

## Towards a shank description for Laurel *Cordia alliodora* in agroforestry systems in Bosque Protector Sumaco, Ecuador

## Hacia una descripción de fuste para el Laurel *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador

Álvaro Cañadas<sup>1\*</sup>, František Vilčko<sup>2</sup>, Diana Rade<sup>1</sup>, Carlos Zambrano<sup>3</sup> y Carlos Molina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Av. 17 de Julio 5-21 y José Córdova, Ibarra, Ecuador.

<sup>2</sup>University of Göttingen, Institute of Forest Management, Busgenweg 5, D - 37077, Göttingen, Germany.

<sup>3</sup>Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP), km 5,5 vía Quevedo-El Empalme, Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: alvarogustavo.canadaslopez@alumni.uni-goettingen.de

Editado por/Edited by: Diego F. Cisneros-Heredia, Ph.D.(c)

Recibido/Received: 28/05/2013. Aceptado/Accepted: 21/02/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 13/06/2014. Impreso/Printed: 13/06/2014.

### Abstract

The Protected Forest Sumaco is characterized by extensive areas of secondary forests. It provides a buffer zone for the National Park Sumaco-Napo-Galeras at an altitude of 1160 m above sea level and with a precipitation of 4000 mm year<sup>-1</sup>. Adequate management of secondary forest in this protected area requires basic data about growth and volume-dependent regeneration of Laurel in Agro forestry systems. Consequently, accurate and flexible methods are required to estimate the volume and taper curve. For the parameterization of the total volume and taper function, 77 trees were taken. Altogether 308 observations were used, such as DBH, the diameter at 1.3, 2, 4, 6, 8 meters, and the total height. The volume was estimated with the Smalian formula for two sections. Splein model used in this research were validated using 44 independent trees from the neighboring community of Wawa Sumaco. The stem represents an assortment of saleable timber products and, for comparing different cross-cutting options, its shape needs to be known. Stem forms can be described in great detail using taper function with a limited number of parameters. The Pain function was fitted to describe a stem taper of Laurel. The algebraically and numerically consistent tree volume and taper function gave reliable results for the determination of the total volume and taper function of Laurel.

**Keywords.** basal area, diameter distribution, height growth, site index, taper function, total volume.

### Resumen

El Bosque Protector Sumaco esta caracterizado por extensas áreas de bosque secundario en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Sumaco-Napo-Galeras a una altitud de 1160 m y con una precipitación promedio de 4000 mm año<sup>-1</sup>. Un adecuado manejo de estas áreas requiere información básica sobre el crecimiento y producción dependiendo de la regeneración del Laurel *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. El presente estudio muestra los resultados sobre diferentes modelos para determinar el coeficiente de forma, volumen, perfil de fuste y desarrolla un sistema de ecuaciones matemáticamente y numéricamente consistente para *Cordia alliodora* bajo un sistema agroforestal en la comunidad indígena de Wamaní. Para la búsqueda de los parámetros de las funciones de volumen total, el cociente de forma, la descripción del perfil de fuste y la función de conicidad, un total de 308 árboles fueron medidos el diámetro a 1, 3, 2, 4, 6, 8, metros, a la mitad del árbol y la altura total en metros. Se presenta un modelo para determinar el volumen del Laurel en base al cociente de forma, diámetro y altura total. El modelo de perfil de fuste a través de la función Pain demuestra ser un modelo muy apropiado para describir este parámetro, así como también para calcular el volumen con mayor exactitud. En este estudio la consistencia algebraica y numérica para determinar el volumen y el diámetro a una establecida altura del fuste a través de la función de conicidad fue verificada. Todos estos modelos pueden ser utilizados en la práctica, constituyéndose estos en la esencia del negocio de la madera.

**Palabras Clave.** consistencia numérica, consistencia matemática, factor de forma, función de perfil de fuste, función de conicidad

## Introducción

El incremento de la concentración de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  en la atmósfera desde la Revolución Industrial ha producido severos efectos antropogénicos sobre el ambiente global del planeta [1]. Por el incremento de gases de efecto invernadero se proyecta un aumento de la temperatura promedio entre 1 y 3,5 °C para el 2100 [2]. Los bosques son de los ecosistemas terrestres más productivos y juegan un rol muy importante en el ciclo de carbono a nivel regional y global debido a que almacenan grandes cantidades de carbono en la vegetación y sus suelos (capacidad que puede ser afectada por causas humanas o naturales). Los bosques son atractivos para la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono, pudiendo ser manejados para secuestrar o conservar significantes cantidades de carbono [3, 4]. Se estima que los bosques del mundo almacenan cerca de 667 Gt de carbono, de las cuales 44 % se encuentran en su biomasa, 11 % como madera muerta y hojarasca, y 45 % en el suelo [5]. La contribución de los ecosistemas forestales al balance global de carbono se está estudiando a través de tres criterios generales a) la cantidad de carbono almacenado a largo plazo en los ecosistemas, b) el rango neto anual de la fijación de carbono por producción primaria y c) almacenamiento a largo plazo en productos forestales. Dentro de este contexto, los bosques amazónicos son un inmenso y diverso reservorio de carbono, el cual se ha ido liberando gradualmente a la atmósfera por cambios en los hábitats por la deforestación y los cambios en el uso del suelo, hecho que tiene un impacto climático [6]. El rango de posibles emisiones de carbono por la deforestación y degradación de los bosques tropicales es muy amplio debido a que los cálculos del stock de carbono en los bosques tropicales son inciertos [7, 8]. Una de las fuentes de controversia en el cálculo del balance del carbono es hasta qué punto el carbono liberado por el cambio de cobertura boscosa es atenuado por la captura y fijación de carbono atmosférico por el crecimiento de bosques secundarios en sitios deforestados [9]. La tasa de fijación de carbono en la biomasa de los bosques secundarios varía temporalmente, de ahí que la edad a la cual los bosques secundarios son nuevamente cortados es importante para proporcionar información sobre el ciclo total del carbono (incluyendo el periodo de uso como agricultura o pastura). El carbón de la leña formado por quema es la única vía para que el carbono salga del ciclo [10]. Por otro lado, la quema del bosque secundario no solo libera más dióxido de carbono sino también metano ( $\text{CH}_4$ ) y otras trazas de gases que no forman parte de los procesos fotosintéticos. Globalmente, la quema de los bosques secundarios libera bajo escenarios altos y bajos de emisión:  $3,1-3,7 \times 10^6$  Mg  $\text{CH}_4$ ,  $73-92 \times 10^6$  Mg CO,  $0,2-1,6 \times 10^6$  Mg  $\text{N}_2\text{O}$  y  $2,4 \times 10^6$  Mg  $\text{NO}_x$  [11]. Usando los 100 años del potencial global de calentamiento adoptado para el primer período 2008–2012 de compromiso del protocolo de Kyoto [12], la emisión de estos gases es equivalente entre  $34-156 \times 10^6$  Mg de car-

bono anual.

Literatura económica relevante ha discutido largamente sobre el potencial de las plantaciones forestales como sumidero de carbón. Estos estudios mostraron que las plantaciones pueden proveer producciones maderas y fijación de carbono, pero tiene una alta desventaja de altos costos de inversión y la necesidad de acceso a financiamientos a largo plazo [13]. Una alternativa a las plantaciones forestales en los trópicos húmedos es la regeneración natural de los bosques secundarios. No obstante, esta alternativa no ha sido incluido en los Mecanismos de Desarrollo Limpio [14], este uso del suelo podría tener un atractivo potencial económico debido a la combinación del bajo costo de inversión y el alto potencial de secuestro de carbón, mientras que la producción de madera podría ser cosechada regularmente a niveles sostenibles. El Bosque Protector Sumaco se caracteriza por extensas áreas de bosque secundario y es una zona de amortiguamiento del Parque Nacional Sumaco Napo-Galeras. El adecuado manejo de esta área protegida requiere información básica sobre condiciones de crecimiento, calidad de fuste y volumen -dependiente de regeneración natural del bosque secundario, para implementar sistemas agroforestales [15]. La estimación de productos forestales es una tarea central en la investigación sobre el crecimiento y producción, en especial la valoración de la biomasa del árbol y volumen de madera. Un requerimiento básico en la estimación de productos forestales es la posibilidad de predecir la forma de fuste con la finalidad de simular la calidad de los árboles en pie [16], de ahí la necesidad de desarrollar métodos flexibles y exactos para estimar volumen y producción de estos sistemas agroforestales. Desde la introducción de los métodos de regresión en las ciencias forestales, la selección de modelos para determinar volumen, perfil de fuste y producción en base a la toma de datos es una práctica común, basados en el criterio de selección de un modelo determinado y la estimación de los parámetros de una ecuación para datos específicos [17]. Propiedades matemáticas tales como la consistencia algebraica están siendo aplicadas para mejorar la especificación de los modelos. Un sistema de ecuaciones es algebraicamente y numéricamente consistente cuando una ecuación en el sistema puede ser expresada en términos de otra ecuación(es) [18]. Por ejemplo, si una ecuación de volumen puede ser expresada en términos de una ecuación que determina el diámetro a una establecida altura del fuste (función de conicidad) o viceversa [19].

El presente estudio muestra los resultados sobre diferentes modelos de volumen, cociente de forma, y descripción del perfil de fuste a través de la función Pain. También, se desarrolla un sistema de ecuaciones con la finalidad de determinar el volumen y el diámetro a una determinada altura del fuste, que sean matemáticamente y numéricamente consistente para el Laurel *Cordia alliodora* bajo un sistema agroforestal dentro del Bosque Protector Sumaco, zona de amortiguamiento del Parque Nacional Sumaco-Napo-Galeras, Ecuador.

## Materiales y Métodos

### Área de Estudio

El estudio fue conducido en el Bosque Protector Sumaco, parroquia de Wamaní, comunidad de Wamaní, provincia de Napo (coordenadas UTM 9920000 y 2150000, 1160 m de elevación, 21 °C de temperatura promedio, Figura 1). La zona de estudio pertenece a la zona de vida de Bosque Húmedo Tropical [20]. La estación pluviométrica representativa para el área de estudio es la estación de Challua Yacu, la cual registra una precipitación media anual de 4000 mm/año y su distribución durante el año es representada en la Figura 2 [21].

En la región del Sumaco, en el mes de diciembre se establece un sistema predominante de vientos Alisios, que por efecto de la rotación terrestre son desviados en dirección NE. Estos vientos se manifiestan en forma de fuertes vientos, provocando la disminución de vapor de agua y por ende la baja de la pluviosidad en la región. En los meses de abril y marzo, donde la corriente de El Niño (cálido y húmeda) se encuentra en su apogeo, se suma la presencia en la región Amazónica de los vientos Alisios monzónicos en dirección NO cargados de vapor de agua, que da como resultado el primer pico de lluvias en la región. Entre junio y julio mientras todo el Ecuador se encuentra un periodo seco, en la Cordillera Oriental se presenta el período de máxima lluvia. La causa de este fenómeno es la presencia de los vientos Alisios en dirección SE, los cuales están relacionados con una corriente fría proveniente del hemisferio sur. Cuando la Tierra va hacia el hemisferio sur después del equinoccio (octubre), la región oriental se ve influenciada por las corrientes de los vientos Alisios en dirección NO y la desviación de los mismos en dirección NE del hemisferio norte, provocando en la región el segundo pico de lluvias [22].

Los suelos del Bosque Protector Sumaco pertenecen al gran grupo de suelos denominados Hydrandeps. Estos suelos son generalmente negros en su horizonte superficial y pardo amarillo en los horizontes subsiguientes. Su capacidad de retención de humedad es mayor a la

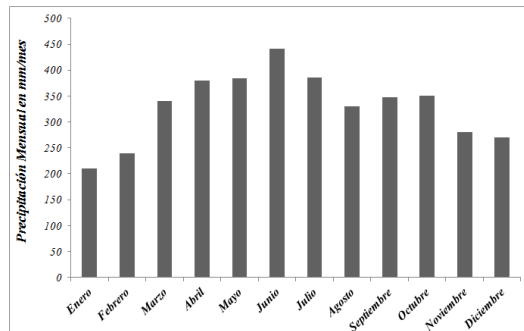


Figura 2: Distribución de la precipitación mensual en el área de Chalua Yacu.

capacidad de campo. Los procesos de lixiviación (lavado) son continuos y la meteorización de los minerales primarios es casi completa, liberando cationes de Al<sup>+</sup> y cationes H<sup>+</sup>, los cuales contribuyen a la acidificación del suelo. La acidez del suelo va disminuyendo conforme se aumenta la profundidad del perfil del suelo, esto se debe principalmente a la poca actividad radicular de la vegetación en esta área [23].

### Cociente de forma y determinación del volumen

Para determinar el cociente de forma se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) a 1,30 m, y a la mitad de la altura total del árbol de un total de 43 árboles. Un modelo de regresión no lineal fue aplicado para establecer la relación entre volumen, DAP y la altura total. La estimación de los parámetros fueron realizados con el programa STATISTICA [24] en base al método de la diferencia mínima de la suma de cuadrados entre los valores medidos y calculados.

### Perfil de fuste (Función Pain)

Con la finalidad de construir el perfil de fuste del Laurel, el diámetro a la altura a 1,3, 2, 4, 6 y 8 metros de la altura total en metros fueron medidos para 308 árboles. La función Pain desarrollada por Pain y Boyer [25] fue aplicada (Ecuación 1 y 2) y es descrita de la siguiente manera:

$$r(h_{rel}) = \alpha \cdot (1 - h_{rel}^3) + \beta \cdot (\ln(h_{rel})) \quad (1)$$

Donde  $r(h_{rel})$  = Radio a una altura relativa del árbol  $h_{rel}$ .  
 $\alpha, \beta$  = Parámetros de dimensión y forma.

con:

$$\alpha = a_0 + a_1 \cdot \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{H \cdot D}\right)} \right) + a_2 \cdot \left( \frac{1}{\left(\frac{H}{D}\right)^2} \right) \quad (2)$$

$$\beta = b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{H \cdot D}\right)} \right) + b_2 \cdot \left( \frac{1}{\left(\frac{H}{D}\right)^2} \right)$$

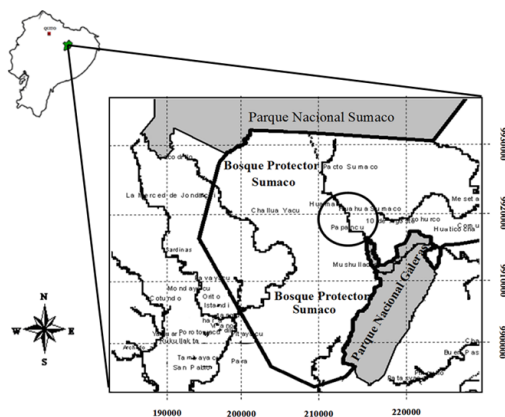


Figura 1: Vista general de la parcela agroforestal después del raleo en Wamaní.

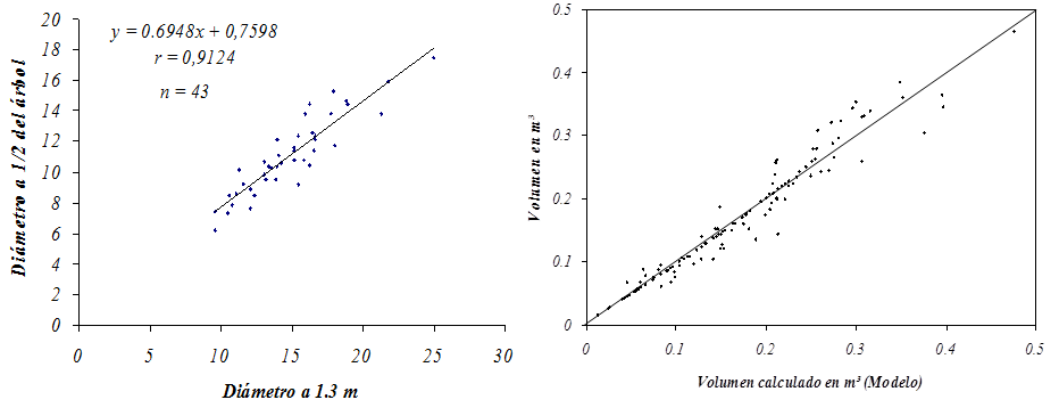


Figura 3: Izquierda: Relación entre diámetro a la altura del pecho y a la mitad del árbol. Derecha: Volúmenes observados plotados sobre los valores predichos por el modelo de volumen.

Donde  $a_0, a_1, a_2,$  = Parámetros.  
 $b_0, b_1, b_2$   
 $\alpha, \beta$  = Parámetros de dimensión y descripción de forma.  
 $H$  = Altura total del árbol.  
 $D$  = Diámetro a la altura del pecho (cm).

La función Pain fue ajustada de acuerdo al método Gauss-Newton provisto por el programa STATISTICA (Ordinary Least Squares).

### Consistente algebraicamente entre la función de volumen total y la función de conicidad

#### Datos para determinar los parámetros de los modelos

Para la determinación de los parámetros de la función de volumen total y de conicidad, un total de 308 árboles observados fueron determinados el diámetro a 1, 3, 2, 4, 6 y 8 metros y la altura total en metros en la comunidad de Wamaní. Setenta y siete árboles fueron seleccionados para la obtención de los parámetros. Los dos modelos utilizados en este estudio fueron validados usando 44 árboles independientes de la comunidad vecina de Wawa Sumaco. Las características generales de los árboles utilizados para este análisis están resumidas en la Tabla 1.

**Volumen total y función de conicidad** En este estudio, la consistencia algebraica y numérica de las ecuaciones de volumen y la función de conicidad fue utilizada para el Laurel [19]. Ec (3) representa la fórmula de volumen total y Ec (4) la fórmula de la función de conicidad.

$$V_t = \alpha D^\beta H^{3-\beta} \quad (3)$$

$$d^2 = D^\beta \gamma \left(1 - \frac{h}{H}\right) h^{2-\beta} \quad (4)$$

Donde  $V_t$  es el volumen total,  $D$  representa el DAP,  $H$  la altura total del árbol,  $\alpha, \beta$  los parámetros que son compartidas en la ecuaciones de volumen y la función de conicidad,  $d$  el diámetro a una determina altura del árbol  $h$  y  $\gamma$  una constante y su valor puede ser obtenido de la Ec. (2), cuando  $d = D, h = k$  donde  $k = 1,30$  m.

Entonces,

$$D^2 = D^\beta \gamma \left(1 - \frac{k}{H}\right) k^{2-\beta} \quad (5)$$

De ahí que,

$$\gamma = \frac{(D/k)^{2-\beta}}{1 - (k/H)} \quad (6)$$

Sustituyendo este valor de  $\gamma$  en la ecuación (4) y agrupando los términos, la ecuación final (Ecuación 7) de la función de conicidad es especificada de la siguiente manera:

$$d^2 = D^2 \left(\frac{h}{k}\right)^{2-\beta} \left(\frac{H-h}{H-k}\right) \Rightarrow d = \sqrt{D^2 \left(\frac{h}{k}\right)^{2-\beta} \left(\frac{H-h}{H-k}\right)} \quad (7)$$

Para la obtención de los parámetros, las ecuaciones 1 y 5 fueron tomadas para la simultánea búsqueda de parámetros del total volumen y función conicidad. El método FIML fue empleado (full information maximum likelihood estimation). Los parámetros fueron estimados utilizando el programa SAS [26]. La Tabla 2, muestra las formulas que fueron utilizadas para estimar la validación de los modelos. Estos criterios de evaluación fueron propuestos por Pretzsch y Durský [27] y Sterba et. al, [28].

## Resultados y Discusión

### Cociente de forma y volumen total

Para describir la forma de los troncos en detalle es necesario medir el diámetro a varias alturas de los árboles, de tal forma que la curva de conicidad puede ser derivada para describir y modelar la forma de los troncos. Con el conocimiento de un diámetro superior y con una curva de conicidad se puede obtener mayor exactitud en el cálculo de los volúmenes y optimizar los surtimientos. La obtención de un diámetro superior es más fácil

|               | Datos del Modelo |      |       | Datos de Validación |      |       |
|---------------|------------------|------|-------|---------------------|------|-------|
|               | (N = 77)         |      |       | (N = 44)            |      |       |
|               | Min.             | Max. | Prom. | Min.                | Max. | Prom. |
| DAP           | 6,7              | 33,4 | 22,4  | 9,6                 | 24,9 | 14,9  |
| Altura total  | 14,6             | 32,9 | 25,2  | 18,2                | 34,7 | 27,1  |
| Volumen total | 0,04             | 1,9  | 0,8   | 0,08                | 1,1  | 0,3   |

Tabla 1: Datos generales de los árboles utilizados para este análisis (N = número de árboles; Min. = mínimo valor; Max. = máximo valor; Prom. = valor promedio).

| Criterio                                 | Fórmulas  |                                 | Valor Ideal |          |
|--|---|---------------------------------|-------------|----------|
|  | Absoluto  | Relativo                        | Absoluto    | Relativo |
| Distorsión<br>( $\bar{e}$ , $\bar{e}$ %) | $\frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)}{n}$   | $(\bar{e} \cdot 100) / \bar{X}$ | 0           | 0 %      |
| Precisión<br>( $s_e$ , $s_e$ %)          | $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{e} - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}}$ | $(s_e \cdot 100) / \bar{X}$     | 0           | 0 %      |
| Exactitud<br>( $m_x$ , $m_x$ %)          | $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{s_x^2 + \bar{e}^2}$                                    | $(s_e \cdot 100) / \bar{X}$     | 0           | 0 %      |
| Eficiencia<br>( $E$ , $E$ %)             | $1 - \frac{\sum (X_i - x_i)^2}{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}$   | $E \cdot 100$                   | 1           | 100 %    |

Tabla 2: Criterios para la evaluación del modelo ( $x_i$  = valor predicho;  $X_i$  = valor observado;  $n$  = número de observaciones).

obtener de árboles caídos, no obstante, existen situaciones en las que es necesario medir diámetros superiores aún con árboles en pie. Esta medición puede ser facilitada por el denominado Finn caliper. El volumen de fuste, puede ser modelado con el DAP como una variable predictora exclusivamente. Sin embargo, los modelos de volumen son más precisos si se dispone de información sobre la forma de fuste y es incorporado a un modelo [29, 30]. La obtención de un diámetro superior requiere del empleo de tiempo y por ende implica un costo, por lo que esta es una decisión de optimización, donde la precisión adicional ganada se justifica por el costo adicional. La relación entre el DAP y el diámetro a la mitad de árbol para el Laurel es presentada en la Figura 3 y sirvió de base para estimar el volumen total del Laurel. Se ajustó un modelo para la predicción del volumen total del Laurel a través de variables que pueden ser fácilmente estimadas en el campo, tales como la altura y DAP (Figura 3). El modelo para establecer el volumen (Ecuación 8) es el siguiente:

$$V = 0,000071 * DAP^{1,958} * H^{0,959} \quad (8)$$

La evaluación visual del modelo propuesto demuestran una bondad de ajuste muy alta ( $n = 140$ , cuadrado medio del error del residuo RMSE = 0,0789 y  $r = 0,97$ ) y por lo tanto este modelo puede ser utilizado en la práctica para determinar el volumen del Laurel.

### Perfil de fuste (Función Pain)

El perfil de fuste proporciona el radio o diámetro como una función de la altura. Una vez que el perfil es conocido matemáticamente, el volumen de fuste puede ser fácilmente calculado por una rotación integral de dicha

curva. Esto hace que los perfiles de fuste sean una herramienta muy útil para establecer el surtimiento [29]. Para una interpolación de la forma de fuste y describir el perfil se puede emplear las funciones Spline. Una función Spline es un conjunto de polinomios de un cierto grado  $k$  que se unen entre si manteniendo condiciones de continuidad, y que permiten definir el perfil de una determinada figura, en este caso el fuste de un árbol. Su aplicación requiere que se conozcan una serie de valores ( $n$  valores) de los diámetros del fuste a diferentes alturas (algunos autores recomiendan un mínimo de cuatro mediciones aunque el número y su situación óptima sobre el fuste son aún objeto de investigación). Para poder representar el perfil del fuste es necesario calcular por interpolación todas las coordenadas en el intervalo entre mediciones sobre el tronco ( $h_i, h_{i+1}$ ) [30]. Estudios conducidos por Kleinn [31], después de realizar simulaciones empíricas, mostraron que de 4 a 6 puntos (medición de diámetros) bien distribuidos a lo largo del fuste dan muy buenos resultados de las interpolaciones de la función Spline. El perfil de fuste para el Laurel pudo ser descrito con gran detalle usando la función no lineal Pain con un limitado número de parámetros. El ajuste de esta función fue apropiada para el Laurel ( $r = 0,98$ , error estándar = 0,23,  $F = 35321,55^{****}$ ) y los parámetros para función Pain son presentados en la Tabla 3.

En la Figura 4 se puede apreciar el análisis de residuos del modelo propuesto, estableciéndose que ellos tienden a localizarse en una banda alrededor del eje X cero, sin mostrar ninguna tendencia, la cual corrobora la distribución normal de los residuos. Este modelo puede ser utilizado también para determinar el perfil de fuste, con un alto grado de exactitud.

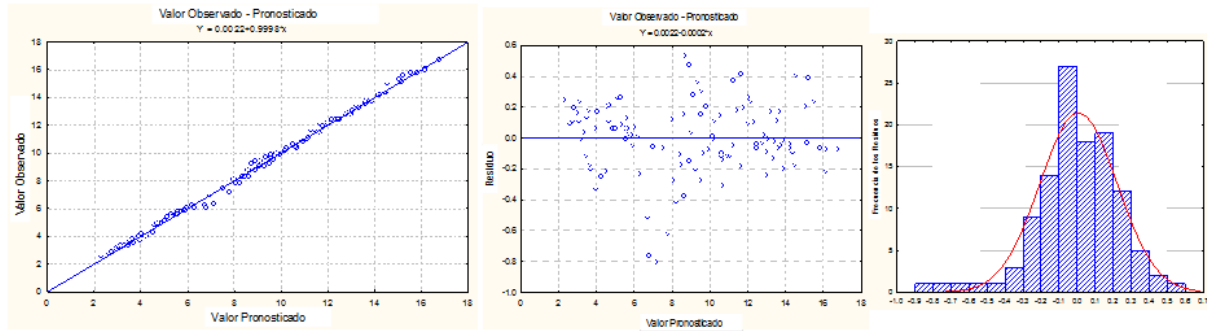


Figura 4: Análisis visual de los residuos de la función de conicidad. Izquierda: valores observados ( $y$ ) ploteados sobre los valores predichos ( $\hat{y}$ ). Mitad: residuos ( $y - \hat{y}$ ) ploteados sobre los valores predichos ( $\hat{y}$ ). Derecha: Frecuencia de los residuos ( $y - \hat{y}$ ).

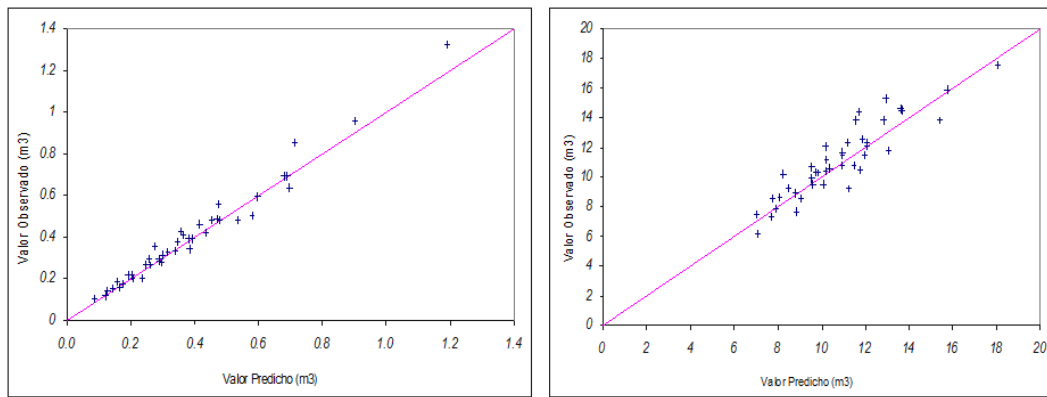


Figura 5: Análisis visual entre los valores observados y predichos (izquierda del volumen total y derecha la función de conicidad).

| Parámetro | Valor    | Valores de T | Pr > t |
|-----------|----------|--------------|--------|
| $a_0$     | -0,84834 | 2,90668      | <,0001 |
| $a_1$     | 1,578191 | 7,36639      | <,0001 |
| $a_2$     | -2,24296 | -1,39619     | <,0001 |
| $b_0$     | 0,270980 | 1,95313      | <,0001 |
| $b_1$     | -0,21005 | -2,13397     | <,0001 |
| $b_2$     | 0,230957 | 0,31043      | <,0001 |

Tabla 3: Parámetros calculados para describir el perfil de fuste del Laurel a través de la función Pain.

**Determinación del volumen total y de conicidad**

Los coeficientes mórficos permiten realizar estimaciones generales sobre la forma del fuste en función de la edad y de la densidad del rodal, pero no permiten describir su perfil del mismo. Si el objetivo es conocer el perfil, se pueden emplear las series de curvatura o las funciones Spline. Sin embargo, con estas metodologías se puede reconstruir exactamente el perfil de un árbol pero no permiten realizar afirmaciones generales sobre la influencia de la estación y la silvicultura en la forma del fuste [16]. Una alternativa es el empleo de las funciones de perfil, que son un compromiso entre la simplicidad de los coeficientes mórficos y la excesiva especificidad de las series de curvatura o las funciones Spline. La consistencia algebraica entre la función de volumen total y la función de conicidad propuesta por Sharma y Oderwald [19] y Demaerschalk [32] son una alternativa. La determinación de los parámetros y el nivel de significancia pueden ser vista en la Tabla 4. Ambos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  usados para la determinación del volumen total y

| Parámetros | Estimación Aproximada | Valor de t | Pr > t |
|------------|-----------------------|------------|--------|
| $\alpha$   | 0,000061              | 49154,2    | <,0001 |
| $\beta$    | 1,999435              | 16296,6    | <,0001 |

Tabla 4: Parámetros calculados para el volumen total y la función de conicidad.

| Criterio             | Modelos                 |        |                             |        |
|----------------------|-------------------------|--------|-----------------------------|--------|
|                      | Modelo de Volumen Total |        | Modelo de Función Conicidad |        |
| $\bar{e}/\bar{e} \%$ | -0,016                  | -4,2 % | 0,29                        | 2,6 %  |
| $s_e/s_e \%$         | 0,043                   | 10,9 % | 1,04                        | 9,4 %  |
| $m_x/m_x \%$         | 0,046                   | 11,7 % | 1,08                        | 9,7 %  |
| $E/E \%$             | 0,958                   | 95,8 % | 0,81                        | 81,2 % |

Tabla 5: Criterio para la evaluación de los modelos dentro del sistema Agroforestal de Wamaní con los datos obtenidos en la Comuna de Wawa Sumaco ( $\bar{e}$  distorsión;  $\bar{e} \%$  distorsión relativa;  $s_e$  precisión;  $s_e \%$  precisión relativa;  $m_x$  exactitud;  $m_x \%$  exactitud relativa;  $E$  eficiencia;  $E \%$  eficiencia relativa).

la función de conicidad mostraron una alta significación estadística, así como también un buen ajuste con un coeficiente de regresión ( $r$ ) de 0,989 para el volumen total y un  $r$  de 0,981 para la función de conicidad. La Tabla 5, muestra la evaluación de ambos modelos. La exactitud de los valores predichos fue alta. El valor de distorsión y precisión de los dos modelos están cercanos al valor ideal de cero.

La precisión expresada a través del coeficiente de varianza alcanzó un máximo del 12,0 % y la eficiencia de ambos modelos fue de 81,2 %.

En la Figura 5, se confirman los datos obtenidos en la validación de los modelos, la dispersión de los residuos de los valores predichos y los observados son muy bajos en ambos casos. Así la consistencia algebraica y numérica para determinar el volumen y el diámetro a una determinada altura del fuste para el Laurel queda establecida. De esta manera ambos modelos pueden ser utilizados para determinar el volumen total y el diámetro a una determinada altura del fuste.

### Conclusiones

La Ley Forestal, en su Título II de Aprovechamiento Forestal, Capítulo I. Programa de Aprovechamiento Forestal Sustentable, Art. 10, inciso a) Inventario y censo comercial, Anexo IV, proporciona un Factor de Forma de 0,7. Es decir que el volumen de fuste de acuerdo a la ley puede ser estimada mediante un solo predictor el Diámetro a la Altura del Pecho para el cálculo del volumen de cualquier especie forestal. No obstante, los modelos de volumen son más precisos, si se mide el diámetro a niveles superiores y estos son incorporados plenamente dentro del modelo seleccionado, debido a que se proporciona alguna información sobre la forma de ahumamiento del fuste. Es necesario resaltar que la medida de diámetros superiores consume tiempo y dinero, de tal manera que es una pregunta de optimización, si se quiere elevar el nivel de precisión de este parámetro forestal. Sin embargo, esta adición de costo está plenamente justificada como se demuestra en esta investigación. El modelo de perfil de fuste a través de la función Pain demuestra ser un modelo muy apropiado para describir este parámetro forestal, así como también para calcular el volumen con mayor exactitud. En este estudio la consistencia algebraica y numérica para determinar el volumen y el diámetro a una establecida altura del fuste a través de la función de conicidad fue verificada. De tal manera que se puede estimar los diámetros a cualquier altura del tronco o la altura a las cuales se alcanza un cierto diámetro para el Laurel. Los modelos desarrollados cumplen con todos los supuestos estadísticos, y además entrega las mejores predicciones para *Cordia alliodora*.

La parametarización de los modelos propuestos en esta investigación para todas las especies forestales en el Ecuador es una necesidad imperiosa con la finalidad de mejorar sustancialmente las estadísticas forestales y corrigiendo con esto los ingresos del MAE por la recaudación por concepto de madera en pie, Art. 262 de la Ley Forestal.

### Referencias

- [1] Malhi, Y.; Baldocchi, D.; Jarvis, P. 1999. "The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests". *Plant Cell Environment*, 22:712-740.
- [2] IPCC. 1996. "Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate: Scientific-Technical Analyses". en: "Contribution of II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press: Cambridge.
- [3] Brown, S.; Sathaye, J.; Cannell, M.; Kauppi, P. 1996. "Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management". *Forest Review*, 75(1):80-91.
- [4] Nabuurs, G.; Masera, O.; Andrasco, K.; Benitez-Ponce, P.; Boer, R.; Dutschke, M.; Elsiddig, E.; Ford-Robertson, J.; Frumhoff, P.; Karjalainen, T.; Kurz, W.; Matsumoto, M.; Oyhantcabal, W.; Ravindranath, N.; Sanz Sanchez, M.; Zhang, X. 2007. "Forestry". en: "Mitigation. Contribution of III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007", B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds.), Cambridge University Press: Cambridge, New York: 541-584.
- [5] FAO. 2010. "Global Forest Resource Assessment 2010". *Food and Agriculture Organisation Forestry Paper, Rome*, 163.
- [6] IPCC. 2007. "Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". *WMO/UNEP: Paris*.
- [7] Fearnside, P. 2000. "Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation". *Climate Change*, 46(1-2):115-158.
- [8] Houghton, R. 2005. "Aboveground forest biomass and the global carbon balance". *Global Change Biology*, 11: 945-958.
- [9] Achard, F.; Eva, H.; Stibig, H.; Mayaux, P.; Gallego, J.; Richards, T.; Malingreau, J. 2002. "Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests". *Science*, 297:999-1002.
- [10] Neeff, T.; de Alencastro, P.; Vieira, L.; da Costa Freitas, C. 2005. "Carbon budget estimation in Central Amazonia: Successional forest modeling from remote sensing data". *Remote Sensing of Environment*, 94:508-552.
- [11] Fearnside, P.; Laurance, W. 2003. "Comment on: Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests". *Science*, 229:1015.
- [12] Schimel, D. 1996. "Radiative forcing of climate change". en: "Climate Change 1995: The Science of Climate Change", J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (Eds.), Cambridge University Press: Cambridge: 65-131.
- [13] Knoke, T. 2008. "Mixed forests and finance - Methodological approaches". *Ecological Economics*, 65:590-601.
- [14] UNFCCC. 2003. "Report of the subsidiary body for scientific and technological advice. Adeendum-methodological issues (FCCC/SUBSTA/10/Add.3)". Enlace: <http://www.unfccc.int>, United Nations Framework Convention on Climate Change: Bonn, Fecha de Consulta: 1 Enero 2014.

- [15] Cañadas, A. 2005. "Providing information about natural resources as a base to support the decentralization of the forest sector in Canton Loreto". *Research Centre of Forest Ecology: Göttingen*.
- [16] Gadow, K. 2004. "Forsteinrichtung, Steuerung und Analyse der Waldentwicklung". *Universitätsverlag Göttingen: Göttingen*.
- [17] Cañadas, A.; Vilčko, F.; Gadow, K. 2003. "Management of Laurel (*Cordia alliodora*) within Agro forestry System in the Canton Loreto, Ecuador". en: "*Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development*", C. Wollny, A. Deininger, N. Bhandari, B. Maass, W. Manig, U. Muuss, F. Brodbeck, I. Howe (Eds.), *Deutscher Tropentag, Göttingen*: 288.
- [18] Cañadas, A.; Vilčko, F. 2004. "Tree volume and taper function for *Cordia alliodora* in agroforestry system, Protected Forest Sumaco". en: "*Rural Poverty Reduction through Research for Development and Transformation*", K.J. Peters, D. Kirschke, W. Manig, A. Bürker, R. Schultze-Kraft, L. Bharati, C. Bonte-Friedheim, A. Deininger, N. Bhandari, H. Weitkamp (Eds.), *Deutscher Tropentag, Berlin*: 384.
- [19] Sharma, M.; Oderwald, R. 2001. "Dimensionally compatible volume and taper equations". *Canadian Journal of Forest Research*, 31:797–803.
- [20] Cañadas, L. 1983. "Mapa bio climático y ecológico del Ecuador". *Editores Asociados Cia. Ltd.: Quito*.
- [21] Cañadas, A.; Korol, M.; Zambrano, C.; Camacho, B. 2012. "Modelos descriptivos de corona para Laurel (*Cordia alliodora*) bajo sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador". *Avances en Ciencia e Ingenierías*, 4(2):39–46.
- [22] Bendix, J.; Lauer, W. 1992. "Die Niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre Klimadynamische Interpretation". *Erkunde*, 46:118–134.
- [23] Cañadas, L. 1978. "Identificación de sistemas ecológicos en la Región Amazónica Ecuatoriana". *INCRAE-MAG: Quito*.
- [24] STATISTICA. 2004. "User's guide". *STATISTICA Version 5.0*.
- [25] Pain, O.; Boyer, E. 1996. "A whole individual tree growth model for Norway Spruce". en: "*Proceedings of the Second Workshop, Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation software's*", *Publication Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois INRA: Nancy*: 13–23.
- [26] SAS INSTITUTE INC. 1999. "SAS/STAT<sup>TM</sup> User's guide Release 8.0". *Edn. Cary. NC. USA*.
- [27] Pretzsch, H.; Durský, J. 2001. "Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum - und Bestandesebene". *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 172(8-9):146–150.
- [28] Sterba, H.; Korol, M.; Rössler, G. 2001. "Ein Ansatz zur Evaluierung eines Einzelbaumwachstumssimulators für Fichtenreinbestände". *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 120:406–421.
- [29] Kleinn, C. 2007. "Lectures notes for the Teaching Module Forest Inventory". *Universitätsverlag Göttingen: Göttingen*.
- [30] Akça, A.; Gadow, K.; Mench, A.; Mann, P.; Pahl, A.; Setje-Eilers, U. 1994. "Überprüfung des Formquotiente q7 (d7/BHD) in der Bundeswaldinventur für die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer im landeseigenen Wald Nordrhein-Westfalens". *Universitätsverlag Göttingen: Göttingen*.
- [31] Kleinn, C. 1989. "Überlegungen zur Berechnung von Einzelbaumvolumen mittels kubischer Spline Interpolation". *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*: 1246–1247.
- [32] Demaerschalk, J. 1973. "Integrated systems for the estimation of tree taper and volume". *Canadian Journal of Forest Research*, 3(1):90–94.