no fueron significativas, al parecer las variaciones en biomásas de raíces están dadas en función de otros factores. Si bien los diferentes tipos de suelo, influyen de manera directa en la proporción de biomasa de raíces gruesas y finas, en este estudio no se encontró relación alguna. En estudios de otros autores se obtuvieron resultados que concuerdan con los encontrados en éste. Quinto *et al.* (2015) atribuyen la ausencia de relación entre raíces finas y fertilidad del suelo, a la baja variabilidad de la fertilidad en los suelos estudiados. Finér *et al.*, (2007) en árboles europeos, no encontraron relación entre biomasa de raíces finas y acidez del suelo y consideran que influyen las fuentes de error que existen en la estimación de biomasa de raíces finas, principalmente por las metodologías empleadas. La biomasa subterránea es difícil de cuantificar, en particular, la biomasa de raíces finas, puesto que son muy dinámicas, y su presencia depende de la época de muestreo, condiciones del sitio y la composición de especies (Pavón *et al.* , 2012). En este estudio, el efecto de la época del año sobre la biomasa de raíces no fue un factor de variación considerado en el diseño de muestreo, lo que probablemente influyó en la ausencia de correlaciones entre las propiedades del suelo y la biomasa de raíces.

2.7. Conclusiones

Se encontraron asociaciones significativas entre los componentes subterráneos y aéreos, con coeficientes de correlación de Pearson que variaron de 0.65 a 0.99. Las raíces finas presentaron correlaciones menores con el resto de los componentes. Los componentes aéreos de los árboles explicaron entre 85 y 98% de la variabilidad de las biomásas de los componentes subterráneos de diferente orden. Las asociaciones entre las biomásas subterránea, aérea y total fueron altamente significativas. La proporción de las biomásas de fuste y raíces gruesas incrementa al aumentar el tamaño del árbol, mientras que las biomásas de ramas, follaje y raíces finas disminuyen; sin embargo, la proporción de biomasa de raíces finas con respecto a la de follaje, aumenta al incrementar el DAP de los árboles.

Las correlaciones entre las biomásas de raíces y las variables del suelo no fueron significativas, al parecer las variaciones en biomasa subterránea dependen en mayor medida de otros factores, o bien influyó que las mediciones se realizarán en diferentes épocas del año.

Los resultados que se presentan en este estudio, facilitan las determinaciones de biomasa de los componentes subterráneos a partir de los componentes aéreos, además aportan información sobre la asignación de biomasa aérea y subterránea en las diferentes etapas de desarrollo y sobre la asociación morfológica y fisiológicamente relevante entre los componentes del árbol.

2.8. Literatura citada

- Adegbidi, H. G., Jokela, E. J., Comerford, N. B., & Barros, N. F. (2002). Biomass development for intensively managed loblolly pine plantations growing on Spodosols in the southeastern USA. *Forest Ecology and Management*, 167(1–3), 91–102. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00691-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00691-0)
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Cao, J., Wang, X., Tian, Y., Wen, Z., & Zha, T. (2012). Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest. *Ecological Research*, 27(5), 883–892. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0965-1>
- Castellanos, J. F., Velázquez, A.M., Vargas J. H., Rodríguez C.F., & Fierros A.G. (1996). Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 30: 123-128.
- Finér, L., Helmisaari, H.-S., Lõhmus, K., Majdi, H., Brunner, I., Børja, I., Eldhuset, T., Godbold, D., Grebenc, T., Konôpka, B., Kraigher, H., Möttönen, M.-R., Ohashi, M., Oleksyn, J., Ostonen, I., Uri, V., & Vanguelova, E. (2007). Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 141(3), 394–405. <https://doi.org/10.1080/11263500701625897>
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 29–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
- He, H., Zhang, C., Zhao, X., Fousseni, F., Wang, J., Dai, H., Yang S., & Zuo Q. (2018) Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. *PLOS ONE*, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226>
- Hui, D., Wang, J., Shen, W., Le, X., Ganter, P., & Ren, H. (2014). Near isometric biomass partitioning in forest ecosystems of China. *PLOS ONE*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086550>

- Jia, Q., Liu, Q., & Li, J. (2015). Individual-based fine root biomass and its functional relationship with leaf for *Pinus tabuliformis* in northern China. *European Journal of Forest Research*, 134(4), 705–714. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0884-0>
- Johansson, T. (2007). Biomass production and allometric above- and below-ground relations for young birch stands planted at four spacings on abandoned farmland. *Forestry*, 80(1), 41–52. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl049>
- Koala, J., Sawadogo, L., Savadogo, P., & Aynekulu, E. (2017). Allometric equations for below-ground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands, *Silva Fennica*, 51(3), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.14214/sf.1631>
- Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongparn, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>
- Laclau, P. (2003). Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *Forest Ecology and Management*, 173(2003), 353–360. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00012-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00012-9)
- Li, H., Li, C., Zha, T., Liu, J., Jia, X., Wang, X., Chen, W., & He, G. (2014). Patterns of biomass allocation in an age-sequence of secondary *Pinus bungeana* forests in China. *Forestry Chronicle*, 90(2), 169–176. <https://doi.org/10.5558/tfc2014034>
- Magalhães, T. M. (2015). Allometric equations for estimating belowground biomass of *Androstachys johnsonii* Prain. *Carbon Balance and Management*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0027-4>
- O’Grady, A. P., Worledge, D., & Battaglia, M. (2006). Above- and below-ground relationships, with particular reference to fine roots, in a young *Eucalyptus globulus* (Labill.) stand in southern Tasmania. *Trees*, 20(5), 531–538. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0055-5>
- Pavón, N. P., Moreno, C. E., & Ramirez-Bautista, A. (2012). Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(3), 303–312. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.07.052>
- Peichl, M., & Arain, M. A. (2007). Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, 253(1–3), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.07.003>

- Perry, J. P. (1991). *Los pinos de México y América Central*. Timber Press, Portland.
- Quinto Mosquera, H., Moreno Hurtado, F., Caicedo Moreno, H. Y., & Perez Luis, M. T. Y. (2016). Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del Pacífico Colombiano. *Colombia Forestal*, 19(1), 53–66. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a04>
- Rodríguez F. H. y J. Rodríguez A. 2011. *Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación*. Trillas, México. 239 p.
- SAS Institute Inc. (2011). *SAS/STAT® 9.3. User's Guide*. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, México. 31 de diciembre del 2002. 85 p.
- Sinacore, K., Hall, J. S., Potvin, C., Royo, A. A., Ducey, M. J., & Ashton, M. S. (2017). Unearthing the hidden world of roots: Root biomass and architecture differ among species within the same guild. *PLOS ONE*, 12(10), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185934>
- Soil and Plant Analysis Council. 2000. *Soil analysis handbook of reference methods*. CRC_Press. FL, U.S.A. 247 p.
- Soriano-Luna, M. Á., Ángeles-Pérez, Gregorio., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006&lng=es&tlng=es.
- Vanninen, P., Ylitalo, H., Sievänen, R., & Mäkelä, A. (1996). Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 10(4), 231–238. <https://doi.org/10.1007/BF02185674>
- Vela, G. L. (1980). Contribución a la ecología de *Pinus patula* Schl. et Cham. Publicación especial No. 19. INIF/SARH. México.
- Wang, L., Li, L., Chen, X., Tian, X., Wang, X., & Luo, G. (2014). Biomass allocation patterns across China's terrestrial biomes. *PLOS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093566>

- Xiao, C. W., & Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for below- and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management*, 203(1–3), 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.062>
- Yang, Y., Fang, J., Ma, W., Guo, D., & Mohammat, A. (2010). Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 268–277. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00502.x>
- Zhou, G., Meng, S., Yu, J., Zhou, H., & Liu, Q. (2018). Quantitative relationships between fine roots and stand characteristics. *European Journal of Forest Research*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1112-5>

CONCLUSIÓN GENERAL

Se determinó el cociente raíz / parte aérea para árboles de *Pinus patula*, mismo que produjo el valor promedio de 0.20. La proporción de biomasa subterránea con respecto a la biomasa total de los árboles en promedio fue de 16.7% e incrementa conforme aumenta el DAP.

Los datos de biomasa subterránea total a nivel árbol, se ajustaron mejor al modelo, que incluye el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) como variables independientes, mientras que en las ecuaciones para estimar la biomasa subterránea de los componentes a nivel árbol al combinar el DAP y la HT la mejora en el ajuste del modelo fue mínima. Las ecuaciones por componentes a nivel árbol presentaron mejor ajuste que las ecuaciones a nivel de raíz individual.

Se encontraron asociaciones significativas entre los componentes subterráneos y aéreos, con coeficientes de correlación de Pearson que oscilaron de 0.65 a 0.99. Los componentes aéreos de los árboles explicaron entre 85 y 98% de la variabilidad de las biomásas de los componentes subterráneos de diferente orden. Las asociaciones entre las biomásas subterránea, aérea y total fueron altamente significativas. La proporción de las biomásas de fuste y raíces gruesas incrementa al aumentar el tamaño del árbol, mientras que las biomásas de ramas, follaje y raíces finas disminuyen. La alometría de los árboles de *Pinus patula* cambia conforme aumenta el DAP y la edad de los mismos.

Las correlaciones entre las biomásas de raíces y las variables del suelo no fueron significativas, al parecer las variaciones en biomasa subterránea depende en mayor medida de otros factores, o bien influyó que las mediciones se realizarán en diferentes épocas del año.

Los resultados que se presentan en este estudio, proporcionan ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono subterráneos, componente de la biomasa forestal, difícil de

estudiar, además facilitan las determinaciones de biomasa de los componentes subterráneos a partir de los componentes aéreos, también aportan información sobre la asignación de biomasa aérea y subterránea en las diferentes etapas de desarrollo y sobre la asociación morfológica y fisiológicamente relevante entre los componentes del árbol.