

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ALMACÉN DE CARBONO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES COMO ESTRATEGÍA PARA LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

**CARBON STORAGE IN FOREST PLANTATIONS AS A
STRATEGY FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION**

René García Martínez

Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo - México

Luis Alberto León Bañuelos

Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo - México

Juan Carlos Montoya Jiménez

Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo - México

Maricruz Tenorio Calixto

Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo - México

Almacén de carbono en las plantaciones forestales como estrategia para la mitigación del cambio climático

René García Martínez¹

rene.gm@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8756-2078>

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

Luis Alberto León Bañuelos

luis.lb@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0332-6228>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo- División de Ingeniería en Sistemas Computacionales. México

Juan Carlos Montoya Jiménez

juan.mj@vbravo.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1828-952X>

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

Maricruz Tenorio Calixto

l202021024@vbravo.tecnm

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

RESUMEN

El cambio climático representa un desafío global con efectos adversos en los ecosistemas y las sociedades. Se ha pronosticado un incremento sostenido en la temperatura media mundial con una tasa de aumento de 0.2 °C por década. La concentración de CO₂ en la atmósfera también ha mostrado una tendencia ascendente, registrando 426.65 ppm en enero de 2025. En México, el sector energético es el principal emisor de carbono (64%), seguido por la producción agrícola (10%), los procesos industriales (8%) y el manejo de residuos (7%). Ante este panorama, las estrategias de mitigación han cobrado relevancia, destacando el manejo forestal como una herramienta clave para la captura y almacenamiento de carbono. En este contexto, el presente estudio analiza la contribución de las plantaciones forestales comerciales en México a la mitigación del cambio climático, mediante una revisión sistemática de la literatura en bases de datos científicas. Los resultados indican que México cuenta con 270 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales, con mayor presencia en Tabasco, Veracruz, Campeche, Chiapas y Puebla. Estas plantaciones desempeñan un papel crucial en la reducción de gases de efecto invernadero porque capturan el CO₂ presente en la atmósfera y los fijan en sus estructuras leñosas, además la incorporación constante de materia orgánica en el suelo incrementa el almacén de carbono orgánico. En conclusión las plantaciones forestales representan una alternativa viable para fortalecer la resiliencia ambiental y contribuir a los compromisos internacionales en materia de cambio climático.

Palabras clave: plantaciones forestales comerciales, captura y almacén de carbono, calentamiento global, manejo forestal, economía circular

¹ Autor Principal

Correspondencia: rene.gm@vbravo.tecnm.mx

Carbon storage in forest plantations as a strategy for climate change mitigation

ABSTRACT

Climate change represents a global challenge with adverse effects on ecosystems and societies. A sustained increase in the global average temperature has been forecasted, with a rising rate of 0.2°C per decade. Atmospheric CO₂ concentrations have also shown an upward trend, reaching 426.65 ppm in January 2025. In Mexico, the energy sector is the main carbon emitter (64%), followed by agricultural production (10%), industrial processes (8%), and waste management (7%). Given this scenario, mitigation strategies have gained relevance, with forest management emerging as a key tool for carbon capture and storage. In this context, the present study analyzes the contribution of commercial forest plantations in Mexico to climate change mitigation through a systematic literature review in scientific databases. The results indicate that Mexico has 270,000 hectares of commercial forest plantations, primarily located in Tabasco, Veracruz, Campeche, Chiapas, and Puebla. These plantations play a crucial role in reducing greenhouse gas emissions by capturing atmospheric CO₂ and storing it in their woody structures. Additionally, the constant incorporation of organic matter into the soil enhances the storage of organic carbon. In conclusion, forest plantations represent a viable alternative to strengthening environmental resilience and contributing to international commitments on climate change mitigation.

Keywords: commercial forest plantations, carbon capture and storage, global warming, forest management, circular economy

Artículo recibido 10 noviembre 2024

Aceptado para publicación: 22 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

El cambio climático contribuye a las emergencias humanitarias causadas por olas de calor, incendios forestales, inundaciones, tormentas tropicales y huracanes, y cuyas magnitud, frecuencia e intensidad van en aumento (OMS, 2021). La década de 2011-2020 se reconoció como la más cálida jamás registrada, con una temperatura media mundial en 2019 superior en 1,1 °C a los niveles preindustriales, esto implica un incremento a una tasa de 0,2 °C por década (Comisión Europea, 2025). En enero de 2025 el dato registrado de la concentración de CO₂ en la atmósfera fue 426.65 ppm (NOAA, 2025). En México las principales emisiones carbono se reparten en los siguientes sectores (Gobierno de México, 2015): 64 % en combustibles fósiles, 10 % en sistemas de producción agrícola, 8 % en procesos industriales y 7 % por el manejo de residuos.

Entre las estrategias para mitigar los efectos de cambio climático se encuentran aquellas asociadas al manejo de los bosques. Las prácticas de ordenación forestal que pueden limitar la tasa de aumento de CO₂ en la atmósfera pueden agruparse en tres categorías (IPCC, 1996): i) ordenación para la conservación de carbono; ii) ordenación para el secuestro y almacenamiento de carbono, y iii) ordenación para la sustitución de carbono. En este sentido México cuenta con 270 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales y los estados líderes son Tabasco, Veracruz, Campeche, Chiapas y Puebla (CONAFOR, 2014). Estos sistemas de producción se han convertido en una herramienta clave para mitigar los efectos del cambio climático.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue analizar la importancia de las plantaciones forestales en la mitigación del cambio climático por su potencial para la captura y almacén de carbono.

METODOLOGÍA

La metodología se basó en un esquema de revisión bibliográfica. El primer paso fue definir el alcance y los objetivos de la revisión centrado en el tema del cambio climático y, las plantaciones forestales y su papel en la mitigación de este fenómeno.

Una vez establecido el alcance, se procedió a la búsqueda sistemática de literatura. Este paso implicó la identificación y recopilación de fuentes científicas relevantes a través de bases de datos como Web of Science, Scopus, Google Scholar, Science Direct, así como diversas revistas científicas relacionadas con la temática. Se revisaron los títulos y resúmenes de los artículos recopilados para identificar

aquellos que fueron más relevantes. Después de seleccionar las fuentes se procedió al análisis y síntesis de la información, para identificar patrones y tendencias en los estudios revisados, determinando cuáles son los enfoques predominantes y los hallazgos más relevantes. En total se utilizaron 56 documentos entre libros, informes técnicos, revistas científicas y páginas de internet de instituciones nacionales e internacionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fundamentos de calentamiento global

La luz solar es la principal fuente de energía que llega a la atmósfera, por medio de ondas electromagnéticas. Estas ondas presentan un ancho de banda (espectro electromagnético) que difieren en la longitud de onda y el contenido de energía (Miller, 2000), de tal manera que a menor longitud de onda le corresponde mayor energía (Salisbury y Ross, 1992).

La luz es una onda electromagnética transversal, donde los campos magnético y eléctrico oscilan perpendicularmente (a 90° una con respecto a la otra) en la dirección de propagación de la onda (Taiz y Zeiger, 2010). De la radiación solar, aproximadamente el 9% corresponde al ultravioleta ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$), el 49% al visible ($0.4 < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$) y el 42% al infrarrojo ($\lambda > 0.8 \mu\text{m}$) (Casas-Castillo y Alarcón-Jordán, 1999).

La atmósfera

La atmósfera de la tierra está formada por 5 capas y partiendo de la superficie terrestre se encuentran la troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera y termósfera (Maunder, 2007). La atmósfera de la tierra en sus capas bajas está compuesta de una mezcla de gases (el aire seco), agua en sus tres fases y aerosoles (partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire) (Lazaridis, 2011). De acuerdo con Saha (2008) en los primeros 25 km de altitud con respecto a la superficie terrestre, la proporción, en volumen, de los gases que forman la atmósfera es la siguiente; nitrógeno (N_2) 78.09 %, oxígeno (O_2) 20.95 %, argón (Ar) 1.3 %, dióxido de carbono (CO_2) 0.03 %, otros gases (neón, helio, kriptón, hidrógeno, xenón, ozono, radón) conforman el 0.37 restante.

Absorción de la radiación solar en la atmósfera

Los gases de la atmósfera absorben la radiación de distintas longitudes de onda y a distintas altitudes. En la franja de longitudes de onda pequeña participan el ozono (O_3), O_2 , nitrógeno (N_2 , N) y óxido de



Nitrógeno (NO) y para las longitudes onda más largas participan el O₃, vapor de agua, CO₂ y metano (CH₄) (Casas-Castillo y Alarcón-Jordán, 1999). Particularmente, la radiación ultravioleta es absorbida en la parte más alta de la atmósfera por el O₂ y el N₂ (Visconti, 2016) y las ondas largas de radiación infrarroja, provenientes de la atmósfera y de la superficie terrestre, son absorbidas por el vapor de agua (H₂O), CH₄, CO₂ y O₃ (Sportisse, 2010).

El efecto invernadero y el calentamiento global

De acuerdo con (Miller, 2000) el efecto invernadero es un fenómeno que ocurre cuando la energía solar penetra la atmósfera de la tierra y calienta la superficie terrestre, esta irradia calor (longitud de onda infrarroja) hacia la atmósfera, parte de ese calor fluye al espacio y el resto interactúa con los gases invernadero y el vapor de agua, donde se absorbe e irradia de nuevo hacia la superficie terrestre, esto ocasiona que se almacene una mayor cantidad de calor. Por su parte Ponater *et al.* (2012) mencionan que en el planeta tierra, parte de la radiación térmica emitida por la superficie es absorbida y re-emitida por la atmósfera, incrementando la ganancia de energía de la superficie e induciendo un incremento de temperatura, este mecanismo es llamado efecto invernadero. Este es un fenómeno natural que ocurre en el planeta, pero cuando existe una acumulación excesiva de los gases de efecto invernadero (GEI) la temperatura de la superficie terrestre se incrementa de manera anormal lo que conlleva a calentamiento global (McKinney *et al.*, 2007). En efecto, el calentamiento global se refiere a un incremento de la temperatura promedio de la superficie terrestre y los modelos climáticos proyectan que al ritmo actual del crecimiento poblacional y con las emisiones de GEI la temperatura de la superficie terrestre puede incrementarse en un rango de 1.6 a 5.8°C al final de este siglo (Prasad *et al.*, 2017). Otros modelos climáticos, como el ESMs (Earth System Models, proyectan un incremento de temperatura de 1.0 a 3.7 °C, este incremento depende de las emisiones futuras de GEI (Anderson *et al.*, 2016).

El CO₂

Actualmente la liberación de carbono (CO₂) a la atmósfera, incrementada por los seres humanos, es 10 veces más rápida que en cualquier momento de los últimos 66 millones de años (Zeebe *et al.*, 2016). La concentración de CO₂ en la atmósfera se incrementa año con año, en función de la quema combustibles fósiles, con lo cual se intensifica el efecto invernadero natural y calienta el planeta (Anderson *et al.*, 2016). En la atmósfera el CO₂ se mide como una fracción molar (número de moléculas de CO₂ dividido



entre el número de moléculas presentes en el aire, incluyendo al mismo CO₂) y los datos del indican un incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera de 393 ppm en 2012 a 400 ppm en 2016 (Earth System Research Laboratory, 2016).

Estimación del carbono en la superficie terrestre

En la superficie terrestre el carbono se estima en los ecosistemas terrestres y ecosistemas acuáticos. El carbono total en ecosistemas terrestres es de aproximadamente 3 170 GT (Ontl y Schulte, 2012). Para conocer la cantidad del carbono presente en la vegetación se ha recurrido a sistemas de percepción remotos (Gómez *et al.*, 2012) cuantificación de la biomasa sobre y bajo suelo (materia orgánica en tejidos vivos y muertos) mediante inventarios por muestreo (Keith *et al.*, 2014) y el uso de modelos alométricos (Rojas-García *et al.*, 2015), sistemas automáticos de medición de CO₂ como la red EUROFLUX (Valentini *et al.*, 2000) y recientemente el uso de la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) ha permitido la estimación de la biomasa de la vegetación de manera exitosa (Laurin *et al.*, 2016).

Carbono en el suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) es el almacén más grande de carbono orgánico en la tierra (Doetterl *et al.*, 2016) y representa aproximadamente el 80 % (2500 GT) del total (Lal, 2004). En el suelo, el nivel del COS está directamente relacionado con la cantidad de materia orgánica (Ontl y Schulte, 2012) y la fertilidad del suelo generalmente esta dado como una función del contenido de COS (Szalai *et al.*, 2016). Los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera ocurren cuando los constituyentes inorgánicos de suelo sufren desgaste, o el COS es sintetizado o mineralizado vía rutas biológicas (Ni *et al.*, 2012). En este sentido la erosión del suelo es un fenómeno que impacta directamente en la pérdida de COS y de acuerdo con (Blanco y Lal, 2010) la pérdida de COS implica un incremento de CO₂ y CH₄ en la atmósfera.

Importancia de los árboles y como fijadores de CO₂

Las plantas utilizan CO₂ y liberan O₂ durante el proceso de la fotosíntesis, a diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les considera como reservas naturales de carbono (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), el movimiento del CO₂, desde la atmósfera hasta las reservas, ocurre porque la

vegetación en crecimiento lo absorbe (Keith *et al.*, 2014). En la ruta fotosintética clásica de las plantas C3, la fijación primaria de CO₂ es catalizada por la enzima ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco) formando el compuesto de tres carbonos (3-fosfoglicerato) (Paulus *et al.*, 2013).

En una población vegetal, la capacidad para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000). En estudios realizados en sistemas agroforestales de café en Veracruz se han estimado capacidades de almacén del orden de 102 Mg C ha⁻¹, aun así, un bosque primario en esa zona almacena hasta 332 Mg C ha⁻¹ (Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012).

Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales son sistemas productivos orientados a la obtención de madera, hule, resina, semillas, entre otros productos. Borges *et al.* (2014), se refieren a las plantaciones como áreas dedicadas al cultivo de árboles que terminan siendo recolectados o tratados para satisfacer las necesidades de consumo humano directo o indirecto necesidades. 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. Estos sistemas productivos requieren insumos y manejo intensivo, más similar a la agricultura que al manejo tradicional de bosques de especies nativas; por ejemplo, preparación intensiva del sitio, control de malezas, uso de fertilizantes, control de plagas, uso frecuente de máquinas pesadas para la cosecha y siembra con impactos asociados en los suelos (Boyle *et al.*, 2016).

Las plantaciones forestales comerciales son cultivos intensivos de árboles donde se puede utilizar maquinaria pesada para la preparación del suelo y las labores principales, usando al mismo tiempo material genético de alta calidad que maximice la producción de acuerdo con el tipo de producto que se espera obtener (SEMARNAT, 2010).

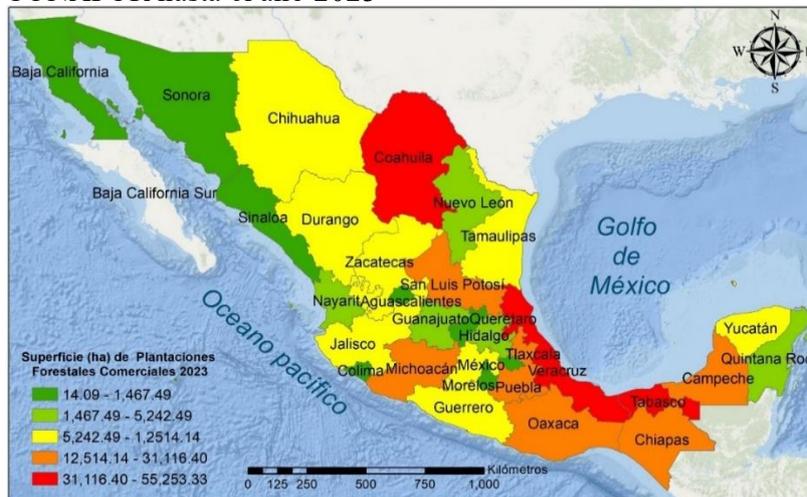
El crecimiento de los árboles en una plantación es afectado por variables como la calidad del material genérico, clima, suelo, disponibilidad de agua e incidencia de plagas y enfermedades. Es razonable entonces que existan diferencias el desarrollo de los individuos entre una región y otro, incluso dentro de una plantación. Las variables de importancia en el desarrollo de las especies forestales maderables son el diámetro y la altura de los árboles (West, 2015). Se ha observado, por ejemplo, que la densidad

de la madera de *P. halepensis* y *P. pinaster*, resulta afectado por las condiciones climáticas donde se instaló la plantación (Olivar *et al.*, 2013). En el caso del material genético, Benavides-Meza *chan.* (2011) evaluaron 12 procedencias de *P. hartwegii* para reconocer la variación de diversos parámetros morfológicos y solo el material genético, proveniente del Cofre de Perote, Veracruz, México, registró valores significativamente diferentes en altura, diámetro y tasa de crecimiento, lo que permitió separarlo del resto de las localidades evaluadas.

En el caso del efecto del manejo de las plantaciones sobre el crecimiento de los árboles, Uranga-Valencia *et al.* (2015) sugieren que árboles relativamente pequeños (menores de 25 cm de diámetro) y jóvenes creciendo en plantaciones con poda, concentran una mayor cantidad de volumen en el fuste. Los bosques producen de 100 a 500 t ha⁻¹ de biomasa (peso seco) incluyendo 60 a 80% en madera en el tallo, 10 a 20% en ramas, 5 a 10% en cortezas, 5 a 10% en raíces y 1 a 5% en hojas y para producir esa cantidad biomasa, las plantas forestales utilizan 200-2,500 kg ha⁻¹ de N, cantidades similares de K y Ca, y 20-200 kg ha⁻¹ P (Osman, 2013).

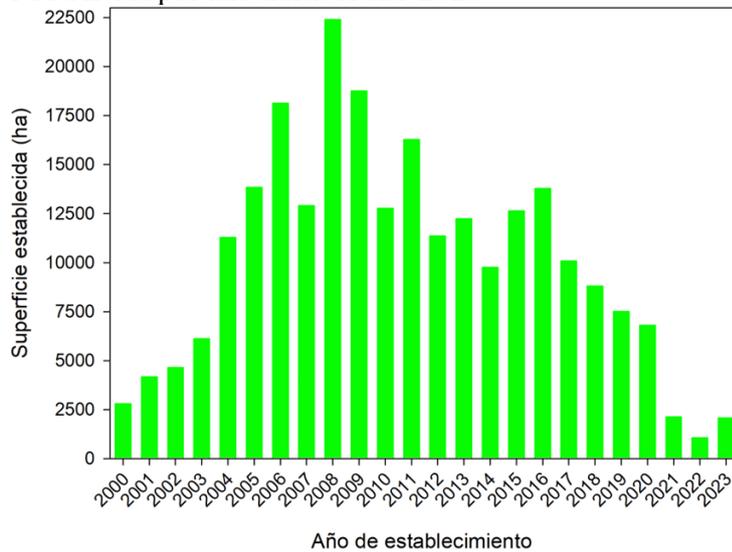
En México a través del Programa Nacional Forestal la CONAFOR es la institución gubernamental encargada, en asignar apoyos y firmar convenios de concertación con los beneficiarios para el establecimiento y desarrollo de plantaciones forestales comerciales. De acuerdo con los datos del Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) Coahuila, Veracruz, Tabasco, San Luis Potosí, Michoacán, Puebla, Oaxaca, y Chiapas fueron los estados con mayor superficie de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) establecidas con apoyos de la CONAFOR hasta el año 2023 (Figura 1).

Figura 1. Mapa de superficies de Plantaciones Forestales Comerciales establecidas con apoyos de la CONAFOR hasta el año 2023



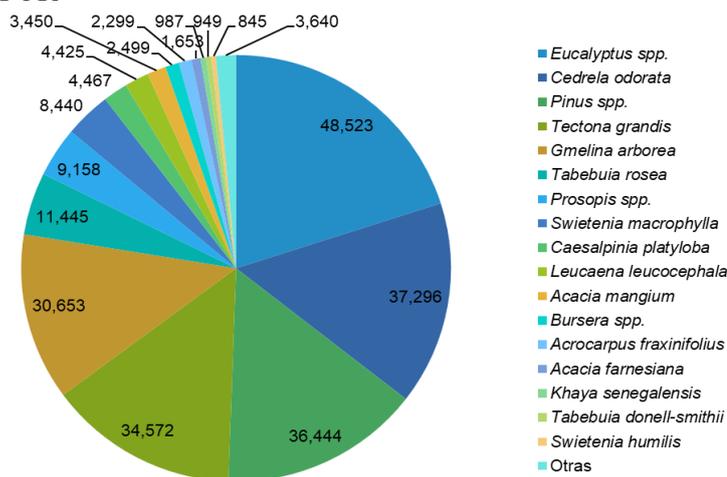
A pesar de que el establecimiento de plantaciones forestales maderables representa una buena estrategia para incrementar la captura de carbono y en consecuencia minimizar los impactos del cambio climático. En los últimos años ha disminuido la superficie de plantaciones forestales establecidas (Figura 2).

Figura 2. Superficies de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) establecidas con apoyos de la CONAFOR por año hasta el año 2023



Los géneros maderables mayormente utilizados para el establecimiento de las plantaciones forestales comerciales son: *Eucalyptus*, *Cedrela*, *Pinus*, *Tectona*, *Gmelina* (Figura 3).

Figura 3. Especies utilizadas en las Plantaciones Forestales Comerciales establecidas con apoyos de la CONAFOR



Captura y almacén de carbono

El almacenamiento de carbono (C) depende de la productividad primaria neta de cada sistema, al asegurar una concentración de carbono en el tejido vegetal promedio de alrededor de 50 %, los

principales almacenes de C en los ecosistemas forestales se encuentran fraccionado en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo (vegetación), hojarasca, sistema radicular y C orgánico del suelo (Acosta-Mireles *et al.*, 2002). Se refiere a la cantidad de carbono que tiene la unidad aérea cubierta por vegetación, (Cortez, *et al.*, 2022). En los sistemas forestales la capacidad de capturar carbono atmosférico tiende a disminuir con relación al incremento de la edad del bosque o al grado de madurez del suelo, en edades tempranas o intermedias es más alta la captura de carbono (Reyes, *et al.*, 2016). Factores como la edad, la densidad y la composición florística de cada estrato por comunidad vegetal, modifican directamente la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono, estos factores generalmente se modifican con el manejo forestal y se reflejan en cambios en la distribución de carbono dentro del ecosistema (Hernández, *et al.*, 2020).

Las reservas de carbono en una plantación pueden evaluarse en una muestra de árboles, que además permitan desarrollar funciones para la predicción del contenido de carbono con base en un mínimo de variables medidas (Joosten *et al.*, 2004). El potencial de almacenamiento de carbono en sistemas sometidos a manejo es mayor cuando las plantaciones son jóvenes, dado que su crecimiento no ha alcanzado el punto máximo (Schlesinger, 1997).

Galicia *et al.*, (2016) señalan que los contenidos de COS en los bosques templados de México varían ampliamente entre los tipos de suelo, desde 60 Mg ha⁻¹ (leptosoles) hasta 559 Mg ha⁻¹ (andosoles)

Carbono aéreo

De acuerdo con Brockerhoff *et al.* (2013) para finales de siglo se habrá perdido más del 30% de la superficie forestal natural y las plantaciones forestales representarán más del 20% de la superficie forestal total. Lo anterior denota la importancia de las plantaciones forestales como sumideros de carbono y agentes naturales de mitigación del cambio climático.

La cantidad de carbono almacenado en las plantaciones está determinada por factores como el tipo de especie, la edad, la densidad de la plantación, el manejo forestal, y las condiciones ambientales. Autores como Pérez *et al.* (2020) han reportado 77.20 t ha⁻¹ T. en *Tectona grandis* a los 11 años de edad con una densidad de 1 666 árboles ha⁻¹. López-Reyes *et al.* (2016) documentaron 257.07 Mg ha⁻¹ de carbono total aéreo en una plantación de *Hevea brasiliensis* a los 51 años. Pérez-Cruzado *et al.* (2012) estimaron entre 443 y 634 Mg ha⁻¹ de carbono en *Eucalyptus globulus Labill* y *Pinus radiata*, con edades de

rotación que van de 10 a 35 años. A partir de los datos anteriormente mencionados se denota la importancia de las plantaciones forestales como sumideros de carbono.

Estudios realizados en el suelo plantaciones de el Salto, Durango, indican que alcanza 187.06 Mg ha⁻¹, de las cuales 70 % se encuentra en los primeros 20 cm de profundidad (Trettin & Jurgensen 2003). Por otra parte, Acosta-Mireles *et al.*, (2009) obtuvieron un valor promedio de carbono en el suelo de 183.2 Mg ha⁻¹ en plantaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Tlaxcala, a una profundidad de 40 cm. Ordoñez (1999), realizó un estudio sobre la captura de carbono en un bosque templado de Michoacán, donde obtuvo que la captura total unitaria alcanza 217 tc/ha, de los cuales 94 tc/ha provienen del suelo, 74 tc/ha de biomasa y 49 tc/ha de productos.

CONCLUSIONES

Las plantaciones forestales comerciales representan una estrategia eficaz para la mitigación del cambio climático, ya que, el manejo forestal adecuado permite capturar y almacenar carbono en la biomasa arbórea y en el suelo, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero.

El secuestro de carbono en plantaciones forestales depende de múltiples factores, es decir, la capacidad de almacenamiento de carbono varía en función de la especie utilizada, la edad de los árboles, la densidad de la plantación y el manejo forestal. Las plantaciones jóvenes tienen un mayor potencial de captura de CO₂, mientras que la acumulación de carbono en el suelo se ve influenciada por la incorporación de materia orgánica y las características edafológicas.

El establecimiento y manejo sostenible de plantaciones forestales es clave para cumplir compromisos ambientales y ante la creciente pérdida de bosques naturales y el incremento de la temperatura global, el fortalecimiento de programas de reforestación y el fomento de plantaciones comerciales sustentables pueden contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático. Además, estos sistemas productivos pueden integrarse dentro de modelos de economía circular, promoviendo beneficios económicos y ecológicos a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/302/30236610.pdf>



- Anderson, R., Hawkins, E., Jones, P. 2016. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187. doi: <http://dx.doi.org.access.biblio.colpos.mx/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Benavides-Meza, H.M.; Gazca-Guzmán, M.O.; López-López, S.F.; Camacho-Morfín, F.; Fenández-Grandizo, D.Y.; De la Garza-López de Lara, M. del P. & Nepamuceno-Martínez, F. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2(5): 73-90.
- Blanco, H., Lal, R. 2010. *Principles of Soil Conservation and Mangement*. New York , USA: Springer.
- Borges, J.G.; Diaz-Balteiro, L.; McDill, M.E & Rodríguez, L.C.E. 2014. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Springer: London, U.K.
- Boyle, J.R.; Tappeiner, J.C.; Waring, R.H. & Smith, C.T. 2016. *Sustainable Forestry: Ecology and Silviculture for Resilient Forests*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09761-X>
- Brockhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A., & Ferraz, S. F. B. (2013). Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management*, 301, 43–50.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018>
- Casas-Castillo, M., Alarcón-Jordán, M. 1999. *Meteorología y Clima*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Comisión Europea. 2025. *Causas del cambio climático*. Comisión Europea.
https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es#:~:text=e1%20calentamiento%20global.-,Calentamiento%20global,2%20%20C2%B0C%20por%20d%C3%A9cada .
- CONAFOR. 2014. México cuenta con 270 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales. CONAFOR. Boletín 77. Recuperado de:
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/5752M%C3%A9xico%20cuenta%20con%20270%20mil%20hect%C3%A1reas%20de%20Plantaciones%20Forestales%20Comerciales.pdf>
- Cortez, M; Santiago W; Ponce, A; Fuentes, M; Barra, J; González, F. & Leyva, T. (2022).

- Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. Pag 18. Documento recabado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v27nspe/2448-7597-mb-27-04-e2742421.pdf>
- Doetterl, S., Berhe, A., E., N., Wang, Z., Sommer, M., Fiener, P. 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: <http://dx.doi.org.access.biblio.colpos.mx/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>
- Earth System Research Laboratory. 2016. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Recuperado el 21 de Octubre de 2016, de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., Torres-Rivera, A. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57-70. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v18n1/v18n1a6.pdf>
- Galicia, L., A. M. Gamboa Cáceres, S. Cram, B. Chávez Vergara, V. Peña Ramírez, V. Saynes y C. Siebe. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- Gobierno de México. 2015. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero#:~:text=Del%20total%20de%20las%20emisiones%2C%2064%25%20correspondieron%20al%20consumo%20de,y%20miner%C3%ADas%20y%205%25%20se>
- Gómez, C., Wulder, M., White, J., Montes, F., Delgado, J. 2012. Characterizing 25 years of change in the area, distribution and stock of Mediterranean pines in Central Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 5546-5573.
- Hernández, Velázquez A; Fierro A.M; Gómez A; Reyes V.J; Vera J.A. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques* vol. 26, núm. 1, e2611802. Documento recabado de: <https://myb.ojs.inacol.mx/index.php/myb/article/download/e2611802/2054/11286>

- Joosten, R. J.; Schumacher, C. W., A. Schulte. 2004. Evaluate tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in Western Germany. *Forest Ecology and Management* 189: 87-96
- Keith H., D. B. Lindenmayer, B. G Mackey, D. Blair, L. Carter, L. McBurney, S. Okada, T. Tomoko Konishi-Nagano.2014. Accounting for Biomass Carbon Stock Change Due to Wildfire in Temperate Forest Landscapes in Australia. *PLoS ONE* 9:1-17.
- Keith H., D. B. Lindenmayer, B. G Mackey, D. Blair, L. Carter, L. McBurney, S. Okada, T. Tomoko Konishi-Nagano.2014. Accounting for Biomass Carbon Stock Change Due to Wildfire in Temperate Forest Landscapes in Australia. *PLoS ONE* 9:1-17.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impact on global climate and food security. *Science* , 1623-1627.
- Laurin, V., Pulletti, N., Chen, Q., Corona, P., Papale, D., Valentini, R. 2016. Above ground biomass and tree species richness estimation with airborne lidar in tropical Ghana forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 371-379. doi: <http://dx.doi.org.access.biblio.colpos.mx/10.1016/j.jag.2016.07.008>
- Lazaridis, M. 2011. *Principles of Meteorology and Air Pollution*. Heidelberg, London, England: Springer.
- López-Reyes, L. Y., Domínguez-Domínguez, M. Martínez-Zurimendi, P., Zavala-Cruz, J., Gómez-Guerrero, A., & Posada-Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22(3), 49–60. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221486>
- Maunder, M. 2007. *Lights in the Sky: Identifying and Understanding Astronomical and Meteorological Phenomena*. London, England: Springer.
- McKinney, M., Schoch, R., Yonavjak, L. (2007). *Environmental Science; Systems and Solutions* (Fourth ed.). USA: Jones and Bartlett Publishers .
- Miller, G. T. 2000. *Living in the Environment: principles, connections, and solutions* (Eleventh ed.). California, USA: Brooks/Cole.
- National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA).2025. Trends in atmospheric carbon dioxide (CO2). <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>



- Ni, J., Yue, Y., Borthwick, G.L.A., Li, T., Miao, C., He, C. 2012. Erosión inducen CO2 flux of small watersheds. *Global and Planetary Change*, 101-110. doi:
<http://dx.doi.org.access.biblio.colpos.mx/10.1016/j.gloplacha.2012.07.003>
- Olivar, J.; Rathgeber, C.; Ordoñez-Alonso, C. & Bravo, F. 2013. Influencia del clima en la densidad de la madera de pinos mediterráneos (*Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*). 6° Congreso Forestal Español.
https://www.researchgate.net/publication/262270215_Influencia_del_clima_en_la_densidad_de_la_madera_de_pinos_mediterraneos_Pinus_halepensis_y_Pinus_pinaster
- Ontl, T., Schulte, L. 2012. Soil Carbon Storage. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 35. Obtenido de
<http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-carbon-storage-84223790>
- Ordoñez, J. (1999). Captura de carbono en un bosque templado: El caso de Nuevo San Juan, Michoacán, México. SEMARNAT-INE. México.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2021. Cambio Climático. Organización mundial de la salud.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Osman, K. T. 2013. *Forest Soils*. Springer: London, U.K.
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 1996. Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. IPCC. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-I-sp.pdf>
- Paulus, J., Schlieper, D., Groth, G. 2013. Greater efficiency of photosynthetic carbon fixation due to single amino acid substitution. *Nature communications*, 4(1518). doi:
<https://doi.org/10.1038/ncomms2504>
- Pérez, J. J., Antonio, R. T., Rodríguez, E. A., Yerena Yamallel, J. I., García García, D. A., & Cárdenas, M. G. (2020). Stored carbon estimation of a *Tectona grandis* L. f. plantation using allometric equations. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57).
- Pérez-Cruzado, C., Mansilla-Salineró, P., Rodríguez-Soalleiro, R., & Merino, A. (2012). Influence of tree species on carbon sequestration in afforested pastures in a humid temperate region. *Plant and Soil*, 353(1–2), 333–353. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1035-0>
- Ponater, M., Dietmüller, S., Sausen, R. 2012. Greenhouse Effect, Radiative Forcing and Climate



- Sensitivity. En U. Schumann, Atmospheric Physics (págs. 85-100). Dordrecht, London: Springer.
- Prasad, P., Tomas, J., Narayan, S. 2017. Global Warming Effects. Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition), 3, 289-299.
- Reyes L; Domínguez M; Martínez P; Zavala J; Gómez A; Posada S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades Madera y Bosques, vol. 22, núm. 3. Documento recabado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/617/61749747005.pdf>
- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendi, P., Paz-Pellat, F. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forest. Annals of Forest Science. doi:DOI <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Saha, K. 2008. The Earth's Atmosphere: Its Physics and Dynamics. Berlin, Germany: Springer.
- Salisbury, F., Ross, C. W. 1992. Plant physiology. California, USA: Wadsworth Publishing Company.
- Zeebe, R., Ridgwell, A., Zachos, J. 2016. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. Nature geoscience. doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo2681>
- Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry: an Analysis of Global Change. Academic Press, San Diego, CA. USA. 588 p.
- Schulze, E., Wirth, C., Heimann, M. 2000. Managing forest after Kyoto. Science, 289 (5487), 2058-2059.
- SEMARNAT. 2010. Prácticas de reforestación. Comisión Nacional Forestal. Recuperado de:
https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL_PRACTICAS_DE_REFORESTACION.PDF
- Sportisse, B. 2010. Fundamentals in Air Pollution. Paris, France: Springer.
- 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: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60074-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60074-1)
- Taiz, L. Zeiger, E. 2010. Plant physiology (Fifth ed.). Massachusetts: USA.
- Trettin CC, Jurgensen MF. 2003. Carbon cycling in wetland forest soils. In: Kimble J, Heath H, Birdsey R, Lal R, eds. The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the



Greenhouse Effect. USA: CRC Press LLC.pp. 1-21 ISBN: 1-56670-583-5

Uranga-Valencia, L. P.; De los Santos-Posadas, H.M.; Valdez-Lazalde, J. R.; López-Upton, J.; Navarro-Garza, H. 2015. Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia*. 49(7): 787-801.

Valentini, R.; Matteucci, G.; Dolman, A.J.; Schulze, E.D.; Rebmann, D.; Moors, E.J.; Granier, A.; Gross, P.; Jensen, N.O.; Pilegaard, K.; Lindroth, A.; Grelle, A.; Bernhofer, C.; GruÈnwald, T.; Aubinet, M.; Ceulemans, R.; Kowalski, A.S.; Vesala, T.; Rannik, U., Berbigier, P.; Lostau, D.; Gu, J.; Thorgeirsson, H.; Ibrom, A.; Morgenstern, K.; Clement, R.; Moncrieff, L.; Montagnani, J.; Minerbi, S., Jarvis, P.G. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forest. *Nature*, 404, 861-865.

West, P.W. 2015. *Tree and Forest Measurement*. 3rd edition. Springer, Australia.

Zhang, D. y J. Stanturf. 2008. Forest Plantations. In: Jørgensen, S. E. and B. D. Fath (eds). *Encyclopedia of Ecology*. Academic Press. Radarweg, Amsterdam, The Netherlands. pp. 1673-1680. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978>

