



Estimación de carbono en las raíces en bosques de la Sierra de Manantlán, México

Root carbon estimation in forests of the Sierra de Manantlán, México

Shatya D. Quintero-Gradilla^{1*}, Antonio Muñoz² y Víctor M. Castillo-Parra³

¹ Universidad de Guadalajara. Departamento de Ecología y Recursos Naturales. Autlán, Jalisco, México.

² Universidad de Guadalajara. Departamento de Ingenierías. Autlán, Jalisco, México.

³ Universidad de Guadalajara. Ingeniería en Recursos Naturales y Agropecuarios. Autlán, Jalisco, México.

* Autor de correspondencia.
shatya.quintero@academicos.udg.mx

RESUMEN

La estimación de carbono en la biomasa subterránea es fundamental para la comprensión de la dinámica de carbono en los bosques. Se cuantificó el carbono en las raíces en un bosque de pino y en un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, México. Se tomaron muestras de suelo a 30 cm de profundidad para la extracción de las raíces y su posterior clasificación en finas (< 2 mm) y gruesas (> 2 mm), así como para la determinación de la densidad aparente y la humedad del suelo. Para el análisis estadístico se realizó la prueba t de Student con un nivel de significancia $p < 0.05$. En el bosque de pino las raíces almacenaron $3.51 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 0.92 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono, valor significativamente menor al de bosque mesófilo de montaña con $4.98 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 1.29 \text{ Mg ha}^{-1}$. El cociente del carbono almacenado entre las raíces finas y gruesas fue 0.86 para bosque de pino y 0.78 para bosque mesófilo, respectivamente. No se observó diferencia significativa en el carbono almacenado entre las raíces finas de los dos tipos de bosque; para las raíces gruesas el contenido de carbono fue mayor en el bosque mesófilo. La densidad aparente y la humedad del suelo en el bosque de pino fueron de 0.73 g cm^{-3} y 23.42%, para el bosque mesófilo de montaña se estimaron valores de 0.59 g cm^{-3} y 29.93%, respectivamente. Con estos datos se obtiene una mayor comprensión de la distribución de carbono en las raíces para diferentes tipos de vegetación.

PALABRAS CLAVE: bosque de pino, bosque mesófilo de montaña, biomasa subterránea, densidad aparente, humedad del suelo, raíces finas.

ABSTRACT

Belowground carbon estimation is essential for understanding carbon dynamics in forests. Root carbon was quantified in a pine forest (PF) and a tropical montane cloud forest (TMCF) in the Sierra de Manantlán, México. Soil samples were taken at a depth of 30 cm, and roots were extracted and classified into fine (< 2 mm) and coarse (> 2 mm) roots. Soil bulk density and soil moisture were determined as well. A Student's t-test was used for statistical analysis with a significance level of $p < 0.05$. In the PF, the carbon stored in roots was $3.51 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 0.92 \text{ Mg ha}^{-1}$, significantly lower than in the TMCF with $4.98 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 1.29 \text{ Mg ha}^{-1}$. The ratio of C stored between fine and coarse roots was 0.86 and 0.78 for PF and TMCF, respectively. No significant differences were observed in the C stored in the fine roots between both forests; for the coarse roots, the C content was higher in the TMCF. The soil bulk density and soil moisture in the PF were 0.73 g cm^{-3} and 23.42%, respectively. Likewise, these variables for the TMCF were 0.59 g cm^{-3} and 29.93%. With these data, a better understanding of the distribution of carbon in roots for different vegetation types was obtained.

KEYWORDS: pine forest, tropical montane cloud forest, belowground biomass, soil bulk density, soil moisture, fine roots.

INTRODUCCIÓN

Los bosques juegan un papel esencial en el ciclo del carbono y, por ende, en el sistema climático global. Capturan aproximadamente una cuarta parte de las emisiones de CO₂ antropogénicas y representan importantes almacenes de carbono en la biomasa y el suelo, 479 Pg y 383 Pg, respectivamente (Pan et al., 2011). Dada la relevancia de los bosques como una opción de mitigación del cambio climático global, durante las últimas dos décadas, una gran cantidad de investigación se ha realizado sobre la estimación del almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales (Sun y Liu, 2020).

A pesar de dichos esfuerzos, el almacenamiento de C en la biomasa subterránea ha sido menos estudiado, con respecto de aquel que se almacena en la biomasa arriba del suelo. Las raíces juegan un papel esencial en el ciclo del agua, los nutrientes y el carbono (McCormack et al., 2015). Aportan entre 20% y 40% del C total que se almacena en los árboles (Cairns et al., 1997); por lo que, la cuantificación de su biomasa es fundamental para la comprensión de la dinámica de carbono en los bosques y la generación de predicciones más puntuales sobre su contribución potencial a la mitigación del cambio climático (Germon et al., 2020).

Las raíces pueden dividirse en finas y gruesas de acuerdo con su tamaño y función en el ecosistema (McCormack et al., 2015; Addo-Danso et al., 2016). Las raíces finas (< 2 mm de diámetro) representan una fracción relativamente pequeña de la biomasa total (2% - 5%). Sin embargo, son responsables de la toma de agua y nutrientes, y juegan un papel determinante en el ciclo del C al transferir anualmente grandes cantidades de carbono al suelo a través de la liberación de exudados y la necromasa de las raíces, dada su alta tasa de recambio (Chang et al., 2012).

Las raíces gruesas (> 2 mm de diámetro) son caracterizadas por un engrosamiento secundario que brinda soporte estructural y por su relevancia en el transporte de agua y nutrientes (Resh et al., 2003). Representan una fracción significativa de la biomasa total de los árboles (20% - 40%) y son un importante almacén de carbono cuya influencia en la productividad del ecosistema es de largo

plazo debido a su lenta tasa de descomposición (Resh et al., 2003; Robinson, 2007).

La biomasa de las raíces es variable, responde a los controles genéticos y a la alta plasticidad que desarrolla tanto arquitectónica como funcionalmente (Finér et al., 2011; Germon et al., 2020). Adicionalmente, está influenciada por el tipo de vegetación, la edad del rodal, la composición de especies, la estructura de la vegetación, las propiedades físicas y químicas del suelo y los factores ambientales (Ziadat et al., 2010; Chang et al., 2012; Gómez et al., 2021; Lwila et al., 2021). En consecuencia, las estimaciones de biomasa de las raíces continúan siendo escasas y, por lo tanto, limitan las evaluaciones precisas de las reservas de C en los bosques y las predicciones sobre las respuestas de éstos a los cambios ambientales globales.

Aunado a ello, existen diferencias en los métodos de estimación de la biomasa de las raíces generando resultados altamente variables y difíciles de comparar (McCormack et al., 2015). La estimación de la biomasa de raíces finas y gruesas puede agruparse en métodos directos e indirectos. Los métodos directos se basan en excavaciones en el suelo y la toma de núcleos, por lo que, debido a lo laborioso y costoso del procedimiento son menos utilizados que los métodos indirectos, los cuales consisten generalmente en el uso de cocientes de biomasa aérea: biomasa subterránea y ecuaciones alométricas, entre otros (Addo-Danso et al., 2016). Ambos métodos pueden tener sesgos potenciales que conduzcan a la sobreestimación o subestimación de la biomasa de las raíces (Resh et al., 2003).

En México, existen algunos estudios que abordan la estimación de la biomasa subterránea en bosques templados (Mendoza-Vega et al., 2003; Asbjornsen et al., 2005; Mendoza-Ponce y Galicia, 2010; Pavón et al., 2012; Álvarez-Arteaga et al., 2013; Galicia et al., 2015). Sin embargo, la información al respecto continúa siendo escasa, considerando que es un país con una alta variabilidad en el clima, la geomorfología y la vegetación; lo que afecta la dinámica del carbono forestal. El presente trabajo busca contribuir a la generación de estimaciones de biomasa y carbono subterráneo para bosques templados en México.



OBJETIVOS

El objetivo del estudio fue cuantificar el contenido de carbono en la biomasa subterránea (raíces finas y gruesas) en un bosque de pino y un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, en el occidente de México. Asimismo, se analizaron la densidad aparente y la humedad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la Estación Científica Las Joyas (ECLJ, 19° 34' 14"-19° 37' 30" N y 104° 14' 49"-104° 18' 16" O), la cual corresponde a una de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM) situada en el centro-occidente de México. La ECLJ tiene una extensión de 1257 ha en un gradiente altitudinal que va de 1500 m a 2242 m s.n.m. El clima es templado subhúmedo con lluvias de verano (*Ca (w2) (w)(e) g*) según el sistema de clasificación de Köppen modificado por García. La temperatura media anual es de 15 °C ± 0.2 °C y la precipitación de 1826 mm ± 94 mm. Las condiciones bioclimáticas, de acuerdo con el sistema de zonas de vida de Holdridge, corresponden a la zona de bosque húmedo montano bajo subtropical, con un cociente de evapotranspiración potencial entre 0.5 y 0.6. (Cuevas-Guzmán y Jardel-Pelaéz, 2004).

El sustrato geológico consiste en rocas ígneas extrusivas del Terciario (pórfido basáltico, pórfido riolítico, basalto andesítico y toba volcánica). La cubierta vegetal es un mosaico de bosques de pino, bosques mixtos de pino-latifoliadas, bosques de pino-encino, bosques de encino, bosque mesófilo de montaña y matorrales secundarios (Cuevas-Guzmán y Jardel-Pelaéz, 2004).

Diseño de muestreo

Con la finalidad de cuantificar el carbono contenido en la biomasa de las raíces en un bosque de pino (BP) y un bosque mesófilo de montaña (BMM), se seleccionaron tres

sitios independientes con una distancia entre ellos de 0.5 km a 2 km. En cada uno de estos sitios, los rodales de BP estuvieron ubicados en la ladera alta y los de BMM en la ladera baja. En cada rodal se establecieron, de manera aleatoria, tres parcelas circulares de 500 m² (radio de 12.62 m), para dar un total de 9 en cada tipo de bosque. La ubicación de las parcelas de muestreo se presenta en la tabla 1. El BP y el BMM están ubicados en la misma zona bioclimática entre 1850 m y 2050 m s.n.m. El BP está dominado por *Pinus douglasiana* (> 90% del área basal), ubicado en la ladera alta de forma convexa con exposición NE-NO, sobre suelo de tipo Inceptisol. El BMM presenta dominancia de *Zinowiewia concina*, *Carpinus tropicalis*, *Symplocarpus purpusii*, *Dendropanax arboreus*, *Magnolia ilicifolia* y *Cornus disciflora* y está ubicado en la ladera baja de forma cóncava con exposición NE-NO, sobre suelo de tipo Alfisol. Ambos tipos de bosques pertenecen a una zona núcleo de la RBSM desde 1985, por lo que el aprovechamiento forestal no está permitido.

En cada parcela de 500 m², partiendo de un punto central se trazaron líneas orientadas hacia los cuatro principales puntos cardinales: norte, sur, este y oeste. Sobre cada línea se establecieron dos puntos de muestreo separados por una distancia de 6.3 m (ocho en total). En cada punto se colectaron muestras de suelo con una barrena de 5 cm de diámetro a 30 cm de profundidad. La profundidad de muestreo se eligió considerando que estudios previos realizados a 1 m de profundidad muestran que más de 70% de la biomasa se encuentra en los primeros 30 cm del suelo (Jackson et al., 1996; Mendoza-Vega et al., 2003).

El suelo extraído fue almacenado en bolsas de plástico debidamente etiquetadas para su transporte al laboratorio. Una muestra de suelo de cada línea (cuatro en total) fue utilizada para la extracción de las raíces y la cuantificación de su biomasa. Las otras cuatro muestras fueron utilizadas para determinar la densidad aparente y la humedad, por lo que su peso fresco se registró en campo con una balanza digital con resolución de 0.01 g.

TABLA 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en el bosque de pino y el bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán.

<i>Tipo de vegetación</i>	<i>Sitio</i>	<i>Parcela</i>	<i>Coordenadas geográficas</i>	<i>Coordenadas geográficas</i>	<i>Altitud</i>	<i>Pendiente</i>
			Latitud norte	Longitud oriente	(m)	(%)
Bosque de pino	1	1	19°58'51"	104°27'58"	1989	40
		2	19°58'46"	104°27'57"	2016	15
		3	19°58'44"	104°27'54"	2023	10
		4	19°59'85"	104°30'06"	2003	22
		5	19°59'81"	104°30'05"	2008	33
		6	19°59'73"	104°30'04"	2024	28
		7	19°35'41"	104°16'10"	2044	31
		8	19°35'24"	104°16'11"	2034	24
		9	19°35'47"	104°16'12"	2044	30
Bosque mesófilo de montaña	1	1	19°58'95"	104°27'67"	1894	14
		2	19°58'92"	104°27'73"	1909	16
		3	19°58'86"	104°27'67"	1917	25
		4	19°59'76"	104°29'77"	1955	14
		5	19°59'70"	104°29'79"	1955	40
		6	19°59'81"	104°29'72"	1957	20
		7	19°58'42"	104°26'61"	2035	19
		8	19°58'48"	104°26'61"	2025	25
		9	ND	ND	2028	19

Procesamiento de muestras en el laboratorio

Las raíces fueron extraídas del suelo manualmente con pinzas y lupa, sin separar en vivas y muertas. Se clasificaron en dos categorías de acuerdo con su tamaño en diámetro: finas (< 2 mm) y gruesas (> 2 mm) (McCormack et al., 2015). Las raíces fueron colocadas en agua y lavadas cuidadosamente para eliminar partículas del suelo adheridas. Fueron llevadas a peso seco constante en un horno de secado a una temperatura de 60 °C y pesadas en una balanza digital de alta precisión (0.0001 g).

La densidad aparente (Da), definida como la masa del suelo (g) sobre unidad de volumen (cm^3), se determinó con el método del cilindro y libre de fragmentos gruesos > 2

mm. Las muestras de suelo se llevaron a peso seco constante en un horno de secado a una temperatura de 60 °C y se registró su peso. En seguida, fueron tamizadas en una malla de 2 mm de apertura para separar los fragmentos mayores a 2 mm y con el peso y el volumen de dichos fragmentos se corrigió el cálculo.

La densidad aparente fue definida por la ecuación 1.

$$Da = \left(\frac{Ps}{V} \right) \quad (1)$$

donde:

Da : densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

Ps : peso del suelo seco (g)



V : volumen total del cilindro (cm³)

El contenido de humedad (%) se determinó con el método gravimétrico, de acuerdo con la ecuación 2.

$$w = \left(\frac{Sh}{Ss} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2)$$

donde:

w : contenido de humedad (%)

Sh : masa de suelo húmedo (g)

Ss : masa del suelo seco (g)

Análisis de datos

El contenido de carbono en la biomasa subterránea (Mg C ha⁻¹) se obtuvo como el producto de la biomasa (Mg ha⁻¹) por la concentración de carbono (%). Se utilizó un valor de concentración de C de 43.5% de acuerdo con lo indicado por Quintero-Gradilla et al. (2020).

La normalidad y homogeneidad de varianza de las variables *Da* (g cm⁻³), humedad (%) y contenido de C (Mg ha⁻¹) fueron comprobadas mediante las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente. Se realizó una prueba t de student (*p* < 0.05) para comparar los valores promedio de dichas variables y ambos análisis se realizaron en el programa Statgraphics18.

RESULTADOS

Biomasa

La comparación de la biomasa de las raíces menores a 2 mm entre el BP y el BMM no mostró una diferencia significativa (*t₁₆* = 1.729, *p* = 0.103). En el BP, la biomasa estuvo en un intervalo de 2.04 Mg ha⁻¹ a 6.57 Mg ha⁻¹, con un promedio de 3.72 Mg ha⁻¹ ± 1.65 Mg ha⁻¹; mientras que en el BMM la biomasa fluctuó entre 3.38 Mg ha⁻¹ y 7 Mg ha⁻¹, con un promedio de 4.34 Mg ha⁻¹ ± 1.86 Mg ha⁻¹ (Fig. 1). La amplitud de los intervalos de variación fue de 4.53 Mg ha⁻¹ para el BP y 3.62 Mg ha⁻¹ para el BMM. Esto indica que la

amplitud del intervalo observado en el BP es 25% mayor que en el BMM.

Por otro lado, la biomasa de las raíces mayores a 2 mm fue significativamente mayor en el BMM con respecto al BP (*t₁₆* = 2.282, *p* = 0.036). En el BP hubo una variación de 1.28 Mg ha⁻¹ a 7.49 Mg ha⁻¹, y en el BMM de 2.78 Mg ha⁻¹ a 9.22 Mg ha⁻¹ (Fig. 1). Se observó un porcentaje del cociente de variación de 3%, el cual es menor que el observado para las raíces menores a 2 mm. La biomasa total del BP fue de 8.07 Mg ha⁻¹ ± 2.11 Mg ha⁻¹, siendo significativamente menor que la biomasa total del BMM con un valor de 11.44 Mg ha⁻¹ ± 2.95 Mg ha⁻¹; donde los valores estadísticos obtenidos fueron *t₁₆* = 2.783, *p* = 0.013.

Carbono

La cantidad de carbono en la biomasa subterránea en el BP fue de 3.51 Mg ha⁻¹ ± 0.92 Mg ha⁻¹ y de 4.98 Mg ha⁻¹ ± 1.29 Mg ha⁻¹ en el BMM (Fig. 2); siendo estadísticamente mayor el contenido de C en el BMM (*t₁₆* = 2.783, *p* = 0.013). En el BP, 46% del C estuvo almacenado en las raíces finas y 54% en las raíces gruesas. De manera similar, en el BMM esta proporción fue 44% y 56%, respectivamente. La comparación del C almacenado en las raíces finas entre tipos de vegetación no mostró diferencia significativa, mientras que, el C almacenado en las raíces gruesas fue significativamente mayor en el BMM (Tabla 2).

Propiedades del suelo

Los resultados obtenidos de las variables edáficas indican que la *Da* fue significativamente mayor en el BP al compararse con el valor obtenido en el BMM (Tabla 2). En el BP, la *Da* se presentó en un intervalo de 0.61 g cm⁻³ a 0.81 g cm⁻³; para el BMM el valor mínimo fue de 0.44 y el valor máximo de 0.74.

La humedad del suelo en el BP fue 23.4%, valor significativamente menor que el observado en el BMM con 29.93% (Tabla 2). En el BP los valores de humedad variaron entre 19.6% y 28.3%, mientras que el BMM los valores se distribuyeron entre 25.3% y 36.5%.

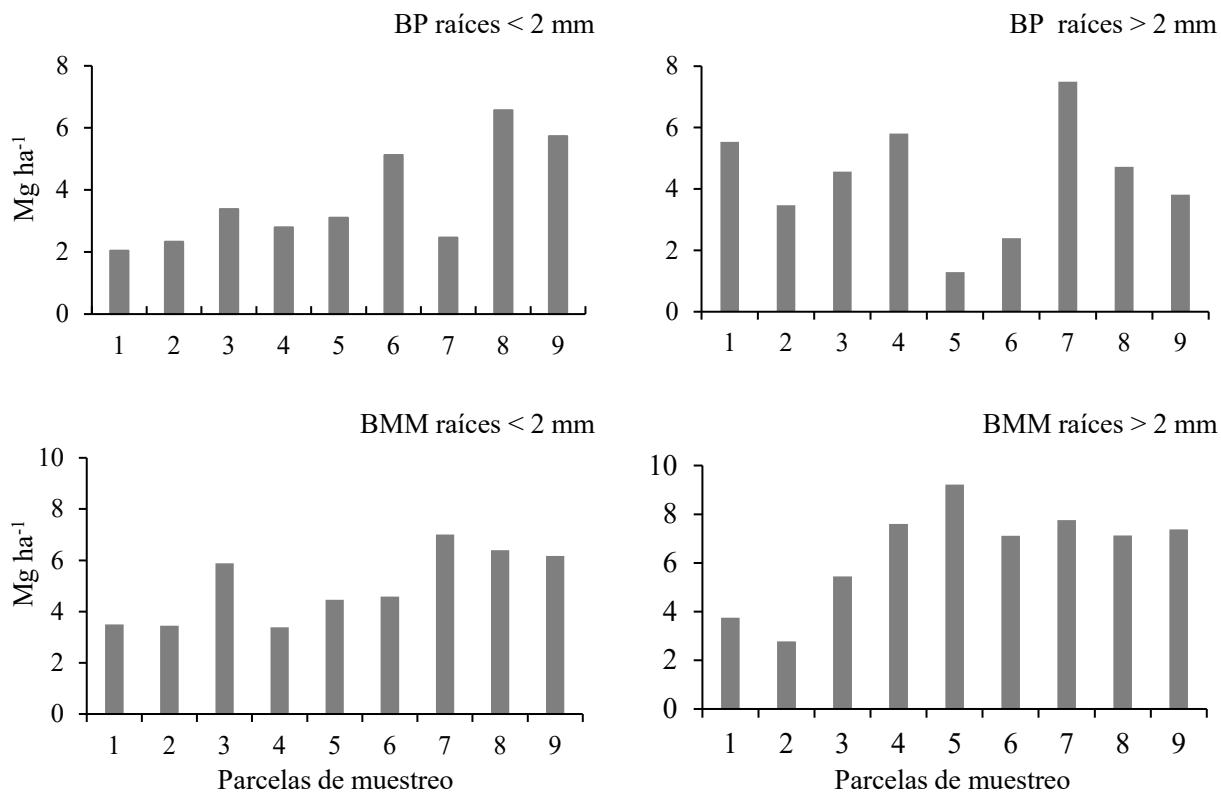


FIGURA 1. Biomasa de las raíces finas (< 2 mm) y gruesas (> 2 mm) en el bosque de pino y el bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán.

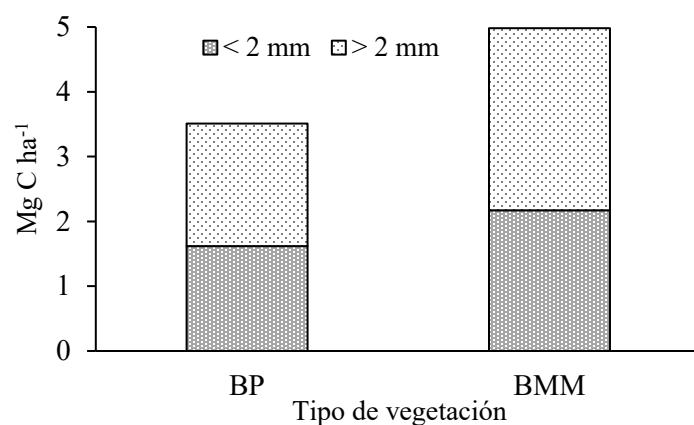


FIGURA 2. Contenido de carbono total y su distribución en raíces finas (< 2 mm) y gruesas (> 2 mm) en el bosque de pino y el bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán.



TABLA 2. Comparación del contenido de carbono en las raíces, densidad aparente y humedad del suelo con la prueba t de Student ($p < 0.05$).

Variable	Bosque de pino ($n=9$)	Bosque mesófilo de montaña ($n=9$)	t_{16}	P
Carbono raíces < 2 mm ($Mg C ha^{-1}$)	1.62 (0.71)	2.17 (0.61)	1.729	0.102
Carbono raíces > 2 mm ($Mg C ha^{-1}$)	1.89 (0.81)	2.81 (0.90)	2.282	0.036
Densidad aparente ($g cm^{-3}$)	0.73 (0.07)	0.59 (0.11)	2.891	0.010
Humedad (%)	23.42 (2.53)	29.93 (1.29)	4.211	0.000

TABLA 3. Estimaciones de biomasa subterránea en bosques templados de México.

Tipo de vegetación	Tamaño de las raíces finas (mm)	Profundidad de muestreo (cm)	Biomasa ($Mg ha^{-1}$)	Fuente
Bosque de pino	< 3 mm	30	4.48	Mendoza-Ponce y Galicia (2010)
	< 2 mm	30	3.72	El presente estudio
Bosque de pino-encino	< 5 mm	20	2.3 – 9.1	Galicia et al. (2015)
	< 3 mm	30	2.06	Pavón et al. (2012)
	< 5 mm	30	27.3	Mendoza-Vega et al. (2003)
Bosque mesófilo de montaña	< 5 mm	30	4.2 – 18.9	Álvarez-Arteaga et al. (2013)
	< 2 mm	30	3.20	Asbjornsen et al. (2005)
	< 5 mm	30	31.8	Mendoza-Vega et al. (2003)
	< 2 mm	30	4.34	El presente estudio

DISCUSIÓN

La estimación de la biomasa de las raíces es un desafío actual debido a las diferencias metodológicas (Addo-Danso et al., 2016). En México se han realizado diversos esfuerzos para cuantificar la biomasa subterránea en bosques templados (Mendoza-Vega et al., 2003; Asbjornsen et al., 2005; Mendoza-Ponce y Galicia, 2010; Pavón et al., 2012; Álvarez-Arteaga et al., 2013; Galicia et al., 2015), lo cual contribuye a mejorar la estimación del almacenamiento de carbono en estos bosques. Sin embargo, la comparación entre los resultados de los estudios es un problema actual. En la tabla 3, se muestran los datos generados para BP y BMM en México.

La biomasa estimada para las raíces finas (< 2 mm) en el BMM en este estudio, fue 1.14 Mg ha^{-1} , mayor que lo observado por Asbjornsen et al. (2005) para el BMM en la región de los Chimalapas, Oaxaca (Tabla 3). Esta diferencia en la estimación podría deberse a que en su estudio solo consideraron las raíces vivas; mientras que en este trabajo se consideraron las raíces vivas y muertas. La cantidad de biomasa obtenida está dentro de lo observado para otros bosques subtropicales de montaña con especies de latifoliadas (Moser et al., 2011).

Por otro lado, Mendoza-Ponce y Galicia (2010) hicieron una estimación de 4.48 Mg ha^{-1} para las raíces finas < 3 mm del BP en el Cofre de Perote, Veracruz. Para el BP

en este estudio la biomasa estimada fue 3.72 Mg ha⁻¹ para raíces finas consideradas < 2 mm. Este dato representa una variación de 17% con respecto al primero, lo cual indica que el estudio realizado arrojó valores similares a los mencionados y que el análisis de la biomasa de las raíces finas consideradas < 3 mm no es significativamente mayor.

La distribución del carbono almacenado entre las raíces finas y gruesas fue similar en ambos tipos de bosque. Para el BMM el cociente entre raíces finas y gruesas fue 0.78, mientras que para el BP fue de 0.86. La cantidad de carbono total en las raíces (finas + gruesas) en el BMM fue 30% mayor que en el BP. Esta diferencia estadísticamente significativa tiene un comportamiento similar a lo observado en otros estudios (Mendoza-Vega et al., 2003; Finér et al., 2011). La diferencia en el carbono almacenado está relacionada a factores bióticos como la estructura de la vegetación, la composición de especies y a las propiedades físico-químicas del suelo (Santiago-Pérez et al., 2009; Chang et al., 2012; Lwila et al., 2021).

Los valores de la densidad aparente y la humedad del suelo observados en este estudio son similares a los registrados por otros autores para los bosques de pino y bosques mesófilo de montaña en México (Williams-Linera et al., 2002; Santiago-Pérez et al., 2009; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; Pavón et al., 2012).

Se observó que la humedad del suelo en el BMM es mayor que en el BP en 6.5%. De forma opuesta, el BMM tuvo una densidad aparente menor que el BP en 0.14 g cm⁻³. Un resultado semejante ha sido obtenido para otros tipos de bosque en Santiago-Pérez et al. (2009) y Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011). El BMM de la zona de estudio se encuentra localizado en la parte baja de la ladera de forma cóncava, esto contribuye a que el suelo reciba una mayor cantidad de humedad y la mantenga por más tiempo. Por otro lado, el BP se encuentra localizado en la parte alta de la ladera, lo cual ocasiona que se mantenga una menor humedad (Ziadat et al., 2010). La densidad del suelo está relacionada con el contenido de humedad y con la cantidad de materia orgánica: conforme se incrementan estas variables, decrece la densidad del suelo (Gómez et al., 2021).

Es conocido que la biomasa de las raíces (Br) decrece conforme se incrementa la densidad aparente (Campos-Cascaredo et al., 2021; Gómez et al., 2021). Esta relación, de forma puntual, fue observada en el presente estudio de la siguiente manera: BP (Da₊, Br₋) y BMM (Da₋, Br₊), donde los subíndices expresan la relación de comparación. Por otro lado, la teoría indica que, conforme se incrementa la humedad del suelo (H), se incrementa la Br (Anaya et al., 2016; Campo-Cascaredo et al., 2021), dicha relación también fue observada en este estudio entre los bosques estudiados: BP (H₊, Br₊) y BMM (H₋, Br₋).

CONCLUSIONES

El contenido de carbono en las raíces finas fue similar entre el BP y el BMM: para las raíces gruesas se observó un contenido 30% mayor en el BMM. En ambos bosques, la proporción de carbono entre raíces finas y gruesas fue similar. En el BP la humedad del suelo fue 7% menor que en el BMM, mientras que la densidad aparente fue 0.14 g cm⁻³ mayor. Cabe mencionar que estas variables se relacionan con la biomasa de las raíces, a mayor humedad del suelo y menor densidad aparente en el BMM mayor contenido de carbono. De forma inversa, a menor humedad del suelo y mayor densidad aparente en el BP menor contenido de C. Con estos datos se obtiene una mayor comprensión de los factores que influyen en el almacenamiento de carbono en las raíces en diferentes tipos de vegetación.

RECONOCIMIENTOS

El presente estudio fue realizado gracias al apoyo recibido de la Secretaría de Educación Pública, a través del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (clave 511-6/17-8091).

REFERENCIAS

- 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(1), 332-351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>.
- Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N. E., Krasilnikov, P., & García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de



- niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180.
- Anaya, C. A., Mendoza, M., Rivera, M., Paéz, R., & Olivarez-Martínez, D. (2016). Contenido de carbono orgánico y retención de agua en los suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México. *Agrociencia*, 50(2), 251-269.
- Asbjornsen, H., Velázquez-Rosas, N., García-Soriano, R., & Gallardo-Hernández, C. (2005). Deep ground fires cause massive above- and below-ground biomass losses in tropical montane cloud forests in Oaxaca, México. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 427-434. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002373>
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Campos-Cascaredo, A., Cruz-Huerta, L., & Rocha-Ortiz, S. (2021). Fine root density across soil profiles in tropical mountain cloud forest and adjacent managed fields in Veracruz (Méjico): Influence of soil properties. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3), 91. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3647>
- Chang, R., Fu, B., Liu, G., Yao, X., & Wang, S. (2012). Effects of soil physicochemical properties and stand age on fine root biomass and vertical distribution of plantation forests in the Loess Plateau of China. *Ecological Research*, 27, 827-836. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0958-0>
- Cruz-Flores, G., & Etchevers-Barra, J. D. (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45(8), 849-862.
- Cuevas-Guzmán, R., & Jardel-Peláez, E. J. (2004). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011). Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2), 265-277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.016>
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 473-484. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>
- Germon, A., Laclau, J. P., Robin, A., & Joudan, C. (2020). Tamm Review: Deep fine roots in forests ecosystems: Why dig deeper?. *Forest Ecology and Management*, 466(15), 118-135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118135>
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., & Asencio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742445. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389-411. <https://doi.org/10.1007/BF00333714>
- Lwila, A. S., Mund, M., Ammer, C., & Glatthorn, J. (2021). Site conditions more than species identity drive fine root biomass, morphology and spatial distribution in temperate pure and mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 499(1), 119581. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119581>
- McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., Helmisari, H., Hobbie, E. A., Iversen, C. M., Jackson, R. B., Leppälämmi-Kujansuu, J., Norby, R. J., Phillips, R. P., Pregitzer, K. S., Pritchard, S. G., Rewald, B., & Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207, 505-518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>
- Mendoza-Ponce, G., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497-506. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq032>
- Mendoza-Vega, J., Karlton, E., & Olsson, M. (2003). Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 191-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00439-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00439-5)
- Moser, G., Leuschner, C., Hertel, D., Graefe, S., Soethe, N., & Iost, S. (2011). Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): the role of the belowground compartment. *Global Change Biology*, 17(6), 2211-2226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02367.x>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pavón, N. P., Moreno, C. E., & Ramírez-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), 304-312. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.07.052>
- Quintero-Gradilla, S. D., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., Jardel-Peláez, E. J., & Martínez-Yrizar, A. (2020). Post-fire recovery of ecosystem carbon pools in a tropical mixed pine-

- hardwood forest. *Forest Systems*, 29(1), 1-13. <https://doi.org/10.5424/fs/2020291-14984>.
- Resh, S. C., Battaglia, M., Worledge, D., & Ladiges, S. (2003). Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: sources of variation and methods for assessment. *Trees*, 17, 389-399. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0250-6>
- Robinson, D. (2007). Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings Biological Science*, 274(1626), 2753-2759. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1012>
- Santiago-Pérez, A. L., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., & Huerta-Martínez, F. M. (2009). Vegetación de bordes en un Bosque Mesófilo de Montaña del Occidente de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 85, 31-49.
- Sun, W., & Liu, X. (2020). Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. *Forest Ecosystems*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0210-2>
- Williams-Linera, G., Manson, R. H., & Isunza-Vera, E. (2002). La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 73-89. <https://doi.org/10.21829/myb.2002.811307>
- Ziadat, F. M., Taimeh A. Y., & Hattar, B. I. (2010). Variation of soil physical properties and moisture content along toposequences in the arid to semiarid area. *Arid Land Research and Management*, 24, 81-97. <https://doi.org/10.1080/15324981003635396>

Manuscrito recibido el 31 de octubre de 2021

Aceptado el 27 de junio de 2022

Publicado el 15 de diciembre de 2022

Este documento se debe citar como:

Quintero-Gradilla, S. D., Muñoz, A., & Castillo-Parra, V. M. (2022). Estimación de carbono en las raíces en bosques de la Sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822431. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822431>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.