



DOI: 10.29298/rmcf.v15i85.1462

Artículo de investigación

Diferencias en la fertilidad del suelo en cuatro plantaciones forestales comerciales de pino en Amanalco, Estado de México

Differences in soil fertility in four commercial pine forest plantations in *Amanalco*, State of Mexico

René García Martínez^{1*}, Felipe Neri Hernández Soto¹, Jacqueline
Emeterio Moreno¹, María Karina Colín Velázquez¹

Fecha de recepción/Reception date: 26 de enero de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 19 de abril de 2024.

¹Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores Valle de Bravo, División de Ingeniería Forestal. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: rene.gm@vbravo.tecnm.mx

*Corresponding autor; e-mail: rene.gm@vbravo.tecnm.mx

Resumen

En la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, México, la mayoría de las plantaciones se establecen en parcelas con pasado agrícola e historias de manejo del suelo que determinaron diferentes situaciones iniciales de suministro de nutrientes para los árboles. El objetivo del presente estudio fue evaluar la fertilidad y almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de cuatro plantaciones forestales comerciales de pino: (1) Rincón de Guadalupe (*Pinus ayacahuite*), (2) Loma del Rincón de Guadalupe (*Pinus pseudostrobus*), (3) San Miguel Tenextepec (*Pinus patula*) y (4) El Potrero (*Pinus patula*). En septiembre de 2022 se realizó un muestreo de suelo y se analizaron las siguientes variables: pH, MO, COS, N y P. El pH del suelo, en la plantación de Loma del Rincón de Guadalupe fue neutro y en las otras, moderadamente ácido. Las plantaciones mostraron un nivel bajo de MO, excepto en El Potrero donde se observó un nivel medio. La concentración de N fue mayor en las plantaciones de El Potrero y Loma del Rincón de Guadalupe y menor en San Miguel Tenextepec y Rincón de Guadalupe. El contenido de P fue el siguiente: El Potrero (11.9 %), Loma del Rincón de Guadalupe (8.2 %), San Miguel Tenextepec (1.4 %) y Rincón de Guadalupe (0.3 %). El almacenamiento de COS fue mayor en la plantación de El Potrero, seguido de San Miguel Tenextepec, Loma del Rincón de Guadalupe y Rincón de Guadalupe. Se concluye que las plantaciones forestales analizadas presentaron diferencias en la fertilidad y almacenamiento de C del suelo.

Palabras clave: Análisis químico de suelo, calidad del suelo, carbono orgánico del suelo, diagnóstico nutricional, plantaciones forestales, suelos forestales.

Abstract

In the *Amanalco-Valle de Bravo* basin, Mexico, most plantations are established on plots with an agricultural past and histories of soil management, which determined different initial situations of nutrient supply for the trees. The aim of the present study was to evaluate the fertility and organic carbon storage in the soil of four commercial pine forest plantations: (1) *Rincón de Guadalupe* (*Pinus ayacahuite*), (2) *Loma del Rincón de*

Guadalupe (Pinus pseudostrobus), (3) *San Miguel Tenextepec (Pinus patula)* and (4) *El Potrero (Pinus patula)*. In September 2022, soil sampling was carried out and the following variables were analyzed: pH, OM, SOC, N and P. The pH of the soil, in the *Loma del Rincón de Guadalupe* plantation, was neutral and in the others, moderately acidic. The plantations showed a low level of OM, except in *El Potrero* where a medium level was observed. The N concentration was higher in the plantations of *El Potrero* and *Loma del Rincón de Guadalupe* and lower in *San Miguel Tenextepec* and *Rincón de Guadalupe*. The P content was the following: *El Potrero* (11.9 %), *Loma del Rincón de Guadalupe* (8.2 %), *San Miguel Tenextepec* (1.4 %) and *Rincón de Guadalupe* (0.3 %). The SOC storage was highest in *El Potrero* plantation, followed by *San Miguel Tenextepec*, *Loma del Rincón de Guadalupe* and *Rincón de Guadalupe*. In conclusion, the forest plantations analyzed presented differences in soil fertility and C storage.

Key words: Chemical analysis of soil, soil quality, soil organic carbon, nutritional diagnosis, forest plantations, forest soils.

Introducción

Se define como plantación forestal comercial aquella establecida en terrenos con previo uso agropecuario o que han perdido su vegetación forestal natural (Conafor, 2017). Estos sistemas productivos proporcionan bienes y servicios (Zhang y Stanturf, 2008) como madera, productos no maderables, agua y aire limpio, control de la erosión del suelo, biodiversidad, estética, secuestro de carbono y control climático. Para el establecimiento y manejo de las plantaciones se realizan actividades de preparación del sitio, plantación, replantación, control de malezas, fertilización, control de plagas, podas, prevención de incendios y cosecha (García *et al.*, 2011).

El establecimiento y posterior desarrollo de la vegetación en una plantación forestal es influenciada por las condiciones del medio y en particular por las del suelo. En este sentido, la fertilidad es uno de los componentes de la calidad del sitio. Un suelo fértil proporciona a los árboles los elementos químicos esenciales en las cantidades y proporciones necesarias para su crecimiento (McGrath *et al.*, 2014).

Muchas plantaciones forestales se establecen en parcelas agrícolas abandonadas; por ello, es posible que el manejo previo ocasione el enriquecimiento de la fertilidad del suelo ligado a su uso pasado, esto puede resultar en un aumento de la productividad forestal, en comparación con la fertilidad edáfica natural. Sin embargo, es posible que

la producción de las generaciones forestales sucesivas disminuya, porque el suministro de nutrientes a los árboles hará que se retorne a su nivel de fertilidad natural (Ranger, 2018).

La determinación de la composición y las propiedades del suelo, como pH, textura, conductividad eléctrica y materia orgánica proporciona información básica para conocer el potencial productivo del suelo, ya que tales propiedades definen los procesos fisicoquímicos relacionados con la disponibilidad de nutrientes (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Las partículas minerales y orgánicas de la fase sólida funcionan como reservorios de K, P, Ca, Mg y Fe, y los componentes orgánicos contienen N, P y S (Taiz *et al.*, 2015), que después de ser mineralizados pueden ser aprovechados por las plantas.

La interacción de numerosas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo controlan la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la concentración de N, S, P y algunos micronutrientes está relacionada con la actividad microbiana del suelo (Havlin *et al.*, 2014). La materia orgánica del suelo (MOS) cumple funciones físicas, entre ellas mejorar la agregación, aireación y movimiento del agua, además de reducir la evaporación y conductividad térmica; así como químicas, tales como mejorar el intercambio iónico, amortiguamiento, meteorización pedoquímica, quelación y translocación de sustancias dentro del suelo (Osman, 2013). La MOS desempeña un papel crítico en el balance global de carbono, que controla en gran medida el cambio climático global (Weil y Brady, 2017).

La MOS se descompone continuamente y se forma humus, compuesto que contribuye a incrementar la calidad del suelo. Sin embargo, una mala gestión humana interrumpe el ciclo de devolución de residuos vegetales o animales al suelo, lo cual altera o reduce los efectos benéficos (Franzmeier *et al.*, 2016). El carbono orgánico, que depende de la MOS, es el almacén más grande de C en la Tierra (Doetterl *et al.*, 2016) junto a la reserva de C inorgánico del suelo (Lal, 2016).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la fertilidad edáfica y estimar la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo de cuatro plantaciones forestales comerciales (PFC) establecidas dentro de la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Los estudios previos sobre el estado de la fertilidad del suelo en plantaciones forestales son escasos en la región y no se conocen antecedentes en variables clave como pH, MO, C, N y P. Adicionalmente, no existe información en la literatura acerca del almacén de carbono orgánico del suelo (COS) de las plantaciones forestales comerciales, dentro de la cuenca, que permita valorar los servicios ambientales que brindan estos sistemas productivos. La hipótesis que se planteó fue que el almacén de C y la fertilidad en el suelo difieren entre las plantaciones debido a los antecedentes del uso del terreno y las características de cada plantación (edad, especie y manejo).

Materiales y Métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en la subcuenca hidrológica Amanalco-Valle de Bravo (392760 E y 2129224 N, Zona 14), al sur del Estado de México y que abarca una superficie total de 77 000 ha (Bonfil y Madrid, 2006). El clima predominante es templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 18.8 °C y precipitación de 1 000 mm anuales (Inegi, 2020a). El suelo es tipo Andosol (Inegi, 2020b) derivado de ceniza volcánica (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006). En la fracción fina dominan los materiales amorfos del tipo alófono y ferrihidrita que tienen alta

capacidad de retención de fosfatos (Alcalá de Jesús *et al.*, 2009). Las plantaciones experimentales se localizan en cuatro comunidades de Amanalco (Figura 1), en las siguientes coordenadas UTM Zona 14 N: (1) Rincón de Guadalupe (395569 E y 2130744 N), (2) Loma del Rincón de Guadalupe (395670 E y 2132770 N), (3) San Miguel Tenextepec (389992 E y 2133174 N) y (4) El Potrero (395422 E y 2135813 N). La altitud promedio en la zona es de 2 609 m.

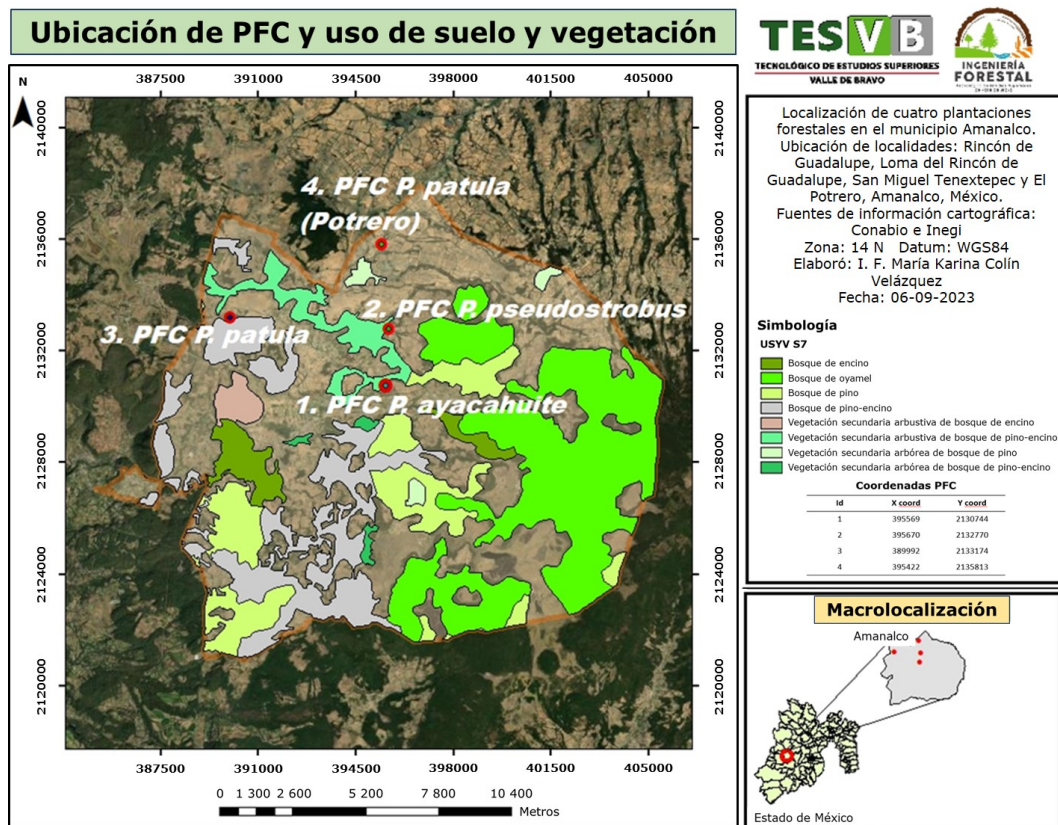


Figura 1. Ubicación de las plantaciones forestales comerciales en la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Plantaciones forestales comerciales

Se estudiaron cuatro plantaciones forestales comerciales de diferentes edades (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características generales de cuatro plantaciones de especies de pino evaluadas en la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Localidad	Especie	Edad (años)	Densidad en 2022 (árboles ha ⁻¹)	Área (ha ⁻¹)	Manejo previo a la plantación
Rincón de Guadalupe	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schlttdl.	20	719	1	Cultivo de maíz con aplicación de fertilizante fosfato diamónico
Loma del Rincón de Guadalupe	<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	8	980	4.2	Cultivo de haba y maíz y aplicación de composta de estiércol ovino
San Miguel Tenextepec	<i>P. patula</i> Schlttdl. & Cham.	19	625	0.5	Uso forestal
El Potrero	<i>P. patula</i> Schlttdl. & Cham.	6	1 000	1	Cultivo de maíz y avena con aplicación de urea y composta de estiércol ovino bovino

Caracterización del arbolado

En cada plantación se establecieron aleatoriamente 10 sitios de forma circular de 250 m², y en cada uno se midieron las características de los árboles presentes, con base en los métodos consignados por West (2015). El diámetro normal (cm) con forcípula *Haglöf*[®] *Mantax Blue* y la altura con un hipsómetro *Haglöf*[®] *Vertex Lasser Geo*.

Muestreo de suelo

Para caracterizar la fertilidad se realizó un muestreo de suelo en septiembre de 2022. En cada plantación se extrajeron 10 muestras a una profundidad de 0 a 30 cm, en los mismos sitios donde se midieron los árboles, con una barrena de acero inoxidable (*SPECTRUM*[®] modelo HA 6510) de 2 cm de diámetro (Acosta-Mireles *et al.*, 2009). Las muestras simples de cada plantación se mezclaron para conformar una muestra compuesta que se colocó en bolsas de plástico para su transporte al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo para su análisis. El suelo se secó a la sombra, a temperatura ambiente y se molió en un mortero de porcelana hasta pasar el tamiz 2 mm. Finalmente se almacenó en sobres de papel hasta el momento de realizar el análisis químico.

Análisis químico del suelo

El pH se midió en una suspensión agua-suelo, relación 2:1 (Weil y Brady, 2017), con un potenciómetro portátil *Hanna*[®] modelo *GroLine Combo*. La MOS y COS se cuantificaron con el método de *Walkley-Black* (Sleutel *et al.*, 2007). El N se determinó con la técnica de semimicro-*Kjeldahl* (Saéz-Plaza *et al.*, 2013) y el P con el método de Olsen *et al.* (1954).

La densidad aparente de la profundidad de 0 a 30 cm del suelo se determinó al relacionar la masa del suelo seco (secado en un horno ICB® 18 L, a 105 °C por 24 horas) y el volumen de la barrena con que se extrajo la muestra (Osman, 2013). El valor promedio de la densidad aparente fue 1.1 Mg m⁻³. Esta información se utilizó para calcular el almacenamiento de C en el suelo.

Los resultados de las determinaciones se compararon con los valores de referencia de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002) y datos de la literatura científica (Binkley y Fisher, 2013; Osman, 2013; Havlin *et al.*, 2014; Weil y Brady, 2017; Porta *et al.*, 2019).

El almacenamiento de carbono en el suelo se calculó con la siguiente fórmula (Acosta-Mireles *et al.*, 2009):

$$\text{Carbono (Mg ha}^{-1}\text{)} = A \times PS \times DA \times COS$$

Donde:

A= Área del terreno (10 000 m²)

PS = Profundidad de muestreo (0.3 m)

DA = Densidad aparente del suelo (1.1 Mg m⁻³)

COS = Concentración de Carbono Orgánico en el Suelo $\left(\frac{\text{Mg de C}}{100 \text{ Mg de suelo}}\right)$

Análisis estadístico

Para identificar diferencias entre las plantaciones, los datos de diámetro y altura de los árboles se sometieron a un análisis de varianza, el cual es un método de prueba de igualdad de tres o más medias poblacionales por medio del análisis de las

varianzas muestrales (Triola, 2018) y pruebas de comparación de medias con el método *Tukey* ($p \leq 0.05$), mediante el programa estadístico SAS versión 9.4[®] (SAS, 2013). Los datos de fertilidad química del suelo no se analizaron estadísticamente porque solo se obtuvo un valor a partir de la muestra compuesta por plantación forestal.

Resultados y Discusión

El diámetro y altura de los árboles presentaron diferencias según la especie y la edad de la plantación (Cuadro 2). *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltldl. (Rincón de Guadalupe) y *Pinus patula* Schltldl. & Cham. (San Miguel Tenextepec) registraron los valores más altos en diámetro y altura, por ser de mayor edad (Cuadro 1); sin embargo, estos últimos fueron 5.7 m más altos que los individuos de *P. ayacahuite*. Los ejemplares de *P. patula* (El Potrero) fueron 70 cm más altos que los de *P. pseudostrobus* Lindl. (Loma del Rincón de Guadalupe), a pesar de ser los primeros, más jóvenes. Ese comportamiento es común en estas especies (Romo *et al.*, 2014; González *et al.*, 2016).

Cuadro 2. Características de los árboles de cuatro plantaciones forestales en la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Localidad	Especie	Diámetro (cm)	Altura (m)
Rincón de Guadalupe	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schltldl.	18.6±2.8 a	15.9±1.6 b
Loma del Rincón de Guadalupe	<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	9.1±2.3 b	5.4±2.3 d

San Miguel Tenex-tepec	<i>P. patula</i> Schltdl. & Cham.	19.0±3.6 a	21.6±1.4 a
El Potrero	<i>P. patula</i> Schltdl. & Cham.	8.3±3.3 b	6.1±2.4 c

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales *Tukey* ($p \leq 0.05$).

Variables químicas del suelo

Los resultados de las variables de fertilidad del suelo se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Análisis químico del suelo de cuatro plantaciones forestales en la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Localidad	Especie	pH	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	MO (%)	COS (%)
Rincón de Guadalupe	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schltdl.	6.3	0.01	0.3	4.5	2.6
Loma del Rincón de Guadalupe	<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	6.7	0.21	8.2	5.1	3.0
San Miguel Tenex-tepec	<i>P. patula</i> Schltdl. & Cham.	6.2	0.04	1.4	6.0	3.5
El Potrero	<i>P. patula</i> Schltdl. & Cham.	6.3	0.30	11.9	6.2	3.6

pH

El pH del suelo se ubicó en el intervalo de 6.2 a 6.7. Los datos concuerdan con estudios realizados en la región, en los cuales el pH del suelo de un bosque templado fue de 6.2 (Prado *et al.*, 2007) y en una plantación de aguacate (*Persea americana* Mill.) de 6.4 (García-Martínez *et al.*, 2021). Esta variable afecta, principalmente, la disponibilidad de nutrientes para las plantas. De acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), el pH del suelo de la plantación de Loma del Rincón de Guadalupe fue neutro y en las otras fue moderadamente ácido. Por lo general, los suelos forestales presentan valores de pH de muy ácidos (pH 4.0) a ligeramente ácidos (pH 6.5) (Barnes *et al.*, 1998).

Los elementos en el suelo están disponibles en un intervalo de pH de 5.5-6.5 (Porta *et al.*, 2019). Por ello, los resultados de la presente investigación indican que no existen restricciones para la absorción de macro y micronutrientes en las plantaciones de Rincón de Guadalupe, San Miguel Tenextepac y El Potrero. Sin embargo, en la de Loma del Rincón de Guadalupe pueden existir limitaciones en la disponibilidad de micronutrientes, pero es necesario realizar estudios de diagnóstico nutrimental en los árboles para confirmarlo.

Materia Orgánica y Carbono Orgánico

El suelo de la plantación de El Potrero tuvo concentración media de MO. Esta parcela se utilizó anteriormente para el cultivo de maíz y avena con aplicación de composta de estiércol (ovino y bovino) y urea. El bajo contenido de MO en las

plantaciones del Rincón de Guadalupe y Lomas del Rincón de Guadalupe se relaciona con el cultivo previo de maíz con aplicación de abonos minerales y la siembra de haba y maíz con la adición de composta de estiércol bovino, respectivamente. El predio San Miguel Tenex-tepec siempre ha tenido uso forestal; por lo tanto, se infiere que el contenido de MO no ha experimentado cambios importantes. En general, su contenido en suelos agrícolas es de 2 % aproximadamente; mientras que, en los bosques los valores alcanzan hasta 5 % (Osman, 2013). La MO proviene de la deposición de biomasa vegetal aérea o de las raíces y es el sustrato que se necesita para el crecimiento y mantenimiento de las poblaciones microbianas edáficas (Barnes *et al.*, 1998).

El porcentaje de COS en los sitios experimentales, ordenado de mayor a menor, fue el siguiente: El Potrero (3.6 %), San Miguel Tenex-tepec (3.5 %), Loma del Rincón de Guadalupe (3.0 %) y Rincón de Guadalupe (2.6 %); valores inferiores a los registrados por Acosta-Mireles *et al.* (2009) en bosques mixtos de *Pinus patula* y *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham. en Tlaxcala, México, donde las concentraciones de COS se ubican en 7.92 % en el perfil de 0-20 cm y 5.28 % de 20 a 40 cm de profundidad. Prado *et al.* (2007) refirieron una disminución del COS desde 5.5 % en el perfil de 0-10 cm hasta 1.3 % en la capa de 15-37 cm. Además, después de los histosoles, los andosoles acumulan las mayores concentraciones de C, por lo cual tienen un alto potencial para secuestrar C (Galicia *et al.*, 2016), y la fertilidad del suelo, generalmente, está dada como una función del contenido de COS (Szalai *et al.*, 2016).

N

El N es el nutriente mineral que las plantas requieren en mayor cantidad; por ello, en suelos deficientes de ese elemento, los árboles no presentan un buen desarrollo

(Taiz *et al.*, 2015). El intervalo del N-Kjeldahl en los suelos de las parcelas experimentales fue de 0.01 a 0.30 %. Según Havlin *et al.* (2014), el contenido total de N en suelos minerales varía de 0.02 a 0.5 % y está correlacionado positivamente con el contenido de MO y negativamente con la profundidad. En las plantaciones de Loma del Rincón de Guadalupe y El Potrero, el mayor porcentaje de N se debió a que el productor aplicó fertilizantes nitrogenados en los dos años previos a la evaluación. Las plantaciones del Rincón de Guadalupe y San Miguel Tenex-tepec son más antiguas y no recibieron aplicaciones de fertilizantes después de su establecimiento.

P

El contenido de P-Olsen en el suelo es un indicador aproximado de su disponibilidad; en las plantaciones Rincón de Guadalupe y San Miguel Tenex-tepec fue bajo (0.3 y 1.4 mg kg⁻¹, respectivamente), pero medio en la Loma del Rincón de Guadalupe (8.2 mg kg⁻¹) y alto en El Potrero (11.9 mg kg⁻¹). En esta última se realizaron aplicaciones de fertilizantes fosfatados al suelo en los primeros cuatro años, lo cual explica los altos valores de P-Olsen. En los suelos de regiones húmedas y tropicales el contenido de P extraíble es menor, comparado con el de zonas áridas y semiáridas; para asegurar la disponibilidad de este elemento para las plantas es conveniente aplicar fertilizantes minerales u orgánicos (Havlin *et al.*, 2014).

En el presente caso, en el cual los suelos son andosoles, se espera que la disponibilidad de P sea relativamente baja, aunque no se midió, se espera que las raíces de los pinos tengan asociaciones con hongos ectomicorrícicos, como los citados

por Garibay-Orijel *et al.* (2013) en un estudio realizado en la Faja Volcánica Transmexicana.

Almacenamiento de Carbono en el Suelo

El almacén de C del suelo es importante en la mitigación del cambio climático. El suelo tiene la capacidad de almacenar más C que la biomasa aérea, pero para que ocurra, se requiere del suministro constante de material vegetal (Ontl y Schulte, 2012). Los almacenes de COS de los suelos se muestran en la Figura 2. El suelo de la plantación de El Potrero almacenó 38.5 % más C que en Rincón de Guadalupe, 15.4 % más que en Loma del Rincón de Guadalupe y 3 % más que en San Miguel Tenex-tepec. La menor cantidad de C almacenado en las plantaciones de Rincón de Guadalupe y Loma del Rincón de Guadalupe se debe a su previa vocación agrícola. En la plantación de El Potrero, aunque la parcela fue de vocación agrícola en el manejo de la plantación se hicieron aportes de fertilizantes orgánicos (estiércol), lo cual explica el mayor almacenamiento de carbono. Finalmente, en San Miguel Tenex-tepec el terreno conservó su vocación forestal, con ello se mantuvo un alto nivel de C en el suelo.

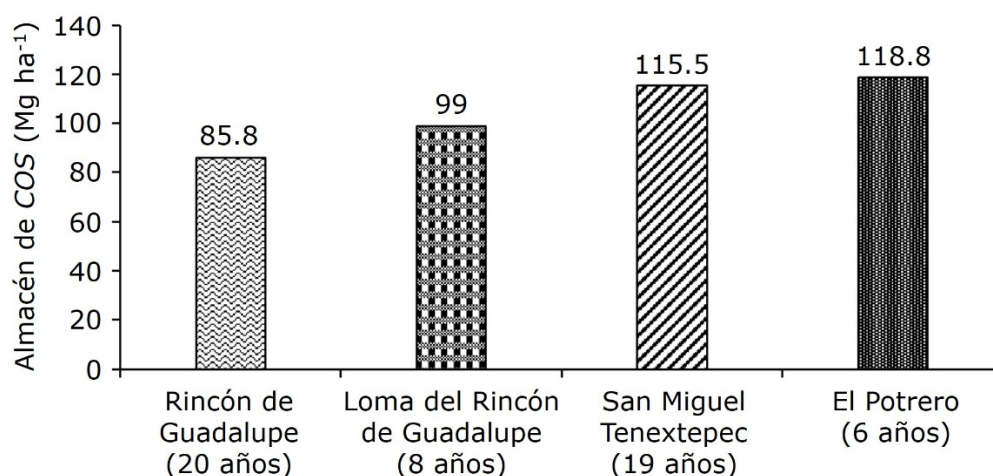


Figura 2. Almacén de carbono en el suelo (0-30 cm) en cuatro plantaciones forestales comerciales en la cuenca Amanalco-Valle de Bravo, Estado de México.

Pérez-Ramírez *et al.* (2013) describieron que el promedio de COS en bosques conservados de pino-encino es de 103 Mg ha⁻¹, mientras que los aprovechados y perturbados tienen 39 y 13 Mg ha⁻¹. En el área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México, Cano-Flores *et al.* (2020) midieron el almacenamiento de COS en bosques de *Pinus-Quercus* y *Quercus-Pinus*, lo que resultó ser 59.8 Mg ha⁻¹ y 98.3 Mg ha⁻¹, respectivamente. En general, la cantidad de C acumulado depende del grado de erosión del suelo (Li *et al.*, 2019).

Conclusiones

El almacenamiento de C y la fertilidad en el suelo son distintos entre las plantaciones forestales evaluadas debido a los antecedentes y características de

cada una (edad, especie y manejo). Las diferencias en la fertilidad y en las concentraciones de MO, N y P en los suelos estudiados están relacionadas con la aplicación de fertilizantes minerales y orgánicos como parte del manejo previo a su establecimiento. Los resultados aportan información sobre las características del suelo de estos sistemas productivos y apoyan el diseño de programas para el manejo de la fertilidad en plantaciones forestales de la región, ya que existen vacíos de conocimiento sobre el manejo de los suelos previo a la instalación de plantaciones forestales.

Agradecimientos

Los autores desean dejar de manifiesto su reconocimiento a los productores dueños de las plantaciones forestales por brindar todas las facilidades y el apoyo para la obtención de datos de campo e información sobre el manejo de las plantaciones. A la Academia de la División de Ingeniería Forestal y el Departamento de Investigación en Ciencia y Tecnología del Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo por el apoyo para el desarrollo del proyecto.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución por autor

René García-Martínez: planeación del trabajo de campo, revisión de datos de campo, análisis químico del suelo e interpretación de resultados y redacción del manuscrito;

Felipe Neri Hernández Soto: revisión de datos de campo y manuscrito; Jacqueline Emeterio Moreno: desarrollo de la investigación, interpretación de resultados y redacción del manuscrito; María Karina Colín Velázquez: desarrollo de la investigación, interpretación de resultados y redacción del manuscrito.

Referencias

- Acosta-Mireles, M., F. Carillo-Anzures y M. Díaz L. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. Terra Latinoamericana 27(2):105-114.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311834003>. (26 de enero de 2024).
- Alcalá de Jesús, M., C. Hidalgo M. y M. del C. Gutiérrez C. 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. Terra Latinoamericana 27(4):275-286.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313040001>. (26 de enero de 2024).
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón (Coord.). 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill. Madrid, Md, España. 651 p.
- Barnes, B. V., D. R. Zak, S. R. Denton and S. H. Spurr. 1998. Forest ecology. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, United States of America. 800 p.
- Binkley, D. and R. F. Fisher. 2013. Ecology and management of forest soils. Wiley-Blackwell. Oxford, OX, United Kingdom. 362 p.
- Bonfil, H. y L. Madrid. 2006. El pago por servicios ambientales en la Cuenca de Amanalco-Valle de Bravo. Gaceta Ecológica (80):63-79.
<https://www.redalyc.org/pdf/539/53908005.pdf>. (18 de julio de 2024).
- Cano-Flores, O., G. Vela-Correa, O. A. Acevedo-Sandoval y M. Á. Valera-Pérez. 2020. Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México. Terra Latinoamericana 38(4):895-905. Doi: 10.28940/terra.v38i4.757.

- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2017. *Plantaciones forestales comerciales*. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/plantaciones-forestales-comerciales-27940>. (26 de enero de 2024).
- Doetterl, S., A. A. Berhe, E. Nadeu, Z. Wang, M. Sommer and P. Fiener. 2016. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews* 154:102-122. Doi: 10.1016/j.earscirev.2015.12.005.
- Franzmeier, D. P., W. W. McFee, J. G. Graveel and H. Kohnke. 2016. *Soil science simplified*. Waveland Press. Long Grove, Il, United States of America. 198 p.
- Galicia, L., A. M. Gamboa C., S. Cram, B. Chávez V., ... y C. Siebe. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34(1):1-29. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/73/79>. (13 de febrero de 2024).
- García C., X., B. Rodríguez S. y J. Islas G. 2011. Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7):7-26. Doi: 10.29298/rmcf.v2i7.562.
- García-Martínez, R., J. I. Cortés-Flores, A. López-Jiménez, J. D. Etchevers-Barra, J. A. Carrillo-Salazar y C. Saucedo-Veloz. 2021. Rendimiento, calidad y comportamiento poscosecha de frutos de aguacate 'Hass' de huertos con diferente fertilización. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(2):205-218. Doi: 10.29312/remexca.v12i2.2232.
- Garibay-Orijel, R., E. Morales-Marañón, M. Domínguez-Gutiérrez y A. Flores-García. 2013. Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84(1):153-169. Doi: 10.7550/rmb.29839.
- González M., M., F. Cruz C., G. Quiñonez B., B. Vargas L. y J. A. Nájera L. 2016. Modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el

estado de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37):7-20. Doi: 10.29298/rmcf.v7i37.48.

Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson and J. D. Beaton. 2014. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient*. Pearson. Noida, UP, India. 528 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2020a. Carta climática (Clave E14). <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>. (26 de enero de 2024).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2020b. Carta edafológica (Clave E14). <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>. (26 de enero de 2024).

Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5(4):212-222. Doi: 10.1002/fes3.96.

Li, T., H. Zhang, X. Wang, S. Cheng, ... and W. Yuan. 2019. Soil erosion affects variations of soil organic carbon and soil respiration along a slope in Northeast China. *Ecological Processes* 8:1-10. Doi: 10.1186/s13717-019-0184-6.

McGrath, J. M., J. Spargo and C. J. Penn. 2014. Soil Fertility and Plant Nutrition. *In: N. Van Alfen (Edit.)*. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Elsevier. Davis, CA, United States of America. pp. 166-184.

Meza-Pérez, E. y D. Geissert-Kientz. 2006. Estabilidad de estructura en Andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana* 24(2):163-170. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108002.pdf>. (26 de enero de 2024).

Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. Washington, DC, United States of America. 19 p.

Ontl, T. A. and L. A. Schulte. 2012. *Soil Carbon Storage*. Nature Education Knowledge. <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-carbon-storage-84223790>. (26 de enero de 2024).

Osman, K. T. 2013. *Soils. Principles, properties and management*. Springer Dordrecht. Dordrecht, ZH, The Netherlands. 274 p.

- Pérez-Ramírez, S., M. I. Ramírez, P. F. Jaramillo-López y F. Bautista. 2013. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(1):157-173. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.042.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y R. M. Poch C. 2019. *Edafología. Uso y protección de suelos*. Mundiprensa. Madrid, Md, España. 624 p.
- Prado, B., C. Duwig, C. Hidalgo, D. Gómez, ... and J. D. Etchevers. 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma* 139(3-4):300-313. Doi: 10.1016/j.geoderma.2007.02.008.
- Ranger, J. 2018. Forest soils: Characteristics and sustainability. *In*: Berthelin, J., C. Valentin and J. C. Munch (Edits.). *Soils as a key component of the critical zone 1. Functions and Services*. Wiley. Hoboken, NJ, United States of America. pp. 163-186.
- Romo G., D., H. Navarro G., H. M. De los Santos P., O. Hernández R. y J. López U. 2014. Crecimiento maderable y biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en Zacualtipan, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(23):78-91. Doi: 10.29298/rmcf.v5i23.343.
- Sáez-Plaza, P., M. J. Navas, S. Wybraniec, T. Michalowski and A. García A. 2013. An overview of the Kjeldahl method of Nitrogen determination. Part II. Sample preparation, working scale, instrumental finish, and quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 43(4):224-272. Doi: 10.1080/10408347.2012.751787.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, 31 de diciembre de 2002. México, D. F., México. 73 p. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. (26 de enero de 2024).
- Sleutel, S., S. De Neve, B. Singier and G. Hofman. 2007. Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon

content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38(19-20):2647-2657. Doi: 10.1080/00103620701662877.

Statistical Analysis System (SAS). 2013. *Base SAS® 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures*. SAS Institute Inc. Cary, NC, United States of America. 558 p.

Szalai, Z., J. Szabó, J. Kovacs, E. Mészáros, ... and G. Jakab. 2016. Redistribution of soil organic carbon triggered by erosion at field scale under subhumid climate, Hungary. *Pedosphere* 26(5):652-665. Doi: 10.1016/S1002-0160(15)60074-1.

Taiz, L., E. Zeiger, I. M. Møller and A. S. Murphy (Edit.). 2015. *Plant physiology and development*. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts, United States of America. 756 p.

Triola, M. F. 2018. *Estadística*. Pearson. Álvaro Obregón, Cd. Mx., México. 764 p.

Weil, R. R. and N. C. Brady. 2017. *The nature and properties of soils*. Pearson Education, Inc. New York, NY, United States of America. 1104 p.

West, P. W. 2015. *Tree and forest measurement*. Springer. London, Lnd, England. 214 p.

Zhang, D. y J. Stanturf. 2008. Forest plantations. *In: Jørgensen, S. E. and B. D. Fath (Edits). Encyclopedia of Ecology*. Elsevier Science. Oxford, OX, United Kingdom. pp. 1673-1680.

<https://webhome.auburn.edu/~zhangd1/Bookchapter/Encyclopedia%20of%20Ecology%20forest%20plantations.pdf>. (26 de enero de 2024).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.