

Angle sampling method for the inventory of teak plantations (*Tectona grandis* L. f.)

Método de muestreo angular para el inventario de plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L. f.)

Javier A. Mora-Espinoza¹; Alberto Peñalver-Romeo^{1*}; Fernando J. Aguilar-Torres²; José R. Rivas-Barzola¹; Ángel Triana-Tomalá¹

¹Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Av. Pdte. Carlos Julio Arosemena Tola, Guayaquil 090615, Ecuador.

²Universidad de Almería. Carretera de Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, España.

*Corresponding author: alberto.penalver01@cu.ucsg.edu.ec; tel.: 593 (04) 380 4601.

Abstract

Introduction: Sampling by fixed area plots is the usual practice in forest inventories, despite the considerable time involved. An alternative method of sampling is the angle count or Bitterlich method.

Objective: To evaluate the accuracy and efficiency of the angle sampling method for the determination of dasometric variables in teak (*Tectona grandis* L. f.) plantations.

Materials and methods: In a three-year teak plantation, 21 circular plots of 500 m² were established. In each plot, the diameter at breast level, the height and position of each tree, the working times, the number of trees per hectare, the diameter of the average basal area, the total basal area, the average Lorey level and the total volume were determined. Angular sampling was simulated using basal area factors (BAF) of 0.5, 1, 1.5 and 2. The estimates of the variables for each BAF and fixed area plots were compared using ANOVA and the relative efficiency was determined.

Results and discussion: The ANOVA did not detect significant differences ($P < 0.05$) in the estimation of dasometric variables between sampling types, which demonstrates that the angular method is accurate. The fixed area and shape plot required more working time ($P < 0.05$). The relative efficiency of the angular method was between 4.5 and 11 times higher than that of fixed area plot. The ideal BAF in young teak plantations was equal to two.

Conclusions: Angular counting is accurate and more efficient for estimating dasometric variables in young teak plantations.

Keywords: Bitterlich method; fixed area sampling; basal area; dasometry; simulation.

Resumen

Introducción: El muestreo mediante parcelas de superficie fija es la práctica usual en inventarios forestales, a pesar del tiempo considerable de trabajo. Un método alternativo de muestreo es el conteo angular o método de Bitterlich.

Objetivo: Evaluar la precisión y eficiencia del método de muestreo angular para la determinación de variables dasométricas en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.).

Materiales y métodos: En una plantación de teca de tres años se establecieron 21 parcelas circulares de 500 m². En cada parcela se determinó el diámetro a la altura del pecho, la altura y posición de cada árbol, los tiempos de trabajo, el número de árboles por hectárea, diámetro de área basal media, área basal total, altura promedio de Lorey y volumen total. El muestreo angular se simuló utilizando factores de área basimétrica (FAB) de 0.5, 1, 1.5 y 2. Las estimaciones de las variables para cada FAB y parcelas de área fija se contrastaron mediante ANOVA y se determinó la eficiencia relativa.

Resultados y discusión: El ANOVA no detectó diferencias significativas ($P < 0.05$) en la estimación de variables dasométricas entre tipos de muestreo, lo cual demuestra que el método angular es preciso. La parcela de área y forma fijas requirió más tiempo de trabajo ($P < 0.05$). La eficiencia relativa del método angular fue entre 4.5 y 11 veces mayor que la de parcela de área fija. El FAB idóneo en plantaciones jóvenes de teca fue igual a dos.

Conclusiones: El conteo angular es preciso y más eficiente para la estimación de variables dasométricas en plantaciones jóvenes de teca.

Palabras clave: método Bitterlich; muestreo de área fija; área basimétrica; dasometría; simulación.

Introduction

Teak (*Tectona grandis* L. f.) is one of the main exotic species used in reforestation programs in the Coastal region of Ecuador, due to both its adaptability to local ecosystems and the high demand in the global timber market. In this region, 9 368 ha of teak plantations were reported in 2018 (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2018), with an increasing trend in the coming years, which has motivated interest in the development of monitoring techniques to implement more accurate and efficient inventory methods (Aguilar, Rivas, Nemmaoui, Peñalver, & Aguilar 2019a; Aguilar, Nemmaoui, Peñalver, Rivas, & Aguilar, 2019b).

Information requirements for timber and other raw material harvesting, quantification of biomass production, carbon fixation and environmental management are relevant objectives of forest inventories. Statistical inference techniques from sampling are used to obtain these data (Kershaw, Ducey, Beers, & Husch, 2016). A relevant aspect in the design is the definition of the type of sampling unit. The usual practice is the fixed area and shape plot, where the selection of trees is directly related to the area and shape of the plot, as well as to the frequency of the individuals that make up the plot (Kershaw et al., 2016). In this sense, the fixed area sampling method has an equal probability of selection for each tree present in the reference plot (Ríos, Acosta, Gaillard de Benítez, & Pece, 2000). This type of sampling requires physically delimiting the reference plot and measuring the dendrometric variables of all the trees included in it, which can be costly in terms of fieldwork time. For this reason, other alternative inventory methods based on sampling with different selection probabilities have been developed, most notably the so-called probability proportional to size (PPS) sampling. In this case, the probability that a tree is selected to make up the sample is proportional to some of its measurable characteristics (Cochran, 1977) such as diameter in horizontal sampling or height in vertical sampling.

The angular sampling method, also known as the Bitterlich method after Austrian foresters Walter Bitterlich (Bitterlich, 1952; Burkhart, 2008), could be classified under the category of PPS sampling. This method does not require the physical delimitation of the sampling plot or the direct measurement of the tree diameter for the estimation of the basal area per hectare (G ; $m^2 \cdot ha^{-1}$) (Burkhart, 2008); the probability of selecting a tree is proportional to its basal area. To determine G at each sampling point, the trees (n), whose normal diameters ($d_{1.3}$) exceed a fixed critical angle (projected from the sampling point with an instrument

Introducción

La teca (*Tectona grandis* L. f.) es una de las principales especies exóticas utilizadas en los programas de reforestación en la región Costa de Ecuador, debido tanto a su adaptabilidad a los ecosistemas locales como a la alta demanda en el mercado mundial de la madera. En esta región se reportó una superficie de 9 368 ha de plantaciones de teca en el año 2018 (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2018), con una tendencia de incremento en los próximos años, circunstancia que ha motivado el interés por el desarrollo de técnicas de monitoreo que permitan implementar métodos de inventario más precisos y eficientes (Aguilar, Rivas, Nemmaoui, Peñalver, & Aguilar 2019a; Aguilar, Nemmaoui, Peñalver, Rivas, & Aguilar, 2019b).

Los requerimientos de información para el aprovechamiento maderero y de otras materias primas, la cuantificación de la producción de biomasa, la fijación de carbono y el manejo ambiental son objetivos relevantes de los inventarios forestales. Para su obtención se emplean técnicas de inferencia estadística a partir de muestreos (Kershaw, Ducey, Beers, & Husch, 2016). Un aspecto relevante en el diseño es la definición del tipo de unidad de muestreo. La práctica usual es la parcela de superficie y forma fija, donde la selección de los árboles está relacionada directamente con el área y forma de la parcela, así como con la frecuencia de los individuos que la componen (Kershaw et al., 2016). En este sentido, el método de muestreo de área fija tiene igual probabilidad de selección para cada árbol presente en la parcela de referencia (Ríos, Acosta, Gaillard de Benítez, & Pece, 2000). Este tipo de muestreo requiere delimitar físicamente la parcela de referencia y medir las variables dendrométricas de todos los árboles incluidos en la misma, lo que puede resultar costoso en tiempo de trabajo de campo. Por esta razón, otros métodos alternativos de inventario basados en un muestreo con distinta probabilidad de selección se han desarrollado, destacando el denominado muestreo con probabilidad proporcional al tamaño (PPT). En este caso, la probabilidad de que un árbol sea seleccionado para integrar la muestra es proporcional a alguna de sus características mensurables (Cochran, 1977) como el diámetro en el muestreo horizontal o la altura en el muestreo vertical.

El método de muestreo angular, también conocido como método de Bitterlich en honor del forestal austriaco Walter Bitterlich (Bitterlich, 1952; Burkhart, 2008), podría clasificarse dentro de la categoría de muestreos con PPT. Este método no requiere de la delimitación física de la parcela de muestreo ni de la medición directa del diámetro de los árboles para la estimación del área basal por hectárea (G ; $m^2 \cdot ha^{-1}$)

called a relascope), are counted and multiplied by the basal area factor (BAF), which depends on the chosen critical angle (Kershaw et al., 2016).

Numerous applications of the Bitterlich method in various forestry contexts have been documented, highlighting its advantages and disadvantages in terms of accuracy and efficiency for the estimation of forestry variables (Druszcz, Nakajima, Netto, & Júnior, 2010; Gove, 2017; Lionjanga & Pereira, 2014; Mulyana, Rohman, & Purwanto, 2018; Rice, Weiskittel, & Wagner, 2014; Šmelko, 2013). However, in the practice of forest plantation inventories in Ecuador, fixed area plots of rectangular or circular shapes and variable size, between 400 and 1 000 m², are used, but no references to the application of the angle-counting method have been documented. This method could, *a priori*, facilitate the development of forest inventories in teak plantations, reducing the time needed for field work and, therefore, allowing the implementation of a continuous decision making system based on forest stand monitoring. This system, complemented with techniques from the Remote Sensing discipline (e.g. Aguilar et al., 2019a), would significantly improve decision-making in forest management (economic) and protection (environmental) activities by public and private entities.

Accordingly, the objective of this research was to evaluate the accuracy and efficiency of the angular sampling method for determining dasometric variables in teak plantations in the Coastal region of Ecuador. To this end, the hypothesis that the angle-counting method is sufficiently precise and faster to implement than sampling with fixed area plots was tested.

Materials and Methods

Description of the area of study

The research work was conducted on a 78.2 ha teak plantation established on the “Las Iguanas” ranch, province of Guayas, in the Coastal region of Ecuador, located at the geographical coordinates 2° 6' 11.72" SL and 80° 2' 59.43" WL (Figure 1).

The study area is located in the bioclimatic zone known as the Tropical Dry Forest, which has a unimodal rainfall regime with a rainy period in the first quarter of the year (average rainfall of 1 222 mm) and a marked drought in the rest (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAHMI], 2017). The average temperature is 24.4 °C and the relative humidity is 72.9 % (Flores, Cabezas, & Crespo, 2010).

The teak plantation was established in 2015, with a frame of 3 m between trees and 4 m between lines. The plants were four months old at the time of planting,

(Burkhart, 2008); la probabilidad de seleccionar un árbol es proporcional a su área basal. Para determinar G en cada punto de muestreo, los árboles (n), cuyos diámetros normales ($d_{1.3}$) exceden un ángulo crítico fijo (proyectado desde el punto de muestreo con un instrumento denominado relascope), se cuentan y se multiplican por el factor de área basimétrica (FAB), el cual depende del ángulo crítico elegido (Kershaw et al., 2016).

Numerosas aplicaciones del método Bitterlich en varios contextos forestales han sido documentadas, poniendo de relieve sus ventajas y desventajas en cuanto a la precisión y eficiencia para la estimación de variables forestales (Druszcz, Nakajima, Netto, & Júnior, 2010; Gove, 2017; Lionjanga & Pereira, 2014; Mulyana, Rohman, & Purwanto, 2018; Rice, Weiskittel, & Wagner, 2014; Šmelko, 2013). No obstante, en la práctica de los inventarios de plantaciones forestales en Ecuador se utilizan parcelas de superficie fija de formas rectangulares o circulares y de tamaño variable, entre 400 y 1000 m², pero no se han documentado referencias de la aplicación del método de conteo angular. Este método podría, *a priori*, facilitar el desarrollo de inventarios forestales en plantaciones de teca, disminuyendo el tiempo necesario para el trabajo de campo y, por tanto, permitiendo la implementación de un sistema continuo de toma de decisiones basado en el seguimiento de masas forestales (*forest monitoring*). Este sistema, complementado con técnicas propias de la disciplina de *Remote Sensing* (v. g. Aguilar et al., 2019a), mejoraría notablemente la toma de decisiones en las actividades de gestión (vertiente económica) y protección (vertiente ambiental ligada a la fijación de CO₂ atmosférico) de los bosques por parte de las entidades públicas y privadas.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la precisión y eficiencia del método de muestreo angular para la determinación de variables dasométricas en plantaciones de teca de la región Costa de Ecuador. Para ello se contrastó la hipótesis de que el método de conteo angular es suficientemente preciso y de ejecución más rápida que el muestreo con parcelas de superficie fija.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El trabajo de investigación se realizó en una plantación de teca de 78.2 ha establecida en la hacienda “Las Iguanas”, provincia de Guayas, en la región Costa de Ecuador, situada en las coordenadas geográficas 2° 6' 11.72" LS y 80° 2' 59.43" LO (Figura 1).

La zona de estudio se encuentra en la zona bioclimática denominada Bosque Seco Tropical,

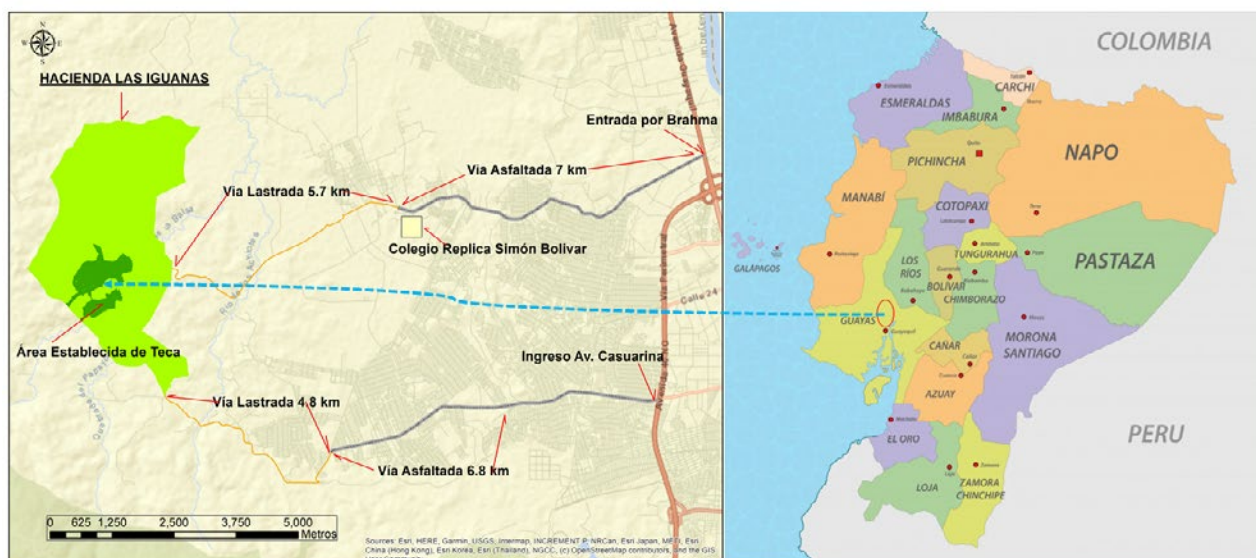


Figure 1. Location of the study site at the “Las Iguanas” farm, province of Guayas, cantón Guayaquil in Ecuador. Geographic coordinates 2° 6' 11.72" SL and 80° WL 2' 59.43".

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en la hacienda “Las Iguanas”, provincia de Guayas, cantón Guayaquil en Ecuador. Coordenadas geográficas 2° 6' 11.72" LS y 80° LO 2' 59.43".

with an approximate height of 30 cm. The plants were produced in a nursery from scarified seeds from Costa Rica.

Sample design

During the months of March and April 2018, 21 fixed area plots were established in the teak plantation (Figure 2), under the simple sampling method without replacement. The plots were circular in shape with a radius of 12.62 m (area of 500 m²).

The plot size used is within the range recommended by White et al. (2013); i.e. between 200 and 625 m² in order to ensure a correct stratification of the plots in the area of interest to cover, as far as possible, their range of structural variability. However, as it is a homogeneous plantation with an age at the time of sampling of 3 years (young plantation), with a fixed frame, similar silvicultural management and soil characteristics, the variability between plots in relation to some dasometric variables of interest was very low (Table 1). The number of experimental plots for sampling was determined following the proposal of Kershaw et al. (2016) given by the following equation:

$$\text{Number of plots} = t^2 CV^2 \left(\frac{1}{Er} \right)^2$$

where,

CV = expected coefficient of variation for the variable to be estimated (basal area) within the work area (%)

presentando un régimen de precipitación unimodal con un periodo lluvioso en el primer trimestre del año (precipitación media de 1222 mm) y una marcada sequía en el resto (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAHMI], 2017). La temperatura media es de 24.4 °C y la humedad relativa de 72.9 % (Flores, Cabezas, & Crespo, 2010).

La plantación de teca se estableció en 2015, con un marco de 3 m entre árboles y 4 m entre líneas. La edad de las plantas en el momento de la plantación fue de cuatro meses, con una altura aproximada de 30 cm. Las plantas fueron producidas en vivero, a partir de semillas escarificadas procedentes de Costa Rica.

Diseño de muestreo

Durante los meses de marzo y abril de 2018 se establecieron 21 parcelas de superficie fija distribuidas en la plantación de teca (Figura 2), bajo el método de muestreo simple sin remplazo. Las parcelas presentaron forma circular con un radio de 12.62 m (superficie de 500 m²).

El tamaño de parcela empleado se encuentra dentro del rango recomendado por White et al. (2013); es decir, entre 200 y 625 m² con el fin de asegurar una estratificación correcta de las parcelas en la zona de interés para abarcar, en la medida de lo posible, su rango de variabilidad estructural. No obstante, al tratarse de una plantación homogénea con una edad en el momento del muestreo de 3 años (plantación juvenil,

Er = assumable error in the estimation (%)
 t = value of the Student t for $P < 0.05$

In this case, and taking into account the homogeneity of the teak plantation, conservative values of $CV = 46\%$ and $Er = 20\%$ were adopted. The *a posteriori* CV for the basal area dasometric variable was found to be 30.8% (Table 1), which implies that the final assumable error was lower than 14% when 21 sampling plots were used. On the other hand, the sampling intensity was 1.35% , which was considered appropriate considering the homogeneity of the plantation.

The coordinates of the plot centers were recorded by GPS-RTK procedures in the WGS84 reference system

con un marco fijo, manejo silvícola y características edafológicas similares, la variabilidad entre parcelas con relación a algunas variables dasométricas de interés fue muy reducida (Cuadro 1). El número de parcelas experimentales para el muestreo se determinó siguiendo la propuesta de Kershaw et al. (2016) dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Número de parcelas} = t^2 CV^2 \left(\frac{1}{Er} \right)^2$$

donde,

CV = coeficiente de variación esperado para la variable a estimar (área basal) dentro de la zona de trabajo (%)

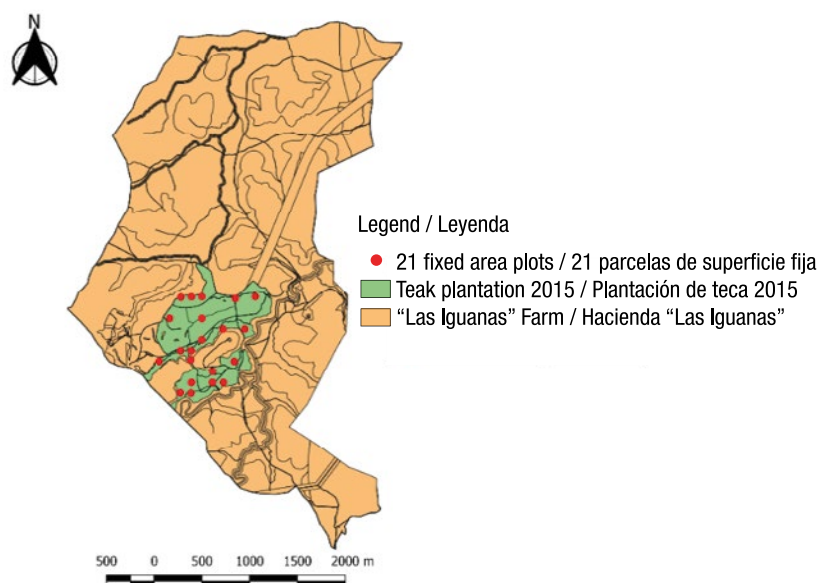


Figure 2. Location of the teak (*Tectona grandis*) plantation on the “Las Iguanas” farm, Guayas province, Guayaquil canton in Ecuador. Distribution of the 21 fixed area plots established in this study.

Figura 2. Localización de la plantación de teca (*Tectona grandis*) en la hacienda “Las Iguanas”, provincia de Guayas, cantón Guayaquil en Ecuador. Distribución de las 21 parcelas de área fija establecidas en el presente estudio.

Table 1. Average characteristics of the 21 fixed surface plots (circular area of 500 m^2) established on the teak plantation. The age of the plantation at the time of sampling was 3 years.

Cuadro 1. Características medias de las 21 parcelas de superficie fija (área circular de 500 m^2) establecidas en la plantación de teca. La edad de la plantación en el momento del muestreo era de 3 años.

Statistical/ Estadístico	Density (tree·ha ⁻¹)/ Densidad (árboles·ha ⁻¹)	Basal area (m ² ·ha ⁻¹)/ Área basal (m ² ·ha ⁻¹)	Average Lorey® height (m)/ Altura media de Lorey (m)
Average/ Media	736.2	4.12	8.0
Standard deviation/ Desviación estándar	83.66	1.27	1.32
Coefficient of Variation (%)/ Coeficiente de variación (%)	11.34	30.88	16.45

and UTM 17S projection, using Trimble R8 GNSS equipment (Trimble Inc., Sunnyvale, CA, USA). Each tree in the sampling plots was numbered, recording absolute coordinates and dendrometric variables such as diameter at breast height (DBH) and total height. The time (min) required for the establishment of the tree sampling and measuring unit was also recorded, including the time for estimating the basal area per hectare using the Bitterlich method for $BAF = 1$. This value was determined by calculating the ratio between the average basal area per hectare, obtained from the inventory data based on the fixed area method (in this case $G = 4.12 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), and the average number of trees sampled by angle sampling on each reference plot. This average value of trees sampled was close to four for the relascope used, which is in line with the recommendations of Kershaw et al. (2016) and Iles (2003) for open plantations and small size trees.

In each fixed area plot the tree density (N ; tree·ha⁻¹), normal tree diameter of average basal area (d_g ; cm), total basal area (G ; m²·ha⁻¹), average Lorey height (h_L ; m) and total volume (V ; m³·ha⁻¹) estimated by Lara's (2012) formula were calculated. In the angular sampling method the same dasometric variables were estimated, but in this case extracted from the partial sample of trees selected for each of the BAFs evaluated. The normal diameter and height of each selected tree were also measured for the estimation of the dasometric variables of interest using the following expressions (Kershaw et al., 2016):

$$G \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right) = \frac{n}{BAF}$$

$$N \left(\frac{\text{trees}}{\text{ha}} \right) = BAF \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \right)$$

$$d_g (\text{cm}) = \sqrt{\frac{4}{\pi n} \sum_{i=1}^n g_i}$$

$$h_L (\text{m}) = \frac{\sum_{i=1}^n g_i h_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$$

$$V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}} \right) = N \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}; \text{ con } V_i = 0.00017023 d_i^{1.7315} h_i^{0.719286}$$

where,

n = number of trees selected by angle sampling (variable for each plot and BAF)

N = number of trees per hectare

g_i , h_i and d_i = basal area, total height and normal diameter, respectively, of the selected tree i .

Finally, the time (minutes) of field execution for the tree count in the angle sampling unit with $BAF = 1$ was recorded. Similarly, the working times by type

Er = error asumible en la estimación (%)

t = valor de la t de Student para $P < 0.05$.

En este caso, y teniendo en cuenta la homogeneidad de la plantación de teca, se adoptaron valores conservadores de $CV = 46\%$ y $Er = 20\%$. El CV a posteriori para la variable dasométrica área basal resultó ser de 30.8% (Cuadro 1), lo que implica que el error asumible final fue inferior de 14% cuando se emplearon 21 parcelas de muestreo. Por otra parte, la intensidad de muestreo fue de 1.35% , lo que se consideró adecuado teniendo en cuenta la homogeneidad de la plantación.

Las coordenadas de los centros de las parcelas se registraron mediante procedimientos GPS-RTK en el sistema de referencia WGS84 y proyección UTM 17S, utilizando un equipo Trimble R8 GNSS (Trimble Inc., Sunnyvale, CA, USA). Cada árbol de las parcelas de muestreo fue numerado, registrando coordenadas absolutas y variables dendrométricas como diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total. También se registró el tiempo (min) requerido para el establecimiento de la unidad de muestreo y medición de árboles, incluyendo el tiempo de estimación del área basal por hectárea mediante el método de Bitterlich para $FAB = 1$. Para ello se empleó un relascope simple de cadena que presentaba un $FAB = 1$. Este valor se determinó calculando la razón entre el promedio del área basal por hectárea, obtenido a partir de los datos de inventario basado en el método de área fija (en este caso $G = 4.12 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), y el número medio de árboles muestreados mediante muestreo angular en cada parcela de referencia. Este valor medio de árboles muestreados se aproximó a cuatro para el relascope empleado, valor que coincide con las recomendaciones de Kershaw et al. (2016) e Iles (2003) para plantaciones abiertas y árboles de tamaño pequeño.

En cada parcela de superficie fija se calcularon la densidad de árboles (N ; arb·ha⁻¹), diámetro normal del árbol de área basal media (d_g ; cm), área basal total (G ; m²·ha⁻¹), altura media de Lorey (h_L ; m) y el volumen total (V ; m³·ha⁻¹) estimado mediante la fórmula de Lara (2012). En el método de muestreo angular se estimaron las mismas variables dasométricas, pero en este caso extraídas de la muestra parcial de árboles seleccionados para cada uno de los FAB evaluados. También se midieron el diámetro normal y la altura de cada árbol seleccionado para la estimación de las variables dasométricas de interés utilizando las expresiones siguientes (Kershaw et al., 2016):

$$G \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right) = \frac{n}{FAB}$$

$$N \left(\frac{\text{árboles}}{\text{ha}} \right) = FAB \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \right)$$

of measurement in the fixed area plot (times of the survey and delimitation of the circular plot, tree count and measurement of its diameter and height) were recorded.

Simulation of Angle Sampling

From the coordinates of the center of each circular plot of fixed area, the distance from the center to each tree of the sampling unit was determined using the electronic Excel® tabulator.

The critical distance ($D_{critical}$) corresponding to the diameter of each tree was calculated for each BAF. The $D_{critical}$ refers to the maximum distance between the observer and the observed tree where it can be seen exactly that the normal tree diameter is larger than the scanning angle or critical angle of the relascope (Jerez, Vincent, Moret, & Quevedo, 2005). In this way, for each normal diameter (DBH, cm) a $D_{critical}$ (m) can be established, from which the tree would not be selected to form part of the sample obtained by angular sampling and whose equation is given by the following expression

$$D_{critical} = \frac{DBH}{2 \sqrt{BAF}}$$

For the evaluation of the angular sampling, BAFs of 0.5, 1.5 and 2 were chosen, according to the range of normal diameters found in the plantations. Figure 3 shows that the probability of finding trees with diameters larger than 14 cm is nil, so that the value of $D_{critical}$ to the tree

$$d_g (cm) = \sqrt{\frac{4}{\pi n} \sum_{i=1}^n g_i}$$

$$h_i (m) = \frac{\sum_{i=1}^n g_i h_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$$

$$V \left(\frac{m^3}{ha} \right) = N \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}; \text{ con } V_i = 0.00017023 d_i^{1.7315} h_i^{0.719286}$$

donde,

n = número de árboles seleccionados por muestreo angular (variable para cada parcela y FAB)

N = número de árboles por hectárea

g_i , h_i y d_i = área basal, altura total y diámetro normal, respectivamente, del árbol seleccionado i .

Finalmente, se anotó el tiempo (minutos) de ejecución en campo para el conteo de árboles en la unidad de muestreo angular con FAB = 1. De igual manera se registraron los tiempos de trabajo por tipo de medición en la parcela de área fija (tiempos del levantamiento y delimitación de la parcela circular, conteo de árboles y medición de su diámetro y altura).

Simulación del muestreo angular

A partir de las coordenadas del centro de cada parcela circular de área fija, se procedió a determinar la distancia del centro a cada árbol de la unidad de muestreo mediante el tabulador electrónico Excel®.

La distancia crítica ($D_{critical}$) correspondiente al diámetro de cada árbol se calculó para cada FAB. La $D_{critical}$ se

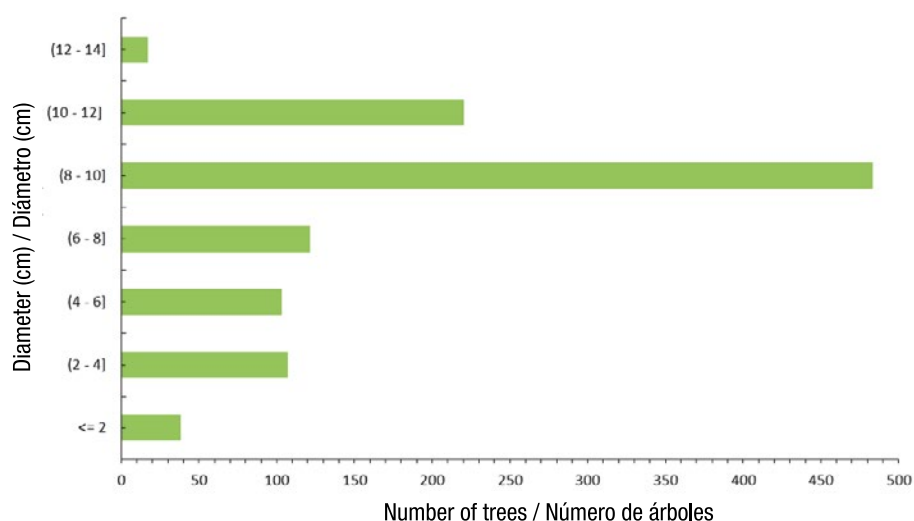


Figure 3. Frequency histogram of the distribution of normal diameters of *Tectona grandis* in the reference plots.
Figura 3. Histograma de frecuencias de la distribución de diámetros normales de *Tectona grandis* en las parcelas de referencia.

Table 2. Descriptive statistics of *Tectona grandis* and statistical significance of ANOVA for the dasometric variables measured on the 21 reference plots.**Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de *Tectona grandis* y significación estadística de ANOVA para las variables dasométricas medidas en las 21 parcelas de referencia.**

Variable	Statistical/ Estadísticos	Treatments/Tratamientos				
		PC	BAF-S/ FAB-S (0.5)	BAF-C/ FAB-C (1)	BAF-S/ FAB-S (1.5)	BAF-S/ FAB-S (2)
Total basal area (m ² .ha ⁻¹)/ Área basal total (m ² .ha ⁻¹)	Media/Mean	4.12 a	4.67 a	4.57 a	4.57 a	4.76 a
	Standard error (%)/ Error estándar (%)	6.74	7.77	7.78	7.33	7.38
	Time (min)/ Tiempo (min)	36 c	10 b	5 a	5 a	4 a
	Relative efficiency/ Eficiencia relativa	1.00	2.67	5.32	6	7.4
Density (trees·ha ⁻¹)/ Densidad (árboles·ha ⁻¹)	Media/Mean	736.2 a	815.2 a	886.9 a	807.8 a	890.9 a
	Standard error (%)/ Error estándar (%)	2.48	5.16	9.61	7.72	10.57
	Time (min)/ Tiempo (min)	15 c	14 c	7.5 b	6 ab	5 a
	Relative efficiency/ Eficiencia relativa	1.00	0.25	0.13	0.26	0.17
Normal tree diameter of mean basal area (cm)/ Diámetro normal del árbol de área basal media (cm)	Media/Mean	7.9 a	8.5 a	8.8 a	8.8 a	8.7 a
	Standard error (%)/ Error estándar (%)	3.68	4.04	4.67	4.60	4.41
	Time (min)/ Tiempo (min)	36 c	20 b	8 a	7 a	5.5 a
	Relative efficiency/ Eficiencia relativa	1.00	1.50	2.80	3.29	4.57
Average Lorey height (m)/ Altura media de Lorey (m)	Media/Mean	8.0 a	8.2 a	8.1 a	8.1 a	8.1 a
	Standard error (%)/ Error estándar (%)	3.59	3.56	3.72	3.81	3.75
	Time (min)/ Tiempo (min)	80 c	25 b	14 a	9 a	7 a
	Relative efficiency/ Eficiencia relativa	1.00	3.26	5.32	7.89	10.47
Total volume (m ³ .ha ⁻¹)/ Volumen total (m ³ .ha ⁻¹)	Media/Mean	22.4 a	25.5 a	24.7 a	24.9 a	25.7 a
	Standard error (%)/ Error estándar (%)	7.63	8.73	8.67	8.38	8.13
	Time (min)/ Tiempo (min)	101 c	26.5 b	16 a	9 a	8 a
	Relative efficiency/ Eficiencia relativa	1.00	2.92	4.90	9.31	11.14

Treatments: PC = fixed area sampling; BAF: basimetric area factor; BAF-S (0.5), FAB-S (1.5) and BAF-S (2) = simulated angle sampling for BAF 0.5, 1.5 and 2, respectively; BAF-C (1) = angle sampling executed in the field. Different letters in the mean values and in the measurement time of the dasometric variables indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

Tratamientos: PC = muestreo de superficie fija; FAB: factor de área basimétrica; FAB-S (0.5), FAB-S (1.5) y FAB-S (2) = muestreos angulares simulados para FAB 0.5, 1.5 y 2, respectivamente; FAB-C (1) = muestreo angular ejecutado en campo. Letras distintas en los valores medios y en el tiempo de medición de las variables dasométricas indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$).

furthest from the center of the plot for each simulated BAF should not exceed the radius of the circular fixed area plot (12.64 m). For example, for a BAF = 0.5, the Critical value for a tree with DBH = 14 cm would be 9.9 m, lower than the 12.64 m radius of the plot.

For the evaluation of the accuracy and efficiency of the angle sampling method, the dasometric variables were calculated by the simulation procedure described for each of the selected BAFs (0.5, 1.5 and 2) and the estimates of these variables on the fixed area and angle sampling field plots (BAF = 1) were compared.

The simulated time values were obtained from the time measurements on the fixed area based inventory plots and the angle sampling plots with BAF = 1 (chain relascope). These values were converted into unit times per tree and measurement type so that they could be applied for the simulation of the field run times for BAF 0.5, 1.5 and 2.

The relative efficiency (e) of the Bitterlich method was determined for surface and fixed plot sampling, using the procedure described by Jordan, Ducey, and Gove (2004), Kershaw et al. (2016) and Kenning, Ducey, Brissette, and Gove (2017):

$$e = \frac{S_{x1}^2 t_1}{S_{x2}^2 t_2}$$

where,

S_{x1} = standard error (%) for a sample unit as a basis for comparison

S_{x2} = standard error (%) for the sample unit to be compared

t_1 = time to carry out the reference sample unit

t_2 = time to carry out the compared sample unit.

$e > 1$ indicates that sampling unit 2 (BAF 0.5, 1, 1.5 and 2 angle sampling) was carried out more efficiently than sampling unit 1 (fixed area plot based reference sampling) and vice versa. This equation does not consider the travel times between sampling units.

The data generated by the simulation of the angular sampling for each of the BAFs were processed by the electronic Excel® tabulator; additionally, the values of the averages and the standard error of the dasometric variables were calculated.

Using the InfoStat statistical package (Di Rienzo et al., 2017), Kruskal-Wallis' non-parametric ANOVA was applied to contrast the differences in means between the variables under study, assuming complete randomization of the sampling units. The non-parametric approach was necessary due to the lack of data normality and homocedastic variances evidenced by the Kolgomorov and Levene tests. All tests used a

refiere a la distancia máxima entre el observador y el árbol observado en que se puede apreciar con exactitud que el diámetro normal del árbol es superior al ángulo de barrido o ángulo crítico del relascope (Jerez, Vincent, Moret, & Quevedo, 2005). De esta forma, para cada diámetro normal (DAP, cm) se puede establecer una $D_{crítica}$ (m), a partir de la cual el árbol no sería seleccionado para formar parte de la muestra obtenida por muestreo angular y cuya ecuación está dada por la expresión siguiente:

$$D_{crítica} = \frac{DAP}{2 \sqrt{FAB}}$$

Para la evaluación del muestreo angular se eligieron FAB de 0.5, 1.5 y 2, de acuerdo con el rango de diámetros normales encontrados en las plantaciones. La Figura 3 muestra que la probabilidad de encontrar árboles con diámetros superiores a 14 cm es nula, de manera que el valor de $D_{crítica}$ hasta el árbol más alejado del centro de parcela para cada FAB simulado no debe superar el radio de la parcela circular de superficie fija (12.64 m). Por ejemplo, para un FAB = 0.5, la $D_{crítica}$ en el caso de un árbol de DAP = 14 cm sería de 9.9 m, inferior a los 12.64 m de radio de parcela.

Para la evaluación de la precisión y eficiencia del método de muestreo angular, las variables dasométricas se calcularon mediante el procedimiento de simulación descrito para cada uno de los FAB seleccionados (0.5, 1.5 y 2) y las estimaciones de estas variables en las parcelas de superficie fija y de muestreo angular en campo (FAB = 1) se compararon.

Los valores de tiempos simulados se obtuvieron a partir de las mediciones de tiempo, en las parcelas del inventario basado en superficie fija y en la de muestreo angular con FAB = 1 (relascope de cadena). Estos valores se convirtieron en tiempos unitarios por árbol y tipo de medición, de forma que se pudieran aplicar para la simulación de los tiempos de ejecución en campo para los FAB 0.5, 1.5 y 2.

La eficiencia relativa (e) del método de Bitterlich se determinó para los muestreos de parcelas de superficie y de forma fija, utilizando el procedimiento descrito por Jordan, Ducey, y Gove (2004), Kershaw et al. (2016) y Kenning, Ducey, Brissette, y Gove (2017):

$$e = \frac{S_{x1}^2 t_1}{S_{x2}^2 t_2}$$

donde,

S_{x1} = error estándar (%) para una unidad de muestreo como base de comparación

S_{x2} = error estándar (%) para la unidad de muestreo a comparar

$P < 0.05$ significance level. The contrasting sampling methods were considered as treatments or sources of variation: circular fixed area plot (control, PC); variable simulation area plot with BAF = 0.5 (BAF-S 0.5); variable simulation area plot measured in field with chain relascope and BAF = 1 (BAF-C 1); variable simulation area plot with BAF = 1.5 (BAF-S 1.5); variable simulation area plot with BAF = 2 (BAF-S 2).

Results and discussion

Table 2 shows that the standard error of estimation (%) for all variables studied and for the sampling methods tested was less than 10 %. Bitterlich angular sampling, for the BAFs assessed, and fixed area and shape plot sampling had similar precision in the estimation of the dasometric variables. In this sense, ANOVA did not detect significant differences ($P < 0.05$) between averages of the dasometric variables by treatments or types of sampling plots.

As expected, fixed surface sampling showed slightly lower standard errors than angular sampling. This was most notable for the estimation of variable density, with standard errors between two and four times higher in variable area sampling. These results are related to Kershaw et al. (2016), who state that, in general, it is more efficient to use a sampling unit where the trees are selected with a probability proportional to the variable of interest. In this sense, if the objective was to estimate the volume of a stand, it would be more efficient to use variable plot sampling (VPS), since the selection of sample trees is proportional to their basal area, a variable closely related to volume. If the objective were to determine the number of trees in a stand, it would be more efficient to use fixed area plots, as evidenced in this paper.

The results of the present work, in terms of the precision of the sampling methods, are similar to those reported by several authors both in plantation inventory and in the natural forest. In the case of plantations, Do Couto et al. (1993) determined the precision of the angular method (BAF 2, 3 and 4) vs. fixed plot in *Eucalyptus saligna* Sm. plantations in Brazil and found no significant differences ($P < 0.05$) in the estimation of the basal area per hectare. The same conclusion is reached by the results obtained by Druszcz et al. (2010) in plantations of *Pinus taeda* L. On the other hand, Lionjanga and Pereira (2014) tested BAF values (1, 2 and 4) against fixed area sampling for the inventory of plantations of *Pinus patula* Schlttdl. & Cham. in Angola and observed that all the dasometric variables had similar precision, except the density which showed a value estimated by angular counting less precise than the fixed area. In the case of natural forest inventories, the results obtained in this work also coincide with those reported by Moskovich and Brena

t_1 = tiempo para llevar a cabo la unidad de muestreo de referencia

t_2 = tiempo para llevar a cabo la unidad de muestreo comparada.

La $e > 1$ indica que la unidad de muestreo 2 (muestreo angular FAB 0.5, 1, 1.5 y 2) se llevó a cabo de una forma más eficiente que la unidad de muestreo 1 (muestreo de referencia basado en parcela de área fija) y viceversa. En esta ecuación no se consideran los tiempos de traslado entre unidades de muestreo.

Los datos generados mediante la simulación del muestreo angular para cada uno de los FAB fueron procesados mediante el tabulador electrónico Excel®; adicionalmente, los valores de los promedios y del error estándar de las variables dasométricas se calcularon.

Mediante el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2017) se aplicó el ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis para el contraste de las diferencias de medias entre las variables objeto de estudio, asumiendo una completa aleatorización de las unidades de muestreo. La aproximación no paramétrica fue necesaria debido a la falta de normalidad de los datos y las varianzas homocedásticas evidenciadas por las pruebas de Kolgomorov y Levene. Todas las pruebas usaron un nivel de significación $P < 0.05$. Se consideraron como tratamientos o fuentes de variación los métodos de muestreo que se contrastan: parcela de superficie fija circular (testigo, PC); parcela de superficie variable de simulación con FAB = 0.5 (FAB-S 0.5); parcela de superficie variable medida en campo con relascopio de cadena y FAB = 1 (FAB-C 1); parcela de superficie variable de simulación con FAB = 1.5 (FAB-S 1.5); parcela de superficie variable de simulación con FAB = 2 (FAB-S 2).

Resultados y discusión

El Cuadro 2 muestra que el error estándar de estimación (%) para todas las variables estudiadas y para los métodos de muestreo ensayados resultó inferior al 10 %. El muestreo angular de Bitterlich, para los FAB evaluados, y el muestreo mediante parcela de área y forma fijas tuvieron precisión similar en la estimación de las variables dasométricas. En este sentido, el ANOVA no detectó diferencias significativas ($P < 0.05$) entre promedios de las variables dasométricas por tratamientos o tipos de parcelas de muestreo.

Como era de esperar, el muestreo de superficie fija mostró errores estándar ligeramente inferiores a los registrados en el muestreo angular. Este hecho fue más notable en el caso de la estimación de la variable densidad, con errores estándar entre dos y cuatro veces mayores en el muestreo de superficie variable. Estos resultados se relacionan con lo indicado por Kershaw

(2006) in a native forest of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze in Brazil, where they found no significant differences between several PPS methods (among them the Bitterlich method with BAF = 4) and the fixed area plot method for the estimation of commercial volume, basal area and tree density. In the same line of work, De Farias Soares, de Souza, and Leite (2002) compared estimates of dasometric variables in a tropical natural forest in Brazil using variable area plots with BAF 2, 3 and 4, and found no significant differences ($P < 0.05$) in the variables evaluated (basal area, average height and volume per hectare), except for tree density.

In relation to field sampling time, the variable presented significant differences ($P < 0.05$), pointing to the area and fixed shape plot as the sampling method that required more working time (Table 2). This result is related to relative efficiency, since, with the exception of tree density, the advantage of the angle method over the fixed area plot method was evident, especially in the case of BAF = 2, showing efficiency between 4.5 and 11 times higher than the fixed area plot method. In the case of the variable density, lower efficiencies were observed in the angular sampling, which was due, as already mentioned, to a lower precision in its estimation for any of the BAFs evaluated, although such decrease was not statistically significant.

Regarding the relative efficiency of sampling methods, Moskovich and Brena (2006) obtained similar results to those of the present work in a native forest of *A. angustifolia* in Brazil, while a recent work by Mulyana et al. (2018) proposed the suitability of the angular count method (BAF = 1) for basal area estimation in community forests in India. It should be noted that the appropriate BAF depends on the geometry, variability and age of the plantation, and local trials assessing relative effectiveness under different conditions are needed. In this study, for variables such as total basal area, normal tree diameter of average basal area, average Lorey's height and total volume, the ideal BAF value in young teak plantations located in the Coastal region of Ecuador was equal to two. This BAF produced sufficiently precise estimates and decreased the work time required for the field inventory (increased efficiency), as shown in Table 2.

Some authors have evaluated the method of angular sampling through computer simulations, proving to be a fast and efficient tool for comparing the performance of various BAFs. For example, Šmelko (2013) used this tool to evaluate the use of different BAFs for angle sampling, finding that the accuracy was similar in the BAFs tested and that the efficiency of the Bitterlich method was superior to the fixed area method, which is consistent with the results of this study. Using a similar procedure, both Rice

et al. (2016), quienes establecen que, en general, es más eficiente usar una unidad de muestreo donde los árboles se seleccionan con una probabilidad proporcional a la variable de interés. En este sentido, si el objetivo fuera la estimación del volumen de un rodal, sería más eficiente utilizar el muestreo de parcela variable (PPT), ya que la selección de árboles de muestra es proporcional a su área basal, variable estrechamente relacionada con el volumen. Si el objetivo fuera la determinación de la cantidad de árboles en un rodal, sería más eficiente el uso de parcelas de área fija, como se evidencia en este trabajo.

Los resultados del presente trabajo, en cuanto a la precisión de los métodos de muestreo, son similares a los reportados por varios autores tanto en inventario de plantaciones como en el bosque natural. En el caso de las plantaciones, Do Couto et al. (1993) determinaron la precisión del método angular (FAB 2, 3 y 4) vs. parcela fija en plantaciones de *Eucalyptus saligna* Sm. en Brasil y no encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en la estimación del área basal por hectárea. A igual conclusión conducen los resultados obtenidos por Druszcz et al. (2010) en plantaciones de *Pinus taeda* L. Por su parte, Lionjanga y Pereira (2014) ensayaron valores de FAB (1, 2 y 4) frente a muestreo de superficie fija para el inventario de plantaciones de *Pinus patula* Schltld. & Cham. en Angola y observaron que todas las variables dasométricas tuvieron precisión similar, excepto la densidad que mostró un valor estimado por conteo angular menos preciso que el de superficie fija. En el caso de inventarios de bosque natural, los resultados obtenidos en este trabajo también coinciden con los reportados por Moskovich y Brena (2006) en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze en Brasil, donde no encontraron diferencias significativas entre varios métodos PPT (entre ellos el método de Bittelich con FAB = 4) y el de parcela de área fija para la estimación de volumen comercial, área basal y densidad de árboles. En la misma línea de trabajo, De Farias Soares, de Souza, y Leite (2002) compararon estimaciones de variables dasométricas en un bosque natural tropical de Brasil mediante parcelas de área variable con FAB 2, 3 y 4, y no encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en las variables evaluadas (área basal, altura promedio y volumen por hectárea), excepto en la densidad de árboles.

En relación con el tiempo de muestreo en campo, la variable presentó diferencias significativas ($P < 0.05$), señalando a la parcela de área y forma fija como el método de muestreo que requirió más tiempo de trabajo (Cuadro 2). Este resultado está relacionado con la eficiencia relativa, ya que, a excepción de la densidad arbórea, se evidenció la ventaja del método angular sobre el método de parcela de área fija, especialmente en el caso de FAB = 2, mostrando eficiencia entre 4.5 y

et al. (2014) and Gove (2017) reported that the angle sampling method was more efficient than the fixed area method.

In general, the angular counting method or methods based on the selection of individuals with a probability proportional to the variable of interest could be used in the case of the terrestrial laser scanner or field instruments with similar characteristics. This could be a promising line of research that integrates sampling methodology with spatial information technologies to increase efficiency in obtaining forest inventories (Aguilar et al., 2019b).

Finally, it is necessary to mention that future research should validate these results by applying the angular counting method in inventory work in teak plantations of different ages, soil and climatic conditions and silvicultural management.

Conclusions

The angular counting method was accurate and faster than sampling with fixed area plots. Neither sampling method was statistically superior to the other with respect to the estimation of dasometric variables, which demonstrates that the angular counting method is sufficiently precise for the estimation of the main dasometric variables of young teak plantations in the Coastal region of Ecuador. On the other hand, the angular-count sampling method was significantly faster than the fixed-plot method. These results recommend the suitability of angle-counting as a reference method for the inventory of teak plantations in the region, which would reduce the costs of field work. In the case of young teak plantations, it is recommended that a basal area factor of 2 be used.

Acknowledgements

This research has been carried out in the context of the development of the project "Evaluation of remote sensing technologies for the estimation of teak biomass in the Coastal Region of Ecuador", financed by the Sistema de Investigación y Desarrollo (SINDE) de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

End of English version

References / Referencias

Aguilar, F. J., Rivas, J. R., Nemmaoui, A., Peñalver, A., & Aguilar, M. A. (2019a). UAV-Based digital terrain model generation under leaf-off conditions to support teak plantations inventories in tropical dry forests. A case

11 veces mayor que el método de parcela de superficie fija. En el caso de la variable densidad se observaron eficiencias menores en el muestreo angular, lo que se debió, como ya se ha señalado, a una menor precisión en su estimación para cualquiera de los FAB evaluados, aunque tal disminución no fue estadísticamente significativa.

Con respecto a la eficiencia relativa de los métodos de muestreo, Moskovich y Brena (2006) obtuvieron resultados similares a los del presente trabajo en un bosque nativo de *A. angustifolia* en Brasil, mientras que en un trabajo reciente de Mulyana et al. (2018) se propuso la idoneidad del método de conteo angular (FAB = 1) para la estimación del área basal en bosques comunitarios de India. Es necesario indicar que el FAB idóneo depende de la geometría, variabilidad y edad de la plantación, siendo necesarios ensayos locales que evalúen la eficacia relativa en condiciones distintas. En este trabajo, y para variables como área basal total, diámetro normal del árbol de área basal media, altura media de Lorey y volumen total, el valor de FAB idóneo en plantaciones jóvenes de teca situadas en la región Costa de Ecuador resultó ser igual a dos. Dicho FAB produjo estimaciones suficientemente precisas y disminuyó el tiempo de trabajo requerido para el inventario de campo (aumento de la eficiencia), tal como se muestra en el Cuadro 2.

Algunos autores han evaluado el método de muestreo angular mediante simulaciones computarizadas, resultando ser una herramienta ágil y eficiente para la comparación del rendimiento de varios FAB. Por ejemplo, Šmelko (2013) empleó esta herramienta para evaluar el uso de distintos FAB en el muestreo angular, comprobando que la precisión era similar en los FAB ensayados y que la eficiencia del método de Bitterlich era superior al método de área fija, lo que concuerda con los resultados del presente estudio. Mediante un procedimiento similar, tanto Rice et al. (2014) como Gove (2017) reportaron que el método de muestreo angular fue más eficiente que el de área fija.

En general, el método de conteo angular o métodos basados en la selección de individuos con una probabilidad proporcional a la variable de interés podrían emplearse en el caso del escáner láser terrestre o en instrumentos de campo de características similares. Esto podría constituir una línea de investigación prometedora que integra la metodología de muestreo con las tecnologías de la información espacial para el incremento de la eficiencia en la obtención de inventarios forestales (Aguilar et al., 2019b).

Por último, es necesario mencionar que futuras investigaciones deberán validar estos resultados mediante la aplicación del método de conteo angular

- of the Coastal Region of Ecuador. *Sensors*, 19(8), 1934. doi: 10.3390/s19081934
- Aguilar, F. J., Nemmaoui, A., Peñalver, A., Rivas, J. R., & Aguilar, M. A. (2019b). Developing allometric equations for teak plantations located in the Coastal Region of Ecuador from terrestrial laser scanning data. *Forests*, 10(12), 1050. doi: 10.3390/f10121050
- Bitterlich, W. (1952). Die winkelmessprobe. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 71(7-8), 215–225. doi: 10.1007/BF01821439
- Burkhardt, H. E. (2008). Remembering Walter Bitterlich. *Journal of Forestry*, 106(2), 61. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/293727952_Remembering_Walter_Bitterlich
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3rd. ed.). New York, USA: Wiley.
- De Farias, C. A., Soares, C. P. B., de Souza, A. L., & Leite, H. G. (2002). Comparação de métodos de amostragem para análise estrutural de florestas inequidistantes. *Revista Árvore*, 26(5), 541–548. doi: 10.1590/S0100-67622002000500003
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2017). InfoStat. Software estadístico. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Grupo InfoStat, FCA. Retrieved from <http://www.infostat.com.ar>
- Do Couto, H. T. Z., Bastos, N. L. M., & de Lacerda, J. S. (1993). A amostragem por pontos na estimativa de área basal em povoamentos de *Eucalyptus*. *IPEF*, 46, 86–95. Retrieved from <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr46/cap07.pdf>
- Druszcz, J. P., Nakajima, N. Y., Netto, S. P., & Júnior, M. Y. (2010). Comparação entre os métodos de amostragem de Bitterlich e de área fixa com parcela circular em plantação de *Pinus taeda*. *Floresta*, 40(4), 739–754. doi: 10.5380/rf.v40i4.20326
- Flores, T., Cabezas, F., & Crespo, R. (2010). Plagas y enfermedades en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.F.) en la zona de Balzar, provincia de Guayas. *Ciencia y Tecnología*, 3(1), 15–22. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267865035_Plagas_y_enfermedades_en_plantaciones_de_Teca_Tectona_grandis_LF_en_la_zona_de_Balzar_provincia_del_Guayas
- Gove, J. H. (2017). Some refinements on the comparison of areal sampling methods via simulation. *Forests*, 8(10), 393. doi: 10.3390/f8100393
- Iles, K. (2003). *A sampler of inventory topics: A practical discussion for resource samplers, concentrating on forest inventory techniques*. Canada: Kim Iles & Associates.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAHMI). (2017). Anuario meteorológico. Retrieved August 21, 2019 from <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/productos>
- Jerez, M., Vincent, L., Moret, A. Y., & Quevedo, A. (2005). Comparación entre modalidades de muestreo en plantaciones de Pino Caribe en el Oriente de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 49(1), 17–25.
- en trabajos de inventarios en plantaciones de teca de edades, condiciones edafoclimáticas y manejo silvícola diferentes.

Conclusiones

El método de conteo angular fue preciso y más rápido que el muestreo con parcelas de superficie fija. Ningún método de muestreo fue estadísticamente superior a otro con respecto a la estimación de las variables dasométricas, lo cual demuestra que el método de conteo angular es suficientemente preciso para la estimación de las principales variables dasométricas de plantaciones jóvenes de teca en la región Costa de Ecuador. Por otra parte, el método de muestreo basado en conteo angular fue significativamente más rápido que el de parcela fija. Estos resultados recomiendan la idoneidad del conteo angular como método de referencia para el inventario de plantaciones de teca en la región, lo que permitiría reducir los costos del trabajo de campo. En el caso de plantaciones jóvenes de teca se recomienda utilizar un factor de área basimétrica igual a 2.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el contexto del desarrollo del proyecto “Evaluación de tecnologías de detección remota para la estimación de biomasa de teca en la Región Costa de Ecuador”, financiado por el Sistema de Investigación y Desarrollo (SINDE) de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Fin de la versión en español

Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/234052498_Comparacion_entre_modalidades_de_muestreo_em_plantaciones_de_Pino_Caribe_en_el_orient_e_de_Venezuela

Jordan, G. J., Ducey, M. J., & Gove, J. H. (2004). Comparing line-intersect, fixed-area, and point relascope sampling for dead and downed coarse woody material in a managed northern hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(8), 1766–1775. doi: 10.1139/x04-051

Kenning, S., Ducey, J., Brisette, C., & Gove, H. (2017). Field efficiency and bias of snag inventory methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2900–2910. doi: 10.1139/X05-207

Kershaw, Jr., J. A., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. (2016). *Forest mensuration* (5th ed.). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118902028

Lara, C. E. (2012). Aplicación de ecuaciones de conicidad para teca (*Tectona grandis* L. f.) en la zona costera ecuatoriana. *Ciencia y Tecnología*, 4(2), 19–27. doi: 10.18779/cyt.v4i2.67

- Lionjanga, D. L., & Pereira, E. (2014). Comparación de los métodos de muestreo casual simples: Bitterlich y Prodan. *Revista Forestal Baracoa*, 33, 76–86.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2018). Comprimido de la base de datos geográfica catalogada en formato (.shp). Archivo de datos. Retrieved August 21, 2019 from <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/a043e691-2f3a-4f8d-8b10-dff650c93ccc>
- Moscovich, F. A., & Brena, D. A. (2006). Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 13, 7–16. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101301>
- Mulyana, B., Rohman, R., & Purwanto, R. H. (2018). Application of point sampling method in estimation of stand basal area in community forest. *Journal of Sylva Indonesiana*, 1(1), 45–54. doi: 10.32734/jjsi.v1i1.426
- Rice, B., Weiskittel, A. R., & Wagner, R. G. (2014). Efficiency of alternative forest inventory methods in partially harvested stands. *European Journal of Forest Research*, 133, 261–272. doi: 10.1007/s10342-013-0756-4
- Ríos, N., Acosta, V., Gaillard de Benítez, C., & Pece, M. (2000). Comparación entre métodos de muestreo. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 9(1), 45–57. Retrieved from <http://www.inia.es/IASPF/2000/vol9/rios.pdf>
- Šmelko, Š. (2013). Nový Pohľad na Vlastnosti a Použitelnosť Kruhových a Relaskopických Skusných Plôch pri Inventarizácii a Monitorovaní Lesných Ekosystémov. *Lesnícky časopis. Forestry Journal*, 59(1), 1–18. doi: 10.2478/v10114-011-0018-7
- White, J. C., Wulder, M. A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D., Pitt, D., & Woods, M. (2013). *A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach*. Canada: Natural Resources Canada-Canadian Forest Service-Canadian Wood Fibre Centre. Retrieved from <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34887.pdf>