

Soil organic carbon stocks and ectomycorrhizal abundance under two trees species at Nevado de Toluca, Mexico

Almacén de carbono orgánico del suelo y abundancia ectomicorrízica bajo dos especies de coníferas en el Nevado de Toluca, México

Chávez-Aguilar, Griselda^{1,2}; Burrola-Aguilar, Cristina³; González-Morales, Azucena⁴; Pérez-Suárez, Marlín^{1*}

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR). El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca. Estado de México. México. CP. 50200. ²Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar, Carretera Ojuelos-Lagos de Moreno Km 8.5, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, México. CP. 47540. ³Universidad Autónoma del Estado de México. Centro de Investigación en Recursos Bióticos (CIRB). Carretera Toluca-Ixtlahuaca de Rayón, Toluca. Estado de México, México. CP. 50200. ⁴Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Santo Tomás. Ciudad de México, México. CP. 11340.

*Autor de correspondencia: marpersua@gmail.com

ABSTRACT

Objective: to evaluate the effect of two forest species in soil organic carbon (SOC) stocks and ectomycorrhizal abundance (ECM) characterizing the most representative morphotypes ECM under each forest species.

Design/methodology/approach: SOC was determined by the oxide reduction method in soil samples collected at 0-30 cm under individuals of *Pinus hartwegii* and *Abies religiosa*. Ectomycorrhizal roots were extracted of soil to quantify ECM abundance and characterize the morphotypes ECM.

Results: SOC under *P. hartwegii* (219.0 Mg ha⁻¹) was not significantly different from that of *A. religiosa* (211.7 Mg ha⁻¹), but not in the abundance of ECM, which was higher ($p=0.000$) under *A. religiosa* (43.5%) than under *P. hartwegii* (26.4%). 21 total ECM morphotypes were observed, of which five were common under both forest species.

Limitations on study/implications: it is an initial study that requires subsequent molecular identification of ectomycorrhizal morphotypes.

Findings/conclusions: *P. hartwegii* and *A. religiosa* have the same capacity to storage SOC under their individuals, while ECM abundance was defined by the forest species. Both forest species shared only 28% of total ECM morphotypes observed. This work contributes to knowledge as the first step for identifying the influence of the fungus-tree association on the dynamics of the SOC in temperate forest soils.

Keywords: ectomycorrhizal fungi; ectomycorrhizal morphotypes; high mountain forests

Agroproductividad: Vol. 13, Núm. 1, enero, 2020. pp: 75-82.

Recibido: septiembre, 2019. **Aceptado:** enero, 2020.

RESUMEN

Objetivo: evaluar el efecto de dos especies forestales sobre los almacenes de carbono orgánico del suelo (COS) y la abundancia ectomicorrízica (ECM) caracterizando los morfotipos ECM más representativos bajo cada especie forestal.

Diseño/metodología/aproximación: se determinó el COS mediante el método de óxido reducción en muestras de suelo colectadas a 0-30 cm bajo individuos de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*. Se extrajeron las raíces ectomicorrizadas para cuantificar la abundancia ECM y realizar identificación de morfotipos ECM.

Resultados: El COS bajo *P. hartwegii* (219.0 Mg ha⁻¹) no fue significativamente diferente al de *A. religiosa* (211.7 Mg ha⁻¹), pero no así en la abundancia ECM, que fue mayor ($p=0.000$) bajo *A. religiosa* (43.5 %) que bajo *P. hartwegii* (26.4 %). Se observaron 21 morfotipos ECM en total, de los cuales cinco fueron comunes en ambas especies arbóreas.

Limitaciones/implicaciones: se trata de un estudio preliminar que requiere la identificación molecular *a posteriori* de los morfotipos ECM.

Hallazgos/conclusiones: *P. hartwegii* y *A. religiosa* tienen la misma capacidad para almacenar COS bajo sus individuos, mientras la abundancia ECM estuvo definida por la especie forestal. Ambas especies forestales compartieron sólo el 28% del total de morfotipos ECM observados. Este trabajo contribuye al conocimiento como primer paso para identificar la influencia de la asociación hongo-árbol sobre la dinámica del COS en bosques templados.

Palabras clave: hongos ectomicorrizógenos, morfotipos ectomicorrizógenos, bosques de alta montaña

la formación y el mantenimiento de la diversidad vegetal y estructura de las comunidades forestales. Sin embargo, existen diversos factores que pueden influir sobre esta vía, uno de ellos son las especies forestales (Dijkstra y Fitzhugh, 2003; Hagen-Thorn *et al.*, 2004), dado que ésta influye sobre las propiedades del suelo (estructura y agregación), modificando los almacenes del COS y consecuentemente las asociaciones ECM. Estas modificaciones pueden ir acompañadas por el efecto de otros factores, tales como la temperatura ambiental, humedad del aire, cambios en el pH del suelo, cantidad de MOS, densidad aparente del suelo (Augusto *et al.*, 2002; Berger *et al.*, 2002; Cha *et al.*, 2019), altitud y latitud, e incluso variaciones a lo largo del perfil del suelo (Jobbágy y Jackson, 2000). Lo anterior dependerá de las características intrínsecas en el ecosistema.

Específicamente, el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) del Nevado de Toluca, es una de las Áreas Naturales Protegidas más importantes del Estado de México, sujeta a intensos procesos de deterioro ambiental (Cruz-Ruiz *et al.*, 2012). Esta área, alberga importantes especies forestales, destacando *Pinus hartwegii* Lindl., única especie de pino distribuida sobre los 4,200 m de altitud y adaptada a temperaturas extremas ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. *et Cham.*, una especie nativa de México cuyos bosques son considerados como relictos. Ambas especies proporcionan importantes servicios ecosistémicos demandados por la sociedad, tales como la captura y almacén de C en suelos (Jobbágy y Jackson, 2000), y el beneficio socio-cultural de la relación biológica raíz-hongo. En este sentido, es importante conocer qué

INTRODUCCIÓN

Los suelos forestales son el más grande reservorio de carbono (C), como resultado del balance entre el C que entra como materia orgánica al suelo (MOS) a través de la hojarasca y rizodepositación, y el que sale hacia la atmósfera (bióxido de carbono) durante los procesos de respiración (Swift, 2001). La incorporación de C al suelo no sólo se da a través de la producción e incorporación de MOS (Hobbie *et al.*, 2007; Pérez-Suárez *et al.*, 2009), sino a través de las asociaciones ectomicorrízicas (ECM) formadas entre las raíces de aproximadamente 95% de las especies arbóreas y las hifas de hongos ectomicorrízicos (Pérez-Moreno y Read, 2004). Estas asociaciones participan en diversos procesos del suelo (absorción y translocación de nutrientes, protección contra patógenos, mineralización de nitrógeno orgánico, etc.) y pueden recibir hasta 20% del C fijado por los árboles (Clasen *et al.*, 2018). Además, estas asociaciones contribuyen a la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) a través de las redes miceliarias, aumentando la adherencia de las hifas y promoviendo la agregación y estabilización del suelo, con lo cual aumenta el tiempo de residencia del COS en los macroagregados.

Las asociaciones ECM han sido reconocidas como una vía importante en la transferencia e incorporación de COS a los suelos, tienen alto impacto en

papel juegan las especies forestales sobre el COS almacenado y las asociaciones ECM. El presente estudio presenta resultados de un análisis inicial sobre el efecto de *P. hartwegii* y *A. religiosa* sobre los almacenes de COS y, la abundancia ECM a 0-30 cm profundidad, además de identificar los morfotipos ECM mayormente representativos bajo individuos de ambas especies forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el APFF del Nevado de Toluca, Estado de México (19° 06' 06" N y 99° 46' 03" W) (Figura 1). La zona presenta un intervalo altitudinal de 2,800 a 4,680 m (Körner y Paulsen, 2004). El 90% de la superficie es dominada por suelos andosoles, el resto por feozem, regosol, cambisol y litosol. Los tipos de clima dominantes son semifrío subhúmedo C(E)wig y frío E(T)Hwig, con temperatura media anual entre -2 a 7 °C. Las lluvias se presentan de mayo a octubre, siendo julio el mes más lluvioso. El rango de precipitación media anual oscila entre 200 a 1,800 mm. El APFF Nevado de Toluca es representativo de varios ecosistemas de clima templado, dominando géneros como *Pinus*, *Abies*, *Quercus* y *Cupressus*. Específicamente, los bosques de *P. hartwegii* constituyen el límite altitudinal de la vegetación arbórea (4,000 m), formando masas monoespecíficas y ecotonos con el pastizal de alta montaña; mientras que los de *A. religiosa* (especie nativa de México) son considerados como relictos, distribuidos a una altitudinal entre 2,800 y 3,400 m, formando un sólo piso vegetal por debajo del bosque de *P. hartwegii* (Jobbágy y Jackson, 2000).

El muestreo fue de tipo aleatorio-estratificado (Matteucci y Colma, 1982), estableciendo cuatro sitios de monitoreo en bosque de *P. hartwegii* y cuatro en el de

A. religiosa. En cada sitio se delimitó un cuadrante de 20×40 m (800 m²) partiendo de tres líneas perpendiculares a la pendiente de 40 m y tres paralelas a los 0, 20, y 40 m. Una línea más fue colocada paralela a la pendiente con distancia de 10 m hacia arriba y hacia abajo. Sobre la primera (0 m) y tercera línea (40 m) fueron seleccionados aleatoriamente dos puntos, uno hacia arriba y otro abajo de la pendiente, muestreando el árbol más cercano, mientras que en la segunda línea (20 m) se tomó un árbol en la parte central del sitio, resultando cinco árboles muestreados por sitio. Estos árboles presentaron condiciones de diámetro, altura y cobertura de copa similares. Paralelamente, se caracterizó cada sitio de muestreo, midiendo altura (clinómetro), diámetro normal (1.30 m de altura; cinta diamétrica), densidad y área basal del arbolado presente; así como exposición (brújula), pendiente (clinómetro) y altitud (GPS) del sitio (Cuadro 1).

Muestreo y análisis físico y químico del suelo

Bajo los árboles de *P. hartwegii* y *A. religiosa* se muestreo un círculo de aproximadamente 5 m de diámetro, dividido en cuatro cuadrantes (C1, C2, C3 y C4) y enumerados en sentido de las manecillas del reloj iniciando en la parte alta de la pendiente. Se tomaron dos muestras de suelo alternando los cuadrantes por árbol de la siguiente manera: en el primer árbol, se muestreo en los cuadrantes nones (C1 y C3), en el segundo árbol en los cuadrantes pares (C2 y C4) y así sucesivamente hasta llegar al árbol cinco. Las muestras de suelo fueron extraídas a 0-30 cm con una barrena de acero inoxidable (5 cm de diámetro). Posteriormente, una de las dos muestras de suelo recolectadas fue secada a temperatura ambiente durante una semana y posteriormente tamizada con una malla de 2 mm, en esta muestra se cuantificaron las variables para la caracterización física y química del suelo, tales como el contenido de humedad (%) en suelo a través del método gravimétrico; densidad aparente (Da) en muestras de suelo no alteradas por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986) y, contenido de COS (%) y MOS (%) con ayuda del método de óxido reducción (Walkley y Black, 1934).

Abundancia ectomicorrízica y caracterización morfológica de ectomicorrizas

Las raíces totales presentes en la segunda muestra de suelo fueron extraídas con ayuda de un tamiz de 1 mm y lavadas cuidadosamente para eliminar el exceso de partículas de suelo. De esta muestra total de raíces, se extrajo una submues-

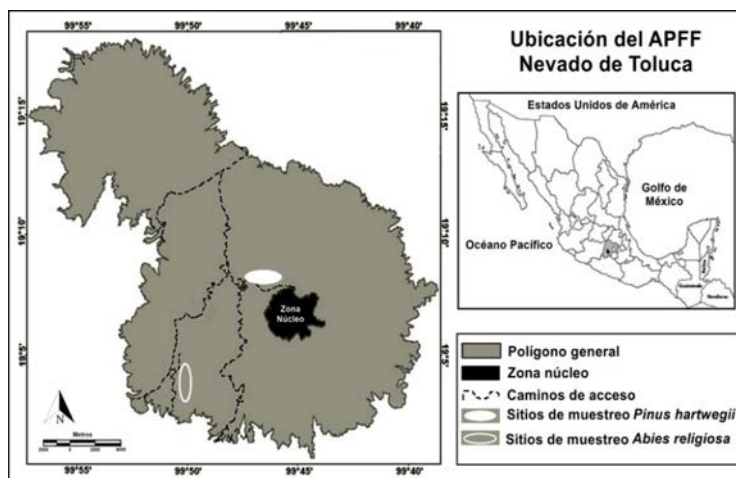


Figura 1. Ubicación geográfica del APFF Nevado de Toluca, mostrando los sitios de muestreo en bosques de *P. hartwegii* y *A. religiosa*.

Cuadro 1. Características fisiográficas y dasométricas de los sitios de estudio en el bosque de *P. hartwegii* y *A. religiosa* en el APFF Nevado de Toluca.

Variable	<i>Pinus hartwegii</i>				<i>Abies religiosa</i>			
	Sitio				Sitio			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Altitud (m)	3,827	3,855	3,924	4,005	3,215	3,805	3,241	3,280
Exposición	SO	SE	SE	E	SO	SO	S	S
Pendiente (°) ¹	12	12	11	12	14	18	14	35
Densidad ²	200	550	325	400	1600	488	700	275
Área basal ³	41	47	62	71	176	59	67	64
DAP (cm) ⁴	49 ⁵ (±3)	26 (±3)	44 (±4)	44 (±3)	31 (±2)	28 (±4)	27 (±3)	50 (±5)
Altura (m) ⁶	21 (±1)	15 (±1)	19 (±1)	18 (±1)	18 (±0)	13 (±1)	17 (±0)	26 (±2)

¹ Pendiente del terreno expresada en grados (°)

² Densidad arbórea expresada en árboles por hectárea (árboles ha⁻¹)

³ Área basal expresada en metros cuadrados por hectárea (m² ha⁻¹)

⁴ Diámetro normal del tronco medido a la altura de 1.30 metros, expresada en centímetros (cm)

⁵ Promedio y error estándar de la media entre paréntesis. Diferencias entre sitios se observan aplicando prueba estadística t student (p≤0.05)

⁶ Altura promedio arbórea expresada en metros (m)

tra (equivalente a una cuarta parte de la muestra total de raíces) para calcular la abundancia ECM (%), con el método de intersección de cuadrantes (Brundrett, 2009). La submuestra fue colocada sobre una caja de Petri (9 cm de diámetro) con una cuadrícula de 1 cm², y con un estereoscopio se contabilizó el número de intersecciones de raíces, considerando en forma separada las ectomicorrizadas (RECM) y las diferentes (RNECM). La abundancia ECM fue calculada a través de la siguiente fórmula:

$$ECM(\%) = \frac{RECM}{(RECM + RNECM)} \times 100$$

Posteriormente, las puntas de raíces ectomicorrizadas fueron separadas y preservadas en alcohol al 70%. Se realizó la identificación morfológica de los morfotipos ECM a través de metodologías estandarizadas (Agerer, 2001; DEEMY, 2004-2018). Para ello, se registraron el color, textura, tipo de ramificación, forma de la terminación de

la punta de la raíz ectomicorrizada. Posteriormente, a estas raíces se les realizaron cortes transversales y longitudinales con ayuda de un criotomo (Leiva Jung 1206), los cuales fueron observados bajo un microscopio óptico. Cuando estas observaciones lo permitieron, se les otorgo identidad (género o nombre científico) a los morfotipos ECM; por el contrario, a los morfotipos no identificados se les asigno una nomenclatura anteponiendo la letra "M" seguida de un número consecutivo.

Análisis estadístico

Los almacenes de COS y la abundancia ECM bajo cada especie forestal fueron comparados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, usando como factor principal la especie forestal y sitio de muestreo. Para comparar las medias entre especies forestales, se realizó una prueba de t (p≤0.05) para muestras independientes. Estos análisis se realizaron con ayuda del paquete estadístico JMP8 (Statistical Analysis System [SAS], 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenes de carbono orgánico en el suelo

Los resultados en los almacenes de COS a 30 cm de profundidad bajo individuos de *P. hartwegii* y *A. religiosa* mostraron un efecto no significativo (p=0.707) de la especie forestal. Derivado de esto, se puede decir que ambas especies arbóreas presentan la misma capacidad para almacenar COS bajo sus individuos (Cuadro 2) a la profundidad evaluada. Al respecto, pocos son los estudios que han registrado diferencias sobre el efecto de especies de coníferas sobre los almacenes de COS (Dijkstra y Fitzhugh, 2003; Hagen-Thorn *et al.*, 2004), resaltando que la especie forestal por sí sola podría no explicar las diferencias, ya que está influenciado por factores climáticos, procesos geológicos, la cobertura vegetal, disponibilidad de nutrientes e incluso, efectos por el cambio climático global, entre otros (Berger *et al.*, 2002; Cha *et al.*, 2019). Adicionalmente, estos estudios fueron realizados en un número relativamente

pequeño de parcelas o rodales forestales, por lo que es difícil llegar a una conclusión única. Diversos estudios han registrado diferencias entre especies forestales e incluso dentro de la misma especie para almacenar COS (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; Vela-Correa et al., 2011; Bolaños-González et al., 2017); los cuales dejan ver que las diferencias intra genéricas podrían generar resultados interespecíficos importantes, dependiendo de las especies forestales, si se considera que todos los estudios se han realizados bajo condiciones semejantes (por ejemplo, de profundidad). Es importante resaltar que en este estudio se obtuvieron valores de COS, tanto bajo *P. hartwegii* como *A. religiosa*, mayores a la de otros estudios (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; Vela-Correa et al., 2011); lo cual resalta que estas especies forestales tienen alta capacidad para almacenar C bajo sus individuos a través de las concentraciones de COS.

Los almacenes de COS dentro de cada especie (por sitio de muestreo) mostró una variación intra específica (dentro de la misma especie forestal), observando diferencias ($p \leq 0.05$) entre sitios de muestreo (Cuadro 3), tanto bajo *P. hartwegii* como *A. religiosa*. Los sitios 3 y 4 fueron los que registraron los valores mayores (almacenes de COS) y mostraron una relación directa con el contenido de humedad en suelo y el de MOS (Cuadro 3). Este comportamiento fue observado también bajo individuos de *A. religiosa*; por lo tanto, a mayor contenido de humedad y de MOS, mayor almacén de COS propiciado mayor estabilidad en los suelos (Hobbie et al., 2007).

Cuadro 2. COS, abundancia ECM, bajo individuos de *P. hartwegii* y *A. religiosa* en el APFF Nevado de Toluca.

Especie forestal	COS (Mg C ha ⁻¹)	Abundancia ECM (%)
<i>Pinus hartwegii</i>	219 (±14) a	26 (±3) b
<i>Abies religiosa</i>	211 (±16) a	43 (±2) a

Abundancia ectomicorrizógena y caracterización morfológica de ectomicorrizas

Los resultados mostraron que la especie forestal tiene efecto sobre la abundancia ECM, con diferencias significativas ($p=0.000$; Cuadro 2), *A. religiosa* presentó la mayor abundancia ECM (43.5 %) en comparación con *P. hartwegii* (26.4%). En cuanto a los morfotipos ECM, se observó que de las 141 raíces micorrizadas en total, 57 pertenecieron a individuos de *P. hartwegii* y 84 a *A. religiosa*; y de este total, 21 morfotipos ECM fueron identificados, de los cuales ocho fueron exclusivos para *P. hartwegii*, ocho para *A. religiosa* y cinco fueron comunes en ambas especies forestales. Es importante mencionar, que aun cuando las características morfológicas y anatómicas no permitieron la identificación de todos los morfotipos, los más representativos en *P. hartwegii* fueron: *Cenococcum geophilum*, *Russula* sp., "M1" y "M16", en *A. religiosa*: *Lactarius* sp., "M3" y "M4"; y los afines a ambas especies forestales: *Cenococcum geophilum*, "M1", "M4" y "M10" (Figura 2), representando 28% del total. La abundancia ECM bajo individuos de *A. religiosa* está directamente relacionada con las características ambientales y edafológicas presentes en este tipo de vegetación; es decir, con un dosel más cerrado y sombrío que el que se presenta bajo individuos de *P. hartwegii*, lo cual impide el

Cuadro 3. Variables fisicoquímicas del suelo (0-30 cm) bajo individuos de *P. hartwegii* y *A. religiosa* en el APFF Nevado de Toluca, México.

Sitio	Abundancia ECM (%)	COS (Mg C ha ⁻¹)	MOS ¹ (%)	Humedad del suelo (%)	Da ² (g cm ⁻³)
<i>Pinus hartwegii</i>					
1	17.40 (±3.66) ³	176.66 (±14.66)	14.40 (±1.10)	39.20 (±1.70)	0.71 (±0.03)
2	32.00 (±4.14)	188.01 (±19.77)	15.40 (±1.10)	42.30 (±3.50)	0.74 (±0.11)
3	19.00 (±4.52)	278.17 (±26.57)	22.80 (±2.20)	52.50 (±3.30)	0.52 (±0.04)
4	37.20 (±6.70)	236.80 (±25.15)	19.40 (±2.10)	44.50 (±1.60)	0.63 (±0.00)
<i>Abies religiosa</i>					
1	44.00 (±3.01)	140.27 (10.79)	11.50 (±0.90)	39.00 (±3.30)	0.68 (±0.05)
2	53.20 (±4.89)	172.67 (31.33)	14.20 (±2.60)	38.90 (±0.90)	0.75 (±0.11)
3	35.20 (±4.68)	281.92 (15.40)	23.10 (±1.30)	45.20 (±1.40)	0.65 (±0.04)
4	41.60 (±3.28)	252.13 (14.13)	20.70 (±1.20)	48.60 (±1.00)	0.77 (±0.11)

¹ Materia orgánica del suelo expresada en porcentaje (%)

² Densidad aparente expresada en gramos por centímetro cúbico (g cm⁻³)

³ Promedios por sitio de muestreo y error estándar de la media entre paréntesis. Diferencias entre sitios se observan aplicando la prueba t student ($p \leq 0.05$)

desarrollo de arbustos y estrato herbáceo conspicuo, fomentando el crecimiento de líquenes y musgos, permitiendo temperaturas más bajas y niveles de humedad más altos y, promoviendo mayor acumulación de MOS (Jobbágy y Jackson, 2000; Pérez-Suárez *et al.*, 2018), resultando en condiciones idóneas para mayor colonización de hongos ectomicorrizógenos (Arteaga-Martínez y Moreno-Zárate, 2006) a diferencia de los bosques de *P. hartwegii*.

Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden con lo observado en otros, donde colocan al bosque de *A. religiosa* con mayor biodiversidad y abundancia fúngica (Córdova *et al.*, 2014). Además del hospedero, otros factores que influyen en la diversidad de las ECM son las variables abióticas temperatura, humedad del aire, cambios en el pH del suelo, altitud y latitud, mayor incorporación de MOS al piso forestal y mayor Da del suelo, entre otras (Augusto *et al.*, 2002). Los individuos de *A. religiosa* muestreados se localizan a menor altitud (alrededor de

los 3,200 m) en comparación con a los de *P. hartwegii*, además de mostrar mayor Da del suelo (Cuadro 1) y mayor contenido de humedad del suelo, que son condiciones que favorecen la colonización de hongos ECM. Al respecto, se ha observado que las raíces ectomicorrizógenas y el tipo de hongos ECM de pinos disminuyen por variaciones en la temperatura y precipitación (Valdés *et al.*, 2006), particularmente a través de eventos climáticos extremos que conducen a sequías o anegamientos (Shi *et al.*, 2002).

La comparación de los resultados del presente estudio con otros realizados en México en condiciones *in situ* en bosques templados es muy limitada; resaltando el de Baeza-Guzmán *et al.* (2016), quienes caracterizaron morfológica y genéticamente las ECM asociadas a *P. hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, registrando 14 morfotipos de ECM; mientras Argüelles-Moyao *et al.* (2016) lo hizo en individuos de *A. religiosa* en San Pedro Atlapulco, Estado de México, identificaron 83

especies de hongos ECM asociados a individuos de *A. religiosa*. Lo anterior pone de manifiesto que aun cuando las asociaciones ECM han sido reconocidas como una de las principales vías de transferencia e incorporación de COS en bosques templados (Averill *et al.*, 2014), el conocimiento sobre la diversidad y función de estas asociaciones es limitado tanto en México, como en el resto del mundo. De ahí, que la información obtenida en el presente trabajo significa un primer paso para la subsecuente identificación taxonómica a nivel de especies de hongos ECM asociados a *P. hartwegii* y *A. religiosa* en el Nevado de Toluca y, determinar si existen ECM específicas a cada especie forestal.

CONCLUSIONES

La capacidad de *P. hartwegii* y *A. religiosa* para almacenar COS a 30 cm de profundidad, fue superior a los registrados en otros estudios. Ambas especies presentaron la misma capacidad para almacenar COS; sin embargo, podría haber diferencias

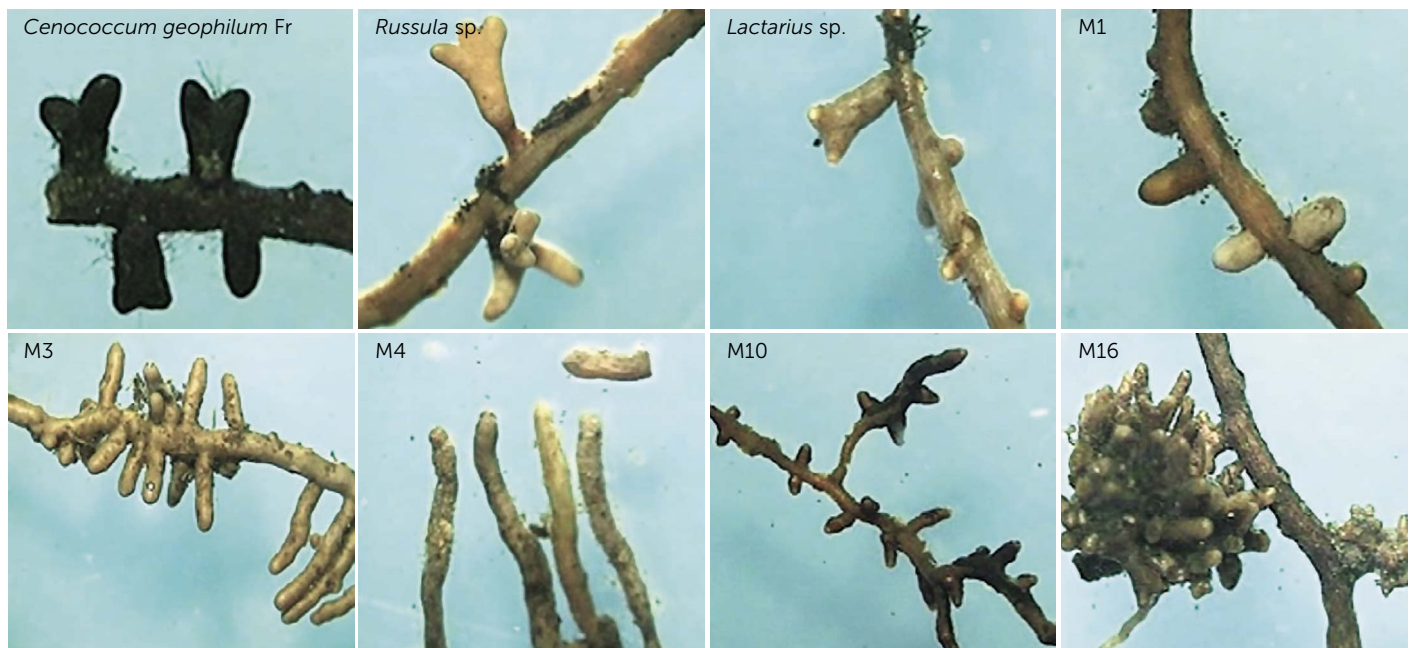


Figura 2. Morfotipos ECM representativos, a 30 cm de profundidad, en individuos de *P. hartwegii* y *A. religiosa* en el APFF Nevado de Toluca, México.

al considerar un mayor número de sitios e individuos muestreados, en conjunto con el efecto que en conjunto crean otros factores como los climáticos, físicos, químicos y biológicos del suelo, entre otros. En cuanto a la abundancia ECM bajo individuos de cada especie forestal fue diferente, con morfotipos diferentes entre ellas, pero en la misma cantidad; mientras los morfotipos ECM que fueron afines entre ambas especies forestales fue un 28% del total de morfotipos observados. Este trabajo contribuye al conocimiento como primer paso para identificar la influencia de la asociación hongo-árbol sobre la dinámica del COS en bosques templados.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue financiado parcialmente por los proyectos PROMEP/103.5/13/653.5 y CONACYT-Ciencia Básica No. 219696.

LITERATURA CITADA

- Agerer, R. (2001). Exploration types of ectomycorrhizae. *Mycorrhiza*, 11, 107–114.
- Argüelles-Moyao, A., Garibay-Orijel, R., Márquez-Valdelamar, L.M., & Arellano-Torres, E. (2016). *Clavulina-Membranomyces* is the most important lineage within the highly diverse ectomycorrhizal fungal community of *Abies religiosa*. *Mycorrhiza*, 27(1), 53–65.
- Arteaga-Martínez, B., & Moreno-Zárate, C. (2006). Los Hongos Comestibles Silvestres de Santa Catarina del Monte, Estado De México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(2), 125–131.
- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., & Rothe, A. (2002). Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3), 233–253.
- Averill, C., Turner, B. L., & Finzi, A.C. (2014). Mycorrhizal-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature*, 505, 543–545.
- Baeza-Guzmán, Y., Medel-Ortiz, R., & Garibay-Orijel, R. (2016). Caracterización morfológica y genética de los hongos ectomicorrízicos asociados a bosques de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 41–48.
- Berger, T.W., Neubauer, C., & Glatzel, G. (2002). Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 159(1-2), 3–14.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis* (pp. 363–365). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M.A., Paz-Pellat, F., & Ponce-Pulido, J.I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35, 73–86.
- Brundrett, M. (2009). Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 79(3), 473–495.
- Cha, J.Y., Cha, Y.K., & Oh, N.H. (2019). The Effects of Tree Species on Soil Organic Carbon Content in South Korea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*.
- Clasen, B.E., Silveira, A. de O., Baldoni, D.B., Montagner, D.F., Jacques, R.J.S., & Antonioli, Z.I. (2018). Characterization of Ectomycorrhizal species through molecular biology tools and morphotyping. *Scientia Agricola*, 75(3), 246–254.
- Córdova, C.O., Medel, R., Mata, G., Castillo, R., & Vázquez, R.J. (2014). Evaluación de hongos ectomicorrízicos del grupo de los basidiomicetos en la zona del Cofre de Perote, Veracruz. *Madera y bosques*, 20(1), 97–106.
- 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.
- Cruz-Ruiz, A., Cruz-Ruiz, E., Aguilera-Gómez, L., Norman-Mondragón, H., Franco-Maass, S., Nava-Bernal, G., Dendooven, L., & Reyes-Reyes, B. (2012). La biomasa microbiana en suelos de montaña con diferentes usos: un estudio de laboratorio. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 221–228.
- DEEMY (Determination of Ectomycorrhizae). (2004–2018). Characterization and Determination of Ectomycorrhizae. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dept. Biologie I–Systematische Mykologie. Consultado 20-01-2017 en <http://www.deemy.de>
- Dijkstra, F.A., & Fitzhugh, R.D. (2003). Aluminum solubility and mobility in relation to organic carbon in surface soils affected by six tree species of the northeastern United States. *Geoderma*, 114(1-2), 33–47.
- Hagen-Thorn, A., Callesen, I., Armolaitis, K., & Nihlgård, B. (2004). The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecology and Management*, 195(3), 373–384.
- Hobbie, S.E., Ogdahl, M., Chorover, J., Chadwick, O.A., Oleksyn, J., Zytkowski, R., & Reich, P.B. (2007). Tree Species Effects on Soil Organic Matter Dynamics: The Role of Soil Cation Composition. *Ecosystems*, 10(6), 999–1018.
- Jobbágy, E.G., & Jackson, R.B. (2000). Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology and Biogeography*, 9, 253–268.
- Körner, C., & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31, 713–732.
- Matteucci, S.D., & Colma, A. (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. Washington, DC, USA: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos-Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- Pérez-Moreno, J., & Read, D.J. (2004). Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. *Interciencia*, 29(5), 239–247.
- Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J.T., Huber-Sannwald, E., & Vargas-Hernández, J.J. (2009). Production and quality of senesced and green litterfall in a pine-oak forest in central-northwest Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 15, 1307–1315.
- Pérez-Suárez, M., Flores-Navarro, M.A., Martínez-Campos, Á.R., Estrada-Flores, J.G., & Chávez-Mejía, M.C. (2018). Impact of Extensive Grazing on Supporting and Regulating Ecosystem Services of Mountain Soils. *Mountain Research and Development*, 38(2), 125–134.

- Shi, L.B., Guttenberger, M., Kottke, I. (2002). The effect of drought on mycorrhizas of beech (*Fagus sylvatica* L.): changes in community structure, and the content of carbohydrates and nitrogen storage bodies of the fungi. *Mycorrhiza*, 12, 303–311.
- Statistical Analysis System (SAS Institute Inc.). (2008). JMP 8.0, Statistical discovery from SAS. Cary, NC, USA: Autor.
- Swift, R.S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858–871.
- Valdés, M., Asbjornsen, H., Gómez-Cárdenas, M., Juárez, M., & Vogt, K.A. (2006). Drought effects on fine-root and ectomycorrhizal-root biomass in managed *Pinus oaxacana* Mirov stands in Oaxaca, Mexico. *Mycorrhiza*, 16(2), 117–124.
- Vela-Correa, G., Blanco, J., & Rodríguez, M. (2011). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 77, 18–30.
- Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of the method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63, 251–263.

