

Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México*

Allometric equations for estimating biomass and carbon from the aerial part of *Pinus hartwegii* in Ixta-Popo National Park, Mexico

Fernando Carrillo Anzures¹, Miguel Acosta Mireles^{1§}, Carmen del R. Jiménez Cruz², Lucila González Molina¹ y Jorge D. Etchevers Barra³

¹Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Textcoco, Coatlinchán, Textcoco, km 13.5, Estado de México. C. P. 56250. (carrillo.fernando@inifap.gob.mx; acosta.miguel@inifap.gob.mx; gonzalez.lucila@inifap.gob.mx). ²Universidad Autónoma Chapingo-División de Ciencias Forestales, Carretera México-Textcoco, km 38.5 Chapingo Estado de México, C. P. 56230. ³Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Textcoco, km 36.5, Montecillos, Textcoco, Estado de México, C. P. 56230. (jetchev@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: acosta.miguel@inifap.gob.mx.

Resumen

Para determinar la biomasa en árboles de *Pinus hartwegii* y estimar el contenido de carbono aéreo, se calcularon ecuaciones alométricas con 29 árboles de dicha especie del Parque Nacional Izta-Popo, México. El 57.9% del peso húmedo de los árboles fue biomasa y de esta 48.6% fue carbono. La distribución de la biomasa en los árboles fue: 65.3% en el fuste, 23.8% en las ramas y 10.9% en el follaje. El contenido de carbono se distribuyó de manera similar: 64.9% en el fuste, 24.2% en las ramas y 10.9% en el follaje. El modelo ajustado es de la forma $Y = bX^k$ donde la variable dependiente (Y) es biomasa o carbono, expresada en kilogramos y la variable independiente el diámetro normal tomado a 1.3 m de altura (DN) expresado en centímetros. Los parámetros "b" y "k" del modelo fueron obtenidos por regresión lineal por el método de mínimos cuadrados; "b" mide el intercepto y "k" la pendiente del modelo. La ecuación resultante para la estimación de la biomasa fue $B = 0.0635DN^{2.4725}$ y para el contenido de carbono: $C = 0.0309DN^{2.4722}$, en ambas el valor de R^2 fue de 0.98. Fue posible ajustar la ecuación alométrica para estimar la biomasa y el contenido de carbono de *Pinus hartwegii* con un alto coeficiente de determinación. Con la ecuación

Abstract

To determine the biomass in trees of *Pinus hartwegii* and estimate the carbon content air, allometric equations with 29 trees of that species of Izta-Popo National Park, Mexico were calculated. The 57.9% of wet weight of biomass trees was 48.6% and this was carbon. The distribution of biomass in the trees was: 65.3% in the shaft, 23.8% at branches and 10.9% the foliage. The carbon content was distributed similarly: 64.9% in the shaft, 24.2% at 10.9% branches and the foliage. The adjusted model is of the form $Y = bX^k$ where the dependent variable (Y) or biomass carbon is expressed in kilograms and the independent variable taken the normal diameter 1.3 m (DN) expressed in centimeters. The parameters "b" and "k" model were obtained by linear regression by the method of least squares; "b" measures the intercept and "k" slope model. The resulting equation for estimating biomass was $B = 0.0635DN^{2.4725}$ and carbon content: $C = 0.0309DN^{2.4722}$, in both the value of R^2 was 0.98. It was possible to adjust the allometric equation for estimating biomass and carbon content of *Pinus hartwegii* with a high coefficient of determination. With the equation obtained was possible to determine that trees of this species concentrate most air bole carbon followed by the branches and finally the foliage.

* Recibido: octubre de 2015
Aceptado: enero de 2016

obtenida fue posible determinar que los árboles de esta especie concentran la mayor parte del carbono aéreo en el fuste seguido por las ramas y por último el follaje.

Palabras clave: alometría, almacén de carbón, bosque de pino, cambio climático.

Introducción

El calentamiento global o aumento en la temperatura mundial, fenómeno físico que se ha presentado en los últimos años, se relaciona con el incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero entre los cuales el principal es el CO₂, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007). En 2005, las concentraciones de CO₂ y CH₄ en la atmósfera excedieron considerablemente al intervalo de valores naturales de los últimos 650 000 años (IPCC, 2007), situación que seguramente pone en riesgo el equilibrio climático del planeta. Aunque en la actualidad se mantuvieran constantes las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y aerosoles en los niveles que alcanzaron en el año 2000, cabría esperar un calentamiento global adicional de aproximadamente 0.1 °C en la temperatura cada 10 años.

El protocolo de Kioto incluye tres mecanismos (artículos 6, 12 y 17) diseñados para incrementar el costo-efectividad y mitigar el cambio climático, al crear opciones para que los países incluidos en el anexo I de dicho protocolo puedan reducir sus emisiones, o aumentar sus sumideros de carbono de manera más económica en otros países que no sea el propio (Guzmán *et al.*, 2004). Entre estos mecanismos se encuentran: el comercio de emisiones (artículo 17), instrumentación conjunta (artículo 6) y mediante mecanismos de desarrollo limpio (MDL) (artículo 12).

Rosa *et al.* (2004) mencionan que los servicios ambientales se definen como “los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas”, y de acuerdo con la evaluación ecosistemática del milenio, los clasifica en servicios de aprovisionamiento; de regulación de los procesos ecosistémicos; culturales y de soporte. Dentro de los servicios ambientales que proporcionan los bosques se encuentran la contribución a ciclos básicos (agua, carbono y otros nutrientes); estabilidad climática; captura de carbono, protección y mantenimiento de la biodiversidad; protección de cuencas hidrográficas para captación de agua de buena calidad y belleza escénica (Torres y Guevara, 2002).

Keywords: allometry, climate change, pine forest, store carbon.

Introduction

Global warming or increase in global temperature, physical phenomenon that has arisen in recent years, is related to the increased concentrations of greenhouse gases among which the principal is CO₂, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007). In 2005, concentrations of CO₂ and CH₄ in the atmosphere exceeded considerably the range of natural values of the last 650 000 years (IPCC, 2007), a situation that certainly threatens the climate balance of the planet. Although the concentrations of all greenhouse gases and aerosols in the levels reached in 2000 remained constant at present, one would expect an additional global warming of about 0.1 °C in temperature every 10 years.

The Kyoto Protocol includes three mechanisms (articles 6, 12 and 17) designed to increase the cost-effectiveness and mitigate climate change, by creating options for countries listed in annex I to that protocol to reduce emissions, or increase its carbon sinks more cheaply in other countries than their own (Guzman *et al.*, 2004). These mechanisms are: emissions trading (article 17), joint implementation (article 6) and through clean development mechanism (MDL) (article 12).

Rosa *et al.* (2004) mention that environmental services are defined as "the benefits that people obtain from ecosystems" and according to the assessment ecosystematic millennium, classified provisioning services; regulation of ecosystem processes; cultural and supporting. Among the environmental services provided by forests are contributing to basic cycles (water, carbon and other nutrients); climate stability; carbon sequestration, protection and maintenance of biodiversity; watershed protection for water catchment quality and scenic beauty (Torres and Guevara, 2002).

Forest ecosystems can store significant amounts of CO₂; however, under certain circumstances they can become a source of this gas. In recent decades there has been considerable interest in increasing the carbon content by increasing the terrestrial vegetation, preserving the forest cover, reforestation, proper implementation of agroforestry practices and other methods of soil conservation (De Jong *et al.*, 2004).

Los ecosistemas forestales pueden almacenar cantidades significativas de CO₂; sin embargo, bajo ciertas circunstancias éstos pueden llegar a ser una fuente de este gas. En las últimas décadas ha surgido un interés considerable por incrementar el contenido de carbono mediante el aumento de la vegetación terrestre, conservando la cubierta forestal, la reforestación, aplicación adecuada de las prácticas agroforestales y otros métodos de conservación del suelo (De Jong *et al.*, 2004).

Respecto al almacenamiento del carbono, el protocolo de Kioto otorgó reconocimiento oficial al papel de los bosques como “sumideros” en la mitigación del cambio climático global, al reducir las concentraciones atmosféricas de CO₂; asimismo, ha tratado de promover un mercado potencial para la captura del carbono en las áreas forestales (Bull *et al.*, 2006). Sin embargo, existe controversia en cuanto a este mecanismo ya que hay quienes argumentan que aún no se han perfeccionado mecanismos confiables para supervisar y verificar la captura y liberación de carbono de las áreas boscosas, lo que dificulta confirmar lo que se está comercializando (Bishop y Landell-Mills, 2003).

Para estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa forestal se han desarrollado métodos directos e indirectos. Los directos consisten en un análisis destructivo para la estimación del peso verde y el peso seco de cada uno de los componentes de los árboles seleccionados (Hitchcock y McDonnell, 1979). Los segundos se basan en la utilización de modelos matemáticos que estiman el peso de las diferentes fracciones del árbol a partir de variables individuales; sin embargo, para poder desarrollar los métodos indirectos es necesario contar con datos obtenidos de métodos directos. En los métodos indirectos también se ha estimado la biomasa mediante el empleo de sensores remotos (fotografía aérea, imágenes de satélite, imágenes de radar, etc.).

Cuando se desea conocer la biomasa aérea de los árboles, una respuesta práctica es la utilización de ecuaciones alométricas; es decir, mediante estimaciones indirectas del material vegetal cuya cantidad se desea conocer previa recolección de datos obtenidos de muestreos directos. Dichas funciones, estiman las relaciones entre la biomasa total con la que cuenta el árbol y algunas de sus dimensiones como suelen ser las más comúnmente utilizadas: altura, diámetro normal o área de albura (Acosta *et al.*, 2002); asimismo, pueden considerarse no sólo variables morfológicas, sino también fisiológicas o bioquímicas (López, 1995). Las ecuaciones alométricas se usan especialmente para proyectos de pequeña escala. Cuando se trata de estimar la biomasa

With respect to carbon storage, the Kyoto protocol granted official recognition to the role of forests as "sinks" in mitigating global climate change by reducing atmospheric concentrations of CO₂; it has also tried to promote the potential market for carbon sequestration in forest areas (Bull *et al.*, 2006). However, there is controversy as to this mechanism as there are those who argue that they have not yet perfected reliable mechanisms to monitor and verify catch and release of carbon from forested areas, making it difficult to confirm what is being marketed (Bishop and Landell-Mills, 2003).

To estimate the carbon stored in forest biomass have been developed direct and indirect methods. Direct consist destructive analysis for estimating the green weight and dry of each of the components of the selected trees (Hitchcock and McDonnell, 1979) weight. The latter are based on the use of mathematical models that estimate the weight of the different fractions of the tree from individual variables; however, in order to develop indirect methods it is necessary to have data from direct methods. In indirect methods it has also been estimated biomass by using remote sensing (aerial photographs, satellite images, radar images, etc.).

When you want to know the biomass of trees, a practical response is the use of allometric equations; i.e. by indirect estimates of plant material whose quantity is desired to know prior collection data obtained from direct sampling. These functions, consider the relationship between the total biomass that counts the tree and some of its dimensions are usually the most commonly used: height, normal diameter or sapwood area (Acosta *et al.*, 2002) also they can be considered not only morphological variables, but also physiological or biochemical (Lopez, 1995). Allometric equations are used especially for small-scale projects. When it comes to estimating biomass in large areas (region or country level) is preferable to use methods based on spectrometry, such as REDD or REDD +.

In many parts of the world they have conducted studies to determine the parameters of allometric equations to help calculate the biomass contained in forest species (Gaillard *et al.*, 2002). In Mexico, such studies exist for calculating biomass of conifers, and comparisons have been made regarding the models used (Domínguez *et al.*, 2009; Montes de Oca *et al.* 2009; Pimienta *et al.*, 2007). Of the variables taken into account, the main ones are normal diameter and height (Vidal *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014). In these cases the sample size or number of measured trees has varied.

en grandes extensiones (nivel región o país) es preferible recurrir a los métodos basados en la espectrometría, como es el caso de REDD o REDD+.

En muchas partes del mundo se han realizado estudios para determinar los parámetros de ecuaciones alométricas que ayuden a calcular la biomasa aérea contenida en especies forestales (Gaillard *et al.*, 2002). En México, dichos estudios existen para el cálculo de biomasa de coníferas, y se han hecho comparaciones en cuanto a los modelos utilizados (Domínguez *et al.*, 2009, Montes de Oca *et al.* 2009, Pimienta *et al.*, 2007). De las variables tomadas en cuenta, las principales son diámetro normal y altura (Vidal *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014). En estos casos el tamaño de muestra o número de árboles medidos ha variado.

Por lo anterior, en el presente trabajo se plantearon como objetivos determinar los parámetros de dos ecuaciones alométricas que permitan calcular la biomasa y el contenido de carbono de la porción aérea de *Pinus hartwegii* Lindl., con base en el diámetro normal, mediante un muestreo de tipo destructivo de árboles seleccionados en el Parque Nacional Izta-Popo que abarca parte del Estado de México y de los estados de Puebla y Morelos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El muestreo se realizó dentro del Parque Nacional Izta-Popo, en el paraje denominado "Paso de Cortés", a 24 km al sureste de la ciudad de Amecameca, Estado de México (19° 16' 25" latitud norte, 98° 34' 54" longitud oeste). El parque se encuentra en la parte central del eje volcánico transversal de México. Los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, constituyen las montañas más altas de la Sierra Nevada. El clima que predomina es frío subhúmedo de alta montaña, con temperatura media anual de 5 a 12 °C, la del mes más frío de 3 a 8 °C y una precipitación media anual de 928 mm. Los suelos son Andosoles derivados de cenizas volcánicas (García, 1988).

Determinación de la biomasa

La metodología empleada fue similar a la aplicada por Avendaño *et al.* (2009), Carrillo *et al.* (2014), Díaz *et al.* (2007), y para estimar la biomasa y el carbono en diferentes

Therefore, in the present work objectives were to determine the parameters of two allometric equations for calculating biomass and carbon content of the air portion of *Pinus hartwegii*, based on the normal diameter by sampling destructive type selected trees in the Izta-Popo National Park covering the State of Mexico and the states of Puebla and Morelos.

Materials and methods

Study area

Sampling was done within the Izta-Popo National Park in the area called "Paso de Cortes", 24 km southeast of the town of Amecameca, State of Mexico (19° 16' 25" north latitude, 98° 34' 54" west longitude). The park is located in the central part of the transverse volcanic axis of Mexico. The Popocatepetl and Iztaccíhuatl volcanoes are the highest mountains of the Sierra Nevada. The prevailing climate is cold high mountain humid, with annual average temperature of 5 to 12 °C, the coldest month from 3 to 8 °C and an average annual rainfall of 928 mm. The andosols soils are derived from volcanic ash (García, 1988).

Determination of biomass

The methodology used was similar to that applied by Avendaño *et al.* (2009), Carrillo *et al.* (2014), Díaz *et al.* (2007), and to estimate biomass and carbon in different species of trees. A representative sample of 29 healthy trees of *Pinus hartwegii* was selected, the trees had different normal diameter (1.3 m. Height) (DN) ranging from 3.3 to 57.2 cm. The number of trees sampled by diameter class was not uniform due to the restrictions of the National Park as only few trees downing larger and most of them were small diameter were allowed. The average age of the stand is 86 years, with a density of 200 trees ha and an average height woodland of 21.7 m.

Before the demolition, each tree was measured normal diameter (DN) with diameter tape and once knocked down was measured total height with a tape measure and height of the felling cut (stump height). The trees were separated into branches, foliage and trunk, the latter was split into logs, logs the first 3 m long and 1.25 m the past. Before cutting the logs, the base of each slice of about 5 cm thick was obtained. The fresh weight of each log was obtained in

especies de árboles. Una muestra representativa de 29 árboles sanos de *Pinus hartwegii* fue seleccionada, los árboles tenían diferente diámetro normal (a 1.3 m. de altura) (DN) en un rango de 3.3 a 57.2 cm. El número de árboles muestreados por categoría diamétrica no fue uniforme debido a las restricciones del Parque Nacional, ya que sólo se permitió el derribo de pocos árboles de mayor tamaño y la mayor parte de ellos eran de diámetro pequeño. La edad promedio del rodal es de 86 años, con una densidad de 200 árboles/hectárea y una altura promedio del arbolado de 21.7 m.

Antes del derribo, a cada árbol se le midió el diámetro normal (DN) con cinta diamétrica y una vez derribado se le midió la altura total con un flexómetro y la altura del corte de derribo (altura del tocón). Los árboles se separaron en ramas, follaje y tronco, este último fue fraccionado en trozas, las primeras trozas de 3 m de longitud y las últimas de 1.25 m. Antes de cortar las trozas, de la base de cada una de ellas se obtuvo una rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor. El peso fresco de cada troza se obtuvo en el mismo lugar donde fue derribado cada árbol con una báscula de 200 kg de capacidad y 1 kg de precisión. Para aquellas trozas que excedían los 200 kg así como para el tocón, su peso húmedo se obtuvo de la ecuación lineal generada por la relación volumen-peso de las trozas cuyo peso sí se pudo obtener directamente en campo. Para la cubicación de las trozas se utilizó la fórmula de Huber modificada (Romahn *et al.*, 1987) y para el tocón la fórmula de neiloide truncado. Las rodajas obtenidas de las trozas, las muestras de ramas y las muestras de follaje se pesaron húmedas en campo, con una báscula de 15 kg de capacidad y 10 g de precisión. Las rodajas, las ramas y el follaje, fueron cuidadosamente etiquetadas para su posterior identificación en el laboratorio.

Las ramas fueron colocadas en costales y pesadas de forma seccionada con la báscula de 200 kg de capacidad, el peso húmedo de las ramas correspondió a la suma del peso de las secciones. El mismo procedimiento se llevó a cabo para el follaje. Del total de ramas y follaje se obtuvieron de dos a tres muestras por árbol de aproximadamente de 1 a 3 kg para árboles grandes y una para árboles pequeños.

Una vez pesadas las muestras, fueron transportadas al Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y colocadas en un invernadero para reducir su humedad. Debido a que el invernadero no da lugar a un secado total, se tomaron submuestras de algunas muestras para llevarlas a peso seco; las submuestras de rodajas y ramas fueron secadas en estufa a 103 °C por 72 h y las del follaje a 60 °C por 48 h

the same place where he was shot down every tree with a weighing capacity of 200 kg and 1 kg precision. For those logs exceeding 200 kg and for the stump, its wet weight was obtained from the linear equation generated by the volume-weight ratio of logs whose weight itself could be obtained directly in the field. Huber's formula modified (Romahn *et al.*, 1987) and the stump truncated neiloide formula used for calculating volume of logs. The slices obtained from logs, samples of branches and foliage samples were weighed wet field, with a weighing capacity of 15 kg and 10 g precision. The slices, branches and foliage, were carefully labeled for identification in the laboratory.

The branches were placed in bags and heavy sectional shape with the scale of 200 kg capacity, the wet weight of the branches corresponded to the sum of the weight of the sections. The same procedure was carried out for foliage. Of total branches and leaves they were obtained two to three samples per tree about 1 to 3 kg for large trees and small trees.

Once heavy samples were transported to the Valley of Mexico Experimental Station of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), and placed in a greenhouse to reduce humidity. Because the gases does not result in a total drying subsamples they were taken some samples to carry them dry weight; subsamples of slices and branches were dried in an oven at 103 °C for 72 h and foliage at 60 °C for 48 h to constant weight with this information the dry weight of the material being weighed field was calculated log, branches and leaves, or biomass thus each component was obtained. The wet/dry weight of the first slice weight ratio was also used to calculate the biomass of stump and by adding biomass of each log and stump, the total biomass of the bole of each tree was obtained. The same was done for the branches and foliage and determine the biomass of each tree crown.

A potential model (Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997) was used to estimate the biomass according to the normal diameter, the parameters were obtained using least squares. The general representation of the model is shown in Equation 1.

$$Y = bX^k \quad 1)$$

Where: Y= biomass or carbon (kg); X= normal diameter; DN (cm); b and k= model parameters.

The model [1] can be linearized to facilitate regression analysis: Little and Jackson (1976) recommend logarithmic transformations do so by adopting the form:

o hasta obtener un peso constante con esta información se calculó el peso seco para el material que se pesó en campo, trozas, ramas y follaje, o sea de esa forma se obtuvo la biomasa de cada componente. La relación peso seco/peso húmedo de la primera rodaja también se utilizó para calcular la biomasa del tocón y mediante la suma de la biomasa de cada troza y del tocón, se obtuvo la biomasa total del fuste de cada árbol. Lo mismo se hizo para las ramas y el follaje y determinar la biomasa de la copa de cada árbol.

Para estimar la biomasa en función del diámetro normal, se utilizó un modelo potencial (Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997), los parámetros se obtuvieron utilizando mínimos cuadrados. La representación general del modelo se presenta en la ecuación 1.

$$Y = bX^k \quad 1)$$

Donde= Y= biomasa aérea o carbono (kg); X= diámetro normal, DN (cm); b y k= parámetros del modelo.

El modelo [1] se puede linealizar para facilitar el análisis de regresión: Little y Jackson (1976) recomiendan hacerlo mediante transformaciones logarítmicas adoptando la forma:

$$\ln(Y) = \ln(b) + k \ln(X) \quad 2)$$

Donde= Y, X, b y k tienen el mismo significado que en la ecuación 1, $\ln(Y)$, $\ln(b)$ y $\ln(X)$ son logaritmos naturales de Y, b y X, respectivamente. De hecho, para identificar la efectividad del modelo utilizado, primero se linealizó y después se graficaron los residuales y su dispersión.

Determinación de carbono

De los 29 árboles seleccionados para la estimación de la biomasa se eligieron 13 para determinar el porcentaje de carbono de cada uno de sus componentes (fuste, ramas y follaje). Esta selección se hizo equitativamente dentro del rango de diámetros del que se dispuso. Para determinar el contenido de carbono de las muestras de rodajas, ramas y follaje se obtuvo una submuestra de aproximadamente 50 g, respectivamente, con las características mencionadas por Acosta *et al.* (2002). Las submuestras se molieron y secaron por dos horas a 60 °C y posteriormente se determinó su contenido de carbono por el método de combustión seca por medio del analizador de carbono Total Organic Carbon Analyzer (TOC-5050A). Para obtener el contenido

$$\ln(Y) = \ln(b) + k \ln(X) \quad 2)$$

Where: Y, X, b and k have the same meaning as in equation 1; $\ln(Y)$, $\ln(b)$ and $\ln(X)$ are natural logarithms of Y; b and X, respectively. In fact, to identify the effectiveness of the model used, first linearized and then the residual dispersion were graphed.

Determination of carbon

Of the 29 trees selected for estimating biomass 13 they were chosen to determine percent carbon of each of its components (stem, branches and leaves). This selection was made equally within the range of diameters became available. To determine the carbon content of the samples of sliced, branches and leaves was obtained a subsample of about 50 g, respectively, with the features mentioned by Acosta *et al.* (2002). The subsamples were ground and dried for two hours at 60 °C and then carbon content was determined by dry combustion method using the Total Organic Carbon Analyzer Carbon Analyzer (TOC-5050A). For the carbon content of the stem, branches and foliage around the tree the total biomass of each component was multiplied by the average carbon content fraction obtained from the subsamples of each component. The carbon content of the whole tree was the result of the sum of carbon stump, stem, branches and leaves.

After obtaining the data carbon content of each tree in kilograms, the allometric model developed was used to estimate biomass and correlated the carbon content according to the normal diameter, using data on both variables for each tree (DN and biomass). As in the case of the model to determine biomass, it was linearized and then the residual dispersion to identify the effectiveness of the model used were graphed. In addition to testing the model including the DN as the only independent variable, they were also tested other models where the total height (m) was included to determine whether it was significant inclusion or not in the same model.

Results and discussion

Biomass

The fresh weight of the 29 trees used to generate the equation is placed in the range of 1.7 to 2 917.9 kg. Tree biomass was 1.37 to 1 142 kg, corresponding to trees with less DN (3.3 cm) and most DN (57.2 cm), respectively.

de carbono del fuste, ramas y follaje de todo el árbol se multiplicó la biomasa total de cada componente por el promedio de la fracción del contenido de carbono obtenido de las submuestras de cada componente. El contenido de carbono del árbol completo fue el resultado de la suma del carbono del tocón, fuste, ramas y follaje.

Una vez obtenidos los datos de contenido de carbono de cada árbol en kilogramos, se empleó el modelo alométrico desarrollado para estimar la biomasa y se correlacionó el contenido de carbono en función del diámetro normal, usando los datos de ambas variables para cada árbol (DN y biomasa). Al igual que en el caso del modelo para determinar la biomasa, éste se linealizó y después se graficaron los residuales y su dispersión para identificar la efectividad del modelo utilizado. Además de probar el modelo incluyendo al DN como única variable independiente, se probaron también otros modelos en donde se incluyó la altura total (m), para determinar si era significativa incluirla o no en el mismo modelo.

Resultados y discusión

Biomasa

El peso fresco de los 29 árboles empleados para generar la ecuación se ubicó en el rango de 1.7 a 2 917.9 kg. La biomasa por árbol fue de 1.37 a 1142 kg, correspondiendo a los árboles con el menor DN (3.3 cm) y al de mayor DN (57.2 cm), respectivamente.

La mayor cantidad de biomasa en *Pinus hartwegii* correspondió a la acumulada en el fuste, con 45.5 a 84.6% según el individuo, y 65.3% promedio. La biomasa de las ramas representó 11.4 a 37.4% del total del árbol, con un promedio de 23.8% y la del follaje de 2.0 a 29.2%, con 10.9% de promedio.

Ecuaciones de biomasa

La ecuación para determinar la biomasa aérea en función del diámetro normal presentó un coeficiente de determinación $R^2= 0.986$ (Figura 1) considerado muy aceptable, además el modelo original se linealizó (ecuación 2) y después de ajustarlo, se graficaron los residuales (Figura 2), en donde no se evidencia una tendencia clara que invalide que el modelo utilizado es el adecuado para los datos usados en

Most biomass in *Pinus hartwegii* corresponded to the accumulated in the shaft, with 45.5 to 84.6% by individual, and 65.3% average. The biomass of branches represented 11.4 to 37.4% of the tree, with an average of 23.8% and foliage from 2.0 to 29.2%, with 10.9% average.

Biomass equations

The equation to determine the biomass according to the normal diameter presented a determination coefficient $R^2= 0.986$ (Figure 1) considered very acceptable, plus the original model (equation 2) was linearized and after adjustment, the residuals were plotted (Figure 2), where a clear trend that invalidates the model used is appropriate for the data used in the regression analysis (Montgomery, 2002) therefore the model used may be considered appropriate for the data analyzed in this species is not evidence.

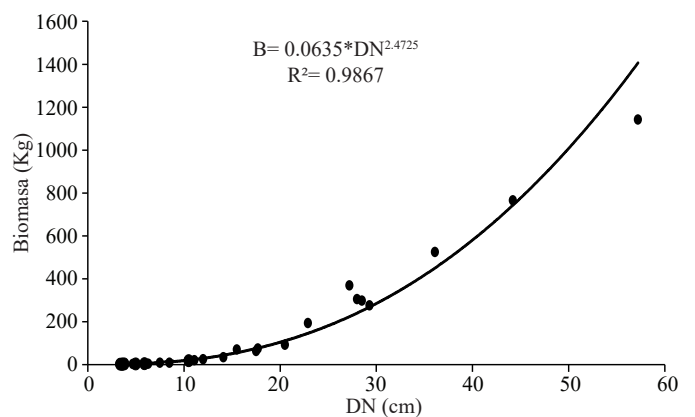


Figura 1. Dispersión de los valores de biomasa para *Pinus hartwegii* su línea de regresión generada y su ecuación.

Figure 1. Dispersion biomass values for *Pinus hartwegii* its regression line generated and its equation.

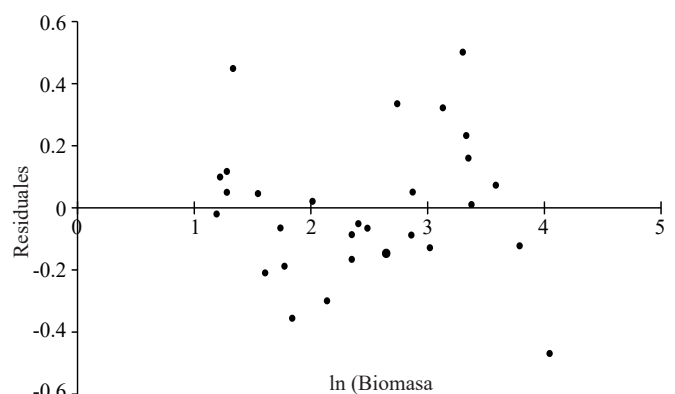


Figura 2. Residuales para la ecuación $\ln(B) = -2,7564 + 2,4725 \ln(DN)$.

Figure 2. Residual equation for $\ln(B) = -2.7564 + 2.4725 \ln(DN)$.

el análisis de regresión (Montgomery, 2002) por lo tanto el modelo utilizado puede considerarse adecuado para los datos analizados de esta especie.

El porcentaje de biomasa del fuste, las ramas y el follaje de *Pinus hartwegii*, se ubicó dentro de los rangos encontrados para otras especies en México, tanto de coníferas como en latifoliadas (Castellanos, 1993; Monroy y Nívar, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Montes de Oca *et al.*, 2009; Carrillo *et al.* 2014); aunque es evidente que la proporción de biomasa entre las partes del árbol pueden variar considerablemente con respecto a otras especies en función de su morfología.

Concentración de carbono

El porcentaje promedio de carbono encontrado en las muestras para el fuste fue de 48.2%, para ramas 49.4% y para follaje 48.5%. Por lo tanto, el porcentaje promedio aritmético de carbono respecto a la biomasa del total de cada árbol en los 29 individuos muestreados de *Pinus hartwegii* fue de 48.5%.

La distribución del carbono entre los componentes presentó las siguientes características: en el fuste se ubicó en el rango 52.6 a 84.3% con una media de 64.9%, en las ramas de 11.6 a 38% con una media de 24.2% y por último en el follaje varió de 2 a 29.1% con una media de 10.9%.

Ecuaciones de carbono

El ajuste del modelo $Y = bX^k$, para los datos del contenido de carbono presentó los valores que aparecen junto con la dispersión de los datos y la línea de ajuste en la Figura 3.

Cuando se probaron otros incluyendo a la altura (m), el modelo no cambió sustancialmente en el valor del coeficiente de determinación (r^2), al contrario en algunos modelos este valor disminuyó ligeramente, por ejemplo en el modelo: $B = \beta_0 DN^2 H$ (B = biomasa en kg, DN = diámetro normal en cm y H la altura total de los árboles en m), con este modelo el valor de $r^2 = 0.9819$, ligeramente menor al valor obtenido cuando sólo se usa el DN como variable independiente. También se probó el modelo: $B = \beta_0 + \beta_1 DN^2 H$; sin embargo, con éste el valor de r^2 disminuyó a 0.9684. Otro de los modelos probados fue: $B = \beta_0 DN^{\beta_1} H^{\beta_2}$ en el cual la $r^2 = 0.9868$ si fue ligeramente superior a la obtenida con el modelo en donde sólo se utilizó al DN como variable independiente.

The percentage of stem biomass, branches and foliage of *Pinus hartwegii*, was within the ranges found for other species in Mexico, both coniferous and broadleaved (Castellanos, 1993; Monroy and Nívar, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Montes de Oca *et al.*, 2009; Carrillo *et al.* 2014); although it is clear that the proportion of biomass between the parts of the tree can vary considerably with respect to other species according to their morphology.

Carbon concentration

The average percentage of carbon found in the samples for the shaft was 48.2%, 49.4% for branches and foliage 48.5%. Therefore, the simple average percentage of carbon to the total biomass of each tree in the 29 sampled individuals of *Pinus Hartwegii* was 48.5%.

The distribution of carbon among the components had the following characteristics: the shaft was located in the range 52.6 to 84.3% with an average of 64.9%, in the branches of 11.6 to 38% with an average of 24.2% and finally in the foliage ranged from 2 to 29.1% with a mean of 10.9%.

Carbon equations

The fit of the model $Y = bX^k$, for carbon content data presented the values displayed along with the scattering of data and adjustment line in Figure 3.

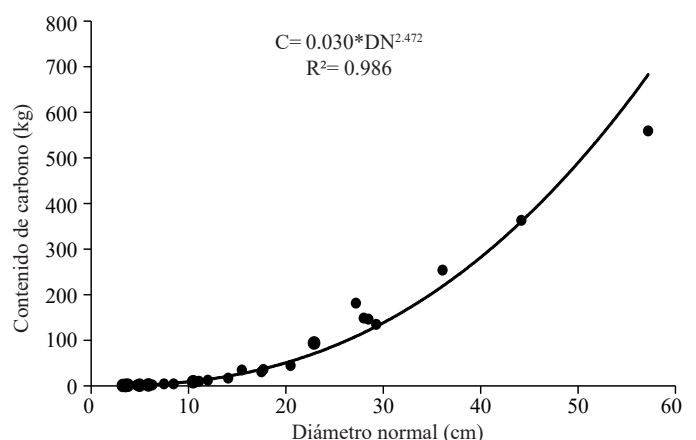


Figura 3. Dispersión de los valores de contenido de carbono para *Pinus hartwegii*, su línea de regresión generada y su ecuación.

Figure 3. Dispersion of the carbon content values for *Pinus hartwegii*, its generated regression line and its equation.

El porcentaje de carbono considerando todo el árbol, está dentro del rango de valores que se han encontrado para otras especies (Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014) a las que se les ha determinado una ecuación alométrica similar.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el presente estudio no contempla la medición de biomasa y carbono en raíces, por lo que se puede estar sub-estimando la cantidad de CO₂ retenida por estos árboles, ya que en algunas especies la proporción subterránea puede representar en coníferas hasta 18% y en hojas del 17.1% al 36.2% de la biomasa total (Kurz *et al.*, 1996; Gargaglione *et al.*, 2010).

Se decidió no incluir a la altura en el modelo para determinar la biomasa y el carbono, debido a que la variable altura es un parámetro más complicado de medir en el campo, de una u otra manera se pueden cometer más errores en su medición y se invierte más tiempo para su medición, además de que no mejoró substancialmente al valor de r² en el modelo donde se utilizó.

Conclusiones

Fue posible ajustar la ecuación alométrica para estimar la biomasa de *Pinus hartwegii* con un alto coeficiente de determinación. Asimismo, fue posible ajustar la ecuación para estimar el contenido de carbono por árbol con el mismo coeficiente de determinación. Con la ecuación obtenida fue posible determinar que los árboles de esta especie concentran la mayor parte del carbono aéreo en el fuste seguido por las ramas y por último el follaje.

Para hacer más completos este tipo de estudios es necesario determinar el carbono de la parte subterránea en los ecosistemas estudiados, ya que se debe de tomar en cuenta que muchas especies forestales, de acuerdo a varios autores mucho del carbono lo concentran también en las raíces.

Debido a que el diámetro normal es una de las variables que por lo general se miden en campo al momento de realizar inventarios forestales o mediciones de sitios temporales o permanentes, con las ecuaciones obtenidas en este trabajo se pueden realizar estimaciones prácticas y precisas de la cantidad de carbono capturada por bosques de *Pinus hartwegii*, y estar en posibilidades de solicitar un pago por servicios ambientales mediante los mecanismos de desarrollo limpio que se especifican en el protocolo de Kyoto.

When tested others including height (m), the model did not change substantially in the coefficient of determination (r²), unlike in some models this value decreased slightly, for example in the model: $B = \beta_0 DN^2 H$ (B= kg biomass, DN= normal diameter in cm and H the total height of the trees in m), with this model the value of r²=0.9819, slightly lower than the value obtained when only the DN is used as an independent variable. The model was also tested: $B = \beta_0 + \beta_1 DN^2 H$; however, this value r² decreased to 0.9684. Another models tested was: $B = \beta_0 DN^{\beta_1} H^{\beta_2}$ in which r²=0.9868 if it was slightly higher than that obtained with the model where only the DN was used as independent variable.

The percentage of carbon considering the whole tree is within the range of values found for other species (Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014) to which they have given a similar allometric equation.

However, it should be noted that this study does not allow for measurement of biomass and carbon in roots, so can be under-estimating the amount of CO₂ retained by these trees, since in some species the underground proportion can conifers represent up to 18% and 17.1% leaves to 36.2% of the total biomass (Kurz *et al.*, 1996; Gargaglione *et al.*, 2010).

It was decided not to include height in the model to determine the biomass and carbon, because the variable height is a more difficult parameter to measure in the field, in one way or another can make more errors in measurement and invests more time for measurement, plus it did not improve substantially the value of r² in the model where it was used.

Conclusions


It was possible to adjust the allometric equation to estimate the biomass of *Pinus hartwegii* with a high coefficient of determination. It was also possible to adjust the equation for estimating the carbon content per tree with the same coefficient of determination. With the equation obtained was possible to determine that trees of this species concentrate most air bole carbon followed by the branches and finally the foliage.

To make complete this type of study is necessary to determine the carbon of the underground part in the ecosystems studied, since it must take into account that many forest species, according to several authors much carbon we concentrate also on the roots.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por financiar con recursos fiscales el presente estudio, a la División de Ciencias Forestales (DICIFO) de la UACH por las facilidades otorgadas para utilizar parte de sus instalaciones para el secado de la madera en estufa y al Geógrafo Agustín Tagle Urrutia Encargado del Parque Nacional Ixta-Popo por las facilidades otorgadas para realizar el trabajo de campo.

Literatura citada

- Acosta, M. M.; Vargas, H. J.; Velázquez, M. A. y Etchevers, B. J. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36(6):725-736.
- Avendaño, H. D. M.; Acosta, M. M.; Carrillo, A. F. y Etchevers, J. J. D. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotec. Mex.* 32(3):233-238.
- Bishop, J. y Landell-Mills, N. 2003. Los servicios ambientales de los bosques: información general. *In: la venta de servicios ambientales forestales*. Pagiola, S.; Bishop, J. y Landell-Mills, N. (Eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F. 43-76 p.
- Bull, G., Harkin, Z., y Wong, A. 2006. El desarrollo de mercados para el carbono forestal en la Columbia Británica, Canadá. *In: La venta de servicios ambientales forestales*. Pagiola S.; Bishop J. y Landell-Mills N. (eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F. 337-366 p.
- Carrillo, A. F.; Acosta, M. M.; Flores, A. E.; Juárez, B. J. E. y Bonilla, P. E. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en la Sierra Nevada, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(5):779-793.
- Castellanos, B. J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Programa Forestal, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México. 75 p.
- De Jong, H.; Macera, O. y Hernández, T. T. 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. *In: Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J. y Fernández, B. A. (Eds.). SEMARNAT-INE. DF, México. 369-380 p.
- Díaz, F. R.; Acosta, M. M.; Carrillo, A. F.; Buendía, R. E.; Flores, A. E. y Etchevers, B. J. D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*. 13(1):25-34.
- Domínguez, C. G.; Aguirre, C. O. A.; Jiménez, P. J.; Rodríguez, L. R. y Díaz, B. J. A. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(1):59-64.
- Because the normal diameter is one of the variables that usually are measured in field when making forest inventories or measurements of temporary or permanent sites, with the equations obtained in this work can be made practical and accurate estimates of the amount carbon captured by forests of *Pinus hartwegii*, and be in a position to request a payment for environmental services through clean development mechanisms specified in the Kyoto protocol.
- End of the English version*
-
- 
- Benitez, G. C.; Pece, M.; De Galíndez, M. J.; Maldonado, A.; Acosta, V. H. y Gómez, A. 2002. Biomasa aérea de ejemplares de Quebracho Blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del parque Chaqueño Seco. *Quebracho*. 9:115-127.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Talleres de offset. México. 252 p.
- Gargaglione, V.; Peri, P. L. and Rubio, G. 2010. Allometric relations for biomass partitioning of *Nothofagus antarctica* trees of different crown classes over a site quality gradient. *Forest Ecol. Manag.* 259(6):1118-1126.
- Guzmán, A.; Laguna, I. y Martínez, J. 2004. Los mecanismos flexibles del protocolo de Kioto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *In: cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J. y Fernández, B. A. (Eds.). SEMARNAT-INE. México, D. F., 177-188 p.
- Hitchcock III H. and McDonnell J. 1979. Biomass measurement: a synthesis of the literature. *In: workshop proceeding: forest resources inventories*. Frayer, W. E. (Eds.). SAF-IUFRO. Fort Collins, CO, USA. 544-595 pp.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. Suiza. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf. 73 p.
- Kurz, W. A.; Beukema, S. J. and Apps, M. J. 1996. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector. *Can. J. Forest Res.* 26(11):1973-1979.
- Little, M. and Jackson, F. 1976. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Trillas. México. 270 p.
- López, T. J. L. 1995. Alometría de variables dasométricas en árboles de vegetación secundaria, derivada de una selva mediana subperennifolia. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Estado de México. 90 p.
- Monroy, C. y Nívar, J. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques*. 10(2):29-43.
- Montes de Oca, E.; García, P.; Nájera, A. y Méndez, J. 2009. Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus duranguensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(1):59-64.
- Montgomery, D. C.; Peck, E. A. and Vining, G. G. 2006. Introducción al análisis de regresión lineal. Compañía Editorial Continental. Tercera edición. México. 588 p.

- Pimienta, D.; Domínguez, G.; Aguirre, C. O.; Hernández, J. y Jiménez J. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*. 13(1):35-46.
- Romahn de la Vega, C. F.; Ramírez, M. H. y Treviño J. 1987. *Dendrometría. Serie de apoyo académico No. 26. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). División de Ciencias forestales. México. 388 p.*
- Rosa, H.; Kandel, S. y Dimas, L. 2004. Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. PRISMA-INE-CCMSS. México. 21-23 p.
- Ter-Mikaelian, T. and Korzukhin, M. D. 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecol. Manag.* 97(1):1-24.
- Torres, J. y Guevara, A. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*. 63:40-59.
- Vidal, A.; Benítez, Y.; Carlos, R. y Gra, H. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI La Palma de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho*. 11:60-66.