

Carbon storage during the development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo

Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense

Noé Ronquillo-Gorgúa¹, Ramón Razo-Zárate^{2*}, Rodrigo Rodríguez-Laguna², Otilio A. Acevedo-Sandoval¹, Juan Hernández-Ortiz³, Nancy Manzur-Chávez¹

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, col. Carboneras. C. P. 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias. Av. Universidad, km 1, Exhacienda de Aquetzalpa. C. P. 43660. Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Económico Administrativas. Carretera México-Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: ramon_razo@uaeh.edu.mx; tel.: +52 775 784 9048.

Abstract

Introduction: Forests provide environmental goods and services associated with the forest ecosystem, such as carbon sequestration, which has market potential to contribute to profitability and sustainability of forestry activities.

Objective: To estimate biomass and aboveground carbon during the development stages of a *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. forest, cultivated in the ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, to know the potential of the species for climate change mitigation.

Materials and methods: Aerial biomass was estimated by non-destructive method, using direct measurement of height and diameter at breast height. The volume estimated for the trees sampled, at each stage of development, was multiplied by the basic wood density and the carbon coefficient of 50 % was used.

Results and discussion: The average biomass of mature trees was 294.8 kg. Estimates of aboveground carbon at the developmental stages of *P. patula* were as follows: brinzal (0.94 Mg C·ha⁻¹), monte bravo (3.73 Mg C·ha⁻¹), vardascal (5.05 Mg C·ha⁻¹), latizal (18.18 Mg C·ha⁻¹) and fustal (81.40 Mg C·ha⁻¹). The non-destructive method allowed reliable estimates of carbon content of this species.

Conclusion: Carbon storage quantification by stages of development of *P. patula* is useful marketing strategies of environmental services for carbon sequestration, which has imminent market potential to mitigate the impacts of climate change.

Keywords: aboveground carbon; aboveground biomass; forest management; environmental services; climate change.

Resumen

Introducción: Los bosques generan bienes y servicios ambientales asociados al ecosistema forestal, como la captura de carbono que tiene potencial de mercado para contribuir a la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad silvícola.

Objetivo: Estimar la biomasa y carbono aéreo en las etapas de crecimiento de un bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., cultivado en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, para conocer el potencial de la especie en la mitigación del cambio climático.

Materiales y métodos: La biomasa aérea se estimó por método no destructivo, utilizando medición directa de altura y diámetro normal. El volumen calculado para los individuos muestreados, en cada etapa de desarrollo, se multiplicó por la densidad básica de la madera y se aplicó el coeficiente de carbono de 50 %.

Results and discussion: Los árboles en etapa de fustal tuvieron en promedio 294.8 kg de biomasa. Las estimaciones de carbono aéreo en las etapas de desarrollo de *P. patula* fueron las siguientes: brinzal (0.94 Mg C·ha⁻¹), monte bravo (3.73 Mg C·ha⁻¹), vardascal (5.05 Mg C·ha⁻¹), latizal (18.18 Mg C·ha⁻¹) y fustal (81.40 Mg C·ha⁻¹). El método no destructivo permitió estimaciones confiables sobre el contenido de carbono de dicha especie.

Conclusion: La cuantificación del almacenamiento de carbono por etapas de desarrollo de *P. patula* es útil en las estrategias de comercialización de servicios ambientales por concepto de captura de carbono, el cual tiene potencial inminente de mercado para la mitigación de impactos del cambio climático.

Palabras clave: carbono aéreo; biomasa aérea; manejo forestal; servicios ambientales; cambio climático.

Introduction

In Mexico, temperate forest ecosystem represents 17.4 % (34 million hectares) of the country's surface (195 million hectares) and groups together the cloud forest and the coniferous and broadleaf forest (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015). In these forests, the carbon sequestration rate is estimated to be $3.431 \pm 0.870 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (Casiano-Domínguez, Paz-Pellat, Rojo-Martínez, Covalada-Ocon, & Aryal, 2018). Pan et al. (2011) mention that forests, as carbon reservoirs, absorb about 30 % of all CO_2 emissions in a year and considerably increase their importance when these are incorporated into silvicultural management.

Carbon sequestration and storage by forest vegetation occurs in two scenarios: natural forests and managed areas. Managed forests fix high amounts of CO_2 according to stand age, site quality, species composition, density, climate, edaphic and topographic conditions, and silvicultural treatment (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009; Pan et al., 2011). Atmospheric carbon sequestration capacity tends to decrease as forest age increases; at early and intermediate ages, carbon sequestration rate is high (Fonseca, Benayas, & Alice, 2011). This is related to the rate of biomass accumulation, such that forests with net growth can capture more CO_2 than they emit, through respiration, and the capture rate is directly proportional to such growth (Casiano-Domínguez et al., 2018). In general, it is accepted that the rate of carbon fixation through photosynthetic processes is higher in young stands than in mature forests, but total carbon storage in the system is higher in mature forests.

Forests go through different stages of development during establishment: brinzal, monte bravo, vardascal, latizal, and fustal. Forest management involves the implementation of a program of silvicultural practices, using regeneration methods and application of silvicultural practices (site preparation, clearing, pruning, thinning, protection, and promotion) that are carried out during the forest management period (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González-Elizondo, 2018). Pacheco-Aquino, Durán-Medina, and Ordóñez-Díaz (2015) show signs that forests under forest management represent important carbon stores, with carbon sequestration capacity and that the sites with timber harvesting recover 15 to 20 % of the carbon removed compared to that originally present in a forest without previous interventions; these values are reached seven years after harvesting is carried out.

The ideal scenario for carbon fixation and storage by forests is where forest stands are kept dynamic through the constant incorporation of organic matter to the soil, coming from adult trees, while the natural

Introducción

En México, el ecosistema de bosque templado representa 17.4 % (34 millones de hectáreas) de la superficie del país (195 millones de hectáreas) y agrupa al bosque mesófilo de montaña y al bosque de coníferas y latifoliadas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015). En estos bosques se estima que la tasa de captura de carbono es de $3.431 \pm 0.870 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Casiano-Domínguez, Paz-Pellat, Rojo-Martínez, Covalada-Ocon, & Aryal, 2018). Pan et al. (2011) mencionan que los bosques, como reservorios de carbono, absorben aproximadamente 30 % de todas las emisiones de CO_2 en un año y aumentan considerablemente su importancia cuando estos se incorporan al manejo silvícola.

La captura y almacenamiento de carbono por la vegetación forestal se presenta en dos escenarios: bosques naturales y áreas bajo manejo. Los bosques manejados fijan cantidades altas de CO_2 en función de la edad del rodal, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, y tratamiento silvícola (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009; Pan et al., 2011). La capacidad de captura de carbono atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del bosque; en edades tempranas e intermedias, la tasa de captura de carbono es alta (Fonseca, Benayas, & Alice, 2011). Esto se relaciona con la velocidad de acumulación de biomasa, de tal manera que los bosques con crecimiento neto son capaces de capturar más CO_2 del que emiten, a través de la respiración, y la velocidad de captura es directamente proporcional a dicho crecimiento (Casiano-Domínguez et al., 2018). En general, es aceptado que la tasa de fijación de carbono por medio de procesos de fotosíntesis es más alta en rodales jóvenes que en los bosques maduros, pero el almacenamiento total de carbono en el sistema es mayor en estos últimos.

Durante su establecimiento, los bosques pasan por etapas de desarrollo de brinzal, monte bravo, vardascal, latizal y fustal. El manejo forestal involucra la ejecución de un programa de prácticas silvícolas, a través de métodos de regeneración y aplicación de prácticas silviculturales (preparación del sitio, limpiezas, podas, aclareos, protección y fomento) que se realizan durante el periodo de administración del bosque (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González-Elizondo, 2018). Pacheco-Aquino, Durán-Medina, y Ordóñez-Díaz (2015) muestran evidencia de que los bosques bajo manejo forestal constituyen almacenes importantes de carbono, que tienen capacidad de captura y que los sitios con aprovechamiento maderable recuperan de 15 a 20 % del carbono removido con respecto a lo que había originalmente en un bosque sin intervenciones

regeneration of species is established and other young trees are in full photosynthetic activity (Razo-Zarate, Gordillo-Martínez, Rodríguez-Laguna, Maycotte-Morales, & Acevedo-Sandoval, 2013).

Forest carbon sequestration under the market scheme in socially owned forests is operating and has great potential, especially where timber is harvested based on legal, technical and social planning and supervision; since, in addition to land tenure security, there is a forest management culture (Pacheco-Aquino et al., 2015). Similarly, Álvarez and Rubio (2013) mention that, although currently the main value of the pine-oak forest lies in its use as a source of timber, carbon sequestration could represent an important additional value. The objective of the present study was to estimate biomass and aboveground carbon in the development stages of a *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. forest, grown in the ejido Atopixco, municipality of Zacualtipán, Hidalgo, to know the potential of the species to mitigate climate change.

Materials and Methods

Study area

The study area is located in the region known as Sierra Alta of Hidalgo, in areas incorporated to silvicultural management in the ejido Atopixco, municipality of Zacualtipán, Hidalgo, coordinates 20° 37' 26" - 20° 35' 20" N and 98° 35' 23" - 98° 37' 48" W, with an average altitude of 2 062 m. The area is dominated by the C(m)a type climate, temperate sub-humid with summer rainfall, precipitation of 1 780 mm and average temperature of 13.5 °C (Aguirre-Salado et al., 2009; García, 1981), with Feozem haplic soils (Hh), rich in organic matter, and Regosol calcárico (Rc) on the steeper slopes (Santiago-García, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, Valdez-Lazalde, & Ramírez-Valverde, 2013). Vegetation corresponds to temperate pine-oak forest, where *P. patula* predominates over other native species such as *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Quercus rugosa* Née, *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Alnus arguta* Schl., *Prunus serotina* Ehrh., *Vaccinium leucanthum* Schltdl., *Clethra mexicana* DC., *Crataegus mexicana* DC. and *Ternstroemia sylvatica* Schltdl. & Cham.

Description of forest development stages

The Atopixco ejido has a total area of 1 188.9 ha, of which 789.1 ha are covered by forest and only 658.7 ha have been incorporated into the sustainable forest management scheme. Silvicultural treatments are aimed primarily for *P. patula*, which is the main species of commercial timber interest. Thus, based on the proposals of Aguilar-Luna (2018), Aguirre, Díaz, Muñoz, and Muñoz (2019) and derived from field experiences, the present study proposes the

previas; dichos valores se alcanzan a los siete años de que se hace el aprovechamiento.

El escenario ideal para la fijación y almacenamiento de carbono por los bosques es aquel donde las masas forestales se mantienen dinámicas mediante la incorporación constante de materia orgánica al suelo, proveniente de los árboles adultos, mientras se establece la regeneración natural de las especies y otros individuos jóvenes están en plena actividad fotosintética (Razo-Zarate, Gordillo-Martínez, Rodríguez-Laguna, Maycotte-Morales, & Acevedo-Sandoval, 2013).

La captura de carbono forestal bajo el esquema de mercados en bosques de propiedad social está operando y tiene gran potencial, sobre todo donde se aprovecha madera a partir de la planeación y supervisión legal, técnica y social; ya que, además de seguridad en la tenencia de la tierra, se cuenta con cultura de manejo forestal (Pacheco-Aquino et al., 2015). De igual manera, Álvarez y Rubio (2013) mencionan que, aunque actualmente el principal valor del bosque de pino-encino reside en su uso como fuente de madera, el secuestro de carbono podría representar un valor adicional importante. En el presente estudio se planteó el objetivo de estimar la biomasa y carbono aéreo en las etapas de crecimiento de un bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., cultivado en el ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán, Hidalgo, para conocer el potencial de la especie en la mitigación del cambio climático.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la región denominada Sierra Alta Hidalguense, en áreas incorporadas al manejo silvícola en el ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán, Hidalgo, en las coordenadas 20° 37' 26" - 20° 35' 20" LN y 98° 35' 23" - 98° 37' 48" LO, con altitud promedio de 2 062 m. En el área predomina el clima tipo C(m)a, templado subhúmedo con lluvias en verano, con precipitación de 1 780 mm y temperatura promedio de 13.5 °C (Aguirre-Salado et al., 2009; García, 1981), con suelos tipo Feozem haplico (Hh), ricos en materia orgánica, y Regosol calcárico (Rc) en las partes con mayor pendiente (Santiago-García, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, Valdez-Lazalde, & Ramírez-Valverde, 2013). La vegetación corresponde a bosque templado de pino-encino, donde predomina la especie *P. patula* sobre otras nativas como *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Quercus rugosa* Née, *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Alnus arguta* Schl., *Prunus serotina* Ehrh., *Vaccinium leucanthum* Schltdl., *Clethra mexicana* DC., *Crataegus mexicana* DC. y *Ternstroemia sylvatica* Schltdl. & Cham.

classification of the development stages of the *P. patula* forest shown in Figure 1.

Brinzal

This is the initial forest development stage, from seedling emergence to about 1 m of height. In cultivated forests, it is usually established during the first rainy season after regeneration or thinning treatments. In the case of *P. patula* in the study area, it manifests itself in trees up to two years old (Figure 1). At this stage, no forest products are obtained from the clearing of vegetation carried out to favor the development of the species of interest.

Monte bravo

This is the second stage of development and is identified by the marked competition for light, space and nutrients between trees of the ecosystem, leading to a greater increase in height; trees reach between 1 and 3 m and diameters at the base of less than 5 cm, with abundant dry low branches that intertwine to form an impenetrable mass. The average age of this stage in the study area is four years (Figure 1). As it is a cultivated forest, pre-thinning and pruning of the basal branches is carried out, and the process of obtaining products such as wood energy material in low quantities for domestic use begins, giving rise to the dynamics of biomass and aboveground carbon extracted from the forest.

Vardascal

Condition in which the stand shows high density with thin and flexible trees that have lost their lower branches (beginning of natural pruning) generating abundant dead material on the ground. Most of the trees have an average age of up to 6 years, an average diameter at breast height lower than 10 cm and heights of 3 to 8 m (Figure 1). With the application of non-commercial thinning, products such as firewood, props and poles are obtained for self-consumption, which represents the beginning of the extraction of biomass and aboveground carbon from the forest.

Latizal

This is the stage of development in which the trees show the greatest growth in height and natural pruning intensifies; in addition, most of the trees show crown differentiation with average heights of 10 m and average diameter at breast height of 15 cm. In the study area, *P. patula* reaches this condition at an average of 11 years of age (Figure 1). From time to time, intermediate thinning is applied to obtain props, poles, roundwood for sawmilling and cellulosic

Descripción de etapas de desarrollo del bosque

El ejido Atopixco posee una superficie total de 1 188.9 ha, de las cuales 789.1 ha están cubiertas por bosque y únicamente 658.7 ha han sido incorporadas al esquema de manejo forestal sustentable. Los tratamientos silvícolas están dirigidos primordialmente a *P. patula*, que representa la principal especie de interés comercial maderable. De tal modo que, con base en lo propuesto por Aguilar-Luna (2018), Aguirre, Díaz, Muñoz, y Muñoz (2019) y derivado de las experiencias de campo, el presente trabajo propone la clasificación de las etapas de desarrollo del bosque de *P. patula* que se muestran en la Figura 1.

Brinzal

Es la etapa de desarrollo inicial del bosque, desde la aparición de las plántulas hasta aproximadamente 1 m de altura. En bosques cultivados regularmente se establece durante el primer periodo de lluvias posterior a los tratamientos de corta de regeneración o matarrasa. En el caso de *P. patula*, en el área de estudio, se manifiesta en individuos de hasta dos años (Figura 1). En esta etapa no se obtienen productos forestales derivados de las limpiezas de vegetación realizadas para favorecer el desarrollo de las especies de interés.

Monte bravo

Es la segunda etapa de desarrollo y se identifica por la marcada competencia por luz, espacio y nutrientes entre individuos del ecosistema, lo que provoca mayor incremento en altura; los árboles alcanzan entre 1 y 3 m y diámetros en la base menores de 5 cm, presentan ramas bajas secas abundantes que se entrelazan formando una masa impenetrable. La edad promedio de esta etapa en la zona de estudio se alcanza a los cuatro años (Figura 1). Al ser un bosque cultivado se realizan actividades de preaclareos y podas de las ramas basales, y se inicia con el proceso de obtención de productos como es material dendroenergético en cantidades bajas para uso doméstico, dando lugar a la dinámica de la biomasa y carbono aéreo extraído del bosque.

Vardascal

Estado en que la masa presenta densidad alta con individuos delgados y flexibles que han perdido sus ramas bajas (inicio de poda natural) generando material muerto abundante en el piso. La mayoría de los individuos tienen edades promedio de hasta 6 años, diámetro normal en promedio menor de 10 cm y alturas de 3 a 8 m (Figura 1). Con la aplicación de aclareos no comerciales se obtienen productos como leña, puntales y postes para autoconsumo, lo que



Figure 1. Tree growth stages of a *Pinus patula* in Sierra Alta of Hidalgo.

Figura 1. Etapas de crecimiento del arbolado de un bosque de *Pinus patula* en la Sierra Alta Hidalguense.

material for sale. The extraction of biomass and aboveground carbon from the forest is destined for products with a medium life span in the environment before carbon is released into the atmosphere.

Fustal

This is the final stage of forest development in which trees reach physiological maturity, natural pruning is completed and they produce large quantities of viable seeds for natural regeneration. The height

representa el inicio de extracción de biomasa y carbono aéreo del bosque.

Latizal

Es la etapa de desarrollo en que los árboles muestran mayor crecimiento en altura y la poda natural se intensifica; además, la mayoría del arbolado presenta diferenciación de copas con alturas medias de 10 m y diámetro normal promedio de 15 cm. En el área de estudio, *P. patula* alcanza esta condición en

of the trees exceeds 20 m and the diameter at breast height is greater than 20 cm (Figure 1). At this stage the final harvest of the forest takes place, in which the trees reach their maximum dimensions and generate a greater quantity of sawmill products, culminating the growing cycle, corresponding to the commercial shift. Wood and biomass volumes reported are abundant. Extracted wood is used to produce long-lasting products where carbon is stored for many years.

Sampling sites and measurement of variables

With the use of Geographic Information Systems and the QGIS® tool, the polygon incorporated into the ejido's forest management was delimited and the areas that presented the five stages of forest development in similar conditions of exposure and slope of the terrain were located and selected. Subsequently, the stratified systematic sampling was designed, regarding 15 circular sites of 1 000 m² (Figure 2). Tree measurement characteristics (height and diameter at breast height), the forest development stage and the number of trees per site were measured with the support of terrestrial orientation and navigation equipment (SUUNTO® Mc-2 Compass and GPS Garmin® 60Cx). The basal diameter at brinzal and monte bravo stages was measured with a Steren® digital vernier of 150 mm with an accuracy of 1 mm. For the vardascal, latizal and fustal stages, the reading was taken at a height of 1.30 m (diameter at breast height), using a Haglof Sweden®,

promedio a los 11 años (Figura 1). Periódicamente, se aplican aclareos intermedios que permiten la obtención de puntales, polines, madera en rollo para aserrío y material celulósico para venta. La extracción de biomasa y carbono aéreo del bosque se destina a productos de mediana duración de vida en el ambiente, antes de que el carbono se libere a la atmósfera.

Fustal

Es la etapa final de desarrollo del bosque en la que los árboles alcanzan su madurez fisiológica, se termina la poda natural y producen cantidades grandes de semillas viables para la regeneración natural. La altura de los árboles supera los 20 m y el diámetro normal es mayor de 20 cm (Figura 1). En esta etapa se realiza la cosecha final del bosque, en la que el arbolado alcanza sus dimensiones máximas y genera mayor cantidad de productos de aserrío culminando el ciclo de cultivo, correspondiente al turno comercial. Los volúmenes de madera y biomasa que se obtienen son abundantes. La madera extraída se destina a la elaboración de productos de larga duración donde el carbono queda retenido por muchos años.

Sitios de muestreo y medición de variables

Con el uso de Sistemas de Información Geográfica y la herramienta de QGIS® se delimitó el polígono incorporado al manejo forestal del ejido y se ubicaron

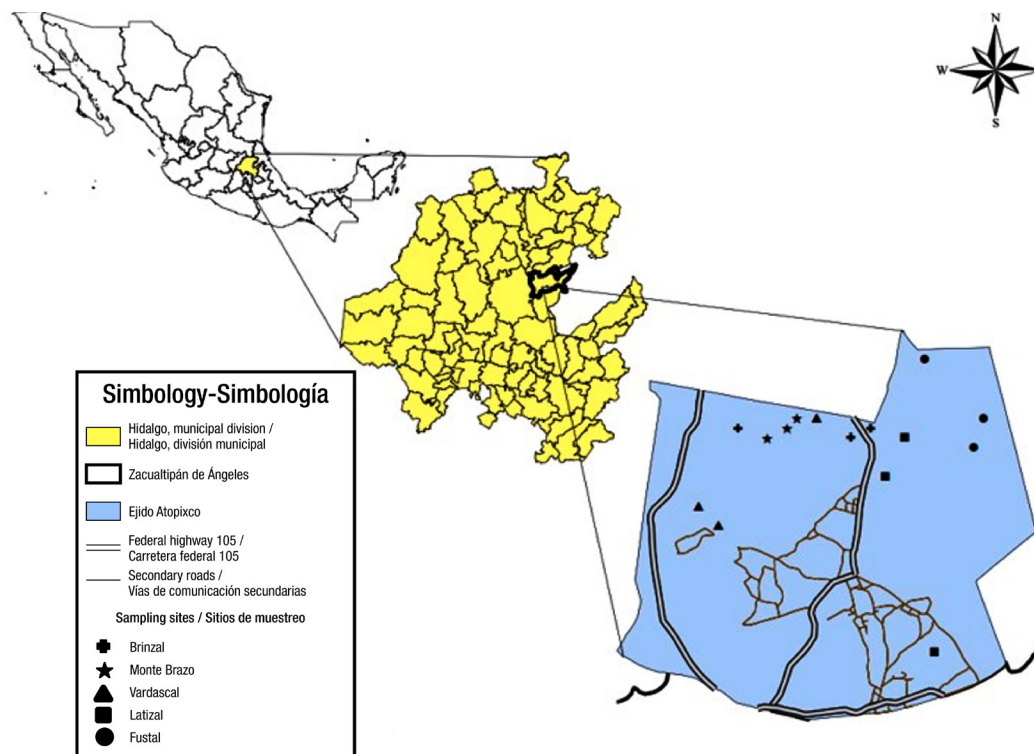


Figure 2. *Pinus patula* sampling sites in the ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, Mexico.

Figure 2. Sitios de muestreo de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México

model Mantax Blue 800 mm. Total height of each tree was measured with a Truper® tape measure for trees up to 2.0 m and with the support of a Suunto® clinometer for greater heights.

The information gathered in the field was processed in the laboratory to obtain composite variables such as basal area, volume, tree density, biomass and carbon content for each stage of forest development.

Basal area

For the areas at brinzal and monte bravo stages, the basal area (BA) per hectare was found by the direct sum of the basal area of a given tree (ab_i , m^2) calculated from the diameter data at the stem base [$AB = (\sum ab_i)$] (Romahn de la Vega & Ramírez Maldonado, 2010), while for the following stages it was not necessary to estimate the basal area, because the volume was obtained directly from the application of a biometric model developed for *P. patula*.

Volumen

The volume (V , m^3) at brinzal (Br) and monte bravo (Mb) stages was calculated with the value obtained from AB (m^2) and the height (h , m) of the tree using the equation $V_{Br/Mb} = AB \cdot h$. In the case of the vardascal, latizal and fustal stages, tree volume was calculated with the equation developed by the Sistema Biométrico Forestal (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], 2016):

$$VTACC = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + b_0 d^2$$

where,

VTACC = total tree volume with bark (m^3)

d = diameter at breast height at a height of 1.3 m (cm)

h = total tree height (m)

a_0 , a_1 , a_2 , b_0 = model parameters: 0.0000253, 1.6939421, 1.4175090 and 0.0000680, respectively.

Biomass

Among the most common alternatives for estimating biomass in forests are destructive (Figuerola-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez, & De los Santos-Posadas, 2010; Soriano-Luna, Ángeles-Pérez, Martínez-Trinidad, Plascencia-Escalante, & Razo-Zárate, 2015) and non-destructive methods (Razo-Zarate et al., 2013; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Treviño-Garza, & Razo-Zárate, 2009;). In this study, we chose to employ the latter, for which we used the basic wood density value of $0.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ reported by

y seleccionaron las áreas que presentaban las cinco etapas de desarrollo del bosque en las condiciones similares de exposición y pendiente del terreno. Posteriormente, se diseñó el muestreo sistemático estratificado, considerando 15 sitios circulares de $1\ 000 \text{ m}^2$ (Figura 2), se midieron las características dasométricas (altura y diámetro normal), el estado de desarrollo del bosque y el número de individuos por sitio con el apoyo de un equipo de orientación y navegación terrestre (brújula SUUNTO® Mc-2 Compass y GPS Garmin® 60Cx). El diámetro basal en la etapa de brinzal y monte bravo se midió con un vernier digital Steren® de 150 mm con precisión de 1 mm. Para las etapas de vardascal, latizal y fustal, la lectura se tomó a la altura de 1.30 m (diámetro normal), utilizando la forcípula Haglof Sweden®, modelo Mantax Blue 800 mm. La altura total de cada árbol se midió con cinta métrica Truper® para individuos de hasta 2.0 m y con apoyo de un clinómetro Suunto® para alturas mayores.

La información obtenida en campo se procesó en gabinete para obtener variables compuestas como área basal, volumen, densidad de arbolado, biomasa y contenido de carbono para cada etapa de desarrollo del bosque.

Área basal

En las áreas en etapas de brinzal y monte bravo, el área basal (AB) por hectárea se obtuvo mediante la suma directa del área basal de un árbol dado (ab_i , m^2) calculado a partir de los datos de diámetro en la base del tallo [$AB = (\sum ab_i)$] (Romahn de la Vega & Ramírez Maldonado, 2010), mientras que para las etapas siguientes no fue necesario estimar el área basal, debido a que el volumen se obtuvo directamente de la aplicación de un modelo biométrico desarrollado para *P. patula*.

Volumen

El volumen (V , m^3) en las etapas de brinzal (Br) y monte bravo (Mb) se calculó con el valor obtenido de AB (m^2) y la altura (h , m) del árbol utilizando la ecuación $V_{Br/Mb} = AB \cdot h$. En el caso de las etapas de vardascal, latizal y fustal, el volumen individual se calculó con la ecuación desarrollada por el Sistema Biométrico Forestal (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], 2016):

$$VTACC = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + b_0 d^2$$

donde,

VTACC = volumen total árbol con corteza (m^3)

d = diámetro normal con corteza a la altura de 1.3 m (cm)

h = altura total del árbol (m)

Vázquez-Cuecuecha, Zamora-Campos, García-Gallegos, and Ramírez-Flores (2015).

The data collected for volume (actual stock [ER], m³) at each stage of development were multiplied by the corresponding wood basic density (D, kg·m⁻³) to find the biomass value (B, kg) based on the equation $B = ER * D$, used by Razo-Zarate et al. (2013).

Aboveground carbon

Aboveground carbon (C, kg) at each forest development stage was estimated with the value determined from the biomass equation (B, kg) multiplied by the carbon coefficient (CC, 0.5) used by different authors (Petersson et al., 2012; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Meza-Rangel, Aguirre-Calderón, & Razo-Zárate, 2008).

Statistical analysis

With the data collected in the field and using equations, composite variables were derived and submitted to an analysis of variance ($P \leq 0.05$) and Tukey's multiple comparison of means tests, to identify differences between mean carbon contents of forest development stages. Data were transformed with natural logarithm (ln) and the Kolmogorov-Smirnov normality test was applied. Statistical analysis was performed using the Minitab® version 18.1 software (Minitab, 2017).

Results and Discussion

Tree measurement characteristics by stage of development

According to Table 1, the area incorporated into the silvicultural management of the Atopixco ejido, which is at different stages of development, had trees with diameters ranging from 0.15 cm at the brinzal stage to 42 cm for adult trees. It should be clarified that the areas regenerated naturally, and seeds often fall in years after the regeneration cut, which is why there are trees with heights less than those mentioned for each stage of development. The values recorded are similar to those described by Aguilar-Luna (2018) and Aguirre et al. (2019) for *P. patula*, which indicates that the non-destructive method provides reliable estimates of the carbon content of this species. Additionally, there are high densities in the forest stand structure causing the presence of dominated or suppressed trees that are characterized by being thin and of low height.

Based on the proposed stages of forest development, Figure 3 shows that the growth dynamics for tree diameter and height was higher for the vardascal to

a_0 , a^1 , a^2 , b^0 = parámetros del modelo: 0.0000253, 1.6939421, 1.4175090 y 0.0000680, respectivamente.

Biomasa

Entre las alternativas más comunes para estimar biomasa en bosques se encuentran los métodos destructivos (Figueroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez, & De los Santos-Posadas, 2010; Soriano-Luna, Ángeles-Pérez, Martínez-Trinidad, Plascencia-Escalante, & Razo-Zárate, 2015) y no destructivos (Razo-Zarate et al., 2013; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Treviño-Garza, & Razo-Zárate, 2009). En este estudio se optó por emplear los últimos, para lo cual se utilizó el valor de densidad básica de la madera de 0.46 g·cm⁻³ reportado por Vázquez-Cuecuecha, Zamora-Campos, García-Gallegos, y Ramírez-Flores (2015).

Los datos obtenidos de volumen (existencias reales [ER], m³) en cada etapa de desarrollo se multiplicaron por la correspondiente densidad básica de la madera (D, kg·m⁻³) para obtener el valor de biomasa (B, kg) con base en la ecuación $B = ER * D$, utilizada por Razo-Zarate et al. (2013).

Carbono aéreo

El carbono aéreo (C, kg) en cada etapa de desarrollo del bosque se estimó con el valor obtenido de la ecuación de biomasa (B, kg) multiplicado por el coeficiente de carbono (CC, 0.5) utilizado por diversos autores (Petersson et al., 2012; Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Meza-Rangel, Aguirre-Calderón, & Razo-Zárate, 2008).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos en campo y mediante el uso de ecuaciones se obtuvieron variables compuestas que se sometieron a un análisis de varianza ($P \leq 0.05$) y pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey, para identificar las diferencias entre los contenidos medios de carbono de las etapas de desarrollo del bosque. Los datos se transformaron con logaritmo natural (ln) y se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. El análisis estadístico se hizo con el programa Minitab® versión 18.1 (Minitab, 2017).

Resultados y discusión

Características dasométricas por etapa de desarrollo

De acuerdo con el Cuadro 1, el área incorporada al manejo silvícola del ejido Atopixco, que se encuentra en diferentes etapas de desarrollo, tuvo árboles con diámetros que van de los 0.15 cm en la etapa de brinzal

Table 1. Tree measurement variables by stage of development of *Pinus patula* in the ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.
Cuadro 1. Variables dasométricas por etapa de desarrollo de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Stage/ Etapa	Density (trees-ha ⁻¹)/ Densidad (árboles-ha ⁻¹)	Diameter (cm)/ Diámetro (cm)			Height (m)/ Altura (m)		
		Minimum/ Mínimo	Average/ Promedio	Maximum/ Máximo	Minimum/ Mínimo	Average/ Promedio	Maximum/ Máximo
Brinzal	2 217	0.15	0.79 ± 0.2	3.02	0.13	0.67 ± 0.2	1.70
Monte bravo	3 447	0.40	1.72 ± 1.0	4.81	0.29	1.49 ± 0.4	3.50
Vardascal	1 817	1.10	4.06 ± 2.6	9.00	0.80	2.87 ± 1.0	5.20
Latizal	2 093	2.00	11.35 ± 11.3	24.00	2.00	9.93 ± 7.7	15.00
Fustal	937	13.00	26.46 ± 27.9	42.00	8.00	23.19 ± 16.8	29.00

± population variance / ± varianza de la población

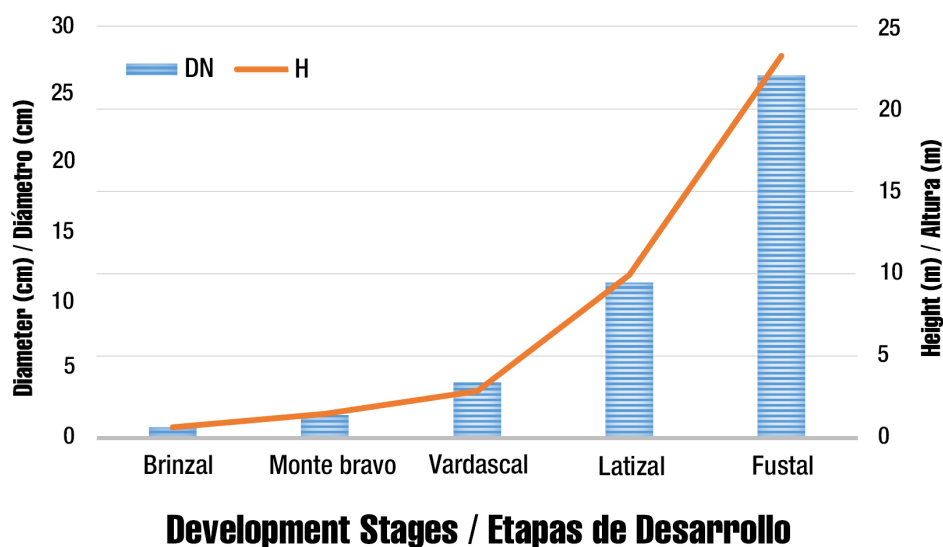


Figure 3. Tree growth at different stages of development of *Pinus patula* in ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Figura 3. Crecimiento del arbolado en las etapas de desarrollo de *Pinus patula* en ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

latizal stage, with accelerated growth when moving from latizal to fustal.

Aboveground biomass and carbon content

The analysis of variance showed that aerial biomass and carbon content differed significantly ($P \leq 0.0001$) among forest development stages. According to Table 2, Tukey's comparison test grouped each stage as a category. Trees at fustal stage had on average 294.8 kg of biomass. In the transition from the latizal stage to the fustal stage, the greatest difference in biomass of up to 271 kg was recorded in a period of less than 10 years, reflecting the high rate of carbon sequestration

hasta 42 cm en el arbolado adulto. Cabe aclarar que las áreas se regeneraron de manera natural y con frecuencia caen semillas en años posteriores a la corta de regeneración, motivo por el cual hay presencia de árboles con alturas menores a las mencionadas para cada etapa de desarrollo. Los valores registrados son similares a los rangos descritos por Aguilar-Luna (2018) y Aguirre et al. (2019) para la especie *P. patula*, lo que indica que el método no destructivo permite obtener estimaciones confiables sobre el contenido de carbono de dicha especie. Adicionalmente, hay densidades altas en la estructura de la masa forestal ocasionando la presencia de árboles dominados o suprimidos que se caracterizan por ser delgados y de poca altura.

Table 2. Aboveground biomass and carbon content per tree during the development stages of *Pinus patula* cultivated forest in the ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Cuadro 2. Biomasa aérea y contenido de carbono por árbol durante las etapas de desarrollo del bosque cultivado de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Stage/Etapa	Biomass (kg)/Biomasa (kg)	Carbon (kg)/Carbono (kg)
Fustal	294.82 ± 87.44 a	147.41 ± 43.72 a
Latizal	23.72 ± 2.78 b	11.86 ± 1.39 b
Vardascal	1.10 ± 0.34 c	0.55 ± 0.17 c
Monte bravo	0.12 ± 0.05 d	0.06 ± 0.03 d
Brinzal	0.02 ± 0.02 e	0.01 ± 0.01 e

Mean values (± standard deviation) with different letter indicate significant differences in biomass and carbon content among developmental stages, according to Tukey's test ($P \leq 0.05$). /

Los valores medios (± desviación estándar) con letra distinta indican diferencias significativas en el contenido de biomasa y carbono entre etapas de desarrollo, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

by the cultivated trees. For carbon content, the values showed the same trends.

The results reaffirm that managed forests fix high amounts of CO₂ according to stand age (Avendaño et al., 2009; Pan et al., 2011) and agree with Razo-Zárte et al. (2013), who mention that the rate of carbon fixation by photosynthetic processes is higher in young stands compared to mature stands.

Aboveground biomass

Aboveground biomass in cultivated forests consist of the trees established after regeneration cuts are applied, where the number of trees is gradually modified by cultivation activities such as pre-thinning cuts and commercial thinning. The highest tree density is present at the juvenile stages, highlighting monte bravo with averages of 3 447 trees·ha⁻¹. Thus, with the management in the following stages of development, tree density decreases, favoring growth and development of trees that will reach the final harvest (mature forest); that is, those that will generate the best material, environmental and economic benefits.

Figure 4 shows tree density and biomass by stage of development, highlighting the fustal stage with the lowest density (937 trees·ha⁻¹) and highest biomass (162.8 Mg·ha⁻¹). This reflects the effect of thinning as part of silvicultural management, because it reduces competition between trees and favors the increase in volume and biomass of residual trees (Ramírez-Martínez, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, González-Guillén, & Santiago-García, 2020), which are efficient for carbon sequestration and storage. In this regard, Fragoso-López et al. (2017) mention that it is necessary to

Con base en las etapas propuestas de desarrollo del bosque, la Figura 3 muestra que la dinámica de crecimiento en diámetro y altura de los árboles fue mayor en la etapa vardascal a latizal, con crecimiento acelerado al pasar de latizal a fustal.

Biomasa aérea y contenido de carbono

El análisis de varianza demostró que las variables biomasa aérea y contenido de carbono difieren significativamente ($P \leq 0.0001$) entre las etapas de desarrollo del bosque. Acorde con el Cuadro 2, la prueba de comparación de Tukey agrupó cada etapa como una categoría. Los árboles en etapa de fustal tuvieron en promedio 294.8 kg de biomasa. En el paso de la etapa de latizal a la de fustal se registró la mayor diferencia de biomasa de hasta 271 kg en un periodo menor de 10 años, lo que refleja la tasa alta de secuestro de carbono por los árboles cultivados. En la variable de contenido de carbono, los valores presentaron las mismas tendencias.

Los resultados reafirman que los bosques manejados fijan cantidades altas de CO₂ en función de la edad del rodal (Avendaño et al., 2009; Pan et al., 2011) y coinciden con Razo-Zárte et al. (2013), quienes señalan que la tasa de fijación de carbono por medio de procesos fotosintéticos es mayor en rodales jóvenes en comparación con rodales maduros.

Biomasa aérea

La biomasa aérea en bosques cultivados la constituye el arbolado establecido después de que se aplican las cortas de regeneración, donde el número de árboles se modifica gradualmente mediante las actividades

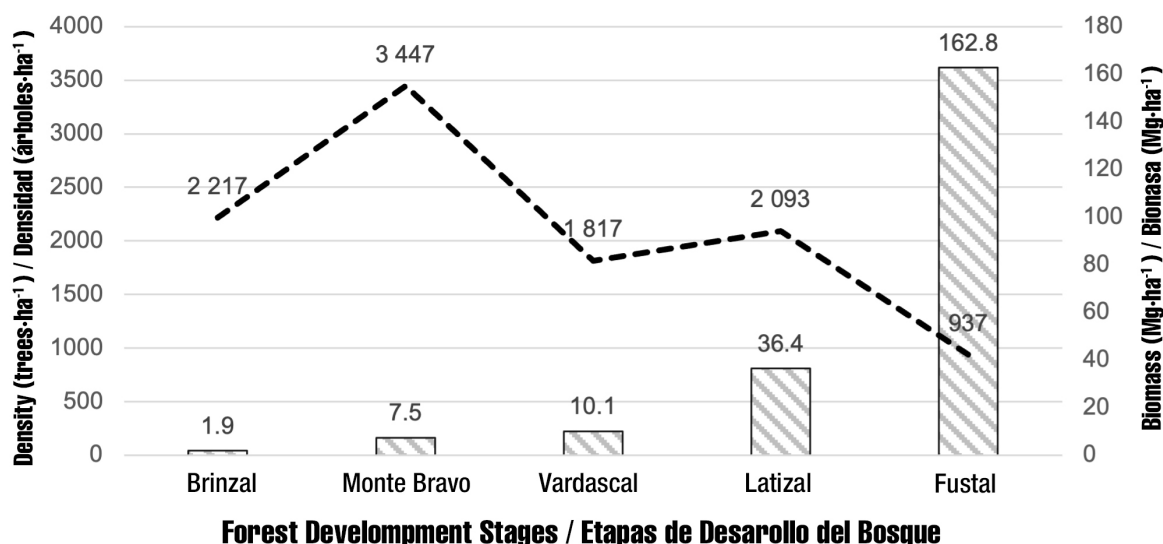


Figure 4. Average aboveground biomass and tree density by stage of development in the cultivated forest of *Pinus patula* in the ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

Figura 4. Biomasa aérea y densidad de arbolado promedio por etapa de desarrollo en el bosque cultivado de *Pinus patula* del ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

implement sustainable forest management that favors soil productivity to achieve maximum yield in a forest; likewise, Ramírez-Martínez et al. (2020) conclude that the management of tree density is essential to maximize timber yield and that the redistribution of tree spacing will improve total production in volume and take advantage of the potential productivity of *P. patula*.

According to that reported by Chávez-Aguilar et al. (2016), in a forest of the same region and species of about 80 years old (without silvicultural intervention), the total aboveground biomass was on average 208 Mg-ha⁻¹; a value 21 % higher than that estimated in the present study with an approximate age of 23 years (162.8 Mg-ha⁻¹) for the fustal stage. Similar values were found by Monárrez-González et al. (2018), who report that, at the ecosystem level, coniferous forest and broadleaf forests store 179 Mg-ha⁻¹ and 153 Mg-ha⁻¹, respectively.

Other studies by Soriano-Luna et al. (2015) and Figueroa-Navarro et al. (2010), using destructive methods, report a total of 166.6 Mg-ha⁻¹ of biomass for forests in the study area; that is, a difference of only 2.3 % compared to the present estimate at the fustal stage.

Carbon content

The information in Table 3 reveals the direct relationship between the stage of forest development and the amount of carbon stored. During the juvenile stages, competition for light, water and nutrients promotes rapid growth in height; however, through intermediate treatments (thinning) it is possible to redistribute biomass and

de cultivo como las cortas de preaclareo y aclareos comerciales. En las etapas juveniles se presenta la mayor densidad arbórea, destacando el monte bravo con promedios de 3 447 individuos-ha⁻¹. De modo que, con el manejo en las etapas siguientes de desarrollo, la densidad del arbolado disminuye favoreciendo el crecimiento y desarrollo de individuos que llegarán a la cosecha final (fustal maduro); es decir, los que generarán los mejores beneficios materiales, ambientales y financieros.

La Figura 4 representa la densidad de arbolado y biomasa correspondiente por etapa de desarrollo, destacando la etapa fustal con menor densidad (937 árboles-ha⁻¹) y mayor biomasa (162.8 Mg-ha⁻¹). Esto refleja el efecto de los aclareos como parte del manejo silvícola, ya que disminuye la competencia entre individuos y favorece el incremento en volumen y biomasa de los árboles residuales (Ramírez-Martínez, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, González-Guillén, & Santiago-García, 2020) que son eficientes para la captura y almacenamiento de carbono. Al respecto, Fragoso-López et al. (2017) mencionan que es necesario implementar el manejo forestal sostenible que favorezca la productividad del suelo, para lograr el máximo rendimiento en un bosque; asimismo, Ramírez-Martínez et al. (2020) concluyen que el manejo de la densidad del arbolado es fundamental para maximizar el rendimiento maderable y que la redistribución del espaciamiento de los árboles permitirá mejorar la producción total en volumen y aprovechar la productividad potencial de *P. patula*.

De acuerdo con lo reportado por Chávez-Aguilar et al. (2016), en un bosque de la misma región y especie de

Table 3. Estimates of aboveground biomass and carbon for each stage of development of the *Pinus patula* cultivated forest in Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.**Cuadro 3. Estimación de biomasa y carbono aéreos para cada etapa de desarrollo del bosque cultivado de *Pinus patula* en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.**

Stage / Etapa	Density (trees·ha ⁻¹) / Densidad (árboles·ha ⁻¹)	Biomass (Mg·ha ⁻¹) / Biomasa (Mg·ha ⁻¹)	Carbon (Mg·ha ⁻¹) / Carbono (Mg·ha ⁻¹)
Brinzal	2 217	1.9	0.94
Monte bravo	3 447	7.5	3.73
Vardascal	1 817	10.1	5.05
Latizal	2 093	36.4	18.18
Fustal	937	162.8	81.40

Table 4. Estimates of carbon stored in temperate forests in Mexico.**Cuadro 4. Estimaciones de carbono almacenado en bosques templados de México.**

References / Referencia	Estimation method / Método de estimación	Ecosystem / Ecosistema	Geographic location / Ubicación geográfica	Estimated carbon* (Mg C·ha ⁻¹) / Carbono estimado* (Mg C·ha ⁻¹)
Aguirre et al. (2009)	SPOT 5 HRG remote Sensing (regression and k-nn) / Percepción remota SPOT 5 HRG (regresión y k-nn)	Pine-oak (managed) / Pino-encino (manejado)	Hidalgo	63.98
Fragoso-López et al. (2017)	RapidEye-4 remote sensing B = 0.0713 D ^{2.5104} / Percepción remota RapidEye-4 B = 0.0713 D ^{2.5104}	Sacred fir (no management PNA) / Sacred fir (no management PNA)	Hidalgo	105.72
Hernández-Moreno et al. (2020)	B = 0.1549 DBH ^{2.3572} CC = 0.07744 DBH ^{2.3572}	Pine-oak (managed) / Pino-encino (manejado)	Michoacán	128.44
Álvarez and Rubio (2013) / Álvarez y Rubio (2013)	Model CO2FIX v3.2 / Modelo CO2FIX v3.2	Pine-oak (managed) / Pino-encino (manejado)	Oaxaca	118.60
Rodríguez-Laguna et al. (2008)	B = a ₀ * DBH ^{a1}	Pine-oak (no management PNA) / Oyamel (sin manejo ANP)	Tamaulipas	82.90
Acosta-Mireles, Carrillo-Anzures, and Díaz-Lavariaga (2009)	B = 0.0948 * DBH ^{2.4079}	Pine-oak (managed) / Pino-encino (manejado)	Tlaxcala	118.30
Current study (2021) / Presente estudio (2021)	B = AS * D	Pine-oak (managed) / Pino-encino (manejado)	Hidalgo	81.40

* For the conversion of biomass (B) to carbon (C) the equation $C = B * CC$, where CC = carbon coefficient (0.5) was used. DBH: diameter at breast height, AS: actual stock, D: wood density, PNA: protected natural area./

*Para la conversión de biomasa (B) a carbono (C) se utilizó la ecuación $C = B * CC$, donde CC = coeficiente de carbono (0.5). DN: diámetro normal, ER: existencias reales, D: densidad de la madera, ANP: área natural protegida.

carbon, favoring fixation in the stem by an increase in the measurement characteristics of residual trees in the intervention areas.

The management of the Atopixco ejido forest, based on the silvicultural development method, favors its productive capacity, the economic activity that timber harvesting represents and the potential of sustainable forest management for climate change mitigation.

Table 4 compares six results of studies of carbon content in other forests in the country, regarding only the adult stage (fustal). Concerning estimates made in similar ecosystems, the results of the present study are close to those reported by Rodríguez-Laguna et al. (2009) and Figueroa-Navarro (2010), taking into account that the estimation models are different; in addition, they confirm the versatility of alternatives for carbon quantification in forest ecosystems by non-destructive methods.

Despite considering an average variation of 22 % in terms of estimating carbon content per unit area, remote sensing techniques, used by Frago-López et al. (2017) and Aguirre-Salado et al. (2009), are tools that allow rapid estimates and are more efficient in terms of human, material and financial resources compared to direct measurements.

Conclusions

The use of tree measurement and wood density variables as calculation inputs for rapid estimates of biomass and aboveground carbon content are very useful for the quantification of the ecosystem services provided by the forest. In this case, carbon storage in the Atopixco forest represents 81.40 Mg C·ha⁻¹. The classification by stages of development represents an important tool for marketing strategies of environmental services for carbon sequestration, which has imminent market potential for the mitigation of climate change impacts. The use of non-destructive methods guarantees the practical usefulness to generate quantitative estimates of aboveground carbon in forests and its advantages include low cost and relative speed; however, it does not consider important reservoirs in terms of forest carbon content, such as soil.

Acknowledgments

The authors thank the ejidatarios and forestry technical service providers for their kind collaboration in the field data collection. To Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the academic funding for this research.

aproximadamente 80 años (sin intervención silvícola), la biomasa aérea total fue en promedio 208 Mg·ha⁻¹; valor 21 % superior al estimado en el presente estudio con edad aproximada de 23 años (162.8 Mg·ha⁻¹) para la etapa fustal. Valores similares obtuvieron Monárrez-González et al. (2018), quienes reportan que, a nivel de ecosistema, el bosque de coníferas y bosques de hoja ancha almacenan 179 Mg·ha⁻¹ y 153 Mg·ha⁻¹, respectivamente.

En otros estudios realizados por Soriano-Luna et al. (2015) y Figueroa-Navarro et al. (2010), utilizando métodos destructivos, se reporta un total de 166.6 Mg·ha⁻¹ de biomasa para bosques del área de estudio; es decir, una diferencia de solo 2.3 % comparado con la presente estimación en etapa fustal.

Contenido de carbono

La información del Cuadro 3 revela la relación directa que existe entre la etapa de desarrollo del bosque y la cantidad de carbono almacenado. Durante las etapas juveniles, la competencia por luz, agua y nutrientes promueve el crecimiento rápido en altura; sin embargo, mediante los tratamientos intermedios (aclareos) es posible redistribuir la biomasa y carbono favoreciendo la fijación en los fustes por el incremento dasométrico en los árboles residuales de las áreas intervenidas.

El manejo del bosque del ejido Atopixco, con base en el método de desarrollo silvícola, favorece su capacidad productiva, la actividad económica que el aprovechamiento maderable representa y el potencial del manejo forestal sustentable para la mitigación del cambio climático.

El Cuadro 4 compara seis resultados de estudios del contenido de carbono en otros bosques del país, considerando únicamente la etapa adulta (fustal). Con respecto a las estimaciones realizadas en ecosistemas similares, los resultados del presente trabajo se aproximan a los reportados por Rodríguez-Laguna et al. (2009) y Figueroa-Navarro (2010), tomando en cuenta que los modelos de estimación son diferentes; además, confirman la versatilidad de alternativas para la cuantificación de carbono en ecosistemas forestales por métodos no destructivos.

A pesar de considerar una variación promedio de 22 % en cuanto a la estimación del contenido de carbono por unidad de superficie, las técnicas de percepción remota, utilizadas por Frago-López et al. (2017) y Aguirre-Salado et al. (2009), son herramientas que permiten realizar estimaciones rápidas y resultan más eficientes en cuanto a recursos humanos, materiales y financieros en comparación con las mediciones directas.

End of English version

Referencias / Referencias

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz-Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105–114. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n2/v27n2a3.pdf>
- Aguilar-Luna, J. M. E. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 230–252. doi: 10.29298/rmcf.v9i47.154
- Aguirre, Z., Díaz, E., Muñoz J., & Muñoz, L. (2019). Sucesión natural bajo plantaciones de *Pinus radiata* D. Don (Pinaceae) y *Eucalyptus globulus* Labill. (Myrtaceae), en el sur del Ecuador. *Arnaldoa*, 26(3), 943–964 doi: 10.22497/arnaldoa.263.26306
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., De los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209–220. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000200011
- Álvarez, S., & Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la sierra Juárez (Oaxaca, México): Aplicación del modelo CO2FIX v. 3.2. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 125–137. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005
- Avendaño Hernández, D. M., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., & Etchevers Barra, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233–238. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v32n3/v32n3a11.pdf>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covaleda-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: Primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–22. doi: 10.21829/myb.2018.2401894
- Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. A., García-Moya, E., & Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 23–36. doi: 10.21829/myb.2016.2231454
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2016). SiBiFor: Biblioteca digital del sistema para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México. Retrieved from <http://fcfposgrado.ujed.mx/sibifor/inicio/documentos.php>
- Figuerroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & De los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/>

Conclusiones

El uso de variables dasométricas y densidad de la madera como insumos de cálculo para estimaciones rápidas de biomasa y contenido de carbono aéreo son de gran utilidad para la cuantificación de los servicios ecosistémicos que el bosque provee. En este caso, el almacenamiento de carbono en el bosque de Atopixco representa 81.40 Mg C·ha⁻¹. La clasificación por etapas de desarrollo representa una herramienta importante en las estrategias de comercialización de servicios ambientales por concepto de captura de carbono, el cual tiene potencial inminente de mercado para la mitigación de impactos emanados del cambio climático. El uso de métodos no destructivos garantiza la utilidad práctica para generar estimaciones cuantitativas del carbono aéreo en los bosques y entre sus ventajas destacan el bajo costo y su relativa rapidez; sin embargo, no considera depósitos importantes en cuanto al contenido de carbono del bosque, como lo es el suelo.

Agradecimientos

A los ejidatarios y prestador de servicios técnicos forestales por su amable colaboración en el levantamiento de información de campo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento académico para la realización del presente trabajo.

Fin de la versión en español

- pdf/remcf/v1n1/v1n1a12.pdf
- Fonseca, W., Benayas, J. M. R., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(2011), 1400–1408. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.036
- Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., González-Ramírez, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Cortés-Blobaum, H. J., & Razo-Zárate, R. (2017). Carbon sequestration in protected areas: A case study of an *Abies religiosa* (H. B. K.) Schlecht. et Cham Forest. *Forests*, 8(11), 429. doi: 10.3390/f8110429
- García, E. (1981). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México: Offset Larios S. A.
- Hernández-Moreno, J. A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Gómez-Guerrero, A., Hernández, V. J. R., & Vera-Castillo, J. A. G. (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*, 26(1), 17. doi: 10.21829/myb.2020.2611802
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. Aguascalientes, México: Author.
- Minitab Inc. (2010). Minitab version 18.1 statistical software. State College, PA, USA: Author.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421569. doi: 10.21829/myb.2018.2421569
- Pacheco-Aquino, G., Durán Medina, E., & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2015). Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 126–145. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000300009&lng=es&tlng=es
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., ...Mäkipää, R. (2012). Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass—A comparative study. *Forest Ecology and Management*, 270(2012), 78–84. doi: 10.1016/j.foreco.2012.01.004
- Ramírez-Martínez, A., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., González-Guillén, M. J., & Santiago-García, W. (2020). Densidad inicial en el rendimiento maderable y biomasa de *Pinus patula* con especies latifoliadas. *Agrociencia*, 54(4), 555–573. Retrieved from <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/459/627>
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, R., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego, en el Parque nacional El Chico. *Madera y Bosques*, 19(2), 73–86. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/617/61728317006.pdf>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317–327. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/461/46111817006.pdf>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Meza-Rangel, J., Aguirre-Calderón, O., & Razo-Zárate, R. (2008). Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 215–222. Retrieved from https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Joel_Meza/9.pdf
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez Maldonado, H. (2010). Dendrometría. Retrieved from <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2013). Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia mexicana*, 36(2), 163–172. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000200009
- Soriano-Luna, M. A., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006
- Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., García Gallegos, E., & Ramírez-Flores, J. A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques*, 21(1), 129–138. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000100010

