

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Modelos de volumen comercial, perfil de fuste
y crecimiento para plantaciones clonales de
Gmelina arborea Roxb. ex Sm. en Costa Rica.**

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL

SOFÍA QUIRÓS MONGE

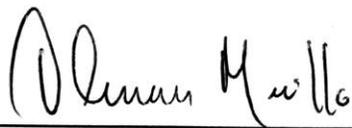
CARTAGO, COSTA RICA

Diciembre, 2015

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

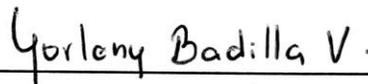
Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Olman Murillo Gamboa, Ph.D.

Director de Tesis



Yorleny Badilla, M.Sc.

Lectora



Dorian Carvajal, Lic.

Lector



Sofía Quirós Monge.

Estudiante

RESUMEN

La melina (*Gmelina arborea*) es la segunda especie arbórea con mayor área de reforestación en Costa Rica, debido a su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas, rápido crecimiento y productividad. Desde la década de los años noventa, el mejoramiento genético de esta especie se ha incrementado, lo que ha provocado cambios significativos en la forma del fuste, conicidad de los árboles, mayor altura comercial y productividad en melina. El objetivo de este trabajo es desarrollar una función para la estimación de volumen comercial de una plantación clonal de 3 años de edad, modelo de perfil de fuste y un sistema de clasificación del crecimiento de plantaciones clonales en Costa Rica. Para la función de volumen comercial se ajustaron 5 modelos (dos lineales y 3 no lineales), de estos se seleccionó el mejor mediante criterios estadísticos. Con respecto a la ecuación de perfil de fuste se ajustaron dos modelos: Kozak y Coffré, se evaluó y escogió el mejor modelo mediante criterios estadísticos y facilidad de uso. El sistema de clasificación del crecimiento de plantaciones se basó en la construcción de un método de percentiles (25 %, 50% y 75%) que consistió en generar tres ecuaciones d_{ap} - edad, cada una representa a cada percentil. De manera general se recomienda incluir y ampliar la información utilizada en cada uno de estos modelos.

Palabras clave: *Gmelina arborea*, volumen comercial, fuste, modelos, plantaciones, clones.

ABSTRACT

Melina's tree (*Gmelina arborea*) is the second species with the most reforestation area in Costa Rica, because of its adaptability to different climatic conditions, fast growth and productivity. Since the 90's melina's genetic improvement has been getting better, which has caused significant changes in stem form, taper trees, commercial height and productivity. The objectives of this thesis are, first develop a merchantable volume function for a tree stem with an age of three years clonal planting. Second, make a stem taper model and third a growth system classification for clonal planting in Costa Rica. To make the volume function was used 5 models (2 lineal models and 3 non-linear models), and using statistical criteria was chosen the best function. To the stem taper model were used two models: Kozak and Coffré, the best model was selected through statistical criteria and user-friendliness. The classification system of plantation growth is based on creating a method of percentiles (25%, 50% and 75%), generating three equations or functions diameter at breast high (DBH) vs age, each one of these represented an every percentile. It is recommended include and to add extra information in every model.

Key words: *Gmelina arborea*, merchantable volume, stem, models, plantations, clone

DEDICATORIA

A **Dios** por demostrarme que siempre ha estado y estará conmigo.

A mis padres Sonia Monge Víquez y Ricardo Quirós Garita por ser mis pilares, por todo su amor, consejos, apoyo, confianza a lo largo de mi vida y, aún más en esta etapa de formación. A mis hermanos Ricardo y Manuel por apoyarme y quererme incondicionalmente, sentimientos que son mutuos.

A mi abuelo Elí Monge Sánchez hombre especial que siempre ha estado al pendiente de mí.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Olman Murillo, por su amistad, apoyo incondicional y consejos principalmente durante esta etapa.

Al Dr. Edgar Ortiz Malavassi, por su instrucción y colaboración durante este proyecto.

A la M.Sc. Yorleny Badilla y al Lic. Dorian Carvajal, lectores de este documento, por su contribución y consejos durante la última etapa de este proyecto.

Al M.Sc. Mario Guevara por su apoyo y colaboración a lo largo de esta tesis.

Al Sr. José María Cordero y su esposa por la atención y colaboración brindada.

A la Sra. Jinny Ureña mujer luchadora y ejemplar.

A Ricardo Quirós y Alonso Ulloa por su ayuda en el trabajo de campo.

A mis queridas amigas Lucía Fallas, Rocío Cortés y Natalia Fallas, por estar conmigo, aconsejarme y apoyarme durante este proyecto. A todos mis amigos y amigas “Los del aparta” por compartir momentos inolvidables a lo largo de estos años de universidad, porque ustedes son amigos de oro.

A todas las personas que colaboraron y permitieron hacer realidad este documento.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Función para la estimación del volumen comercial para plantaciones clonales de 3 años de melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.), Siquirres, Costa Rica.	2
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
MATERIALES Y MÉTODOS	5
RESULTADOS	10
DISCUSIÓN	13
CONCLUSIONES	16
RECOMENDACIONES	17
Capítulo II. Modelo de perfil de fuste para plantaciones clonales de melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.) en Costa Rica.	18
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
MATERIALES Y MÉTODOS	22
RESULTADOS	27
DISCUSIÓN	31
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	36
Capítulo III. Sistema de curvas diámetro-edad para clasificación de plantaciones clonales de melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.) en Costa Rica.....	37
RESUMEN	37
INTRODUCCIÓN	38
MATERIALES Y MÉTODOS	42
RESULTADOS	46
DISCUSIÓN	52
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Alturas establecidas para el cubicaje de árboles en suelo de <i>Gmelina arborea</i> clonal en Costa Rica.	5
Cuadro 2. Cálculo de volumen por troza y total hasta los 5 cm de diámetro.....	6
Cuadro 3. Estructura de la base de datos sistematizada	6
Cuadro 4. Distribución por clase diamétrica (dap) de los árboles utilizados para el ajuste de modelos de predicción del volumen total con corteza hasta un diámetro mínimo de 5 cm, en clones de <i>Gmelina arborea</i> en Costa Rica.	10
Cuadro 5. Funciones generadas para estimar el volumen total con corteza hasta 5 cm de diámetro	11
Cuadro 6. Resultados de los estadísticos de prueba para la validación del modelo elegido.	12
Cuadro 7. Mediciones realizadas en los árboles cubicados en el suelo para el ajuste de modelos de conicidad de <i>Gmelina arborea</i> clonal en Costa Rica.	22
Cuadro 8. Distribución por clase diamétrica (dap) de los árboles utilizados para el ajuste del modelo de conicidad para clones de <i>Gmelina arborea</i> en Costa Rica.	27
Cuadro 9. Parámetros estadísticos de los modelos de conicidad ajustados en clones de melina en Costa Rica.	28
Cuadro 10. Resultados de los estadísticos de prueba (porcentaje de sesgo y prueba de Wilcoxon) para la validación del modelo de ahusamiento de Kozak elegido para melina clonal en Costa Rica.....	29
Cuadro 11. Función de conicidad ajustada a partir de la inclusión de la información adicionada a la base de datos de <i>Gmelina arborea</i> clonal en Costa Rica.	30
Cuadro 12. Distribución por categoría diamétrica de las parcelas muestreadas en tres regiones de Costa Rica para el ajuste de las curvas de clasificación de plantaciones clonales de <i>Gmelina arborea</i>	46
Cuadro 13. Funciones y estadísticos de los modelos evaluados para el ajuste de una curva de crecimiento del dap vs edad, o curva guía, para plantaciones clonales de melina en Costa Rica.	47
Cuadro 14. Funciones creadas a partir de una sub base de datos para la predicción del percentil 25 de las observaciones totales de plantaciones clonales de melina en Costa Rica.....	48
Cuadro 15. Funciones creadas a partir de la sub base de datos para la predicción del percentil 75 del crecimiento diamétrico de la melina clonal en Costa Rica.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea de tendencia del modelo de mejor ajuste para la relación Volumen con corteza hasta 5cm vs dap de la especie Gmelina arborea en Costa Rica.	10
Figura 2. a) Distribución de los residuos con respecto al dap de la función escogida. b) Distribución de los residuos con respecto al dap^2 de la función escogida.	12
Figura 3. Relación entre di/dap con respecto a hi/ht en Gmelina arborea clonal en Costa Rica.....	27
Figura 4. a) Distribución de los residuos con respecto a la variable independiente $(hi/ht)-1$ de la función escogida. b) Distribución de los residuos con respecto al $(hi^2/ht^2)-1$ de la función escogida, para el modelo de ahusamiento de melina clonal en Costa Rica.....	29
Figura 5. Modelo de mejor ajuste para la relación dap vs edad de plantaciones clonales de Gmelina arborea en Costa Rica.....	47
Figura 6. Distribución de los residuos con respecto a la relación dap-edad de la función escogida, para plantaciones clonales de melina en Costa Rica.....	48
Figura 7. a) Distribución de los residuos de la sub base de datos del percentil 25% con respecto a la edad de la función escogida. b) Distribución de los residuos de la sub base de datos del percentil 75% con respecto a la $edad^2$ de la función escogida	49
Figura 8. a) Distribución de los residuos de la sub base de datos para la estimación del crecimiento diamétrico del percentil 75%. b) Distribución de los residuos de la sub base de datos con respecto a la $edad^2$ del modelo seleccionado.	50
Figura 9. Funciones de crecimiento del dap vs edad en plantaciones clonales de Gmelina arborea en Costa Rica.	51

INTRODUCCIÓN

La especie forestal melina (*Gmelina arborea*) pertenece a la familia Lamiaceae, es nativa de la India, Bangladesh, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia, Laos, sur de China, Camboya y Sumatra, siendo una fuente maderera importante en dichas regiones (Rojas y Murillo, 2004).

En América Central ha sido plantada con éxito, adaptándose mejor a las zonas de vida del bosque seco tropical, bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical (Murillo y Valerio, 1991), específicamente en Costa Rica las primeras plantaciones se establecieron a mitad de la década de los sesenta en Manila, Siquirres; desde entonces y debido a su corto turno de rotación, diferentes usos de la madera y adaptabilidad a diversas condiciones climáticas se ha utilizado melina en proyectos de reforestación. (Rojas *et al*, 2004),

Al conocerse las propiedades y características de *G. arborea*, a finales de los años setentas se inician los programas de mejoramiento genético, (actividad que aún continúa vigente con la inclusión de nuevas técnicas de propagación vegetativa in vivo en la última década) (Murillo y Guevara, 2013), generando cambios notables en la melina, tales como en la forma de fuste, aumento en altura comercial, turnos de rotación más cortos, madera más uniforme y productos de mayor calidad (Dvorak, 2004). Lo anterior obliga a que la silvicultura y metodologías para la estimación, cuantificación y mensura en plantaciones sean actualizadas, asimismo que permitan a los pequeños, medianos productores y empresas forestales conocer de manera adecuada el tipo de producto que pueden obtener de sus plantaciones forestales.

La presente investigación tiene como objetivo ajustar modelos de estimación del volumen para una plantación clonal de *Gmelina arborea* de 3 años en Siquirres, perfil de fuste y sistema de clasificación del crecimiento de *G. arborea* en Costa Rica.

Capítulo I. Función para la estimación del volumen comercial para plantaciones clonales de 3 años de melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.), Siquirres, Costa Rica.

Resumen

Actualmente *Gmelina arborea* es la segunda de especie arbórea más utilizada en planes de reforestación en Costa Rica. El material genético utilizado para dichos proyectos con el tiempo ha evolucionado al empleo de material clonal que ha generado cambios en la productividad y conicidad de la especie. No obstante, los modelos para la estimación del volumen de esta especie a nivel clonal son reducidos o inexistentes. Esta razón lleva al ajuste de ecuaciones de volumen con corteza hasta un diámetro mínimo de 5 cm, para lo cual se contó con 133 árboles tumbados en el suelo y medidos a diversas alturas, con un dap que varía entre los 10,5 cm a 24 cm y una edad de 3 años.

La función ajustada presentó un alto coeficiente de determinación que corresponde a un $r^2 = 0,8949$, y valores bajos en los estadísticos de error estándar de la medición, error estándar en unidades reales y coeficiente de variación, en comparación con los otros modelos desarrollados, así como una distribución uniforme de los residuos analizados.

La validación del modelo se realizó con una muestra de 23 árboles diferentes a los utilizados en el ajuste del modelo. El porcentaje de sesgo mostró un valor del 7,18%, pero al ser sometido a la prueba de Wilcoxon, ésta indicó que la tabla no está sesgada. Se recomienda la utilización de la ecuación con cuidado.

Palabras clave: melina (*Gmelina arborea*), volumen, mediciones

Introducción

La producción sostenida de masas arboladas permiten satisfacer la demanda maderera de la sociedad (Cuevas García, Parraguirre Lezama & Rodríguez Santiago, 1992); muchas de éstas al ubicarse en los trópicos, utilizan especies exóticas (Evans, 1999) por ejemplo melina (*Gmelina arborea*), motivado por su rápido crecimiento y alta producción de biomasa (Piotto, Montagnini, Kanninen, Ugalde & Viquez, 2002; Murillo y Badilla, 2015).

Sin embargo para monitorear y estimar la tasa de producción de plantaciones de melina, es necesario que el productor pueda determinar con precisión la masa presente en la plantación forestal, para posteriormente poder predecir y proyectar su rendimiento a futuro (Andenmatten & Letourneau, 2003).

El rendimiento de un rodal se define como la biomasa total (en t/ha) que ha podido acumular al término de un determinado tiempo; de la misma forma, el crecimiento se define como la tasa de acumulación de la biomasa total de un rodal por unidad de tiempo (en t/ha/año) (Ortiz, 2011). Ambos conceptos son por lo general los que se buscan cuantificar en las plantaciones forestales, mediante la utilización de modelos matemáticos.

Las primeras plantaciones de *G. arborea* en Costa Rica se registran entre los años 1970 y 1975 (Lega, 1988), y es a partir de los años 80 que se desarrollan funciones de volumen para la especie, con un primer modelo publicado por Salazar & Palmer (1984), quienes reportaron ecuaciones para estimar el volumen total con y sin corteza hasta un diámetro superior de 10 cm para árboles de melina en la zona de Siquirres; para la cual se midieron un total de 60 árboles bajo un ámbito de diámetros de 20 hasta 50 cm:

$$\text{Volumen total con corteza} = -9,630 + 1,785 \ln(d) + 0,985 \ln(h)$$

$$\text{Volumen total sin corteza} = -9,938 + 1,854 \ln(d) + 0,947 \ln(h)$$

Asimismo Zeaser y Murillo (1992) reportaron una ecuación de volumen comercial sin corteza hasta la altura de 7 cm de diámetro mínimo utilizada por Stone Forestal, para cubicar árboles de melina de 2 años, aunque solo para uso en la zona sur del país:

$$V_{sc} = -0,1412 + 0,00087586 d^2 - 0,000029279 d^2 + 0,01h$$

Posteriormente Burbano (s.f.) desarrolló dos ecuaciones para estimar el volumen comercial de árboles de melina aplicable a todo el país. Se incluyó una muestra de 576 árboles con edades entre 3 y 13 años, con alturas que oscilaron entre 7 y 34 m y diámetros entre 9 y 49 cm. La primera ecuación es de dos entradas y utiliza el diámetro a 1,30m de altura y la altura total de los árboles para predecir el volumen comercial:

$$V_c = e^{(-11.6424 + 2.2444 \ln(dap) + 1.1249 \cdot \ln(h))}$$

La segunda ecuación de Burbano es de una sola entrada y utiliza únicamente el diámetro a 1,30 m del árbol para predecir el volumen comercial:

$$V_c = e^{-10.8445 + 3.0545 \ln(dap)}$$

Ambos modelos poseen altos coeficientes de determinación (r^2) 0,985 y 0,977 respectivamente.

Las empresas reforestadoras del país con el paso del tiempo, han cambiado el material genético que utilizaban, para avanzar hacia el establecimiento de plantaciones clonales. El uso de clones en melina inició a finales de los años 90 y se consolidó en los últimos 10 años (Murillo y Guevara, 2013), los cuales generan una mayor productividad, cambios en la forma del fuste y conicidad de los árboles (Salazar, Lobo & Chavarría, 2009). Este cambio mostrado al utilizar clones, especialmente en *G. arborea*, exige nuevos modelos para estimar su volumen con mayor precisión.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar modelos de estimación del volumen comercial para plantaciones clonales de 3 años de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica, que se adecúen a los cambios que ha sufrido la especie en el país en los últimos años.

Materiales y métodos

La información se obtuvo a partir de mediciones de árboles tumbados en el suelo de una plantaciones clonal de la especie *G. arborea* proveniente de Siquirres, Limón. Para el estudio se contó con un total de 133 árboles volteados con edad de 3 años.

La cubicación de los árboles volteados se realizó mediante la medición de diámetros con corteza (cm) a diferentes alturas de fuste, en la base del árbol (0,10m), altura de pecho (1,30 m), 5 m y la altura en el fuste donde el diámetro alcanza los 5 cm y altura total del árbol en metros (Cuadro 1)

Cuadro 1. Alturas establecidas para el cubicaje de árboles en suelo de *Gmelina arborea* clonal en Costa Rica.

Rodal	N° de árbol	Diámetro a la base del árbol	dap	d _{5m}	h alcanza 5 cm de diámetro	ht
-------	-------------	------------------------------	-----	-----------------	----------------------------	----

La base de datos se examinó cuidadosamente con el fin de identificar y eliminar datos inconsistentes que pudieron afectar el ajuste de los modelos de volumen. Por ejemplo, árboles con mediciones ausentes o datos con errores de digitación.

Se calculó el volumen con corteza (m³) por el método de Smalian en cada segmento del fuste medido. Con la suma de todos los segmentos de cada árbol se obtuvo el volumen con corteza total del árbol (Cuadro 2). En el mismo también se ejemplifica el orden establecido para el cálculo del volumen por troza y volumen total. Para la estimación de volumen de la troza 1, por ejemplo, se tomó como diámetro mayor (D₁) el dato de diámetro a la base y para el diámetro menor el dato correspondiente fue el diámetro a una altura de 1,30 m; asimismo el largo de la troza se obtiene de la diferencia de las alturas mencionadas anteriormente (1,30 m y base).

Cuadro 2. Cálculo de volumen por troza y total hasta los 5 cm de diámetro

Rodal	N° árbol	h total (m)	d _{base} (cm)	dap (cm)	d _{5m} (cm)	h (m) hasta d _{5cm}	Largo troza 5m- h d _{5cm}	Vol (m ³) troza 1	Vol (m ³) troza 2	Vol (m ³) troza 3	Volumen total (m ³) hasta 5cm
	1	17,00	19,00	14,70	11,00	13,00	8,00	0,0295	0,0490	0,0459	0,1243

Se creó otra nueva base de datos que incluyó **solamente** los diámetros medidos a la base y a 1,30 m además, se añadió la altura a la que se midió el último diámetro, la altura total y el volumen total (cuadro 3); ésta estructura de datos se utilizó para ajustar la ecuación deseada.

Cuadro 3. Estructura de la base de datos sistematizada

Rodal	N° árbol	d _{base}	ht	dap	d _{mínimo}	Vol Smalian	h (m) se alcanza el d mínimo
-------	----------	-------------------	----	-----	---------------------	-------------	------------------------------

En el cuadro 4 se muestra la distribución de los árboles cubicados por su clase diamétrica.

Se revisó gráficamente en una figura, la relación entre el dap y el volumen total, con el fin de visualizar la tendencia de los datos e identificar y eliminar la existencia de datos extremos. Posteriormente, se procedió a ajustar modelos lineales y no lineales de predicción volumen a partir del dap mediante el programa de EXCEL.

La elección del mejor modelo explicativo de volumen con corteza hasta 5 cm de diámetro, se hizo a través de los siguientes criterios:

Coefficiente de determinación (r²): Indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, que es explicada por el modelo utilizado (Ortiz, 2011). El coeficiente se calculó de la siguiente manera:

$$r^2 = 1 - \left(\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2} \right) \quad (1)$$

Donde:

y_{obs} = es cada uno de los valores observados de la variable dependiente (volumen)

y_{est} = es cada uno de los valores de la variable dependiente estimados a través del modelo de regresión desarrollado

y_{med} = es la media aritmética de la variable dependiente

Error estándar de la medición (Syx)

Este es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión (Ortiz, 2011). Se determinó de la siguiente manera:

$$Syx = \left[\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n-p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

n: número de observaciones incluidas en el análisis

p: número de coeficientes en el modelo de regresión

Análisis de residuos: Se definió como un residuo (resd) a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado o predicho por el modelo de regresión (Y_{est}) (Ortiz, 2011).

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est} \quad (3)$$

Índice de ajuste (FI): Se utilizó para comparar la exactitud de los modelos en los que su variable dependiente (volumen) requirió ser transformada, mientras los demás modelos se encontraron en unidades reales. Para los modelos sin transformar $FI = r^2$

$$FI = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{e.ur})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2} \quad (4)$$

Donde:

y_{obs} : son cada uno de los valores observados de la variable dependiente, expresados en unidades reales, es decir sin transformar

$y_{e.u.r}$: son los valores de la variable dependiente, estimados a partir de modelo de regresión pero en unidades reales.

y_{med} : es la media aritmética de los valores observados de la variable dependiente, calculada a partir de valores sin transformar.

Error estándar en unidades reales (Se): Fue útil para comparar los modelos que necesitaron ser transformados contra los modelos sin transformar. Para el caso de los modelos sin transformar el $Sy_x = Se$ (Ortiz, 2011).

$$Se = \left[\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{e.u.r})^2}{n-p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde:

n : es el número de observaciones

p : es el número de coeficientes en el modelo

Coefficiente de variación (CV %) expresado en unidades reales: Permitió hacer comparaciones entre modelos

$$CV = \left[\frac{Se}{Y_{med}} \right] * 100 \quad (6)$$

La validación del modelo de volumen se realizó con un set de datos diferentes al utilizado para construirlo, éste constó de 23 árboles cubicados en el suelo; a cada individuo se le tomó la medida de diámetro a la base, 1m, 1,30m, 1,80m, 2,5m, 5m, 10m, altura a la que alcanza los 10 cm y los 5 cm de diámetro.

Con estas mediciones independientes se estimó el porcentaje de sesgo del modelo.

Sesgo (S%): Éste parámetro se determinó mediante la siguiente expresión:

$$S\% = \frac{\sum(Y_{obs}-Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100 \quad (7)$$

Prueba de Wilcoxon: Se ordenaron los residuos de menor a mayor en valor absoluto. A cada dato se le asignó un número consecutivo según su posición en el orden general y se le mantuvo su signo (+/-) residual. Cuando varios residuos presentaron igual valor, se les asignó a todos el valor promedio de su posición en el ranking (Ortiz, 2011). Una vez codificados todos los datos con su signo, se procedió a obtener la suma de todos los valores negativos y todos los valores positivos del ranking. Se tomó el valor más bajo en valor absoluto entre ambos $\Sigma +/\Sigma -$ y se utilizó como el valor de T para el cálculo del estadístico de prueba:

$$Zc = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

Donde:

T: Es el menor valor de la suma de los ranking (+/-) en valor absoluto

n: Es el número de observaciones utilizadas en la validación

Las hipótesis probadas fueron:

- Hipótesis nula (Ho): La suma de los rankings positivos es igual a la suma de los rankings negativos
- Hipótesis alternativa: la suma de los rankings positivos es diferente a la suma de rankings negativos.

Una vez obtenido el **Zc**, se procedió a compararlo con el valor de **Zt** de la tabla de distribución normal con una significancia $\alpha=0,05$, este valor correspondió a 1,96. En el caso que el valor absoluto de Zc fuese menor que el Zt, se debería aceptar la hipótesis nula, pues no existe evidencia para rechazar ésta hipótesis, lo que significaría que la tabla no está sesgada. Si el Zc en valor absoluto fuese mayor al Zt la hipótesis nula se rechazaría, lo que significaría que la tabla está sesgada (Ortiz, 2011).

Resultados

En el cuadro 4 se presenta la distribución por clase diamétrica de los 133 árboles utilizados en el ajuste de los modelos de volumen. Los árboles fueron organizados en clases diamétricas con intervalos de 5 cm, con valores desde los 10,5 cm hasta los 24 cm. La clase diamétrica con mayor número de individuos fue la de 15,5-20,5 cm. La altura total de los árboles osciló desde los 8 a los 23 m.

Cuadro 4. Distribución por clase diamétrica (dap) de los árboles utilizados para el ajuste de modelos de predicción del volumen total con corteza hasta un diámetro mínimo de 5 cm, en clones de *Gmelina arborea* en Costa Rica.

dap (cm)			Total general
10,5-15,5	15,5-20,5	20,5-25,5	
46	76	11	133
46	76	11	133

La figura 1 muestra la ecuación y la relación entre la línea de tendencia del mejor modelo ajustado y los datos.

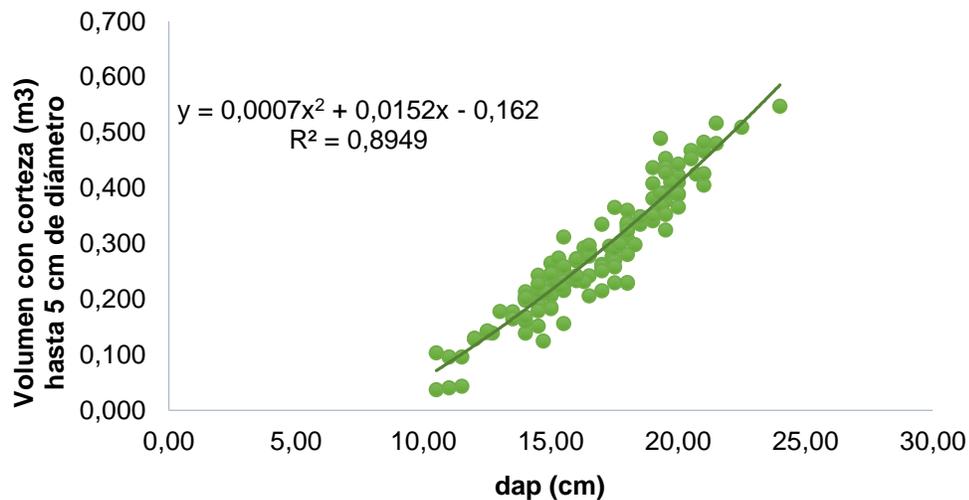


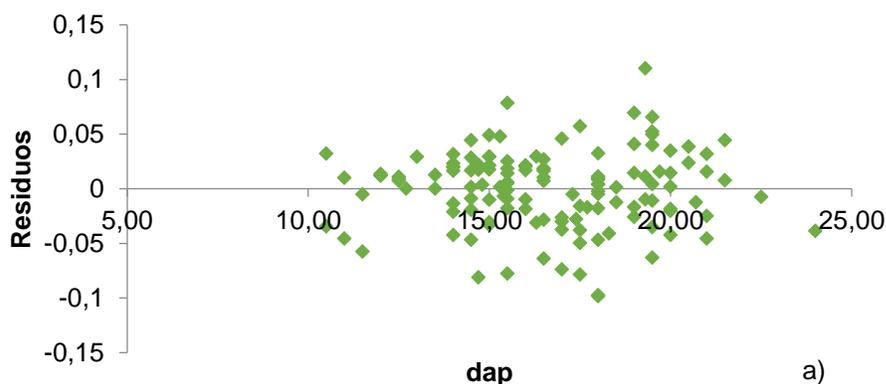
Figura 1. Línea de tendencia del modelo de mejor ajuste para la relación Volumen con corteza hasta 5cm vs dap de la especie *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Los modelos generados se presentan en el cuadro 5, con sus respectivos estadísticos. El mejor modelo escogido de los 5 probados, permite estimar con precisión el volumen total con corteza hasta los 5 cm de diámetro mínimo, con base en el diámetro a la altura de pecho (dap). Este registró un coeficiente de determinación (r^2) de 0,89 y un error estándar de la estimación de 0,0353 el más bajo de todos los modelos.

Cuadro 5. Funciones generadas para estimar el volumen total con corteza hasta 5 cm de diámetro

Modelo	R ²	Syx	Se	(FI)	CV%
1. Vol= 0,0006633dap ² + 0,01524 dap -0,1621	0,8949	0,0352	0,0353	0,8949	12,63
2. Vol= 0,0372 dap - 0,3397	0,8915	0,0356	0,0356	0,8915	12,78
3. Vol= 0,5924 ln(dap) -1,3775	0,8702	0,0390	0,0390	0,8702	13,98
4. Vol= 0,0002 dap ^{2,5492}	0,8430	0,1877	0,0383	0,8754	13,70
5. Vol= 0,0194 e ^{0,155 dap}	0,8073	0,2079	0,0460	0,1803	16,48

El análisis gráfico de los residuos se muestra en la figura 2a y 2b. En la figura 2a se puede observar la distribución de los residuos con respecto al dap, mientras que en la figura 2b se muestra los residuos en relación con el dap².



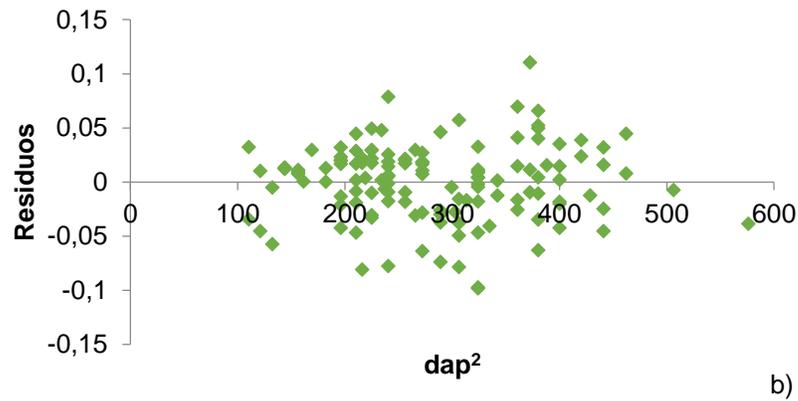


Figura 2. a) Distribución de los residuos con respecto al dap de la función escogida. b) Distribución de los residuos con respecto al dap^2 de la función escogida.

Para la validación del modelo se muestran los resultados obtenidos de los estadísticos (cuadro 6). El porcentaje de sesgo (S%) para la función elegida fue del 7,18%. El Z calculado (Z_c) mostró un valor de 1,77 para una significancia del 0,05%. Al ser comparado contra el Z tabular (Z_t) que corresponde a 1,96, se pudo observar que éste (Z calculado) es menor.

Cuadro 6. Resultados de los estadísticos de prueba para la validación del modelo elegido.

Estadístico	Resultado
$S\% = \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100$	7,18%
$Z_c = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)^{\frac{1}{2}}}$	1,77

Discusión

La información dasométrica proviene de un total de 133 árboles medidos en julio del año 2013 y de una sola finca en el cantón de Siquirres; para esa fecha la plantación de melina clonal tenía la edad de 3 años. Los 133 árboles provienen de un primer raleo hecho a la plantación.

La ubicación en la que se encuentra la finca es óptima para el desarrollo de la melina, pues como menciona Rojas & Murillo (2004), ésta debería de plantarse en la parte central de la provincia de Limón. La precipitación media anual en la zona se ubica entre los 3000 mm y 4000 mm, lo que es adecuado para el establecimiento y el desarrollo de la especie, pues sus requerimientos hídricos oscilan entre los 2000-2500 mm (Rojas *et al*, 2004).

Es importante señalar que los datos mostrados en el cuadro 4 son utilizados para ajustar los modelos de volumen total hasta un diámetro mínimo de 5 cm. Esto podría significar una desventaja al tratar de predecir el volumen total en categorías de dap mayores a los presentados en el cuadro mencionado. Pues la información utilizada para el ajuste del modelo está conformada por individuos muy jóvenes cuyos diámetros a 1,30 m (dap) no sobrepasan los 24 cm y fueron tomados de un solo área.

En la figura 1 se muestra la curva de la ecuación mejor ajustada al grupo de datos, la cual corresponde a una ecuación polinómica de segundo orden. En ella se observa el buen comportamiento que posee el modelo hasta la última clase diamétrica, ya que permite describir satisfactoriamente la relación entre las variables volumen comercial y diámetro a 1,30 m. Se observa que los datos se distribuyen de forma homogénea en torno a la curva de regresión.

Es necesario poder observar gráficamente lo que sucedería con la predicción del modelo al incluir datos de mayores categorías, sin embargo la limitación de este tipo de información está presente.

La elección de la mejor función de volumen se basó en criterios estadísticos usuales (valor de r^2 , desviación estándar, etc) y en criterios de facilidad de aplicación como el número de variables independientes y facilidad de medición en campo. Phillips (1995) mencionado por Pérez & Kanninen (2003) indica que la aplicabilidad y utilidad de los modelos debe basarse en parámetros de fácil y económica medición, siendo este el caso del diámetro a 1,30 m. La altura de los árboles, como menciona Burbano (s.f.) presenta dificultades de medición, por ejemplo, tienen la limitación de que en el campo los valores son estimados a partir del uso de instrumentos, a diferencia del **dap** (diámetro a 1,30 m de altura) que si se mide en cada árbol. Por consiguiente, el valor de la altura de los árboles incorpora un grado de error en la estimación de volumen, que puede inclusive aumentar considerablemente si no se trabaja con pericia.

La ventaja comparativa de estimación de una función de volumen de dos entradas (dap, altura) tiene el riesgo de verse sustancialmente reducida, si el valor de altura introducido ha sido obtenido en campo de manera descuidada o con impericia en el uso de los instrumentos.

Se determinó que el mejor modelo de ajuste de los generados (cuadro 5) es la ecuación 1 pues al ser comparado con los demás, éste posee el coeficiente de determinación (r^2) más alto de todas las ecuaciones, además de presentar los valores más bajos de S_{yx} , S_e y CV entre ellas. La ecuación 1 permite explicar el 89,49 % de la variación existente en la base de datos utilizada. Ortiz (2011) señala que un buen modelo de regresión tiene un r^2 cercano a 1, lo que coincide con el coeficiente de esta ecuación. También es importante apreciar el error estándar de la regresión que mostró un valor bajo, lo que indica que es poca la diferencia entre los datos reales y estimados. Los residuos en la figura 2 (a y b) permiten corroborar la información anterior, pues éstos se distribuyen uniformemente a lo largo del eje horizontal.

Los resultados de la validación mostrados en el cuadro 6 muestran que el porcentaje de sesgo es superior al 2%, sin embargo la prueba de Wilcoxon mostró que el Z calculado (Z_c) es menor al Z tabular (Z_t) lo que permite aceptar la hipótesis nula establecida, que indica que la tabla no está sesgada. Por lo que se recomienda utilizar la función con cuidado.

La ecuación de volumen ajustada no se ha podido comparar hasta el momento con otra, puesto que en la literatura aún no se reporta este tipo de modelos para árboles producidos a nivel clonal. Esta función de volumen de árboles clonados de melina es la primera en su género en el país y probablemente en la región. El avance de la silvicultura clonal y de los programas de mejoramiento genético requiere de la adecuación de este tipo de herramientas para que los productores obtengan valores precisos del volumen comercial por árbol y de sus plantaciones. El proceso de selección de los árboles superiores, ha producido árboles de melina con una mayor cilindridad y mayor altura comercial, que ha producido un cambio sustancial en el ahusamiento de los árboles. Este modelo de volumen se deberá seguir mejorando con la incorporación de nuevas mediciones de árboles de diámetros superiores a los 30 cm y de otras regiones del país.

Conclusiones

La mejor ecuación para estimar el volumen con corteza hasta un diámetro superior de 5 cm para árboles clonales de la especie *Gmelina arborea* es la siguiente:

$$V_{cc_5} = 0,0006633 * (d)^2 + 0,0152356(d) - 0,162013$$

El modelo ajustado permite explicar el 89,49% de la variación de los datos con un error estándar de estimación bajo de 0,035. La función ajustada es sencilla, fácil de utilizar en campo, basada únicamente en el dap; que permite la toma rápida de información en campo.

Através de la prueba de Wilcoxon y el porcentaje de sesgo se establece que la función ajustada no está sesgada.

Recomendaciones

Crear y sistematizar la estructura de toma de información de campo, con el fin de facilitar su posterior manejo.

Incluir otras zonas diferentes del país en la recolección de información, así como aumentar el tamaño de la muestra de individuos de las categorías diamétricas que se mencionan en este documento.

Incluir si es posible, individuos con un diámetro a 1,30 m (d) mayor e igual a 30 cm, pues en este documento no se pasa de los 24 cm de diámetro.

Utilizar con cuidado el modelo seleccionado debido a que supera el 2% de sesgo recomendado.

Capítulo II. Modelo de perfil de fuste para plantaciones clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.) en Costa Rica.

Resumen

Los efectos de la silvicultura clonal en *Gmelina arborea* durante los últimos 10 años en Costa Rica, se han visto reflejada en un fuste más cilíndrico, una mayor altura comercial y altura total para una misma clase diamétrica, por tanto, una menor conicidad. Esto precisa del ajuste de una nueva ecuación de perfil de fuste para la especie por su importancia en el mercado maderero interno del país.

Para la realización del estudio se contó con 223 árboles tumbados en el suelo y medidos a diversas alturas, con edades desde los 3 a los 6 años y diámetros a la altura del pecho desde 10,5 cm hasta 35,70 cm.

El modelo ajustado y seleccionado presentó un alto coeficiente de determinación que corresponde a un $r^2 = 0,9527$ y un bajo valor en el error estándar de la medición y una distribución generalmente adecuada de los residuos analizados.

La validación del modelo se realizó con una muestra de 23 árboles diferentes a los utilizados en el ajuste del modelo. El porcentaje de sesgo mostró un valor de -17,25% asimismo el modelo al someterse a la prueba de Wilcoxon, ésta indicó que la tabla está sesgada. Debido a esto se ajustó una nueva ecuación a partir de la inclusión a la base de datos original de los 23 árboles utilizados para la validación mencionada anteriormente. La validación de la última ecuación ha quedado pendiente.

Palabras clave: melina (*Gmelina arborea*), fuste, mediciones, clones.

Introducción

La situación actual con el encarecimiento de la madera (Obando, 1992) y el consumo nacional basado principalmente de madera proveniente de plantaciones forestales o importaciones (Barrantes & Ugalde, 2013), convierte en necesario maximizar y determinar el rendimiento que cada árbol o rodal puede brindar en diferentes productos según su uso y así poder valorizar la madera (Tamarit, De los Santos Posadas, Aldrete, Valdez, Ramírez & Guerra, 2013). Melina en particular, ha sido junto con teca (*Tectona grandis*), las especies más plantadas y utilizadas en la industria de la madera local en los últimos 10 años (Murillo y Guevara, 2013; Murillo et al, 2015).

Para lograr la cuantificación del volumen de un árbol, es necesario conocer las características de forma que presenta el fuste, conocido también como perfil del fuste (Prodan, Peters, Cox & Real, 1997). Que para una misma especie variará en función de la densidad de plantación, mejor expresado por el ambiente de competencia dentro de la plantación, de la edad, del genotipo, en resumen, de cualquier factor que afecte la relación diámetro/altura y el tamaño de copa. Todo productor y/o empresa forestal requiere por tanto mayor precisión de estimación del volumen comercial existente para la toma de decisiones a nivel silvicultural o económico (Wabo, Marquina & Bratovich, 2002). Sin esta información no podrá estimar el rendimiento esperado, que se puede expresar en términos de la cantidad y tipo(s) de producto(s) que se puede obtener de un árbol o rodal (volumen de madera para aserrío hasta un diámetro determinado, madera para tarima, postes, leña o biomasa, , entre otros) (Ortiz, 2011).

Existe diversos métodos de estimación del rendimiento de un árbol, usualmente, expresado en tablas de volumen total, volumen comercial por rodal o por árbol individual; éstos son utilizados tradicionalmente para estimar el volumen de productos que poseen dimensiones predefinidas (Wabo *et al*, 2002).

El modelo de perfil de fuste o ahusamiento es una herramienta flexible que facilita la determinación del volumen de un árbol y sus trozas. Este representa la variación diamétrica a lo largo del fuste como función del diámetro normal o dap y la altura total

(Prodan, *et al*, 1997). Los modelos fustales de este tipo permiten estimar el diámetro del árbol a una altura deseada, la altura del árbol a un diámetro establecido y el volumen entre dos alturas determinadas o hasta un diámetro mínimo de utilización (Ortiz, 2011).

Muy pocos modelos fustales han sido reportados para la especie *Gmelina arborea* a nivel internacional. En Costa Rica Lega (1988) ajustó los primeros 2 modelos de ahusamiento con esta especie. El primero es un modelo de ahusamiento con corteza con base en 197 árboles no bifurcados. La ecuación es:

$$\frac{di}{dap} = 0,8803 - 0,0374 * ALTF + 0,0006474 * Ht$$

El segundo es una ecuación sin corteza basada en 302 árboles. La ecuación:

$$\frac{di}{dap} = 0,9357 - 0,038 * ALTF + 0,0005725 * Ht$$

Poco tiempo después, Cancino (1993) probó en Costa Rica 8 modelos, 3 de ellos para árboles completos. Este autor ajustó el modelo cuadrático de Kozak (1969), el modelo polinómico de Lowell (1986) y el modelo trigonométrico de Thomas y Parresol (1991). Así también evaluó modelos segmentados como el cuadrático- cuadrático de Marx y Burkhardt (1976), cúbico- cuadrático y cúbico-cúbico de Thomas y Parresol (1991), cuadrático-lineal- cuadrático, cuadrático- cuadrático- cuadrático Marx y Burkhardt (1976) con 116 árboles distribuidos en diferentes localidades del país.

En Colombia Melo (2015) reporta el ajuste de la función de ahusamiento exponencial de Kozak ($Y = Z^c$) para árboles de esta especie en sistemas agroforestales y plantaciones forestales. Las mediciones se realizaron durante un período de 3 años y medio bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con 48 árboles en total a lo largo del estudio.

Sin embargo, la silvicultura de la melina ha cambiado en los últimos 10 años dando paso a la utilización de material mejorado y árboles plus clonados para el establecimiento de plantaciones (Murillo y Guevara, 2013). Los efectos de su

utilización se ha visto reflejado en un fuste más cilíndrico, una mayor altura comercial y altura total para una misma clase diamétrica, por tanto, una menor conicidad (Salazar, Lobo & Chavarría, 2009). Esto obliga el ajuste de una nueva ecuación de perfil de fuste para la especie por su importancia en el mercado interno de la madera del país.

El objetivo del trabajo fue desarrollar modelos de perfil de fuste comercial para plantaciones clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica.

Materiales y métodos

1. Datos dasométricos

La información se obtuvo a partir de mediciones de árboles tumbados provenientes de plantaciones clonales de la especie *G. arborea* de diferentes zonas del país: Salamá (Osa) y Siquirres. Para el estudio se contó con un total de 223 árboles volteados con edades desde los 3 a los 6 años, con diámetros a la altura del pecho desde 10,5 cm hasta 35,70 cm.

La cubicación de los árboles volteados se realizó mediante la medición de diámetros con corteza (cm) a diferentes alturas de fuste: en la base del árbol (0,10 m y 0,5 m), 1 m de altura, altura de pecho (1,30 m), 1,80 m, 2,5 m, 5 m, 10 m, altura en el fuste donde el diámetro alcanza los 5 cm y altura total del árbol en metros. Es importante mencionar que las bases de datos poseían una estructura de recolección de información diferente entre ellas, por lo que en el (cuadro 7) se indica de manera conjunta todas las a las que se realizaron las mediciones.

Cuadro 7. Mediciones realizadas en los árboles cubicados en el suelo para el ajuste de modelos de conicidad de *Gmelina arborea* clonal en Costa Rica.

Rodal	N° de árbol	Diámetro a la base del árbol	d _{1m}	dap	d _{1,80m}	d _{2,5 m}	d _{5m}	d _{10m}	h alcanza 5 cm de diámetro	ht
-------	-------------	------------------------------	-----------------	-----	--------------------	--------------------	-----------------	------------------	-------------------------------------	----

Las bases de datos se inspeccionaron minuciosamente para hallar y eliminar información inconsistente que pudiera afectar el ajuste del modelo. Por ejemplo, árboles con mediciones ausentes o datos con errores de digitación.

Se elaboró una base de datos en la que cada árbol tuviese registros de los diámetros medidos (d_i) a las alturas establecidas (h_i), acompañado siempre con la medida de altura total (ht) y diámetro a 1,30m de altura (dap).

2. Ajuste del modelo de conicidad

Se agregaron dos columnas más a la base de datos: 1) el cociente entre di y dap (di/dap), 2) el cociente entre hi y ht (hi/ht). Consecuentemente se construyó un gráfico di/dap contra hi/ht , con el fin de detectar datos sesgados y verificar que la variable dependiente (di/dap), tuviese una buena relación con respecto a la variable independiente (hi/ht).

La elaboración de la función de conicidad para melina se realizó a través del análisis de regresión de dos modelos ya conocidos que son Coffré (ecuación 9) y Kozak (ecuación 10)

- **Modelo de Coffré:**

$$y = a * x + b * x^2 + c * x^3 \quad (9)$$

donde:

$$y = \frac{di}{dap} \quad x = \frac{ht-hi}{ht-1,3}$$

La ecuación general es la siguiente:

$$\frac{di}{dap} = a \left(\frac{ht - hi}{ht - 1,3} \right) + b \left(\frac{ht - hi}{ht - 1,3} \right)^2 + c \left(\frac{ht - hi}{ht - 1,3} \right)^3$$

En este modelo se pudo observar que:

Cuando hi es igual a 1,30 m, $di/dap = a+b+c$ ó $a+b+c$ debió ser igual a 1

Cuando hi es ht, $di/dap = 0$

El modelo se restringe pasar por el origen, por lo que el intercepto es igual a 0

- **Modelo de Kozak:**

$$y = a + b * x + c * x^2 \quad (10)$$

$$y = \frac{di^2}{dap^2} \quad x = \frac{hi}{ht}$$

Al modelo se le introdujo la restricción $a+b+c=0$; esto aseguró que cuando el **hi= ht** el **di = 0**, por lo que la ecuación se transformó:

$$\frac{di^2}{dap^2} = b \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + c \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right) \quad (11)$$

Debido a que el modelo se le forzó a pasar por el origen, su intercepto es igual a cero. La selección del mejor modelo se realizó a través de los siguientes criterios estadísticos:

Coefficiente de determinación (r^2): Indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, que es explicada por el modelo utilizado (Ortiz, 2011). El coeficiente se calculó de la siguiente manera:

$$r^2 = 1 - \left(\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2} \right) \quad (12)$$

Donde:

y_{obs} = es cada uno de los valores observados de la variable dependiente

y_{est} = es cada uno de los valores de la variable dependiente estimados a través del modelo de regresión desarrollado

y_{med} = es la media aritmética de la variable dependiente

Error estándar de la medición (Sy_x)

Este es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión (Ortiz, 2011). Se determinó de la siguiente manera:

$$Sy_x = \sqrt{\left[\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n-p} \right]} \quad (13)$$

n: número de observaciones incluidas en el análisis

p: número de coeficientes en el modelo de regresión

Análisis de residuos: Se definió como un residuo (*resd*) a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado o predicho por el modelo de regresión (Y_{est}) (Ortiz, 2011).

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est} \quad (14)$$

3. Validación del modelo

Se utilizó una colección de 23 árboles diferentes al conjunto de datos destinados a la creación del modelo. Los árboles se dispusieron en una estructura de base de datos igual a la especificada en el cuadro 7. Estos individuos alcanzaron diámetros a 1,30m que oscilaron entre 25,60 y 34,80 cm, mientras que sus alturas variaron de 21,73 a 32,5 m. Para realizar el proceso de validación de la función seleccionada se empleó los siguientes criterios:

Sesgo: Éste parámetro se midió de la siguiente manera:

$$S\% = \frac{\sum(Y_{obs}-Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100 \quad (15)$$

Prueba de Wilcoxon: Se ordenaron los residuos de menor a mayor en valor absoluto. A cada dato se le asignó un número consecutivo según su posición y se le mantuvo su signo (+/-) residual. Cuando varios residuos presentaron igual valor, se les asignó a todos el valor promedio de su posición en el ranking (Ortiz, 2011). Una vez codificados todos los datos con su signo, se procedió a obtener la suma de todos los valores negativos y todos los valores positivos del ranking. Se tomó el valor más bajo en valor absoluto de entre ambos ($\Sigma+$ ó $\Sigma-$) y se utilizó como el valor T para el cálculo del estadístico de prueba:

$$Z_c = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)}} \quad (16)$$

Donde:

T: Es el menor valor de la suma de los ranking (+/-) en valor absoluto

n: Es el número de observaciones utilizadas en la validación

Las hipótesis revisadas fueron:

- Hipótesis nula (Ho): La suma de los valores positivos del ranking es igual a la suma de los valores negativos del mismo ranking.
- Hipótesis alternativa: la suma de los valores del ranking positivos es diferente a la suma de los valores del ranking negativos.

Una vez obtenido el Z calculado (Zc), se comparó con el valor de Z tabular (Zt) de la tabla de distribución normal con una significancia $\alpha = 0,05$, que correspondió a 1,96.

Resultados

El cuadro 8 muestra la distribución diamétrica de los 223 individuos utilizados para el ajuste de la ecuación de conicidad para *G. arborea*. Los árboles fueron organizados en clases diamétricas con intervalos de 5 cm, con valores desde los 10,5 cm hasta los 35,7 cm. La clase diamétrica con mayor número de individuos fue la de 15,5 a 20,5 cm, seguida por las clases de 20,5 a 25,5 cm y 10,5 a 15,5 cm. La altura total de los árboles osciló desde los 8 a los 28,7 m.

Cuadro 8. Distribución por clase diamétrica (dap) de los árboles utilizados para el ajuste del modelo de conicidad para clones de *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Sitio	dap (cm)						Total general
	10,5-15,5	15,5-20,5	20,5-25,5	25,5-30,5	30,5-35,5	35,5-40,5	
1. Siquirres, Caribe, abril 2015	0	8	7	9	0	0	24
2. Siquirres, Caribe, julio 2013	46	76	11	0	0	0	133
3. Osa, Pacífico sur, noviembre 2005	0	0	8	3	1	0	12
4. Osa, Pacífico sur, noviembre 2005	0	1	34	16	2	1	54
Total general	46	85	60	39	14	1	223

La relación entre la variable dependiente (di/dap) y la independiente (hi/ht) se muestra en la figura 3.

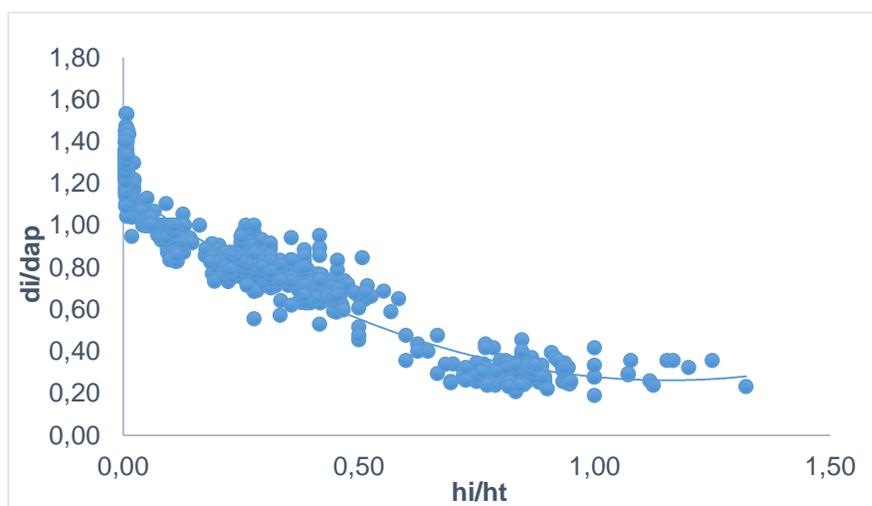


Figura 3. Relación entre di/dap con respecto a hi/ht en *Gmelina arborea* clonal en Costa Rica.

El ajuste de los modelos de Kozak y Coffré mediante análisis de regresión se muestran en el cuadro 9, junto a sus respectivos estadísticos: coeficiente de regresión (r^2) y error estándar (Syx). El modelo de Coffré demostró el r^2 más alto de los dos modelos generados y el menor error estándar.

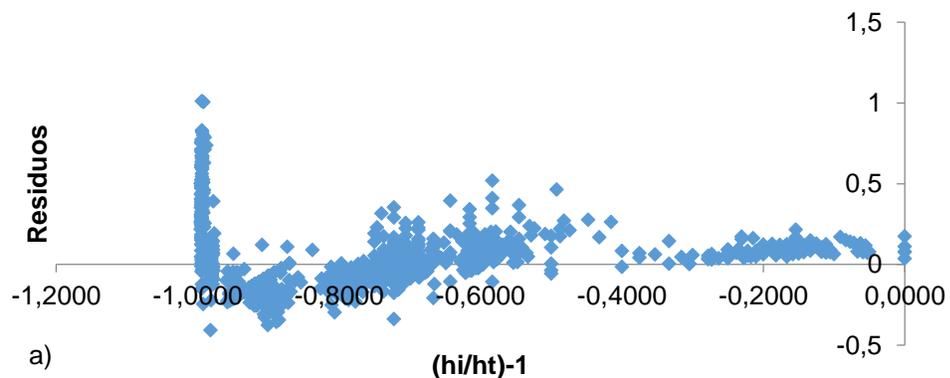
Cuadro 9. Parámetros estadísticos de los modelos de conicidad ajustados en clones de melina en Costa Rica.

Modelo	R^2	Syx
1. Modelo de Coffré:		
$y = 0,9810 x + 0,0343x^2 + 0,0552x^3$	0,9877	0,1021
2. Modelo de Kozak:		
$y = -3,0248 (x - 1) + 1,6663 (x^2 - 1)$	0,9527	0,2111

Para el modelo de Coffré: $y = \frac{di}{dap}$, $x = \frac{ht-hi}{ht-1,3}$.

Para el modelo de Kozak: $y = \frac{di^2}{dap^2}$, $x = \frac{hi}{ht}$

El análisis de los residuos del modelo seleccionado se observa en la figura 4. La figura 4a muestra la distribución de los residuos con respecto a la variable independiente $(hi/ht)-1$. De la misma forma la figura 4b presenta los residuos con respecto a la variable $(hi^2/ht^2)-1$.



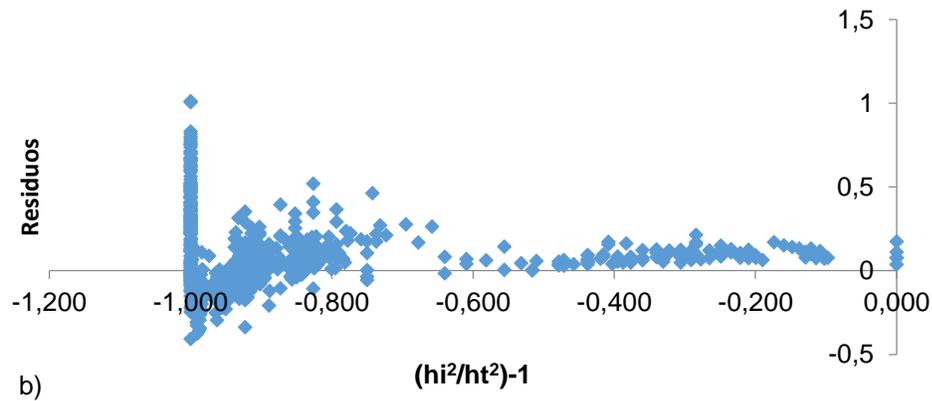


Figura 4. a) Distribución de los residuos con respecto a la variable independiente $(h_i/h_t)-1$ de la función escogida. b) Distribución de los residuos con respecto al $(h_i^2/h_t^2)-1$ de la función escogida, para el modelo de ahusamiento de melina clonal en Costa Rica.

Para la validación del modelo se muestran los resultados obtenidos de los estadísticos (cuadro 10). El porcentaje de sesgo ($S\%$) para la función elegida fue del $-17,25\%$. El Z calculado (Z_c) mostró un valor de $8,34$ para una significancia del $0,05\%$. Al ser comparado contra el Z tabular (Z_t) que corresponde a $1,96$, se determinó que éste (Z calculado) es mayor.

Cuadro 10. Resultados de los estadísticos de prueba (porcentaje de sesgo y prueba de Wilcoxon) para la validación del modelo de ahusamiento de Kozak elegido para melina clonal en Costa Rica.

Estadístico	Resultado
$S\% = \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100$	-17,25%
$Z_c = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)^{\frac{1}{2}}}$	8,34

En el proceso de validación se observó que el Zc fue mayor que el Zt, por tanto se añadió la información utilizada para la validación a la base de datos original, para generar una nueva ecuación a partir del modelo de Kozak (cuadro 11). No obstante, la validación de dicha ecuación quedó pendiente.

Cuadro 11. Función de conicidad ajustada a partir de la inclusión de la información adicionada a la base de datos de *Gmelina arborea* clonal en Costa Rica.

Modelo	R ²	Syx
1. Modelo de Kozak: $\frac{di^2}{dap^2} = -2,876 \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + 1,5579 \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right)$	0,9512	0,2059

Discusión

La ubicación geográfica de los individuos muestreados es favorable para su desarrollo, pues se encontraron en zonas de vida con alta precipitación media anual y rango de temperatura óptimo, como son el bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical, según menciona Chavarría, Navarro, Valverde, Ramírez, Méndez & Monge (1997).

Los árboles utilizados en el ajuste del modelo poseen una edad entre 3 y 6 años, localizados en la región caribe del país (70%) y Pacífico sur. Se puede observar en el cuadro 8 que hay una buena representatividad de árboles en las primeras cuatro categorías diamétricas (desde 10 hasta 30 cm), todas con más de 39 individuos. Las restantes dos categorías diamétricas superiores (35 y 40 cm) registraron pocos individuos, por lo que será conveniente a futuro, continuar incorporando árboles al modelo con más de 30 cm de dap. Sin embargo, a esta base de datos inicial, se agregó 23 nuevas mediciones de árboles, todos con diámetros (dap) superiores a los 25 y 30 cm, de una plantación independiente localizada en Guácimo (región caribe).

El sitio Siquirres fue el que más árboles aportó al modelo. Sin embargo debe mencionarse que este sitio es de productividad relativamente marginal, localizado en zona de pie de monte, suelos con pH de 5,5 y más importante aún, los datos provienen de un ensayo genético que alberga una colección amplia y representativa de la melina clonal del país (Salas, 2012). Debe también agregarse, que esta plantación ha tenido un manejo oportuno con la realización de dos raleos (año 3 y año 4), que ha permitido una relación altura/diámetro de los árboles adecuada y bajo condiciones representativas de densidad de una plantación clonal de melina.

No obstante, los árboles provenientes de los demás rodales aportaron información importante para realizar el ajuste de las ecuaciones, por ejemplo el rodal de Osa, Pacífico Sur añadió información en las categorías 20,5 a 25,5, 25,5 a 30,5 y algunos individuos de categorías mayores a los 30,5 cm de dap. Sin embargo, la poca cantidad de observaciones con diámetros superiores a los 30 cm es una limitante del modelo, que se espera sea corregida a futuro.

La figura 3 muestra la relación que existe entre la variable dependiente (d_i/dap) y la variable independiente (h_i/ht), que puede verse como una expresión de alturas relativa, que permite generar una unidad de altura comparable entre árboles de distintas dimensiones (Prodan *et al*, 1997). En la figura 3 se observa una buena forma en la distribución de los datos, que permite que la variación de un diámetro d_i pueda ser relacionada con respecto a la altura h_i , por ejemplo. Se podrá entonces inferir que cuando $d_i/dap = 1$, $h_i = 1,30$.

Los criterios estadísticos usados para seleccionar el mejor modelo son los usuales (valor de r^2 y error estándar) mostrados en el cuadro 9. Otros criterios utilizados fueron la facilidad de medición de las variables en campo y principalmente, el criterio de facilidad de aplicación para el usuario. En el mismo cuadro se comparó los coeficientes de determinación entre ambos modelos, que a pesar de que los dos registraron un coeficiente alto, el modelo de Coffré posee un r^2 más alto que Kozak. Esto puede explicarse porque su ecuación tiene un grado mayor que la función de Kozak, lo que pudo aumentar la capacidad predictiva del modelo. El error estándar nuevamente reflejó que el modelo de Coffré resultó ser el que tiene el menor valor con 0,10. Sin embargo, estas diferencias en ajuste y calidad de estimación son muy pequeñas entre ambos modelos. Por tanto, la mejor decisión del modelo a utilizar en este caso, puede ser basada en su facilidad y operatividad de uso y no tanto por sus bondades de ajuste.

Los modelos de ahusamiento permiten estimar el diámetro del árbol a cualquier altura del fuste deseada, la altura a la que se puede encontrar un determinado diámetro mínimo comercial y, el volumen del árbol entre dos segmentos de altura cualesquiera (h_1 y h_2) (Ortiz, 2011). Esto tiene gran utilidad por ejemplo, para la simulación del volumen comercial a obtener en un árbol a distintos diámetros mínimos, para distintos productos deseados. En el país se ha venido estableciendo un mercado de madera para melina con diámetros mayores a 30 cm, denominado madera gruesa y del más alto valor; diámetros entre 20 y 30 cm para productos intermedios y valor medio; diámetros entre 10 y 25 cm para tarima o madera de valor medio bajo; y finalmente, diámetros entre 5 y 15 cm para biomasa o madera del más bajo valor de mercado.

El otro elemento es la facilidad para poder utilizar las ecuaciones, de las cuales se pueda derivar funciones para estimar un diámetro a cualquier altura deseada o también, una altura de fuste donde se ocurra un diámetro mínimo comercial deseado. Con este objetivo se obtuvo de las ecuaciones originales de Coffré y Kozak las funciones derivadas (1) y (2) respectivamente. Por su mayor facilidad se eligió el modelo de Kozak, pues al despejar la ecuación en términos de la variable deseada resulta en funciones cuadráticas de simple uso. Por el contrario, el modelo de Coffré, al ser una ecuación de tercer grado, la derivación de funciones aplicables en términos de diámetro o altura deseada, tiene como resultado ecuaciones extensas y de difícil aplicación.

Cancino (1993), citó y realizó comparaciones entre 8 tipos diferentes de modelos de ahusamiento para diferentes localidades en Costa Rica, (en orden consecutivo) : 1) modelo cuadrático de Kozak (1969), 2) el modelo polinómico de Lowell (1986), 3) el modelo trigonométrico de Thomas y Parresol (1991), 4) el cuadrático-cuadrático de Marx y Burkhardt (1976), 5) cúbico- cuadrático, 6) cúbico-cúbico de Thomas y Parresol (1991) 7) cuadrático-lineal- cuadrático y 8) cuadrático- cuadrático- cuadrático Marx y Burkhardt (1976). Se obtiene que en general la capacidad predictiva del diámetro por los modelos analizados es muy buena, ya que el menor coeficiente de determinación (r^2) es mayor a 0,83.

De esta comparación resultó que para la especie *Gmelina arborea* y las demás evaluadas, la tercera ecuación (modelo trigonométrico) es la mejor en relación al valor estimado y el error estándar de los coeficientes de regresión (Cancino, 1993). La función 1 de Kozak presentó el menor r^2 con un valor de 0,8343 y con los valores más altos de Cuadrado Medio de Error.

Las figura 4a y 4b mostraron la distribución de la magnitud de los residuos con respecto a las variables independientes del modelo de Kozak, que para ambos casos se aprecian con un mismo patrón, con una ligera dispersión inicial de valor positivo, que luego se distribuye en forma homogénea a lo largo del eje horizontal. En su mayoría, los residuos se desvían en menos de un valor de 0,5 con respecto al eje vertical.

Los estadísticos resultantes del proceso de validación (cuadro 10) mostraron que el porcentaje de sesgo fue de -17,25%, cuyo valor negativo surgió de la diferencia entre los $Y_{obs} - Y_{est}$, donde el valor de los Y_{est} fue mayor. Esto implica que el modelo tiende a sobrestimar los valores de los estimados en relación con el valor cierto.

El análisis con la prueba de Wilcoxon determinó que el Z calculado (Z_c) fue mucho mayor al Z tabular (Z_t) establecido para una significancia del 95%. Esta diferencia pudo ser consecuencia de que al realizar el ranking (para obtener el Z_c), la suma del ranking negativo en valor absoluto fue mayor que la suma del ranking de los residuos positivos en valor absoluto. Por esta razón se rechazar la hipótesis nula establecida, dando como resultado que la tabla se encuentra sesgada.

Al evidenciarse que dicha ecuación está sesgada, Ortiz (2011) sugiere corregir el sesgo o construir una nueva tabla. Se optó por construir una nueva tabla (cuadro 11), para esto se agregaron los datos destinados para validar la ecuación escogida, a la base de datos original utilizada para ajustar los modelos. El nuevo set de datos fue sometido nuevamente al ajuste por análisis de regresión bajo el modelo de Kozak; los coeficientes y la nueva función generada se muestran en el cuadro 11. Puede observarse que el valor del coeficiente de determinación no mostró ninguna diferencia, mientras que el valor de la desviación estándar disminuyó ligeramente.

Es importante someter a validación la ecuación generada en el cuadro 11, ya que de no estar sesgada podría ser el primer modelo de ahusamiento o perfil de fuste realizado para individuos clonales de *Gmelina arborea* en el país y en la región. El nuevo modelo se deberá de optimizar con la adición de nuevas mediciones de otras regiones del país, preferiblemente con árboles con diámetros superiores a los 30 cm.

Conclusiones

El modelo de ahusamiento ajustado por regresión fue basado en la función de Kozak cuya expresión fue la siguiente $y = -3,0248 (x - 1) + 1,6663 (x^2 - 1)$. Su bondad de ajuste fue de un R^2 de 0,9527 y una desviación estándar de 0,211. Sin embargo, los análisis de comprobación indican que el modelo tiene un sesgo de un -17% (sobrestimación de los valores).

El segundo modelo de Kozak ajustado: $y = -2,876 (x - 1) + 1,5579 (x^2 - 1)$ posee un $r^2 = 0,9512$.

Se elige el modelo de ahusamiento de Kozak por su fácil utilización a nivel operativo, del que se pueden deducir funciones de altura a la que se puede encontrar un determinado diámetro, así como el diámetro a una altura deseada, con cuyos valores se podrá estimar el volumen del árbol entre dos alturas cualesquiera (h_1 y h_2).

Recomendaciones

Crear y sistematizar la estructura de toma de información de campo, con el fin de facilitar su posterior manejo.

Incluir otras zonas diferentes del país en la recolección de información, así como aumentar el tamaño de la muestra de individuos de las categorías diamétricas mayores a los 30 cm.

Capítulo III. Sistema de curvas diámetro-edad para clasificación de plantaciones clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.) en Costa Rica

Resumen

La silvicultura de plantaciones en Costa Rica a lo largo de los años ha evolucionado, especialmente durante los últimos 15 años con la inclusión de material forestal genéticamente mejorado principalmente en teca y melina, que han dado resultados exitosos. Es importante la actualización de modelos de crecimiento y rendimiento para *Gmelina arborea* ya que los modelos que han sido desarrollados previamente no han logrado ajustarse a la nueva realidad silvicultural y que permitan conocer el crecimiento y estado actual de las plantaciones clonales de melina.

A partir de 917 parcelas provenientes de 3 grandes zonas del país (Pacífico Norte, Pacífico Sur y Región Atlántica) se ajustó un modelo que permite clasificar el dap con respecto a la edad: **Dap= 3,5473 edad + 2,9916** que presentó un $r^2 = 0,642$. La curva de este modelo permitió generar un dap estimado que representó el 50% de los datos dentro de la base de datos. Esto sirvió para clasificar el total de parcelas en dos sub bases de datos: individuos inferiores al 50% e individuos superiores al 50%. De cada una de estas sub-bases se crearon nuevos modelos por análisis de regresión, que representaron el percentil 25 y el percentil 75, las ecuaciones fueron las siguientes:

Percentil 25: **Dap= -0,0249 (edad)²+3,6486 (edad)+0,2337, $r^2 = 0,886$**

Percentil 75: **Dap= 3,7202 (edad) + 5,1922, $r^2=0,859$**

Estos modelos constituyen un sistema de clasificación dap-edad para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en Costa Rica

Palabras clave: melina (*Gmelina arborea*), plantaciones, crecimiento, clones, modelos

Introducción

La especie *Gmelina arborea* es de rápido crecimiento, con una versátil adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales y edáficas (Chavarría, *et al*, 1997; Moya, 2004). Presenta una alta importancia económica dada la cantidad y calidad de productos que se pueden obtener de ella (Pakos, 2012).

En Costa Rica, melina es la segunda especie con mayor reforestación en los últimos 15 años (Murillo y Guevara, 2013; Barrantes y Ugalde, 2013) con un total estimado de 18 835 ha (INEC, 2014). Su turno corto de rotación (actualmente de 5 a 8 años) en comparación con otras especies, aunado al avance de los programas de mejoramiento genético que iniciaron desde los años 70, pero que tomaron mayor fuerza y se incrementaron en los años 90 (Barquero, 1987; Mesén, 1990; Murillo, 1992; Cornelius y Hernández, 1995; Zeazer, 1996), ha dado como resultado que actualmente la mayor parte de la reforestación nacional sea realizada con material clonado (Murillo & Guevara, 2013). Esto ha provocado un aumento en su productividad, así como cambios significativos en la forma del fuste, conicidad de los árboles y una mayor altura comercial (Salazar, Lobo & Chavarría, 2009).

El país ha ido poco a poco entrando en la silvicultura clonal (Badilla *et al*, 2003) pero será necesario adecuar los modelos de crecimiento, de rendimiento y de evaluación de la calidad de las plantaciones. Con el uso de los clones, las plantaciones hoy día contienen una alta proporción de árboles de muy alta y de alta calidad para aserrío, dado que su fuste comercial mejoró significativamente (Salas, 2012). En los índices de calidad propuestos por Murillo (2000), se estimaba como excelente una plantación con una cantidad de 400 individuos por ha de calidad 1 y 2 (N1 + N2), así como si alcanzara un IMA de volumen comercial de 15 m³/ha/año, según la metodología de calidad desarrollada en el país (Murillo y Badilla, 2004).

Stöffler (2000) citado por Garro (2001) ajustó un modelo de crecimiento para melina en Costa Rica, basado en las relaciones entre el diámetro de copa, el diámetro a la altura del pecho (dap) y la edad. Este método permite calcular la necesidad de espacio para el desarrollo de la copa, según la meta en diámetro. La ecuación ajustada fue **$D_c = 0,44 + 0,205 \cdot dap - 0,094 \cdot edad$** (D_c = diámetro de copa), sin embargo no se reportó mayor información sobre la precisión del modelo. Hughell (1991), reportó para América central modelos de crecimiento para el dap: **$D = 1,7397 \cdot IS (1 - \exp(-0,089 \cdot Edad))^{0,8189}$** ($D =$ dap (cm)), con un $r^2 = 0,92$; y altura : **$h = 0,9929 \cdot IS (1 - \exp(-0,2332 \cdot Edad))^{1,2811}$** con $r^2 = 0,95$. Obtenidos a partir de un total de 36 parcelas de crecimiento de los proyectos LEÑA y MADELEÑA.

Jiménez (1991) procedió a ajustar ecuaciones de crecimiento de volumen, diámetro (entre otros) aplicables al Pacífico Seco de Costa Rica, a partir de parcelas permanentes ubicadas en Abangares y Nicoya. La función para volumen y diámetro respectivamente son:

$$\ln(V) = 2,3188 - 8,7377 \cdot (1/Edad) + 0,021782 \cdot IS + 0,34707 \cdot (1/Edad)$$

$$\ln(Dg) = 0,82061 \cdot (1/Edad) + 0,03334 \cdot IS - 0,0483 \cdot (IS/Edad)$$

En la zona norte, Zech (1994) desarrolló un modelo de crecimiento para melina basado en factores de sitio, donde determinó que los factores que afectaron en forma negativa fueron, la densidad o compactación de la capa superior del suelo (0 a 5cm), el número de años de uso anterior del suelo en ganadería, pendiente del terreno, distancia a la cima de la loma y, en forma positiva, el grosor del horizonte Ah. Sin embargo, el trabajo fue basado en pocas parcelas y no reportó elementos sobre la calidad del ajuste. Vázquez y Ugalde (1995) desarrollaron algunos modelos sobre rendimiento y calidad de sitio para melina en Guanacaste, Costa Rica, donde reportaron un IMA del diámetro que varió desde 2,5 cm/año hasta 4cm/año, y una productividad desde 10 m³/ha/año hasta 36 m³/ha/año, según la calidad de sitio. Sin embargo, utilizaron solamente 35 parcelas permanentes y no reportaron ningún modelo estadístico ajustado con la base de datos reportada.

En el Pacífico, específicamente en la provincia de Guanacaste (Vallejos, 1996) permite relacionar el índice de sitio con variables edafo-climáticas y foliares para tres especies, incluida la melina. El desarrollo de la curva de índice de sitio, se realizó basado en el modelo de Schumacher; partiendo de este modelo se ajustó un modelo polimórfico y uno anamórfico de los cuales se seleccionó el mejor. El modelo de ajustado para la curva guía: $LN (IS) = Ln (Hdom) + 1,5830(1/ Edad^{0,6533} - 1/ Edad base^{0,6533})$ con un $r^2 = 0,292$ para 62 observaciones. Seguidamente a partir de la información del IS se diferencié 5 clases de sitio promedio: **Marginal** con sitios que poseían un índice inferior al percentil 12,5, **Bajo** con índice entre 12,5 y 37,5, **Medio** índices entre percentiles 37,5 a 62,5, **Alta** con índices entre los percentiles 62,5 y 87,5 y **Excelente** sitios con índices superiores al percentil 90.

Murillo y Badilla (2015) ajustaron un modelo de crecimiento dap/edad para melina, utilizando datos de más de 600 parcelas de plantaciones con clones y semilla de todo Costa Rica. El modelo logró explicar poco más de un de $r^2 = 0,77$ y tuvo una buena representatividad de parcelas de todo el territorio nacional.

Los trabajos de investigación desarrollados por el CATIE (1997) reportan valores de IMA para el dap de melina en Centroamérica, distribuidos en cuatro clases de crecimiento: **Excelente** ($\geq 5,0$ cm/ año), **Alta** ($\geq 3,5$ a $\leq 5,0$ cm/ año), **Media** ($\geq 2,5$ a $\leq 3,5$ cm/ año), **Baja** ($< 2,5$ cm/año). Asimismo reporta valores de IMA para altura: **Excelente** ($\geq 4,0$ m/ año), **Alta** ($\geq 3,0$ a $\leq 4,0$ m/ año), **Media** ($= 2,5$ a $\leq 3,0$ m/ año), **Baja** ($< 2,0$ m/año)

Rojas *et al* (2004), en el segundo manual silvicultural para la especie, mostraron una caracterización del crecimiento de melina en Hojancha, Guanacaste, en dos condiciones de sitio: (A) buena condición y (B) condición de sitio media:

Edad (años)	Sitio	IMA DAP (cm/ año)	IMA h (m/ año)
4	A	4,76	4,20
4	B	3,21	2,94
8	A	4,19	3,66
8	B	3,11	2,51
10	B	2,65	2,16
12	B	2,33	1,73

Murillo y Badilla, (2015), ajustaron un modelo general de crecimiento (plantaciones clonales y semilla) para la estimación de volumen total y biomasa en Costa Rica, basado en la relación DAP/edad, donde obtuvieron un ajuste con un R^2 de 0,77. Asimismo ajustaron un modelo de área basal media, utilizando un total de 497 parcelas de diferentes regiones del país, para obtener una capacidad predictiva del 63%.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de clasificación del crecimiento de plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en el país, de sencilla y de fácil aplicación, que permitiera relacionar a cualquier edad el crecimiento de plantaciones clonales con la especie en distintas regiones del país. Con esto se pretende que el productor tenga una herramienta que le asista en la toma de decisiones sobre su cultivo de melina.

Materiales y métodos

Datos dasométricos

Los datos para elaborar el estudio se obtuvieron a partir de mediciones de parcelas permanentes y del muestreo de árboles individuales, para diferentes plantaciones clonales de *Gmelina arborea*, ubicadas en tres zonas del país: Pacífico Norte, Pacífico Sur y Zona Atlántica. La edad de las plantaciones osciló entre los 0,75 y 8 años. A cada individuo se le midió el diámetro con corteza a 1,30 m del suelo (dap) y se registró su edad al momento de medición con base en registros de las plantaciones.

El área del Pacífico Norte donde fue tomada la información, corresponde a zona de vida bosque seco tropical transición a bosque húmedo, con temperatura media anual de 23°C y precipitación media anual de 2385 mm. La zona geográfica de las plantaciones ubicadas en el Pacífico Sur, pertenecen al bosque húmedo tropical, su temperatura media anual es de 18°C y con una precipitación media anual de 3050 mm. La zona Atlántica de manera general tiene una zona de vida bosque húmedo tropical, temperatura media anual de 30°C y precipitación media anual de 3844 mm (Solano, Villalobos, s.f.). Los requerimientos climáticos mencionados por Murillo y Valerio (1991) señalan que en América Central se ha plantado melina en sitios con una temperatura media anual entre 24- 29°C, precipitaciones entre 700 hasta más de 3100 mm anuales y en zonas de vida que abarcan bosque seco, húmedo y muy húmedo tropical (Rojas *et al* ,2004).

Los datos de crecimiento de cada rodal provenientes de muestreo por el método de árboles individuales (Murillo *et al* 2011) se agruparon, en conjuntos de 15 a 29 individuos, para conformar un concepto de parcela de muestreo. Asimismo se identificó y eliminó datos inconsistentes que pudiesen afectar el ajuste de los modelos de crecimiento. La información se unificó en una base de datos, donde se registró y organizó la información de campo según el orden jerárquico Región, lote, edad y dap promedio por cada parcela. Un total de 917 parcelas se utilizaron para ajustar las ecuaciones.

De cada parcela se obtuvo el promedio aritmético del dap, con cuyos valores se procedió a relacionarlos con la edad y poder así desarrollar curvas dap-edad.

Ajuste de las curvas para percentil 25, 50 y 75.

El ajuste de las curvas se realizó por medio del método del percentil (Ortiz, 2006), que radica en la construcción de un grupo de funciones de crecimiento anamórficas que se ajustan con base en la agrupación de los datos de dap con respecto a la edad en 3 grupos: observaciones dap-edad inferiores al 25% del total, observaciones dap-edad inferiores al 50% del total de datos y observaciones inferiores al 75% del total de datos, como se describe a continuación:

Se generó un primer gráfico dap versus edad, para observar la relación existente entre las variables e identificar valores fuera de un ámbito razonable esperado para la edad asociada. Se ajustaron los datos mediante análisis de regresión en EXCEL, que relacionaran las variables dap-edad y de ellas, se escogió la función de mejor ajuste.

Los modelos fueron escogidos a partir de los siguientes criterios:

Coefficiente de determinación (r^2): Indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, que es explicada por el modelo utilizado (Ortiz, 2011). El coeficiente se calculó de la siguiente manera:

$$r^2 = 1 - \left(\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2} \right) \quad (17)$$

Donde:

y_{obs} = es cada uno de los valores observados de la variable dependiente (volumen)

y_{est} = es cada uno de los valores de la variable dependiente estimados a través del modelo de regresión desarrollado

y_{med} = es la media aritmética de la variable dependiente

Error estándar de la medición (Syx)

Este es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión (Ortiz, 2011). Se determinó de la siguiente manera:

$$Syx = \left[\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n-p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

n: número de observaciones incluidas en el análisis

p: número de coeficientes en el modelo de regresión

Análisis de residuos: Se definió como un residuo (resd) a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado o predicho por el modelo de regresión (Y_{est}) (Ortiz, 2011).

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est} \quad (19)$$

Índice de ajuste (FI): Se utilizó para comparar la exactitud de los modelos en relación con su variable dependiente (diámetro) que requirió ser transformada, mientras los demás modelos se encontraron en unidades reales. Para los modelos sin transformar $FI = r^2$

$$FI = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{e.u.r})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2} \quad (20)$$

Donde:

y_{obs}: son cada uno de los valores observados de la variable dependiente, expresados en unidades reales, es decir sin transformar

y_{e.u.r}: son los valores de la variable dependiente, estimados a partir de modelo de regresión pero en unidades reales.

y_{med}: es la media aritmética de los valores observados de la variable dependiente, calculada a partir de valores sin transformar.

Error estándar en unidades reales (Se): Fue útil para comparar los modelos que necesitaron ser transformados contra los modelos sin transformar. Para el caso de los modelos sin transformar el **Syx = Se** (Ortiz, 2011).

$$Se = \sqrt{\left[\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{e.u.r})^2}{n-p} \right]} \quad (21)$$

Donde:

n: es el número de observaciones

p: es el número de coeficientes en el modelo

Coefficiente de variación (CV %) expresado en unidades reales: Permitió hacer comparaciones entre modelos

$$CV = \left[\frac{Se}{Y_{med}} \right] * 100 \quad (22)$$

Una vez escogida la mejor función con sus respectivos coeficientes de regresión, ésta se utilizó para generar un dap estimado con base en cada edad existente en la base de datos. Los valores de dap estimados resultantes o la curva formada por ellos, constituyeron el percentil 50 de todas las observaciones, o sea representaron el promedio de la base de datos. Con ayuda de EXCEL, se crearon dos nuevas sub base de datos. La primera con todos los árboles inferiores al percentil 50, es decir, todos aquellos valores de dap inferiores al valor esperado para cada edad. La segunda sub base de datos de manera similar, pero ahora con todos los valores de dap superiores al valor del percentil 50 para cada edad.

Con cada una de las dos nuevas sub base de datos, se ajustó una nueva función mediante análisis de regresión, que representó el percentil 25 y el percentil 75 respectivamente.

Los mejores modelos fueron elegidos mediante los mismos criterios estadísticos indicados en las ecuaciones 1 a 6.

Las 3 funciones obtenidas se graficaron en una sola figura, que representa el crecimiento esperado para el dap en plantaciones clonales de melina en Costa Rica.

Resultados

La distribución diamétrica de la base de datos de 917 parcelas utilizadas para el ajuste de las curvas de percentiles 25, 50 y 75 se muestra en el cuadro 12. La Zona Caribe fue la región que aportó mayor número de parcelas con un total de 537, seguida del Pacífico Sur con un total de 374 parcelas. No menos importante es el aporte que brindó la Zona Pacífico Norte con 6 parcelas en categorías diamétricas superiores a 27 cm.

La distribución diamétrica de las parcelas es amplia y representativa con respecto a la edad, ya que logra incluir todo el espectro desde los 0,75 a los 8 años, ámbito de edades en que hoy día se cultiva una plantación clonal de melina en el país. La clase diamétrica de 2 a 7cm está representada por 121 parcelas con edades entre 0,75 a 2,25 años, provenientes del Pacífico Sur y Zona Atlántica. La siguiente clase diamétrica de 7-12 cm es mayormente aportada por el Pacífico Sur con 185 datos cuyas edades variaron entre 1,30-4,42 años; la Región Atlántica aporta 59 parcelas con edades de 1,18-3,92 años. La clase de 12-17 cm estuvo representada por 216 parcelas provenientes del área Atlántica con edades que oscilaron entre 1,25- 5,43 años, y del Pacífico Sur, 216 parcelas con edades de 2,17-4,42 años. Se observó que los dap promedio para las clases 17-22 y 22-27 cm estuvieron únicamente ubicados en la Zona Atlántica con edades que abarcan 2-6 años y 3,76-5,59 años respectivamente. La categoría de 27-32 cm tiene 4 parcelas; 3 obtenidas del Pacífico Norte y 1 del área Atlántica, sus respectivas edades fueron 8 y 4,75 años. Seguida por 1 parcela en la zona Pacífico Norte de 8 años de edad. Por último la clase de 37-42cm con 2 parcelas que presentaron una edad de 8 años.

Cuadro 12. Distribución por categoría diamétrica de las parcelas muestreadas en tres regiones de Costa Rica para el ajuste de las curvas de clasificación de plantaciones clonales de *Gmelina arborea*.

Región	Dap promedio (cm) / parcela							Total general	
	2-7	7-12	12-17	17-22	22-27	27-32	32-37		37-42
Pacífico Norte	0	0	0	0	0	3	1	2	6
Pacífico Sur	107	185	82	0	0	0	0	0	374
Zona Atlántica	14	59	216	213	34	1	0	0	537
Total general	121	244	298	213	34	4	1	2	917

La figura 5 muestra la relación existente entre el dap promedio por parcela y la edad, así como la ecuación que representa su mejor ajuste.

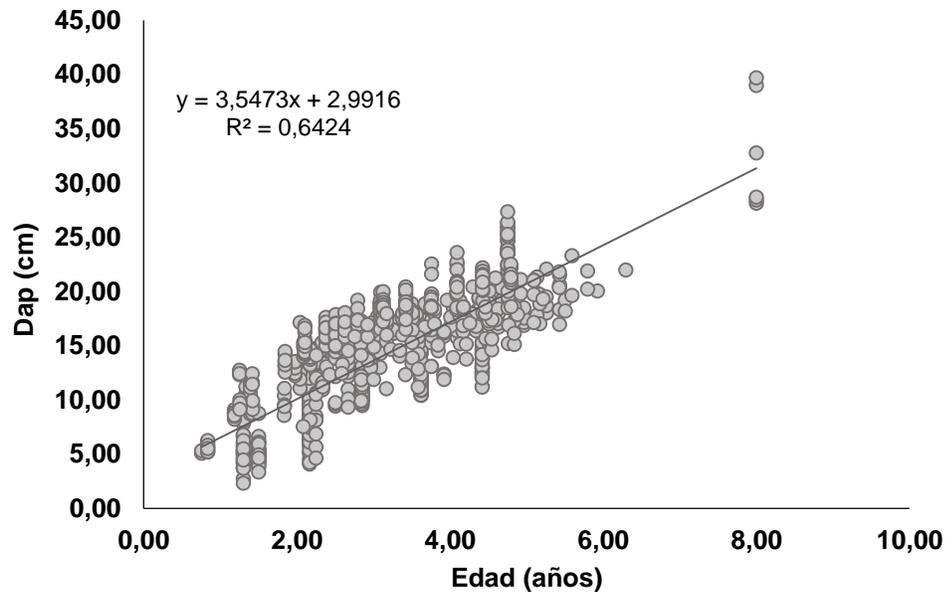


Figura 5. Modelo de mejor ajuste para la relación dap vs edad de plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Los modelos generados a partir del análisis de regresión, se muestran en el cuadro 13, junto con sus respectivos estadísticos. Los modelos 1 y 2 obtuvieron el mayor índice de ajuste (FI), el menor error estándar en unidades reales y menor coeficiente de variación.

Cuadro 13. Funciones y estadísticos de los modelos evaluados para el ajuste de una curva de crecimiento del dap vs edad, o curva guía, para plantaciones clonales de melina en Costa Rica.

Modelo	R ²	Syx	Se	(FI)	CV%
1. $Dap=0,1357(edad)^2+4,4781(edad)+1,6178$	0,645	3,167	3,167	0,645	23,32
2. $Dap= 3,5473 \text{ edad} + 2,9916$	0,642	3,178	3,178	0,642	23,41
3. $Dap= 10,163 \ln(edad) + 3,3039$	0,630	0,039	3,231	0,630	23,79
4. $Dap = 5,2893 \text{ edad}^{0,8447}$	0,618	0,276	3,195	0,639	23,53
5. $Dap = 0,0194 e^{0,155 \text{ edad}}$	0,566	0,294	3,720	0,510	23,39

La figura 6 muestra el análisis de residuos para la función seleccionada con base en la variable independiente edad

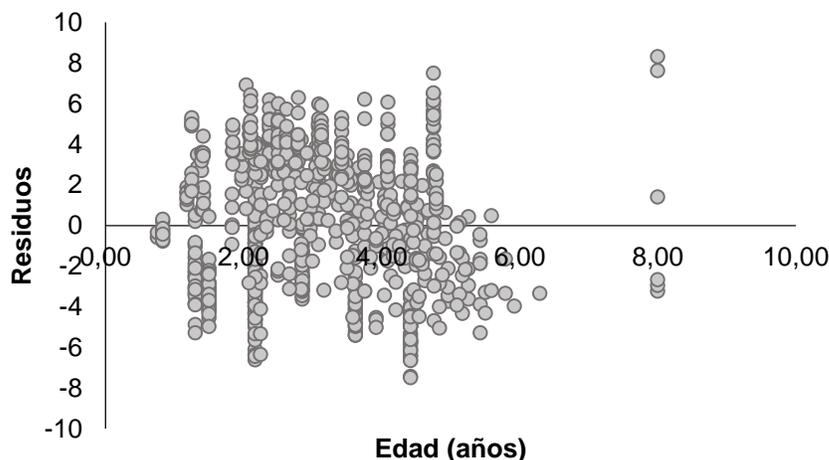


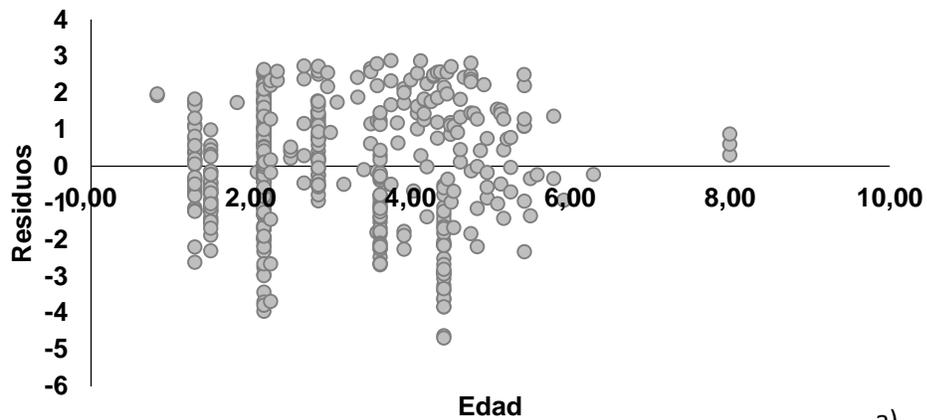
Figura 6. Distribución de los residuos con respecto a la relación dap-edad de la función escogida, para plantaciones clonales de melina en Costa Rica.

En el cuadro 14 se muestra el ajuste de las ecuaciones a partir de la sub base de datos para la predicción del percentil 25 con sus respectivos estadísticos. Los modelos 1 y 2 fueron los que registraron el mejor índice de ajuste, con valores similares en error estándar en unidades reales (Se), coeficiente de variación y error estándar.

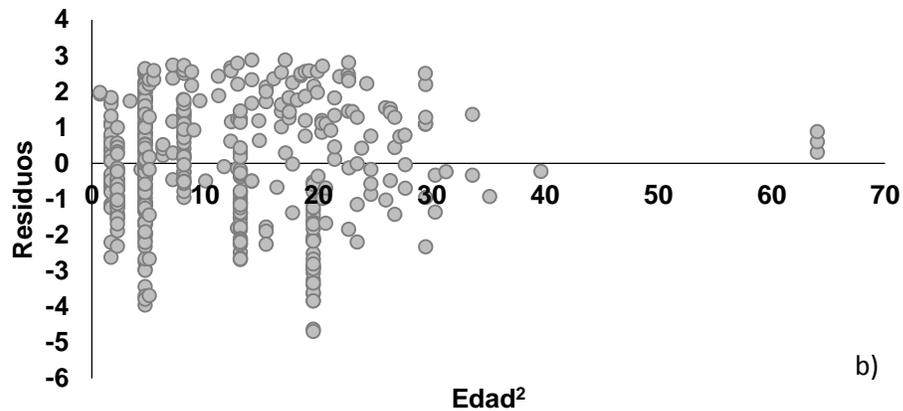
Cuadro 14. Funciones creadas a partir de una sub base de datos para la predicción del percentil 25 de las observaciones totales de plantaciones clonales de melina en Costa Rica.

Modelo	R ²	Syx	Se	(FI)	CV%
1. Dap= -0,0249 (edad) ² +3,6486 (edad)+0,2337	0,886	1,601	1,601	0,886	14,65
2. Dap= 3,4758 (edad) + 0,4866	0,886	1,599	1,599	0,886	14,64
3. Dap= 10,105 ln(edad) +0,732	0,848	1,848	1,848	0,848	16,92
4. Vol= 3,6917 edad ^{0,9778}	0,851	0,176	1,604	0,845	14,69
5. Vol= 3,7881 e ^{0,155 edad}	0,805	0,202	2,484	0,725	22,7

El análisis de residuos para las variables independientes edad y edad², para la función de mejor ajuste de melina clonal, se exhiben en las figuras 7a y 7b respectivamente.



a)



b)

Figura 7. a) Distribución de los residuos de la sub base de datos del percentil 25% con respecto a la edad de la función escogida. b) Distribución de los residuos de la sub base de datos del percentil 75% con respecto a la edad² de la función escogida.

Se ajustaron funciones para la predicción del percentil 75, éstas se presentaron en el cuadro 15, junto a sus respectivos estadísticos de comparación; donde los modelos 4 y 5 fueron los que registraron los valores más altos en el índice de ajuste. Sin embargo, estos modelos exhibieron los valores más altos en los parámetros error estándar en unidades reales y coeficiente de variación.

Cuadro 15. Funciones creadas a partir de la sub base de datos para la predicción del percentil 75 del crecimiento diamétrico de la melina clonal en Costa Rica.

Modelo	R ²	Syx	Se	(FI)	CV%
1. $Dap = -0,0179 (edad)^2 + 3,8413 (dap) + 5,0126$	0,859	1,681	1,681	0,859	10,36
2. $Dap = 3,7202 (edad) + 5,1922$	0,859	1,680	1,680	0,859	10,35
3. $Dap = 10,15 \ln(edad) + 5,9424$	0,819	1,906	1,906	0,819	11,75
4. $Vol = 7,8085 edad^{0,6823}$	0,861	0,109	1,684	0,986	10,38
5. $Vol = 7,8159 e^{0,2328 edad}$	0,783	0,137	2,141	0,989	13,19

El análisis de residuos de las variables independientes edad y edad² para el modelo seleccionado se expusieron en las figuras 8a y 8b respectivamente

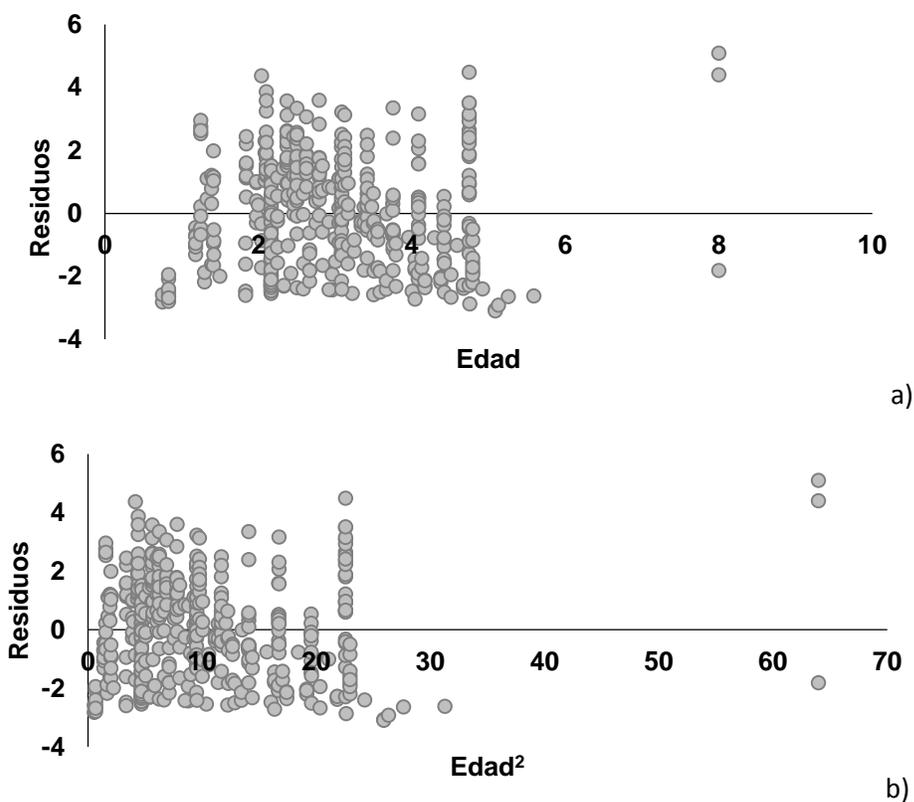


Figura 8. a) Distribución de los residuos de la sub base de datos para la estimación del crecimiento diamétrico del percentil 75%. b) Distribución de los residuos de la sub base de datos con respecto a la edad² del modelo seleccionado.

Las tres curvas ajustadas de crecimiento del dap de plantaciones clonales de *Gmelina arborea* se muestran en la figura 9. La primera curva representó el percentil 75, la siguiente curva constituyó el percentil 50 o promedio del total de datos, y finalmente, la curva más abajo correspondió al percentil 25.

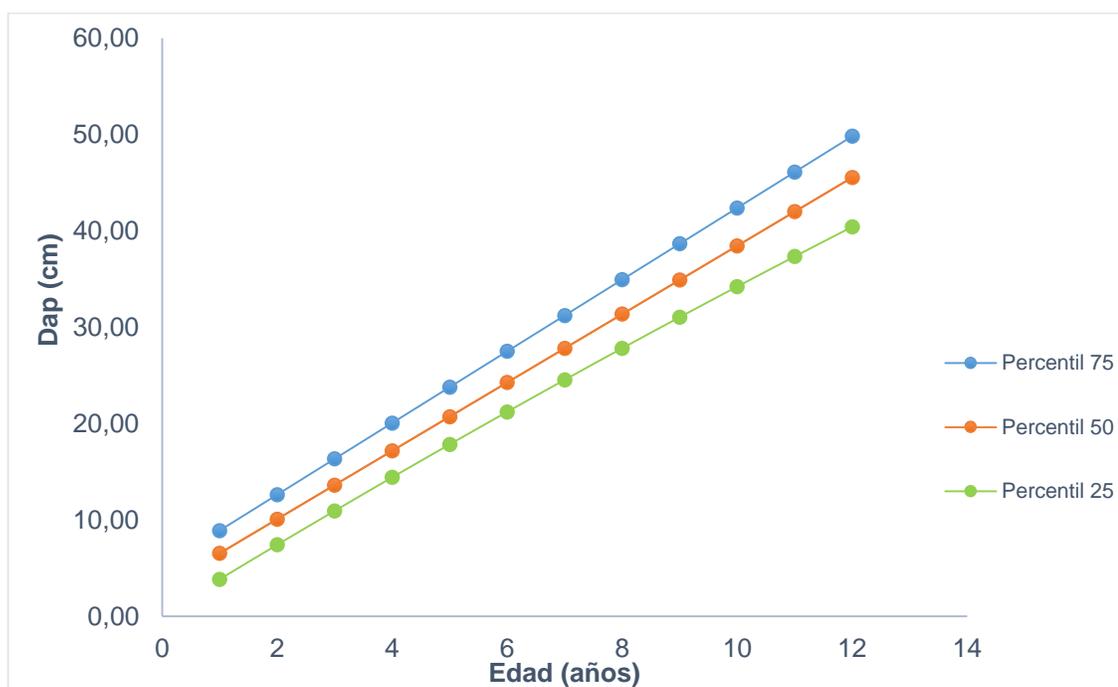


Figura 9. Funciones de crecimiento del dap vs edad en plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en Costa Rica.

Discusión

Las zonas geográficas de donde provienen los datos de crecimiento de la melina corresponden con las de mayor plantación en el país y las de mayor adaptación en crecimiento, principalmente por su clima y suelo.

La base de datos incluyó parcelas con diámetros que van desde 2,32 hasta los 39,69 cm, distribuidas en clases diamétricas en rangos de 5cm que van desde los 2cm hasta los 42 cm, que puede considerarse sumamente representativa para la especie en el ámbito de edades no superiores a los 8 años. Sin embargo, más del 99% de las parcelas utilizadas correspondió a diámetros menores a los 30 cm, con tan solo 7 parcelas (menos de un 1%) de un total 917 parcelas, con diámetros de 30 a 40 cm. Esto pudo contribuir a una menor explicación de la variación ($r^2 = 0,64$) del mejor modelo ajustado. Sin embargo, como puede observarse en la figura 5 la tendencia de la pendiente de la función de crecimiento parece mantenerse invariable a lo largo de todo el ámbito de datos de edad. Lo que sugiere, que los problemas de ajuste pueden explicarse mayoritariamente por una alta dispersión del diámetro para una misma edad. Situación esperada, pues un modelo de este tipo utiliza parcelas provenientes de plantaciones con diferencias importantes en calidad de sitio, espaciamiento inicial, en el momento de realización de los raleos, diferencias en el protocolo de control de malezas, todos estos elementos que fácilmente pueden afectar el crecimiento diamétrico (Zeaser y Murillo, 1992).

La pendiente del modelo ajustado (figura 5, polinomio de primer grado) claramente muestra que su tasa anual de incremento diamétrico se mantiene y perdurará más allá del ámbito de edad analizado. Esto puede tener implicaciones sobre la decisión del mejor momento de cosechar los árboles (turno con criterio financiero), que bien podría postergarse algunos años más allá del año 8. De manera diferente, el modelo dap/edad ajustado por Murillo y Badilla (2015) se basó en una función polinómica de segundo grado con una pendiente creciente hacia el año 8, donde el árbol medio estaría cercano a alcanzar los 35 cm de dap. No obstante, la dispersión de los datos fue sumamente alta, lo que generó una desviación estándar considerablemente más

alta, explicada posiblemente por la mezcla de datos provenientes de plantaciones clonales y plantaciones a partir de semilla.

Los datos utilizados en el ajuste de los modelos de esta investigación provienen de las regiones Caribe, Pacífico Sur y algunas parcelas del Pacífico Norte que son tres de las cuatro regiones con mayor registro de plantaciones de melina del país y también, las regiones de mayor productividad reportada (Murillo y Badilla, 2015). La excepción son las parcelas provenientes de Pérez Zeledón (Pacífico Sur), donde predominan suelos muy ácidos y de baja productividad para la especie (Murillo *et al*, 1991; Zeaser *et al*, 1992)

Otros aspectos que pudieron influir en la variabilidad, son las condiciones de suelo en las que se han desarrollado las plantaciones en cada zona, pues los rendimientos más satisfactorios se dan sobre suelos franco arcillosos, con acidez débil, nivel de CICE alta, y con un drenaje interno del suelo apropiado. Estos factores del suelo producen un gran efecto en el crecimiento en los dos primeros años de la plantación (Zeaser & Murillo, 1992). Sin embargo, no se tiene registro de los tipos de suelos que predominaban en las zonas muestreadas.

El manejo de la plantación también pudo influenciar la distribución de datos, pues por ejemplo con un valor de dap de 12cm (considerado como bajo) a una edad de 4 años, refleja que pudo existir falta de mantenimiento en una plantación, ausencia o retraso de raleos o, del control de malezas que es particularmente importante para melina.

La base de datos presenta una diversidad diamétrica para una misma edad pero significa también que se logró compilar la variabilidad que existe en las plantaciones clonales de melina en el país. En particular de clases diamétricas menores a 30 cm, ya que resulta difícil obtener, información de plantaciones de más de 6 años de edad en el país, debido a la presión por su uso en el mercado y por la presencia de enfermedades.

A pesar de la alta variedad de los datos, en la figura 5 se observa una distribución adecuada de la información a lo largo de la función de edad ajustada.

Los estadísticos utilizados para la escogencia del mejor modelo (Se, FI, CV%) permiten la comparación entre funciones lineales y no lineales (Ortiz, 2011). Otro de los criterios utilizados fue que la curva guía evitara intersecar las otras dos ecuaciones percentil 25 y 75. La función 1 es de tipo polinomial de segundo grado, cuya gráfica tiende a formar una parábola, lo que pudo provocar que en alguna sección pudiese intersecar a la función del percentil 25. Por esta razón se decidió el modelo 2 como curva guía para la especie, que además registró valores casi iguales en todos los criterios estadísticos de verificación (cuadro 13). El mejor de los modelos logró explicar poco más de 64% de la variación total, como indica el índice de Ajuste (FI).

El análisis de residuos de la ecuación elegida (figura 6), muestra una distribución homogénea a lo largo del eje horizontal y vertical, con respecto a la variable independiente edad. Puede sin embargo, observarse una dispersión relativamente mayor en algunos sectores del eje vertical, pero que no llegan a sobrepasar las 8 unidades. Más importante aún, la dispersión de los residuos sigue un patrón completamente homogéneo y simétrico en magnitud en ambas direcciones con respecto al eje vertical, lo cual refleja la homogeneidad del modelo. Al final del eje "y" se observa un grupo de parcelas que muestran un desvío positivo importante, originado por las pocas parcelas de mayor edad que se logró incorporar al modelo. Este efecto podría por tanto disminuirse en la medida en que a futuro se logre utilizar más datos de plantaciones clonales de mayor edad.

En el cuadro 14 se observa que en general la capacidad de predicción de los modelos fue más alta que con el modelo general. Esto se explica por el resultado del proceso de conformación de las dos bases de datos para justar los percentiles 25 y 75. De donde se obtuvo un grupo de parcelas mucho más homogénea con una desviación de un 50% menor con respecto a la nueva función ajustada para cada percentil.

En el cuadro 14 puede observarse que de los 5 modelos ajustados, nuevamente los modelos polinomiales 1y 2 fueron los que exhibieron los mejores valores en los estadísticos de comparación. La función 1 fue la que se eligió por su mejor ajuste, y para evitar que se interseque con alguna de las restantes dos ecuaciones (percentil 50 ó 75)

Los residuos de estas dos funciones (figuras 7a y 7b) al evaluarse contra la edad y edad², exhibieron igualmente una distribución homogénea alrededor de los ejes horizontales. Puede observarse tal y como se explicó que su magnitud de dispersión es mucho menor (aproximadamente un 50 %) menos que la registrada en la figura 6, donde se graficó toda la base de datos.

De los modelos ajustados para el percentil 75 se obtuvo que el modelo 4 fue el que registró los mejores criterios de comparación estadística. No obstante, se verificó gráficamente que la función del modelo 4 interseca la curva guía. El modelo 2 fue el escogido, pues gráficamente presentó un buen ajuste, corroborado por un alto índice de ajuste, bajos valores de error estándar en unidades reales y menor coeficiente de variación. Adicionalmente es el modelo más simple de todos los ajustados.

Los 3 modelos se presentaron en la figura 9, y muestran el sistema de clasificación de funciones de crecimiento dap-edad para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en Costa Rica.

El sistema de clasificación es de fácil uso, pues la información que se necesita para su evaluación es la medición de los diámetros de los árboles en la parcela de muestreo. Al mismo tiempo es una herramienta que permitiría junto con otros análisis, tomar decisiones en el mantenimiento y manejo de una plantación clonal de melina.

Conclusiones

El sistema de clasificación dap-edad por el método de percentiles para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* en Costa Rica podrá utilizar tres ecuaciones, elegidas bajo criterios estadísticos. Las ecuaciones elegidas fueron:

- El percentil 25: **Dap = -0,0249 (edad)²+3,6486 (edad)+0,2337**
- El percentil 50 o curva guía: **Dap= 3,5473 edad + 2,9916**
- El percentil 75: **Dap = 3,7202 (edad) +5,1922**

Recomendaciones

Se deben incluir nuevos datos de mediciones en campo, cuyos diámetros a la altura de pecho mayores a 30 cm.

Bibliografía

- Andenmatten, E., Letourneau, F. 2003. Predicción y proyección del rendimiento de pino ponderosa en las provincias de Chubut y Río Negro, Argentina. Quebracho. Revista de Ciencias Forestales. (10), 14-25 pp.
- Badilla, Y.; Murillo, O.; Azofeifa, M. Y Obando, G. 2003. Avances en Reforestación Clonal en Costa Rica. En: V Congreso Forestal Nacional. 17-19 de setiembre del 2003. San José, Costa Rica.
- Barquero, M.E. 1987. Establecimiento de rodales semilleros de Gmelina arborea Roxb. Hojanca, Guanacaste. In Rojas, FE (ed.). Primer Taller Nacional de Semillas y Viveros Forestales. MEMORIA Noviembre, 1985, San José, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago.141-153 pp.
- Barrantes, A. R. y Ugalde, S. A. (2013). Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Oficina Nacional Forestal. Heredia, Costa Rica. 32 p.
- Burbano, J. Manual para la estimación del volumen comercial en pie de plantaciones de Gmelina arborea Roxb. COSEFORMA-MINAE-GTZ. 31 p.
- Cancino, J. 1993. Modelo optimizador de trazado de árboles basado en funciones de ahusamiento y Programación Dinámica. Tesis Mg.Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- Chavarría, M.; Navarro, E.; Valverde, J.; Ramírez, F.; Méndez, D.; Monge, J.1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Madeleña en Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica
- Cornelius, J; Hernández, M. 1995. Variación genética en crecimiento y rectitud del fuste en Gmelina arborea en Costa Rica. Boletín Mejoramiento Genético y Semillas Forestales 10:9.

- Cuevas García, X., Parraguirre Lezama, C., Rodríguez Santiago, B. 1992. Modelos de crecimiento para una Plantación de Caoba (*Swietenia macrophylla* King). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 17(71). 87-102 pp.
- Dvorak, W.S. 2004. World view of *Gmelina arborea*: Opportunities and challenges. *New Forests* 28: 111-126
- Espinoza, J. 2010. Valoración de la calidad de la madera aserrada de *Gmelina arborea* Roxb. en dos pendientes según la norma PN INTE 06-02-07-09, Hacienda Junquillal, Turrubares, San José, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica
- Evans, J. 1999. Planted forests of the wet and dry tropics: their variety, nature, and significance. *New Forests*. 17, 25-36.
- Garro, A. 2001. Sumario (abstracts) de la especie *Gmelina arborea* (Roxb) en Costa Rica. Tesis (Bachiller). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Hughell, D. 1991. Modelos preliminar para la predicción del rendimiento de *Gmelina arborea* en América Central. *Silvoenergía* (44), 1- 4p
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2014. VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. 1 edición. San José, Costa Rica.
- Lega, 1988. Estudio de la forma de *Gmelina arborea* Roxb. Análisis de las plantaciones de Manila, Siquirres. Tesis Mg.Sc. Universidad de Costa Rica y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 116 p.
- Melo, O. 2015. Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de *Gmelina arborea* Roxb., asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia.
- Mesén, F. 1990. Resultados de ensayos de procedencias en Costa Rica. Turrialba, CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico No. 156.

- Moya, R. 2004. *Gmelina arborea* en Costa Rica. *Bois et Forêts des Tropiques*. 279(1), 47-57
- Murillo, O. 1992. Diseño de un huerto semillero de *Gmelina arborea* para la producción de semilla certificada en la zona norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol 11 (3): 51-58 p.
- Murillo, O. 2000. Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24 (2), 41-47.
- Murillo, O., Badilla, Y. 2015. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. *Tecnológico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O., Valerio, J. 1991. *Melina Gmelina arborea* Roxb., especie de árbol de uso múltiple en América Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 69 pp
- Murillo, O.; Badilla, Y. y Morales, M. 2011. Método de inventario para plantaciones pequeñas. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú. 17 p.
- Murillo, O.; Guevara, V. 2013. Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO, San José, Costa Rica. 159 pp.
- Murillo, O. y Badilla, Y. 2004. Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51 p.
- Murillo, O.; Badilla, Y. 2015. Consultoría. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO. San José, Costa Rica. 108 p.

- Musálem, S. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Obando, G. 1992. Modelos matemáticos para estimar el volumen aserrable en pie de raleos en plantaciones jóvenes de ciprés (*Cupressus lusitánica* Mill). II Congreso Forestal Nacional. Alajuela, Costa Rica, 55-57 p.
- Ortiz, E. 2011. Crecimiento y rendimiento forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Pakos, P. 2012. Comportamiento y manejo de *Gmelina arborea* Roxb., en Zamorano Honduras. Zamorano, Honduras
- Pérez, D., Kanninen, M. 2003. Ecuaciones y tablas de volumen para árboles individuales en plantaciones de *Teca Tectona grandis* L.f en Costa Rica.
- Piotto, D.; Montagnini, F.; Kanninen, M.; Ugalde, L.; Viquez, E. 2002. Forest plantations in Costa Rica and Nicaragua: performance of species and preferences of farmers. *Revista Forestal Centroamericana (CATIE)* Abr-Jun 2002 no. 38. 59-66 pp.
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F.; Real, P. 1997. *Mensura Forestal*. IICA-BMZ-GTZ. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., Arguedas, M. 2004. Manual para productores de *Melina Gmelina arborea* en Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Salas G. R. 2012. Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 54 p.
- Salazar, F. R.; Palmer, J. 1984. Tablas de volumen para *Gmelina arborea* Roxb. en Manila de Siquirres., Costa Rica. *Turrialba (C.R.)* 35(4): 425-433.
- Salazar, G., Lobo, S., Chavarría, M.I. 2009. Guía del productor para el establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales. Oficina Nacional Forestal. San José, Costa Rica.

- Solano, J.; Villalobos, R. (s.f.). Regiones y subregiones climáticas en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica.
- Tamarit, J.C.; De los Santos, H.; Aldrete, A.; Valdez, R.; Ramírez, H.; Guerra, V. 2014. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L.f. Mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21): 58-74.
- Vallejos, O. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Tesis M.Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 147 p.
- Vázquez, W.; Ugalde, L. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico No. 256. Turrialba, Costa Rica. 33p.
- Wabo, E.; Marquina, J.; Bratovich, R. Modelos de perfil de fuste para clones comerciales de *Populus deltoides* Marsh en la zona continental de la provincia de Buenos Aires. 2002. Quebracho - *Revista de Ciencias Forestales*, (5): 83-94 pp
- Zeazer, D.; Murillo, R.; 1992. Evaluación de los factores edáficos limitantes al crecimiento temprano de melina (*Gmelina arborea* Roxb), plantado en suelos inceptisoles en la región Brunca de Costa Rica. II Congreso Forestal Nacional. Alajuela, Costa Rica, 55-57 p.
- Zech, W. 1994. Metodología práctica para la identificación de sitios para reforestación en la zona norte de Costa Rica, en especial con melina y laurel. COSEFORMA. Cooperación CR/Alemania en los sectores forestal y maderero. Documento de proyecto No. 39. San José, Costa Rica. 53 p.