

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN DE MODELOS VOLUMÉTRICOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA ÁRBOLES EN
PIE DE MATILISGUATE (*Tabebuia rosea*), EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN ESCUINTLA
TESIS DE GRADO

KEDIN FRANCISCO SIAN FAJARDO
CARNET 24007-12

ESCUINTLA, AGOSTO DE 2018
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN DE MODELOS VOLUMÉTRICOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA ÁRBOLES EN
PIE DE MATILISGUATE (*Tabebuia rosea*), EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN ESCUINTLA
TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR
KEDIN FRANCISCO SIAN FAJARDO

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES EN EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIADO

ESCUINTLA, AGOSTO DE 2018
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ

SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA

DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JOSÉ MANUEL BENAVENTE MEJÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
LIC. CARLOS ESDUARDO ARDÓN LÓPEZ

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN
MGTR. PEDRO ARNULFO PINEDA COTZOJAY

Guatemala 2 de agosto de 2018

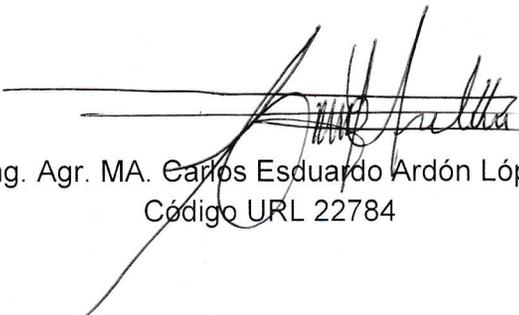
Honorable Consejo
Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas
Universidad Rafael Landívar
Presente

Estimados miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado y revisado el informe final de tesis titulado: "EVALUACIÓN DE MODELOS VOLUMÉTRICOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA ÁRBOLES EN PIE DE MATILISGUATE (*Tabebuia rosea*), EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN ESCUINTLA", realizado por el estudiante Kedin Francisco Sian Fajardo, quien se identifica con carné 24007-12.

Considero que dicho informe cumple con los requisitos establecidos por la Facultad para ser aprobado. Por lo tanto, lo someto a su consideración a efecto de emitir la respectiva autorización para su impresión.

Atentamente,


Ing. Agr. MA. Carlos Esduardo Ardón López
Código URL 22784



cc/archivo



Universidad
Rafael Landívar

Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
No. 06981-2018

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante KEDIN FRANCISCO SIAN FAJARDO, Carnet 24007-12 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES, de la Sede de Escuintla, que consta en el Acta No. 06127-2018 de fecha 20 de agosto de 2018, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

EVALUACIÓN DE MODELOS VOLUMÉTRICOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA
ÁRBOLES EN PIE DE MATILISGUATE (*Tabebuia rosea*), EN SISTEMAS
AGROFORESTALES EN ESCUINTLA

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 20 días del mes de agosto del año 2018.



**MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar**

AGRADECIMIENTOS:

A Dios: por darme la vida primeramente y por brindarme motivación, sabiduría y guiarme por el camino adecuado.

A mis hermanas: Alma Sian, Marcela Sian y Lourdes Sian; Es por ellas que he llegado a graduarme, por su ayuda económica en mi diversificado hoy mi logro el fruto de su esfuerzo.

A INAB y mis compañeros de Trabajo: Especialmente a la subregión IX-2, Escuintla, por ser la institución que me ayudo a recabar información esencial para mi trabajo y a mis compañeros de trabajo por su apoyo y ayuda incondicional.

A mi asesor: Ing. Carlos Ardón, por los conocimientos transmitidos durante la etapa final; El esfuerzo, paciencia y sabiduría al momento de corregir y alimentar mi documento de graduación, Dios lo bendiga.

DEDICATORIA:

A mis padres: por ser el apoyo, la motivación y el amor que me han brindado en cada momento.

A mis hermanos: por motivarme a seguir adelante en los buenos y malos momentos.

A mis abuelas: por sus oraciones, cariño, amistad y motivación.

A mi Difunto hermano y abuelos: porque sé que desde donde quiera que estén siempre estuvieron apoyándome y deseándome lo mejor.

A mis tíos y tías: especialmente a Aleida Sian, por todo el cariño y apoyo incondicional recibido.

A Luz María Veliz y Olga Regina Catalán; por su amistad, apoyo y cariño durante mi etapa de estudiante.

A la Virgen de los pobres: por ser la guía espiritual en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. Antecedentes.....	2
2.2. Tablas de volumen.....	3
2.3. Validación de modelos y elaboración de tablas de volumen.....	3
2.3.1. Selección de la muestra.....	3
2.3.2. Cubicación de los árboles muestra.....	5
2.3.3. Análisis estadístico de regresión de volumen cúbico.....	5
2.3.4. Elección del modelo de regresión más apropiado.....	7
2.3.5. Criterios de selección de modelos basados en la información estadística.	8
2.4. Descripción de la especie Matilsguate	10
2.4.1. Clasificación taxonómica.....	10
2.4.2. Origen y distribución geográfica.....	10
2.4.3. Fuste y corteza.....	11
2.4.4. Hojas.....	11
2.4.5. Flores.....	11
2.4.6. Fruto	11
2.5. Requerimientos ambientales.....	12

2.5.1.	Suelos	12
2.5.2.	Clima	12
2.6.	Usos principales de la especie	12
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	14
4.	OBJETIVOS	16
4.1.	Objetivo General.....	16
4.2.	Objetivos específicos	16
5.	METODOLOGÍA	17
5.1.	Ambiente	17
5.2.	Sujetos y unidades de análisis	17
5.3.	Tipo de investigación.....	17
5.4.	Instrumentos	17
5.5.	Procedimiento.....	18
5.5.1.	Fase documental.....	18
5.5.2.	Fase de campo	18
5.5.3.	Fase de gabinete	21
5.6.	Análisis de la información	22
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1.	Datos obtenidos en campo.....	24
6.1.1.	Diagrama de dispersión de los datos obtenidos en campo	25

6.2.	Análisis estadístico y selección de los modelos evaluados	26
6.2.1.	Descripción del modelo de regresión múltiple con el mejor ajuste	29
6.2.2.	Ajuste del modelo seleccionado.....	29
6.2.3.	Cumplimiento de supuestos de los parámetros del modelo.	30
6.3.	Despliegue de tablas	31
6.4.	Valores en porcentaje de troza y leña.....	32
6.5.	Análisis del cálculo de volumen comparando las fórmulas utilizadas por INAB	33
6.5.1.	Prueba t de Student para medias dependientes.....	36
7.	CONCLUSIONES	37
8.	RECOMENDACIONES.....	38
9.	BIBLIOGRAFÍA	39
10.	ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama de dispersión de datos obtenidos en campo.....	26
Figura 2. Ajuste del modelo seleccionado.....	29
Figura 3. Representación gráfica de los volúmenes estimados comparados con el volumen real.....	35
Figura 4. Cinta diamétrica.....	41
Figura 5. Cinta métrica.....	41
Figura 6. Fléxometro.....	42
Figura 7. Motosierra.....	42
Figura 8. GPS Garmin.....	43
Figura 9. Selección de árboles muestras y dirección de corte.....	43
Figura 10. Medición de diámetro a la altura de pecho (1.30 mts).....	44
Figura 11. Apeo de árboles muestra.....	44
Figura 12. Medición del Volumen de Troza.....	45
Figura 13. Medición de volumen de copa por medio de tareas.....	45
Figura 14. Medición de altura real.....	46

Figura 15. Ubicación geográfica de árboles muestra y medición de tocones.....	46
Figura 16. Volumen de copa y de troza de un árbol muestra.....	47
Figura 17. Ubicación geográfica de árboles muestra.....	48
Figura 18. Estadísticos del modelo seleccionado (Curve Expert Professional).....	51
Figura 19. Comparación de los dos mejores modelos.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Clasificación taxonómica de Matilisguate.....	10
Tabla 2 Instrumento utilizados en la investigación.....	18
Tabla 3 Número de árboles muestreados por clase diamétrica.....	19
Tabla 4 Modelos matemáticos a evaluar.....	21
Tabla 5 Datos dasométricos y volumétricos de los arboles muestreados.....	24
Tabla 6 Estadística de modelos evaluados.....	26
Tabla 7 Prueba de significancia para los parámetros del modelo (InfoStat).....	30
Tabla 8 Prueba de normalidad de residuos de Shapiro-Willks modificado por Mahibbur y Govindarajulu (1997).....	30
Tabla 9 Prueba de heterocedasticidad de residuos.....	31
Tabla 10 Tabla de volumen.....	32
Tabla 11 Valores en porcentaje para productos de troza y leña de la especie evaluada.....	33
Tabla 12 Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.....	35
Tabla 13 Prueba T Student (Muestras dependientes).....	36
Tabla 14 Formato de boleta de campo.....	47
Tabla 15 Diagnóstico de colinealidad de los modelos evaluados.....	49
Tabla 16 Regresión lineal de los modelos 1, 2, 4 y 5.....	50
Tabla 17 Correlaciones parciales de los modelos 2 y 5.....	51

**EVALUACIÓN DE MODELOS VOLUMÉTRICOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA
ÁRBOLES EN PIE DE MATILISGUATE (*Tabebuia rosea*), EN SISTEMAS
AGROFORESTALES EN ESCUINTLA.**

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar catorce modelos matemáticos, para el cálculo de volumen de árboles en pie de la especie Matilisqueate (*Tabebuia rosea* (Bertol)), presentes en sistemas agroforestales, para el departamento de Escuintla. Con la selección del modelo con mejor ajuste respecto a los datos de volumen real obtenidos en campo, se podrá realizar una estimación de volumen total con mayor exactitud, debido a que las ecuaciones que utiliza el Instituto Nacional de Bosques –INAB-, son generalizadas para todas las especies, utilizando métodos empíricos para el cálculo del volumen total, obteniendo así subestimaciones y sobrestimaciones del producto forestal. Se utilizó una muestra de 51 árboles, a los cuales se les calculó el volumen real, por medio de la fórmula de Smalian, para troza y se cuantificó el volumen de copa por medio de tareas. La elección del mejor modelo fue a través del análisis de los indicadores estadísticos siguientes: Multicolinealidad, Error estándar más bajo, máximo del coeficiente de determinación ajustado (r^2), y el que tuviera un menor Índice de Información de Akaike, el cual da una mejor bondad de ajuste. El modelo $V = -0.239998 + 0.001772DH + 0.000962D^2$, presentó el mejor ajuste con un error estándar de 0.1769, un coeficiente de determinación ajustado de 0.9783, un Índice de Información de Akaike de -175.5069 y un nivel de confianza del 95%, con el cual se procedió a desplegar la tabla de volumen para uso local de la especie Matilisqueate.

1. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país altamente diverso; su posición geográfica, su variedad de alturas y de precipitación, han hecho que cuente con una gran variedad de ecosistemas y por ende de especies arbóreas. Del área total del país, el 34% corresponde a cobertura forestal, es por ello que mediante el decreto legislativo 101-96 fue creado el Instituto Nacional de Bosques - INAB-, con la finalidad de que este se encargue de promover y fomentar el desarrollo forestal del país mediante el manejo sostenible de los bosques (INAB, 1999).

Las tablas de volumen se generan a partir de la validación de modelos matemáticos y son una herramienta útil para estimar el volumen de bosques, plantaciones y sistemas agroforestales, especialmente en la recolección de información necesaria para llevar a cabo la planificación, investigación científica y la elaboración de planes de manejo.

Los estudios en cuanto a la validación de modelos matemáticos para el cálculo de volumen y a la elaboración de tablas de volumen para especies latifoliadas no son suficientes. El INAB, en su manual técnico forestal, hace referencia a 11 ecuaciones para especies arbóreas de hoja ancha. Actualmente se utiliza la ecuación emitida por la FAO para la estimación volumétrica de especies latifoliadas, como el caso de Matiliguat, especie que presenta una gran importancia dentro del aprovechamiento forestal que se lleva a cabo en el departamento de Escuintla, ya que dentro de la clasificación de maderas para Guatemala es considerada una especie semipreciosa con alta demanda en el mercado nacional (INAB, 2016).

El presente estudio tiene por objetivo la validación de un modelo matemático para la especie de Matiliguat que mejor ajuste tenga para el cálculo de volumen de árboles en pie y la construcción de tablas de volumen en función de la altura total del árbol y su diámetro a la altura del pecho (DAP), además, proporcionar una herramienta útil que le permita al INAB estimar el volumen de árboles en pie que se encuentran fuera de bosque o establecidos en sistemas agroforestales de manera rápida con mayor exactitud.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Guatemala, es un país rico en vegetación, ya que sus tierras son fértiles, lo que hace que la agricultura y los bosques sean unos de los principales sectores económicos. La importancia de los bosques radica que el 65% de la población depende de los recursos forestales (FAO-INAB, 2004), por tal razón el Gobierno a lo largo de los años ha creado diversas instituciones para el manejo adecuado de los mismos.

En 1,996, se emitió el Decreto 101-96, actual Ley Forestal, en la que se declara de urgencia nacional y de interés social la reforestación y conservación de los bosques, para lo cual se propiciará el desarrollo forestal y su manejo sostenible. Esta misma Ley, sustituye el antiguo Servicio Forestal y crea al Instituto Nacional de Bosques –INAB–, como una entidad estatal, autónoma, descentralizada, con personalidad jurídica, patrimonio propio e independencia administrativa; con la designación de ser el órgano de dirección y autoridad en Materia Forestal. Entre sus principales atribuciones, la ley le establece: Ejecutar las políticas forestales que cumplan con los objetivos de esta Ley, Promover y fomentar el desarrollo forestal el país mediante el manejo sostenido de los bosques.

Las tablas de volumen son una tabulación de datos generadas a través de la validación de un modelo matemático en las cuales el DAP y la altura son las variables principales para determinar el volumen de un árbol, se originaron a inicios del siglo pasado. El creador fue Heinrich Cotta (1804). Cotta reconoció que el volumen de un árbol dependía de su altura y su coeficiente mórfico. Los países con una larga tradición forestal utilizan actualmente tablas de volumen y tablas auxiliares con factor de corrección y porcentaje de corteza, para estimar el volumen de un árbol o rodales.

El Instituto Nacional Forestal en 1997, genera tablas de volumen para nueve especies de coníferas, como se puede apreciar hasta la fecha estos estudios están orientados a bosques de coníferas. El Instituto Nacional de Bosque en 1999, presenta en su manual técnico forestal las ecuaciones para estimar el volumen total sin corteza tomadas del estudio generado por el

Instituto Nacional Forestal en 1977, además, presenta nueve ecuaciones para especies de latifoliadas tomadas del documento Dirección General De Inventario Nacional Forestal y la ecuación para otras especies generado por la FAO (1969).

2.2. Tablas de volumen

Definición: FAO (1980), define una tabla de volumen como una tabla, fórmula o gráfica, que proporciona el valor volumétrico de un árbol o conjunto de árboles en función de variables llamadas entradas. Ferreira (1990), define la tabla de volumen como una tabulación del volumen promedio de árboles de diferentes tamaños, expresados por su DAP y altura, y diferentes clases de formas. Las tablas de volumen construidas para las especies individuales o grupos de especies, expresan en forma de tabla o gráfico el volumen medio por árbol a través de las variables; diámetro y altura, altura y forma (Rojas, 1973).

2.3. Validación de modelos y elaboración de tablas de volumen

Alder (1980), indica que los pasos fundamentales para la generación de ecuaciones que permiten la elaboración de tablas de volumen son:

- a) Selección de la muestra.
- b) Cubicación de los árboles muestra.
- c) Análisis estadístico de regresión de volumen cúbico.
- d) Elección del modelo de regresión más apropiado.
- e) Validación de los modelos.
- f) Despliegue de las tablas.

2.3.1. Selección de la muestra

FAO (1974), indica que las poblaciones a inventariar, son por lo regular grandes y difíciles de cuantificarse o enumerarse completamente, por lo que es necesario realizar un muestreo.

Burkhart, FAO/FYDEP, y Latorre, citados por Hernández, (1995) coinciden en que el método fundamental en la selección objetiva de los árboles para la realización de una tabla de

volumen, es el muestreo aleatorio, ya que elimina el error sistemático, permitiendo el cálculo preciso en la estimación.

La distribución geográfica de los puntos o parcelas dentro de los cuales se seleccionan los árboles tipo debe basarse de preferencia en un diseño de muestreo objetivo, ya sea aleatorio o sistemático que asegure la representatividad de la muestra a utilizar (FAO, 1980).

- Número de muestras

Vaniere y Lojan (1973), citados por Hernández (1995), indican que para la construcción de una tabla de volumen se necesitan de tres a cinco árboles por clase diamétrica, y que cuanto mayor es el número de muestras, más precisa es la estimación.

No existe en el caso de las regresiones una expresión explícita para determinar el tamaño muestral (n) de árboles, necesarios para obtener una precisión dada. Cuanto mayor sea el número, más precisa será la estimación. Sin embargo, la calidad de los ajustes estará influida también por otros factores tales como: la distribución de la frecuencia diamétrica observada, la relación altura-diámetro, la extensión del área geográfica en que se aplicaran los modelos y la necesidad de agrupar especies en bosques mixtos.

Según LANLY (1974) se han construido ecuaciones de volumen para una especie o grupos de especies con incluso 100 ó menos árboles tipo o muestra (Michail, et al., 1997). Freese y FAO, citados por Hernández, (1995), indican que la muestra mínima que se necesita es de 30 árboles de una especie para ser estadísticamente aceptable.

- Número de clases diamétricas

La regla de Sturges establece la siguiente estimación de número de clases: número de clases = $1 + 3.3 \times \text{Log } N$, donde N es el número de datos. El tamaño de clases diamétricas debe estar comprendido entre cinco y veinte centímetros (Ferreira, 1996).

2.3.2. Cubicación de los árboles muestra

Veillon, Martínez, Salazar y Burkhart, citados por Hernández (1995), indican que el volumen de un árbol, es constituido por el volumen de la troza y el volumen de las ramas, hasta un índice de utilización de 2.5 cm. Porciones menores a este diámetro, se considera como follaje.

Para calcular el volumen por árbol, deben ser talados y luego medidos, también pueden medirse en pie con un relascopio u otro instrumento similar o con fórmulas, las cuales estiman el volumen, con cierto porcentaje de error. En árboles talados, para cubicarlos lo más simple es dividir el fuste en secciones semejantes a trozas para luego cubicar cada sección con las formulas siguientes: Huber, Smalian, Newton, y otras (Mackay, 1964). La fórmula más práctica y utilizada por técnicos forestales es la de Smalian (Alder, 1980).

$$V = \frac{g_u + g_o}{2} L$$

Donde:

V = Volumen

gu = Área basal mayor

go = Área basal menor

L = Largo o altura (Mackay, 1964).

2.3.3. Análisis estadístico de regresión de volumen cúbico

En la actualidad el procedimiento de mayor uso, si no el único utilizado, para la construcción de funciones de volumen y modelos fustales es el análisis de regresión (Michail, et al., 1997).

Según Ferreira (1996) indica que en la práctica forestal se encuentra a menudo que existe una relación entre dos o más variables. Por ejemplo, se puede predecir o estimar la altura de un árbol midiendo su DAP. También se puede estimar el volumen de un árbol midiendo su DAP y altura.

Las predicciones anteriores se pueden lograr por medio de un análisis de regresión, cuyo objetivo es expresar una relación entre la altura de un árbol y su DAP, mediante un

modelo o ecuación matemática que exprese como se desarrolla una variable en función del cambio de la (s) variación (es) de la (s) otra (s) variable (s).

Cuando se tiene información acerca de dos o más variables relacionadas, es natural buscar un modo de expresar la forma de las relaciones funcionales, pero además de buscar la función matemática que indique, de qué manera están relacionadas las variables, es necesario saber también, con que precisión se puede predecir el valor de una variable si conocemos los valores de las variables asociadas. La técnica para lograr estos dos objetivos se conoce cómo método de regresión (Ostle, 1965).

El procedimiento de análisis de varianza trata de eliminar la variación de una respuesta y de asignar porciones de esta, a cada variable de un conjunto de variables independientes. En el análisis de varianza, la suma de cuadrados corregida para Y (S_y^2), estima la cantidad de variación de los valores individuales de "Y" respecto al valor medio de "Y". La ecuación de regresión es una indicación de que parte de la variación observada en "Y" está asociada con la relación de "Y" a "X". La cantidad de variación en "Y" que está asociada con la regresión sobre "X" se conoce como: Suma de cuadrados de la reducción o la suma de cuadrados de la regresión (Fresse, 1967).

La porción de la variación total en "Y" que no está asociada con la regresión se conoce como Suma de Cuadrados Residual. La relación conjunta entre la variable dependiente y todas las variables independientes se denomina: Coeficiente de Determinación y con él se puede calcular la proporción de la variación total en "Y" que corresponde a la regresión. El coeficiente de determinación es igual al cuadrado del coeficiente de correlación (Fresse, 1967). En el análisis de varianza, el coeficiente de determinación se puede calcular mediante la fórmula.

$$C.Deter\ min\ acción = \frac{SC.reducción}{SC.total}$$

La distribución de la muestra teórica, denominada Distribución "F", permite realizar pruebas estadísticas acerca de la diferencia entre dos varianzas, así también permite investigar sobre

las diferencias entre las medias de un grupo de muestra. En el análisis de varianza, cuando la "F" calculada es mayor que "F" tabular, ($Pr > F$) la regresión se acepta como significativa (Hoel, 1988).

$$F.\text{calculada} = \frac{\text{Varianza.regresion}}{\text{Varianza.residual}}$$

2.3.4. Elección del modelo de regresión más apropiado

Para la elección del modelo de regresión se debe de considerar los siguientes aspectos:

- a) El modelo debe ser el más simple posible, es decir que tenga el menor número de coeficientes. Mientras más numerosos son los coeficientes, más ilógicamente variará el volumen en función de las entradas (FAO, 1980). Se debe elegir entonces el modelo más parsimonioso.
- b) Con base a los indicadores estadísticos el mejor modelo será aquel que tenga el valor máximo del coeficiente de determinación ajustado (r^2). (FAO, 1980).
- c) Otro criterio tomado en cuenta es que el mejor modelo será aquel que presente una menor variabilidad en los datos estimados con relación a los reales (FAO, 1980).
- d) El último criterio tomado en cuenta es el nivel de significancia el cual indica la probabilidad del ajuste del modelo a la serie de valores reales, la cual debe ser altamente significativa.

Ferreira Rojas (2005), indican que se han desarrollado numerosas ecuaciones para expresar el volumen como variable dependiente sobre una o más variables dependientes como DAP y altura. Reportan que los modelos más usados en las tablas de volumen son:

- Modelos Logarítmicos

- a) $v = k * D^{b1} * H^{b2}; \text{Log}V = \text{Log}K + b1\text{Log}D + b2\text{Log}H$

- b) $V = d^{b1} * H^{b2}; \text{Log}V = b1\text{Log}D + b2\text{Log}H$

- Modelos polimoniales

a. $V = a + Bdh^2cD^2$

b. $V = a + Bdh + cD^2$

c. $V = a + Bdh + cD^2 + dDH^2$

- Otras fórmulas

a. $V = a + bD + cDH = dD^2 + cH + fD^2H$ (Formula de W.H Meyer para la construcción de tablas de volumen en pies tablares).

b. $V = a + bD^2 + cH + dD^2H$ (Fórmula de Stoate).

c. $V = a + bD^2H$ (Formula de la variable combinada).

d. $V = a + bD^2 + cH + dD^2H$ (Formula Australiana)

Donde:

V= volumen en m³ o dm³

D= diámetro en cm

H= altura en m

K, b1, b2, a, b, c, d, f= constantes de la regresión

Log= logaritmo natural

2.3.5. Criterios de selección de modelos basados en la información estadística.

Los criterios de información son criterios de selección que equilibran el ajuste del modelo y su complejidad, hay que estar de acuerdo, en primer lugar, en el hecho de que no existen modelos ciertos o verdaderos. Los modelos son por definición, aproximaciones a la realidad o verdad desconocida. Para ilustrar esto, sirva la frase del estadístico norteamericano George Box. “Esencialmente, todos los modelos son erróneos, pero algunos son útiles”. En análisis de datos empíricos, se debe encarar la cuestión “¿Qué modelo debería ser usado para aproximar mejor la realidad, dado un conjunto de datos?”. La selección del Modelo no ha de

estar solamente basada en la bondad del ajuste, sino también en la complejidad; un modelo altamente complejo puede proporcionar un buen ajuste sin que muestre una relación interpretable con el proceso subyacente. La selección del Modelo debería de estar, pues basada en su capacidad para aceptar las características de la población.

Los criterios de información que son los comúnmente más usados son el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de información Schwarz (BIC), y su diferencia radica por su objetivo de aplicación (Peña, 2002). El criterio BIC trata de seleccionar el modelo correcto, con máxima probabilidad a posteriori, y puede demostrarse que es un criterio consistente, de manera que la probabilidad de seleccionar el modelo correcto tiende a 1 cuando aumenta el tamaño muestral. El criterio AIC no pretende seleccionar el modelo correcto, ya que admite que el modelo verdadero puede no estar entre los estimados, y trata de obtener el modelo que proporcione mejores predicciones entre los existentes. Puede demostrarse que, suponiendo que el modelo verdadero puede aproximarse arbitrariamente bien con los estimados, al aumentar el tamaño de la muestral, el criterio AIC es eficiente, escogiendo el modelo que proporciona (en promedio) mejores predicciones. Sin embargo, en muestras pequeñas o medianas, el criterio AIC tiende a seleccionar modelos con más parámetros de los necesarios (Peña, 2002).

El objetivo de la selección de modelos mediante el AIC es estimar la pérdida de información cuando la distribución de probabilidad f , asociada con el modelo verdadero, es aproximada mediante la distribución de probabilidad g , asociada con el modelo que va hacer evaluado. Una medida para discrepancia entre el modelo real y el modelo aproximado viene dada por la cantidad $I(f,g)$ que es igual al valor negativo de la entropía (Bozdogan, 1987).

En definitiva, el primer término del AIC puede ser interpretado como una medida de la bondad del ajuste, mientras el segundo término es una penalización, creciente conforme aumenta el número de parámetros, de acuerdo al principio de parsimonia, posteriormente, se selecciona el modelo factorial adecuado, a partir del valor mínimo del AIC.

El AIC enfatiza la bondad del modelo. Como puntualizaba Takane (1987), El AIC no pretende identificar el modelo verdadero. Que un modelo sea el que mejor se ajusta a los

datos, no quiere decir que sea el modelo real o verdadero. Más bien, significa que el modelo es el mejor de entre los modelos candidatos, en el sentido que proporciona la aproximación más cercana a la realidad o al verdadero modelo. El modelo que mejor se ajusta a los datos, podría cambiar en función al tamaño muestral, dado que, con un tamaño muestral mayor, los parámetros de un modelo pueden ser estimados de manera más fiable.

2.4. Descripción de la especie Matiliguat

Árbol caducifolio de porte mediano a grande, hasta 28-37 m de altura y diámetros que van de 50 a 100 cm. El árbol tiene una copa ancha, que puede ser cónica o irregular. Un rasgo característico del Matiliguat es que cuando pierde sus hojas en la época seca, se cubre totalmente de flores rosadas a lila, razón por la cual en muchas ciudades se le utiliza como ornamental. (P&C MADERAS, 2013).

2.4.1. Clasificación taxonómica

Tabla 1
Clasificación taxonómica de Matiliguat.

Reino:	Plantae
Filo:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Scrophulariales
Familia:	Bignoniaceae
Género:	Tabebuia
Especie:	<i>T. rosea.</i>

Fuente; ITIS (2016)

2.4.2. Origen y distribución geográfica

Es una especie nativa en México, América Central y el norte de Sur América (Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela). Crece en una variedad de hábitats desde 0-1900 msnm, con tendencia a dominar en bosque húmedo bajo, bosque de galería y áreas con inundaciones estacionales. También ocurre en bosque seco tropical, bosque de montaña y tierras agrícolas abandonadas. Se encuentra naturalmente en el sur de México, Centroamérica, Antillas, norte

del Perú, Venezuela y Ecuador. En Colombia desde el nivel del mar hasta los 1.900 metros. (P&C MADERAS, 2013).

2.4.3. Fuste y corteza

La especie decepciona en su fase inicial de crecimiento por su ramificación dicotómica que augura un tronco mal formado. Eventualmente el árbol llega a formar un excelente fuste sobre todo si hay sombra lateral de la misma especie o de un árbol diferente. Corteza gris oscura, escamosa con fisuras verticales (Salazar, 1997).

2.4.4. Hojas

Hojas color verde claro brillante digitadas, opuestas, con 3 a 5 folíolos de tamaños diferentes, los basales siempre son más pequeños, el de mayor tamaño es el central. Folíolos de 3-16 cm de largo y de 3-8 cm de ancho, obovados o lanceolado-elípticos, con ápice acuminado, bordes enteros, base obtusa. Pecíolo largo y delgado. (Castañeda, 2004).

2.4.5. Flores

Las flores, grandes, son de un llamativo color lila. Esta especie requiere un período seco bien marcado para su floración, también se encuentran flores blancas o rosadas; tienen forma de campana. Los árboles adultos de Matiliguat florecen de manera sincronizada durante la estación seca, alrededor de febrero y marzo. Para esta época, el árbol deja caer las hojas y la copa se torna blanca o rosada por el color de las flores. (Salazar, 1997).

2.4.6. Fruto

El fruto es una cápsula lineal cilíndrica, angosta en ambos extremos que alcanza a medir entre 22 y 38 cm de longitud; presenta un color verde claro que va variando a verde oscuro cuando madura. El fruto está maduro a los tres meses de iniciada la floración, cuando comienzan las lluvias. Los frutos cosechados deben empacarse en bolsas de tela rala. Para su secamiento se extienden en una capa delgada, cuidando que queden separados, para evitar la pudrición por exceso de humedad. También deben protegerse de los rayos directos del sol.

Una vez que se produce la apertura total en los frutos, la semilla va siendo liberada. Un fruto contiene entre 240 y 300 semillas. (Castañeda, 2004).

2.5. Requerimientos ambientales

2.5.1. Suelos

En forma general, el *Tabebuia rosea* se adapta a una gran variedad de suelos, preferiblemente fértiles, aluviales; también crece en suelos con inundaciones anuales, así como en orillas de ciénagas y pantanos; requiere de suelos con un pH que varía de 5.5 a 6.5. Se ha reportado también buen desarrollo en suelos con regular drenaje, altos contenidos de nutrientes y saturación de bases entre 37% y 68% y con déficit de fósforo. (Castañeda, 2004).

2.5.2. Clima

La especie de Matilisguate se desarrolla desde el nivel del mar hasta los 1.900 msnm, en zonas con temperaturas superiores a 21 °C y precipitaciones en un rango comprendido entre los 1.200 y 2.500 mm anuales. (Castañeda, 2004).

2.6. Usos principales de la especie

Es una especie cuya madera de buena calidad y valor lo hace muy importante en América Central, en Guatemala es considerada una madera semipreciosa por el Instituto Nacional de Bosques. La madera es excelente para trabajar, con un acabado atractivo y una variedad de usos.

En América del Sur la madera y corteza de Matilisguate, junto con otras especies de *Tabebuia*, son usadas en un número de formulaciones medicinales que se promueven como agentes anti cáncer, anti hongos y antiviral. Los extractos de la corteza del fuste de Matilisguate se utilizan contra los efectos de veneno de serpientes por curanderos tradicionales.

La madera es fácil de trabajar con herramientas manuales, tiene un acabado y lustre atractivo. La albura es rosada pálida en color, y el duramen un café-dorado hasta café castaño

oscuro. De árboles maduros de bosque es posible obtener piezas de madera de buena calidad de 12-25 m de largo y 25-70 cm en diámetro.

La madera es muy fácil de secar, y parecido en fortaleza a la teca (densidad 0,48 0,57 g/m³). La madera es usada extensivamente para muebles, construcción liviana, botes, equipo deportivo, pisos, y chapados. (Castañeda, 2004).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El cálculo del volumen para árboles en pie es un requisito básico de toda actividad forestal. En Guatemala, la mayor parte de los estudios sobre la validación de modelos matemáticos para crear ecuaciones que determinan el volumen de árboles en pie son para especies de coníferas provenientes de plantaciones forestales, sin embargo, muy pocos estudios se han dirigido para especies latifoliadas. Los planes de manejo forestal son el instrumento idóneo para la sostenibilidad del recurso forestal, y se basa en una buena cuantificación de las existencias volumétricas y su dinámica. Las ecuaciones que determinan el volumen total, (troza + leña), juegan un papel preponderante en esa formulación para la toma de decisiones.

Actualmente el Instituto Nacional de Bosques, -INAB-, al no existir ecuaciones que determinen el volumen para muchas especies arbóreas de hoja ancha, recomienda en su manual técnico forestal publicado en el año de 1,999, la utilización de la ecuación $V=0.108337266+0.000046499*(D^2*H)$ de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación -FAO- (FAO, 1989), para la determinación del volumen para "otras especies latifoliadas". Esta ecuación se generaliza para muchas especies con forma y fuste diferente teniendo el inconveniente que es válida únicamente para el volumen de fuste, por lo que el volumen total es obtenido mediante criterios empíricos, utilizando un factor de forma de 0.62 o utilizando la fórmula de la FAO con un dato de altura total. Esto conlleva a subestimaciones o sobreestimaciones del volumen autorizados en aprovechamientos forestales.

La manera más adecuada para realizar estimaciones volumétricas con mayor exactitud, es generar una ecuación por medio de modelos matemáticos para cada especie de árbol que se tenga interés. Las especies de hoja ancha conocida como Matilisguate, no cuenta con una ecuación específica para el cálculo de volumen total, así también tomando en cuenta que esta especie es una de mayor demanda en los aprovechamientos que se realizan en el departamento de Escuintla en especial las provenientes de sistemas agroforestales o árboles que han crecido

en potreros, los cuales tienen un crecimiento diferente a los provenientes de plantaciones forestales.

La importancia de validar un modelo matemático específico para el cálculo de volumen de la especie Matiliguat, es que permite que el cálculo tenga mayor exactitud y genera información más precisa de los productos de troza y leña que se puede obtener por árbol, los cuales generan un valor económico en su comercialización al silvicultor, y así mismo, al servicio forestal -INAB-, tanto para el cálculo de los impuestos al valor de la madera en pie, como para facilitar y tecnificar la elaboración de inventarios forestales nacionales en cuanto a calidad y cantidad de volúmenes madereros, lo cual coadyuvará en la política forestal nacional.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar modelos de regresión múltiple para cubicación de árboles en pie de Matilisguate, establecidos en sistemas agroforestales del departamento de Escuintla.

4.2. Objetivos específicos

Seleccionar la ecuación específica para el cálculo de volumen de árboles en pie que se encuentran en sistemas agroforestales de la especie Matilisguate, a través de la validación de un modelo matemático.

Elaborar tabla de volumen para uso local para la especie de Matilisguate, a partir del diámetro a la altura del pecho (1.3 metros) y altura total.

Determinar de los datos de la muestra, el porcentaje del producto de leña y troza que se obtiene del aprovechamiento de un árbol de la especie Matilisguate.

5. METODOLOGÍA

5.1. Ambiente

El presente estudio se llevó a cabo en el Departamento de Escuintla, localizado en el sur de Guatemala. En Escuintla se localizan 4 zonas de vida, Bosque muy húmedo subtropical, Bosque muy húmedo subtropical templado, Bosque muy húmedo subtropical cálido y Bosque húmedo subtropical cálido. La temperatura oscila entre 25 a 30 grados centígrados, la precipitación promedio es de 2440 mm anuales, los suelos característicos del lugar son andisoles y con altitudes de 0 a 1600msnm (SEGEPLAN, 2010).

El área de estudio fueron las fincas siguientes: La Miniatura y San Miguel Las Flores, ubicadas en el municipio de San José, Finca Montaña Hermosa, ubicada en Escuintla, Finca La Concha, ubicada en Guanagazapa y Finca Bandurria ubicada y Finca Sin Nombre, ubicadas en La Nueva Concepción. Estas Fincas se encuentran en las zonas de vida; Bosque húmedo subtropical (cálido) y Bosque muy húmedo subtropical (cálido).

5.2. Sujetos y unidades de análisis

Para el presente estudio las unidades de análisis serán la obtención de datos dasométricos (Diámetro a la Altura del Pecho, Altura y Volumen) de árboles establecidos en sistemas agroforestales (árboles en cercos, aislados en potreros) de la especie Matilisguate (*Tabebuia rosea* Bertol.).

5.3. Tipo de investigación

El presente estudio es una investigación descriptiva con enfoque cuantitativo, que trata de generar una ecuación específica para el cálculo de volumen total de árboles que se encuentran establecidos en sistemas agroforestales de la especie Matilisguate, a través de la validación de un modelo matemático.

5.4. Instrumentos

Los instrumentos que se utilizarán para realizar la presente investigación son los que aparecen en la tabla 2.

Tabla 2

Instrumentos utilizados en la investigación.

Hojas de registros	Realizar apuntes de información.
Cinta diamétrica	Medición de Diámetros (DAP)
Cinta métrica	Medición de longitud total del árbol.
Flexómetro	Medición de longitud de las secciones.
Motosierra.	Apeo de árboles, corte de trozas y ramas gruesas.
GPS	Localización de zonas de muestreo.
Machete	Corte de ramas delgadas.

5.5. Procedimiento

5.5.1. Fase documental

Se realizaron consultas documentales en tesis elaboradas para especies provenientes de plantaciones forestales; también documentos generados por el Instituto Nacional de Bosque: Manual Técnico Forestal 1999, Lineamientos Técnicos Forestales 2015, Evaluación Nacional Forestal 2002-2003, Tablas de volumen para las especies de coníferas de Guatemala INAFOR 1997 y consultas virtuales al Sistema de Manejo Forestal.

5.5.2. Fase de campo

a) Ubicación del área de estudio

El área de estudio fueron las fincas siguientes: La Miniatura y San Miguel Las Flores, ubicadas en el municipio de San José, Finca Montaña Hermosa, ubicada en Escuintla, Finca La Concha, ubicada en Guanagazapa, Finca Bandurria ubicada y Finca Sin Nombre, ubicadas en La Nueva Concepción (ver figura 17), estas fincas fueron elegidas debido a que tienen inscritos sus sistemas agroforestales en el Instituto Nacional de Bosque.

b) Tamaño de la muestra

Los árboles fueron agrupados en clases diamétricas con intervalos de cinco centímetros, lo cual está definido como intervalo de clase más específico para estos estudios

según FAO (1,980). Se utilizaron ocho clases diamétricas, con un diámetro menor de 20 cm y un diámetro mayor de hasta 60 cm. En ese sentido, las clases diamétricas y número de árboles a muestrear se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Número de árboles muestreados por clase diamétrica.

Clase diamétrica	Número de árboles evaluados
20-24.9	6
25-29.9	6
30-34.9	6
35-39.9	7
40-44.9	7
45-49.9	6
50-54.9	7
55-60	6
Total	51

c) Selección de los árboles muestra

Para la obtención de los árboles muestra, se utilizó un muestro selectivo, debido a que el manejo silvicultural que se les da es casi nulo o nulo, caso diferente del manejo que se les da a árboles establecidos en plantaciones forestales. Además, los árboles establecidos en sistemas agroforestales sufren daños por pastoreo en la mayoría de los casos y factores climáticos, que provocan alteración en su desarrollo de crecimiento. Derivado de lo anterior se buscó que los árboles muestra cumplieran con las características siguientes:

- Estado fitosanitario sano.
- Fuste recto.
- Sin bifurcaciones.
- Libres de plagas y enfermedades.
- Libres de pudriciones, deformaciones, gambas o daños provocados por rayos.
- Relación adecuada entre diámetro y altura (no podados).
- Que se encuentre en un sistema agroforestal (cercos, potreros).

d) Cubicación de los árboles muestra

La cubicación de los árboles muestra se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- El apeo de los árboles muestra, se llevó a cabo con una motosierra autorizada por el Instituto Nacional de Bosques. Los árboles se cortaron a 20-40 centímetros del suelo, esto varió en algunas ocasiones por razones topográficas (ver figura 11).
- Las mediciones dasométricas de DAP (diámetro a la altura del pecho) a 1.30 metros del suelo, se realizaron previo al apeo de los árboles muestra y la altura real se tomó después de tumbado el árbol con cinta métrica y diamétrica (ver anexo A y B), cada árbol muestra se ubicó geórgicamente por medio de coordenadas GTM, DATUM WGS 84 (ver figura 8 y 15).
- El volumen de troza se obtuvo dividiéndola en secciones de diversas dimensiones que en promedio van de 1 hasta 3 metros de longitud, midiéndose el diámetro mayor y diámetro menor con corteza de cada sección (ver figura 12), iniciando desde la base del árbol y finalizando en diámetros de 15 a 20 cm los cuales están definidos como el diámetro mínimo de uso de la troza de aserrío. Para obtener el volumen de cada sección de la troza se utilizó la fórmula de Smalian (1837).

$$V = \frac{g_u + g_o}{2} L$$

Donde:

V = Volumen

gu = Área basal mayor

go = Área basal menor

L = Largo o altura (Mackay, 1964.)

Volumen de copa se obtuvo acomodando la leña en tareas, la cual es una medida universal, por ser una medida común y práctica, sus dimensiones son: 3.36 m de largo (4 varas), 0.84 m de alto (1 vara) y media vara de espesor, lo que hace 1.223 m³ (ver figura 13).

5.5.3. Fase de gabinete

Los modelos matemáticos que se utilizaron para el análisis de regresión constituyen en la mayor parte de los tradicionales modelos de volumen empleados en diversos estudios realizados en bosques naturales (Spurr, 1952; Prodan et al., 1997; Salas, 2002; Husch et al., 2003).

Tabla 4
Modelos matemáticos a evaluar.

Modelos	Número de parámetros de regresión estimados	Modelo	Fuente o denominación.
1	2	$V = a + b D^2 H$	Spurr
2	3	$V = a + b DH + cD^2$	Cuadráticas
3	3	$V = a + b D^2H + cD^2$	
4	3	$V = a - b H + cD^2H$	
5	3	$V = a + b DH^2 + cD^2$	
6	3	$V = a + b D^2H + cD^3$	Polinomial con variable combinada (Grado 3)
7	4	$V = a + b DH^2 + cDH + dD^2$	Cuadrática
8	4	$V = a + b DH + cH + dD^2H$	Cuadrática
10	4	$V = a + b D^2 + cH + dDH$	Cuadrática
11	4	$V = a + b D^2 + cH + dD^2H$	Australiana
12	3	$V = a + b Ln (D) + cLn(H)$	Schumacher-Hall
13	4	$V = a + b Ln (H) + cD + dH$	Logarítmicas
14	4	$V = a + b D + cLn (D) + dLn (H)$	

(Spurr, 1952; Prodan et al., 1997; Salas, 2002; Husch et al., 2003).

Dónde:

V = volumen (m³)

D = diámetro a la altura del pecho (cm).

H = altura total (m), (Dato obtenido en árboles tumbados).

Ln = logaritmo natural.

a,b,c,d = parámetros de regresión estimados.

5.6. Análisis de la información

El proceso de la información de los diferentes volúmenes que se obtuvieron en los modelos mencionados anteriormente, se realizó por medio de un análisis de regresión múltiple, a través del programa Curve Expert Professional versión 1.6.5. Las variables independientes a estudiar en el análisis de regresión fueron el Diámetro a la Altura del Pecho y altura total del árbol, la variable dependiente fue el volumen total.

También se utilizaron otros programas como: el software de Excel 2010 y sus herramientas de análisis de datos, para agrupar, ordenar y analizar los datos obtenidos en campo y realizar el análisis de varianza de los datos de volumen real, respecto a los datos calculados de volumen con la Formula de FAO, Factor de Forma (0.62), utilizadas actualmente por INAB y los datos obtenidos del modelo que presente el mejor ajuste, InfoStat versión 2008, para obtención de residuos y prueba de normalidad, XL STAT Premium versión 2016, para realizar la prueba de heterocedasticidad de residuos y el programa IBM SPSS Statistics versión 22, se utilizó para realizar las pruebas de multicolinealidad.

La selección de los modelos matemáticos mencionados anteriormente, se basó en el análisis de los indicadores estadísticos siguientes:

- Error Estándar (indica la precisión de ajuste del modelo, a medida que aumenta disminuye el grado de ajuste)
- Coeficiente de determinación ajustado r^2 (Es una medida de la capacidad predictiva del modelo de regresión debida al grado de ajuste. Si todos los puntos observados estuvieran muy cerca de la línea de regresión, R^2 sería cercano 1 y significaría que el modelo es altamente predictivo.)
- Criterio de Información de Akaike (AIC: Akaike Information Criterion), es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, dado un conjunto de modelos candidatos para los datos, el mejor modelo es el que tiene el valor más pequeño en el AIC.
- Multicolinealida consiste en la existencia de relaciones lineales entre dos o más variables independientes del modelo.
- Correlación parcial es la relación lineal entre dos variables cuando se han eliminado de ambas, los efectos lineales de las otras variables intervinientes.

- Significancia evalúa cada uno de los parámetros del modelo y mide que tan significativos son, lo que determina si deben formar parte del modelo.
- Normalidad consiste en determinar si los datos del modelo tienen distribución normal.
- Heterocedasticidad en estadística se dice que un modelo presenta heterocedasticidad cuando la varianza de las perturbaciones no son constantes a lo largo de las observaciones.

El procedimiento para obtener el mejor modelo fue a través de un análisis de regresión a través del programa Curve Expert Professional, en el cual se obtuvieron valores de los estadísticos de error estándar, coeficiente de determinación ajustada y el AIC para los 14 modelos evaluados.

Posteriormente se realizó una prueba de multicolinealidad por medio del programa SPSS, con la cual se descartaron todos aquellos modelos que presentaban colinealidad entre las variables independientes, al modelo seleccionado se le realizaron las pruebas de significancia, normalidad y heterocedasticidad, estas pruebas se realizaron por medio de los programas InfoStat y XL STAT Premium 2016.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Datos obtenidos en campo

Se obtuvieron un total de 51 datos de árboles muestreados, de los cuales se tomaron datos dasométricos (diámetro a la altura del pecho y altura total) y se cuantificó el volumen total o volumen real (volumen troza y volumen leña).

Tabla 5

Datos dasométricos y volumétricos de los arboles muestreados.

Árbol No.	DAP	Altura	Volumen troza	Volumen leña	Volumen total
1	20.3	10	0.07	0.34	0.42
2	21	10.3	0.09	0.39	0.48
3	22.2	10.5	0.14	0.44	0.58
4	23	11	0.16	0.43	0.59
5	24.2	11.5	0.2	0.46	0.67
6	24.5	11.9	0.16	0.52	0.68
7	25.2	11.58	0.15	0.53	0.68
8	25.8	13.2	0.19	0.5	0.69
9	26	13.5	0.2	0.49	0.69
10	27.5	14	0.27	0.5	0.77
11	28.4	14.5	0.26	0.55	0.81
12	29.2	15.2	0.29	0.56	0.84
13	30.5	15.2	0.33	0.75	1.08
14	31.8	14.5	0.33	0.64	0.97
15	32	15.4	0.34	0.85	1.19
16	32.6	16.5	0.34	0.89	1.23
17	33	14.6	0.25	1.61	1.86
18	34.8	17.3	0.43	1.43	1.86
19	35.9	15.5	0.43	1.45	1.88
20	36.1	13.8	0.86	1.02	1.89
21	36.2	18.1	0.58	1.42	2
22	37.5	16.5	0.53	1.46	1.99
23	38.5	18.5	0.89	1.32	2.21
24	39.2	15.1	0.74	1.28	2.02
25	39.7	14.3	0.55	1.44	1.99
26	40	13.9	0.57	1.49	2.06
27	41	15.5	0.74	1.39	2.13
28	41.6	14.5	0.69	1.43	2.11

Continúa Tabla 5. Datos dasométricos y volumétricos de los arboles muestreados.

Continuación de Tabla 5. Datos dasométricos y volumétricos de los arboles muestreados.

Árbol No.	DAP	Altura	Volumen troza	Volumen leña	Volumen total
29	43.5	18	1.21	1.06	2.27
30	44	19.3	0.89	1.7	2.59
31	44.2	16.1	0.83	1.45	2.27
32	44.7	18.9	0.99	1.64	2.63
33	45.5	17.8	1.01	1.62	2.63
34	46.7	18.8	1.01	1.66	2.67
35	48	18.5	1.16	1.92	3.08
36	48.5	16.7	1.15	1.66	2.81
37	49	16.4	1.09	1.65	2.74
38	49.6	20	1.04	2.27	3.3
39	50	19	1.15	2.22	3.37
40	50.5	16.5	1.17	1.76	2.93
41	50.9	18.8	1.18	2.21	3.39
42	52.5	16.3	1.08	2.05	3.13
43	53.2	17.9	1.2	2.21	3.41
44	53.5	19.5	1.4	2.15	3.55
45	53.7	19.2	1.16	2.38	3.54
46	55.8	20.2	1.21	2.56	3.77
47	57	18.5	1.53	2.08	3.61
48	58.1	20.8	1.7	2.32	4.02
49	59	19.9	1.64	2.42	4.06
50	59.5	20	1.88	2.62	4.49
51	60	20.6	1.97	2.72	4.69

6.1.1. Diagrama de dispersión de los datos obtenidos en campo

La figura 1, muestra el diagrama de dispersión 3D obtenido mediante el programa de Curve Expert Professional, se observa cómo se distribuyen los datos de volumen obtenidos en campo, respecto a sus los valores dasométricos. Los puntos configuran un plano cuya inclinación indica que el volumen aumenta a medida que el diámetro del fuste y la altura del árbol aumentan

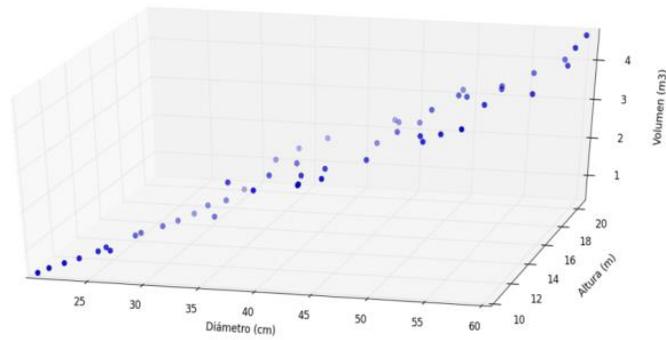


Figura 1 . Diagrama de dispersión de datos obtenidos en campo.

6.2. Análisis estadístico y selección de los modelos evaluados

En Tabla 6, se muestran los estadísticos de los modelos evaluados; los cuales contribuyeron para la elección del mejor modelo, para el cálculo de volumen de árboles en pie presentes en sistemas agroforestales de las especie de Matilisguate.

Tabla 6
Modelos evaluados.

Modelo No.	Modelos	Error Estándar	Coefficiente de determinación	Coefficiente de determinación (r ² ajustado)	AIC	Índice de Condición
13	$V = a + b \ln (H) + cD + dH$	0.1605	0.9912	0.9825	-184.2401	343.02
8	$V = a + b DH + cH + dD^2H$	0.1631	0.9909	0.982	-182.6076	110.39
10	$V = a + b D^2 + cH + dDH$	0.176	0.9845	0.979	-174.8467	158.62
7	$V = a + b DH^2 + cDH + dD^2$	0.1775	0.9893	0.9787	-173.9937	84.73
9	$V = a + b D^2 + cDH + dD^2H$	0.1766	0.9894	0.9789	-174.5209	47.43
2	$V = a + b DH + cD^2$	0.1769	0.9891	0.9783	-175.5069	27.95
11	$V = a + b D^2 + cH + dD^2H$	0.1845	0.9884	0.9769	-170.0313	47.91
14	$V = a + b D + c \ln (D) + d \ln (H)$	0.1838	0.9885	0.9771	-170.4141	237.44

Continúa Tabla 6. Estadística de modelos evaluados.

Continuación de Tabla 6. Estadística de modelos evaluados.

Modelo No.	Modelos	Error Estándar	Coefficiente de determinación	Coefficiente de determinación (r ² ajustado)	AIC	Índice de Condición
5	$V = a + b DH^2 + cD^2$	0.1847	0.9881	0.9764	-171.125	17.53
3	$V = a + b D^2H + cD^2$	0.201	0.9859	0.972	-162.4742	34.56
4	$V = a - b H + cD^2H$	0.2272	0.982	0.9643	-149.9912	25.79
1	$V = a + b D^2 H$	0.229	0.9813	0.963	-150.3254	25.22
6	$V = a + b D^2H + cD^3$	0.2307	0.9814	0.9632	-148.4247	31.15
12	$V = a + b \text{Ln}(D) + c\text{Ln}(H)$	0.3074	0.9668	0.9343	-119.1678	73.09

El primer pasó en la selección del mejor modelo, fue realizar el análisis de regresión múltiple y el último fue evaluar la multicolinealidad en donde se descartaron los modelos que presentaron problemas de colinealidad. La multicolinealidad afecta en forma severa las estimaciones de mínimos cuadrados, ya que éstas tienden a ser menos precisas para los efectos individuales de las variables independientes, es decir, cuando dos o más variables de predicción son colineales los parámetros no miden los efectos individuales sobre la respuesta, sino que reflejan un efecto parcial sobre la misma, sujeto a todo lo que pase con las demás variables de predicción en la ecuación de regresión (Canavos, 1988).

La presencia de multicolinealidad entre variables en cada uno de los modelos se evaluó en función del índice de condición (IC). Belsey (1991), indica que cuando el valor de dicho índice se encuentra entre 5 y 10 no existen problemas de multicolinealidad, si está entre 30 y 100 hay problemas de multicolinealidad, estos problemas se consideran severos. Por su parte, Myers (1990) indica que si el índice de condición máximo es superior a 30, es necesario tener cuidado debido a los posibles efectos de la multicolinealidad.

Todos los modelos excepto el 2, 4, 5 y 1, presentan problemas de multicolinealidad severa (Tabla 6), por lo cual que presentan variables predictoras independientes correlacionadas entre si y redundan sobre el modelado de la variable respuesta (Salas, 2002). El índice de condición máximo para los modelos 2, 4,5 y 1 en ningún caso superó el valor de

30, por lo que, según las recomendaciones de Belsey (1991) y Myers (1990), se descarta la presencia de multicolinealidad severa y se consideraron válidos los errores estándar aproximados asociados a las estimaciones de los parámetros según este criterio.

A los modelos con índice de condición máximo menor a 30, se les realizó un análisis de correlación parcial (tabla 15), que evalúa la relación lineal entre dos variables cuando se han eliminado de ambas, los efectos lineales de las otras variables intervinientes. El modelo 5 tiene correlación de 0.450 y 0.798 que es una positiva moderada y positiva alta, mientras el modelo 2 ambas son positivas moderadas (tabla 17), los modelos 4 y 1 presentan una positiva muy alta y positiva muy baja, por lo que basado en correlación relativa, el mejor modelo es el número 2.

Dentro de las capacidades predictivas de los modelos sin problemas de multicolinealidad se evaluó el ECM error (tabla 16), en la cual se observa el análisis de regresión lineal que demuestra que el ECM error para los modelos 2 y 5 es de 0.03 siendo los que presentan menor variabilidad en su predicción. Al comparar el modelo 2 con el 5 (figura 25), se observa que la probabilidad que el modelo 2 sea el mejor es de 89.94%,

También se evaluó el grado de ajuste de los modelos que no presentan multicolinealidad severa y como se puede observar en el cuadro 5, el modelo numero 2 presenta el menor error estándar (0.1769) que indica la precisión del ajuste del modelo y la dispersión promedio entre los valores estimados respecto a los valores observados. Coeficiente de determinación ajustado (0.9783), que expresa la cantidad de variación total explicada por el modelo siendo este el que proporciona el valor más alto y cercano a 1, Sin embargo, no se debe de juzgar la bondad del ajuste únicamente por el error estándar, el coeficiente de determinación ajustado, también se tomó en cuenta el criterio de información estadística AIC, el cual evalúa la bondad de ajuste a partir del valor mínimo del AIC y siendo el menor para el modelo 2 (-175.5069).

Como puntualizaba Takane (1987), el AIC no pretende identificar el modelo verdadero. Que un modelo sea el que mejor se ajusta a los datos, no quiere decir que sea el modelo real o verdadero. Más bien, significa que el modelo es el mejor de entre los modelos

candidatos, en el sentido de que proporciona la aproximación más cercana a la realidad o al verdadero modelo, cumpliendo con el principio de parsimonia.

6.2.1. Descripción del modelo de regresión múltiple con el mejor ajuste

Se determinó que el modelo que mejor ajusta es el numero 2 ($V = a + b (DH) + cD^2$) donde el volumen (V) está dado en metros cúbicos, el diámetro (D) en centímetros y la altura (H) en metros. Los parámetros de regresión estimada y el modelo correspondientes son los siguientes:

$$a = -0.239998$$

$$b = 0.001772$$

$$c = 0.000962$$

$$V = -0.239998 + 0.001772DH + 0.000962D^2$$

Cabe mencionar que el modelo descrito anteriormente es validado para diámetros con un rango de 20 a 60 centímetros tomados a la altura de 1.30 metros, y por lo tanto, la menor cantidad de términos requeridos para predecir el volumen a partir del diámetro y la altura es de 3 términos, siendo el modelo seleccionado el más parsimonioso de los evaluados.

6.2.2. Ajuste del modelo seleccionado

En la figura 2, se observa el comportamiento que presenta el modelo 2, con respecto a los datos de volumen total que se obtuvieron en la fase de campo.

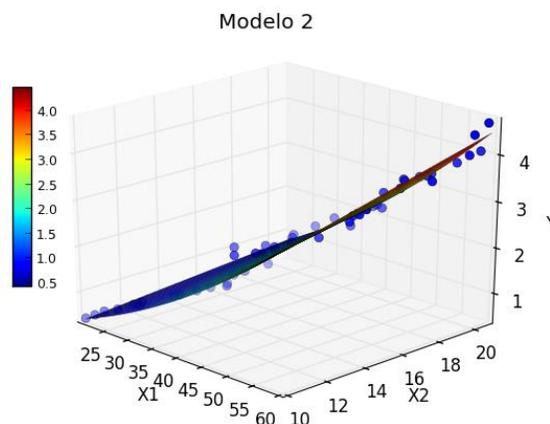


Figura 2. Ajuste del modelo seleccionado.

6.2.3. Cumplimiento de supuestos de los parámetros del modelo.

- Se realizó una prueba de significancia para los parámetros del modelo seleccionado, en la que se muestra que todos los parámetros del modelo son significativos debido a que la significancia para cada uno de los parámetros es menor a 0.05, lo cual indica que los parámetros son significativos al 5% de significancia y por ello deben formar parte del modelo seleccionado (ver tabla 7).

Tabla 7
Prueba de significancia para los parámetros del modelo (InfoStat).

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración
Volumen total	51	0.03	0.18	-27.12	-19.39	6

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
A	-1E30	1E30	1.0E-03	-0.24	0.08	-2.97	0.0047
B	-1E30	1E30	1.0E-03	1.8E-03	4.2E-04	4.20	0.0001
C	-1E30	1E30	1.0E-03	6.9E-04	1.3E-04	5.28	<0.0001

Matriz de correlación de las estimaciones

	A	B	C
A	1.00	-0.76	0.63
B	-0.76	1.00	-0.98
C	0.63	-0.98	1.00

*Volumen_total $a+b*Dap*Altura+c*Dap^2$*

- Prueba de normalidad de residuos de Shapiro-Willks modificado por Mahibbur y Govindarajulu (1997), se utilizó un nivel de confianza de 97% es decir 0.97, por lo que el nivel de significancia (alfa) es de 0.03 y como el valor de p es mayor que alfa se concluye que se acepta la hipótesis nula y por lo tanto los datos si tienen distribución normal.

Tabla 8
Prueba de normalidad de residuos de Shapiro-Willks modificado por Mahibbur y Govindarajulu (1997).

Normalidad de residuos de Shapiro-Wilks (modificado)						
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)	
Residuos Volumen total	51	3.3E-12	0.17	0.97	0.5153	

- Se realizó el análisis de heterocedasticidad, Prueba de Breusch-Pagan y White: las cuales indican que no se puede rechazar la hipótesis nula, es decir que los datos de los residuos son homocedásticos por lo que el error cometido por el modelo tiene siempre la misma varianza y el valor de las variables explicativas, no afectarán a la varianza del error.

Tabla 9
Prueba de heterocedasticidad de residuos.

Prueba de Breusch-Pagan:					
LM (Valor observado)	1.097				
LM (Valor crítico)	5.991				
GL	2				
valor-p (bilateral)	0.578				
alfa	0.05				
Interpretación de la prueba:					
H0: Los residuos son homocedásticos					
Ha: Los residuos son heterocedásticos					
Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación alfa=0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.					
El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es de 57.78%.					
Prueba de White:					
LM (Valor observado)	6.883				
LM (Valor crítico)	11.070				
GL	5				
valor-p (bilateral)	0.229				
alfa	0.05				
Interpretación de la prueba:					
H0: Los residuos son homocedásticos					
Ha: Los residuos son heterocedásticos					
Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación alfa=0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.					
El riesgo de rechazar la hipótesis nula H0 cuando es verdadera es de 22.95%.					

6.3. Despliegue de tablas

Luego de tener el modelo de regresión seleccionado, se procedió a elaborar la tabla de volumen en una hoja electrónicas de Microsoft Excel ®, en las cuales se procesaron los datos correspondientes a DAP hasta un diámetro de 60 centímetros y una altura hasta 21 metros, datos que se tomaron en base a las mediciones realizada en los arboles muestra.

Tabla 10
Tabla de volumen.

Diámetro (cm)	ALTURA TOTAL EN METROS											
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
20	0.499	0.535	0.570	0.606	0.641	0.676	0.712	0.747	0.783	0.818	0.854	0.889
22	0.615	0.654	0.693	0.732	0.771	0.810	0.849	0.888	0.927	0.966	1.005	1.044
24	0.739	0.782	0.824	0.867	0.910	0.952	0.995	1.037	1.080	1.122	1.165	1.207
26	0.871	0.917	0.963	1.009	1.055	1.101	1.147	1.194	1.240	1.286	1.332	1.378
28	1.010	1.060	1.110	1.159	1.209	1.258	1.308	1.358	1.407	1.457	1.507	1.556
30	1.157	1.211	1.264	1.317	1.370	1.423	1.476	1.530	1.583	1.636	1.689	1.742
32	1.312	1.369	1.426	1.482	1.539	1.596	1.652	1.709	1.766	1.822	1.879	1.936
34	1.475	1.535	1.595	1.655	1.716	1.776	1.836	1.896	1.957	2.017	2.077	2.137
36	1.645	1.708	1.772	1.836	1.900	1.964	2.027	2.091	2.155	2.219	2.283	2.346
38	1.822	1.890	1.957	2.024	2.092	2.159	2.227	2.294	2.361	2.429	2.496	2.563
40	2.008	2.079	2.150	2.221	2.292	2.362	2.433	2.504	2.575	2.646	2.717	2.788
42	2.201	2.276	2.350	2.424	2.499	2.573	2.648	2.722	2.797	2.871	2.945	3.020
44	2.402	2.480	2.558	2.636	2.714	2.792	2.870	2.948	3.026	3.104	3.182	3.260
46	2.611	2.692	2.774	2.855	2.937	3.018	3.100	3.181	3.263	3.344	3.426	3.507
48	2.827	2.912	2.997	3.082	3.167	3.252	3.337	3.422	3.507	3.593	3.678	3.763
50	3.051	3.140	3.228	3.317	3.405	3.494	3.583	3.671	3.760	3.848	3.937	4.026
52	3.283	3.375	3.467	3.559	3.651	3.743	3.836	3.928	4.020	4.112	4.204	4.296
54	3.522	3.618	3.713	3.809	3.905	4.001	4.096	4.192	4.288	4.383	4.479	4.575
56	3.769	3.868	3.968	4.067	4.166	4.265	4.365	4.464	4.563	4.662	4.761	4.861
58	4.024	4.127	4.229	4.332	4.435	4.538	4.641	4.743	4.846	4.949	5.052	5.154
60	4.286	4.393	4.499	4.605	4.712	4.818	4.924	5.031	5.137	5.243	5.350	5.456

6.4. Valores en porcentaje de troza y leña

Empíricamente en el Instituto Nacional de Bosque, se utiliza un valor de porcentaje para troza y leña del volumen total del árbol, valores que son de 70% de Troza y 30% de leña, estos valores se han generalizado para todas las especies, además, estos valores son provenientes de plantaciones forestales, sin embargo, tal y como se muestra en el cuadro 7, los valores para Matilisguate son diferentes según su clase diamétrica, con un promedio general de 32.82% para el producto troza y 67.18% para el producto leña.

Tabla 11

Valores en porcentaje para productos de troza y leña de la especie evaluada.

Clase diamétrica	% volumen troza	% volumen leña
20-24.9	23.35	76.65
25-29.9	30.02	69.98
30-34.9	26.21	73.79
35-39.9	32.70	67.30
40-44.9	36.62	63.38
45-49.9	37.67	62.33
50-54.9	35.80	64.20
55-60	40.19	59.81
Promedio	32.82	67.18

6.5. Análisis del cálculo de volumen comparando las fórmulas utilizadas por INAB

El Instituto Nacional de Bosque utiliza la fórmula de la FAO, para el cálculo de volumen total de árboles, sin embargo, esta fórmula es mal utilizada por que fue creada para alturas comerciales y debido a la falta de investigaciones se recurre a usarla tomando la altura total. Formula de factor de forma, es utilizada de manera empírica utilizando un factor de forma de 0.62, para todas las especies. En tabla 12, se comparan los datos volumétricos de las fórmulas anteriormente mencionas con el modelo seleccionado respecto al volumen obtenido en campo.

Tabla 12

Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.

DAP (cm)	Altura (m)	Volumen real (m ³)	Fórmulas utilizadas por INAB		Modelo seleccionado (m ³)
			F.FORMA (m ³)	FAO (m ³)	
20.3	10	0.42	0.2	0.3	0.52
21	10.3	0.48	0.22	0.32	0.57
22.2	10.5	0.58	0.25	0.35	0.65
23	11	0.59	0.28	0.38	0.72
24.2	11.5	0.67	0.33	0.42	0.82
24.5	11.9	0.68	0.35	0.44	0.85
25.2	11.58	0.68	0.36	0.45	0.89
25.8	13.2	0.69	0.43	0.52	1

Continúa Tabla 12. Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.

Continuación de Tabla 12. Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.

DAP (cm)	Altura (m)	Volumen real (m ³)	Fórmulas utilizadas por INAB		Modelo seleccionado (m ³)
			F.FORMA (m ³)	FAO (m ³)	
26	13.5	0.69	0.44	0.53	1.03
27.5	14	0.77	0.52	0.6	1.17
28.4	14.5	0.81	0.57	0.65	1.27
29.2	15.2	0.84	0.63	0.71	1.37
30.5	15.2	1.08	0.69	0.77	1.48
31.8	14.5	0.97	0.71	0.79	1.55
32	15.4	1.19	0.77	0.84	1.62
32.6	16.5	1.23	0.85	0.92	1.74
33	14.6	1.86	0.77	0.85	1.66
34.8	17.3	1.86	1.02	1.08	1.99
35.9	15.5	1.88	0.97	1.04	1.99
36.1	13.8	1.89	0.88	0.94	1.9
36.2	18.1	2	1.15	1.21	2.18
37.5	16.5	1.99	1.13	1.19	2.21
38.5	18.5	2.21	1.34	1.38	2.45
39.2	15.1	2.02	1.13	1.19	2.29
39.7	14.3	1.99	1.1	1.16	2.28
40	13.9	2.06	1.08	1.14	2.28
41	15.5	2.13	1.27	1.32	2.5
41.6	14.5	2.11	1.22	1.28	2.49
43.5	18	2.27	1.66	1.69	2.97
44	19.3	2.59	1.82	1.85	3.13
44.2	16.1	2.27	1.53	1.57	2.9
44.7	18.9	2.63	1.84	1.86	3.18
45.5	17.8	2.63	1.79	1.82	3.19
46.7	18.8	2.67	2	2.01	3.41
48	18.5	3.08	2.08	2.09	3.55
48.5	16.7	2.81	1.91	1.93	3.46
49	16.4	2.74	1.92	1.94	3.49
49.6	20	3.3	2.4	2.4	3.88
50	19	3.37	2.31	2.32	3.85
50.5	16.5	2.93	2.05	2.06	3.69
50.9	18.8	3.39	2.37	2.37	3.95
52.5	16.3	3.13	2.19	2.2	3.93
53.2	17.9	3.41	2.47	2.46	4.17
53.5	19.5	3.55	2.72	2.7	4.36

Continúa Tabla 12. Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.

Continuación de Tabla 12. Calculo de volúmenes utilizando diferentes fórmulas.

DAP (cm)	Altura (m)	Volumen real (m ³)	Fórmulas utilizadas por INAB		Modelo seleccionado (m ³)
			F.FORMA (m ³)	FAO (m ³)	
53.7	19.2	3.54	2.7	2.68	4.36
55.8	20.2	3.77	3.06	3.03	4.75
57	18.5	3.61	2.93	2.9	4.75
58.1	20.8	4.02	3.42	3.37	5.15
59	19.9	4.06	3.37	3.33	5.19
59.5	20	4.49	3.45	3.4	5.27
60	20.6	4.69	3.61	3.56	5.41

Fórmula de factor de forma:

$$V = 0.7854 * (D^2 * H) * 0.62$$

Fórmula de FAO:

$$V = 0.108337266 + 0.000046499 * (D^2 * H)$$

Fórmula de modelo seleccionado:

$$V = -0.239998 + 0.001772DH + 0.000962D^2$$

En la siguiente grafica se puede observar el comportamiento que presentan los volúmenes calculados con las fórmulas que utiliza INAB (formula de factor de forma 0.62 y la fórmula empleada por FAO), y el modelo seleccionado, con respecto al volumen real.

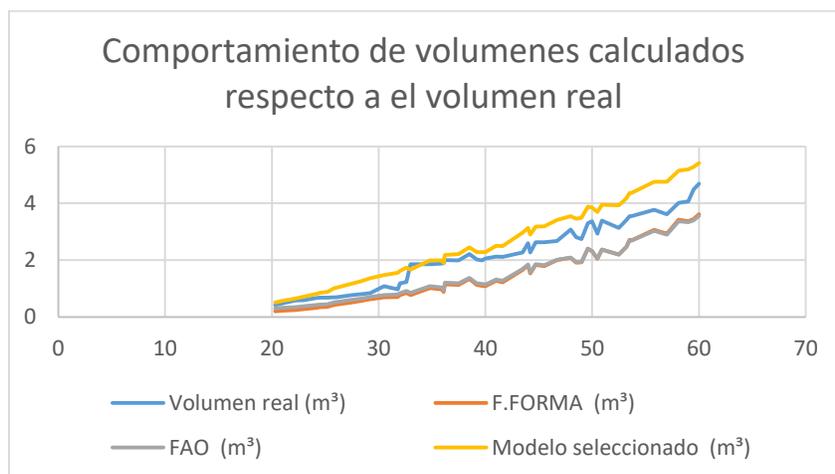


Figura 3. Representación gráfica de los volúmenes estimados comparados con el volumen real.

6.5.1. Prueba t de Student para medias dependientes

Luego de observar la figura 6. Comportamiento de volúmenes calculados respecto al volumen real, se realizó una prueba t Student, para medias dependientes, con el objetivo de evaluar si presentan diferencias significativas entre las medias.

Tabla 13

Prueba T Student (Muestras dependientes).

	<i>Volumen real</i> (m^3)	<i>F.FORMA</i> (m^3)	<i>FAO</i> (m^3)	<i>Modelo seleccionado</i> (m^3)
Media	2.18	1.50	1.54	2.66
Varianza	1.39	0.96	0.87	2.01
Observaciones	51.00	51.00	51.00	51.00
Grados de libertad		50.00	50.00	50.00
Estadístico t		7.44	6.84	-10.99
Valor crítico de t (dos colas)		2.01	2.01	2.01

En la prueba se observa que el estadístico t es menor que el valor crítico t (dos colas) para el modelo seleccionado, lo cual indica que no existen diferencias significativas entre el volumen real y el volumen calculado con el modelo seleccionada, lo contrario se observa para las fórmulas que utiliza INAB, donde si hay diferencia significativa con respecto a la media del volumen real, ambas con un valor estadístico t mayor al valor crítico de t (dos colas).

Las diferencias que se observan entre las fórmulas utilizadas por INAB, para el cálculo de volumen total, se debe a que estas fueron desarrolladas en bosques tropicales y plantaciones, lo que provoca que con ellas se subestime el volumen, debido a que un árbol que crece de forma natural en sistemas agroforestales no tendrá el mismo desarrollo comparado con uno que proviene de bosque tropicales o plantaciones, recordando que en un bosque hay mayor competencia en cuanto a desarrollo de altura entre la flora presente, lo que provoca mayor porcentaje de desarrollo en fuste para cualquier árbol.

7. CONCLUSIONES

Derivado del análisis estadístico de los modelos seleccionados, se determinó que el modelo $V = -0.239998 + 0.001772DH + 0.000962D^2$, es el que mejor ajuste tiene respecto a los datos de volumen real obtenidos, para los árboles de la especie de Matiliguat, no presenta problemas de multicolinealidad, presenta el mejor grado de ajuste por su error estándar, altamente predictivo por su coeficiente de determinación ajustado y mejor bondad de ajuste en su AIC. En tal sentido la utilización del modelo seleccionado proporciona un cálculo volumétrico con mayor exactitud y una aproximación más cercana a la realidad, disminuyendo sobreestimaciones y subestimaciones en la estimación de volumen por lo que al utilizar el modelo seleccionado produce una estimación notablemente mejor que las obtenidas por otras ecuaciones utilizadas por INAB, para el departamento de Escuintla.

Por medio de la validación del modelo con mejor ajuste se procedió a realizar la respectiva tabla de volumen específica para la especie de Matiliguat, que es una herramienta útil para la estimación de volumen de manera rápida y de mayor exactitud, y facilita la planificación, investigación y elaboración de planes de manejo.

La tabla de volumen está dada para una clase diamétrica que va de 20 hasta 60 centímetros de diámetro y una altura de 10 hasta 21 metros (tomando como referencia las alturas mínimas y máximas muestreadas), por debajo de la primera clase diamétrica el producto obtenido no es comercial y para la segunda clase diamétrica, establecida como la máxima por que la frecuencia de encontrar arboles con datos dasometricos mayores a 60 centímetros no es común, además, son arboles longevos que presentan en su mayoría pudriciones en su duramen y deformaciones por lo que no son de interés comercial.

Debido a que el Instituto Nacional de Bosques, ha generalizado otorgar un porcentaje de troza del 70% y de leña del 30% sobre el volumen total calculado de un árbol y este dato proviene de plantaciones de coníferas, en el presente estudio se calculó de los datos de volúmenes totales de la muestra y se obtuvo un promedio del porcentaje, para el producto troza de 32.82% y 67.18% para el producto de leña por cada árbol de Matiliguat.

8. RECOMENDACIONES

Continuar con el proceso de generar tablas de volumen y validar modelos para el cálculo de volumen para cada una de las especies que mayor demanda tenga en el departamento de Escuintla, debido a que no se puede generalizar una fórmula específica, para tal cálculo por las irregularidades en crecimiento y desarrollo que tienen los árboles de especies latifoliadas.

Validar modelos para plantaciones de Matiliguaté ya que el comportamiento en cuanto a desarrollo y crecimiento es diferente al evaluado en esta investigación, debido a que en plantaciones las especies tienden a tener una mayor altura y poco desarrollo de ramas caso contrario en árboles establecidos en sistemas agroforestales.

El modelo validado se debe utilizar únicamente para el cálculo de volumen en árboles que se encuentran establecidos en sistemas agroforestales y que sus datos dasométricos se encuentren dentro del rango de 20 hasta 60 centímetros de diámetro y alturas de 10 hasta 21 metros, no es aconsejable utilizar datos dasométricos fuera de estos rangos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, IT, Estudio FAO: Montes 22. v. 2, 80 p.
- Castañeda Salguero, C. (2004). Árboles y arbustos de los bosques secos de Guatemala. Instituto Nacional de Bosques de Guatemala. 199 p.
- Freese, F. (1970). Métodos Estadísticos Elementales Para Técnicos Forestales. México, D.F. Centro regional de ayuda técnica.
- Francisco Caballero. (2011) Selección de Modelos Mediante Criterios de Información en Análisis Factorial, Granada, España. 171p.
- Gerson Alvarado. (2003). Tablas de volumen local para Santa María (*Calophyllum brasiliense* Camb.) y Malerio Colorado (*Aspidosperma megalocarpum* Muell.) en la unidad de manejo de las ventanas, zona de usos múltiples de la Reserva de la Biosfera Maya, Peten, Guatemala. 52p.
- Hugo Armas. (2004). Elaboración de tablas de volumen general para Palo Blanco *Cybastax donnell-smithii* (Rose) dentro de la zona de vida bosque muy húmedo subtropical (cálido) en el Departamento de Suchitepéquez. Guatemala. 53p
- Instituto Nacional De Bosques. (1999). Manual Técnico Forestal, Ed. Guatemala. 110 p.
- Instituto Nacional Forestal (1997). Tablas de Volumen Para Las Especies De Coníferas De Guatemala. Proyecto/PNUD/FAO/GUA/72/006. Guatemala.
- Instituto Nacional De Bosques (2015). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal. Serie Técnica LT-002(2015). Guatemala. 63 p.

- Lec De León, (1997). Tablas para la estimación de productos en rollo de pino colorado (*Pinus hartwegii* Lindl) en el área de distribución natural en el departamento de Huehuetenango. Tesis Ing. For Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Nor- Occidente. 84p
- Martínez Leiva, 1999. Tablas para la estimación de productos en rollo de ciprés común (*Cupressus lusitanica* Miller). En el área de distribución natural, en el departamento de Huehuetenango. Tesis Ing. For. Universidad de san Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Nor- Occidente. 105 p.
- Peters, R. (1977). Tablas generales de volumen para coníferas de Guatemala. Proyecto PNUD/FAO/GUA/72.
- Roberto Kometter. (2007). Metodología para elaborar tablas nacionales de conversión volumétrico de madera rolliza en pie a madera a madera aserrada calidad exportación. CITES. Nicaragua. 32p.
- Rojas, A. (1973). Dasometría práctica. Escuela Nacional de Ciencias Forestales Honduras.
- Salazar, R. 1997. *Tabebuia rosea* (Bertol) DC. Nota Técnica sobre Manejo de Semillas Forestales, CATIE, No. 8. 2 pp.
- Sistema integrado de información taxonómica ITIS (2016). Código taxonómico base de datos Version 4.0.4. (en línea). EE.UU. Consultado 10 de Octubre de 2016. Disponible en <https://www.itis.gov/servlet>.
- Tapia, Juan; Návar, Jose. (2011), Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahustamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. En bosque de pino de la sierra madre oriental de Nuevo León, México. Xalapa, México. 11-28 pp.

10. ANEXOS



Figura 4. Cinta diamétrica



Figura 5. Cinta métrica



Figura 6. Fléxometro



Figura 7. Motosierra



Figura 8. GPS Garmin



Figura 9. Selección de árboles muestras y dirección de corte

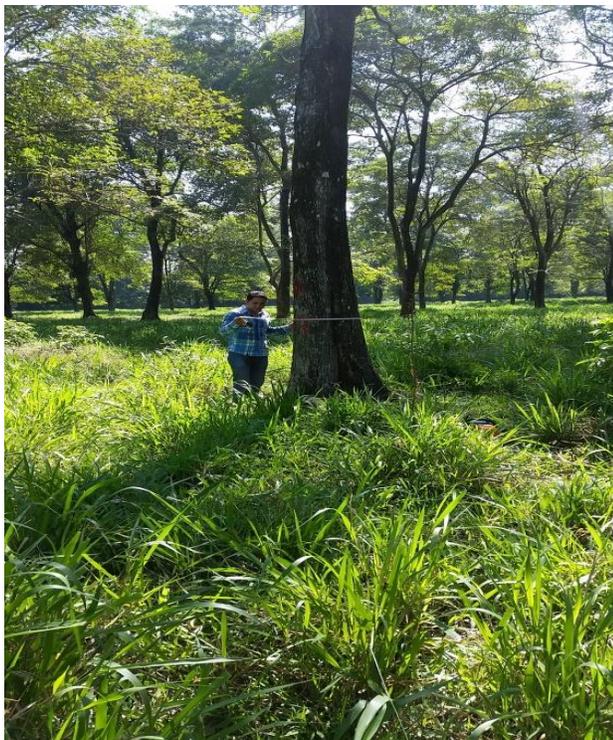


Figura 10. Medición de diámetro a la altura de pecho (1.30 mts).



Figura 11 Apeo de árboles muestra



Figura 12. Medición del Volumen de Troza.



Figura 13. Medición de volumen de copa por medio de tareas.



Figura 14. Medición de altura real.



Figura 15. Ubicación geográfica de árboles muestra y medición de tocones.



Figura 16. Volumen de copa y de troza de un árbol muestra.

Boleta para levantamiento de datos.				
No. De árbol				
Coordenadas	X	Y		
Datos Dasometricos				
DAP (centímetros)	Altura (Metros)			
Largo Total del árbol				
	No de trozas	Área 1	Área 2	Largo de sección
Altura del tocón				
Tareas de leña				

Tabla 14
Formato de boleta de campo.

Mapa: Ubicación geográfica de arboles muestra.

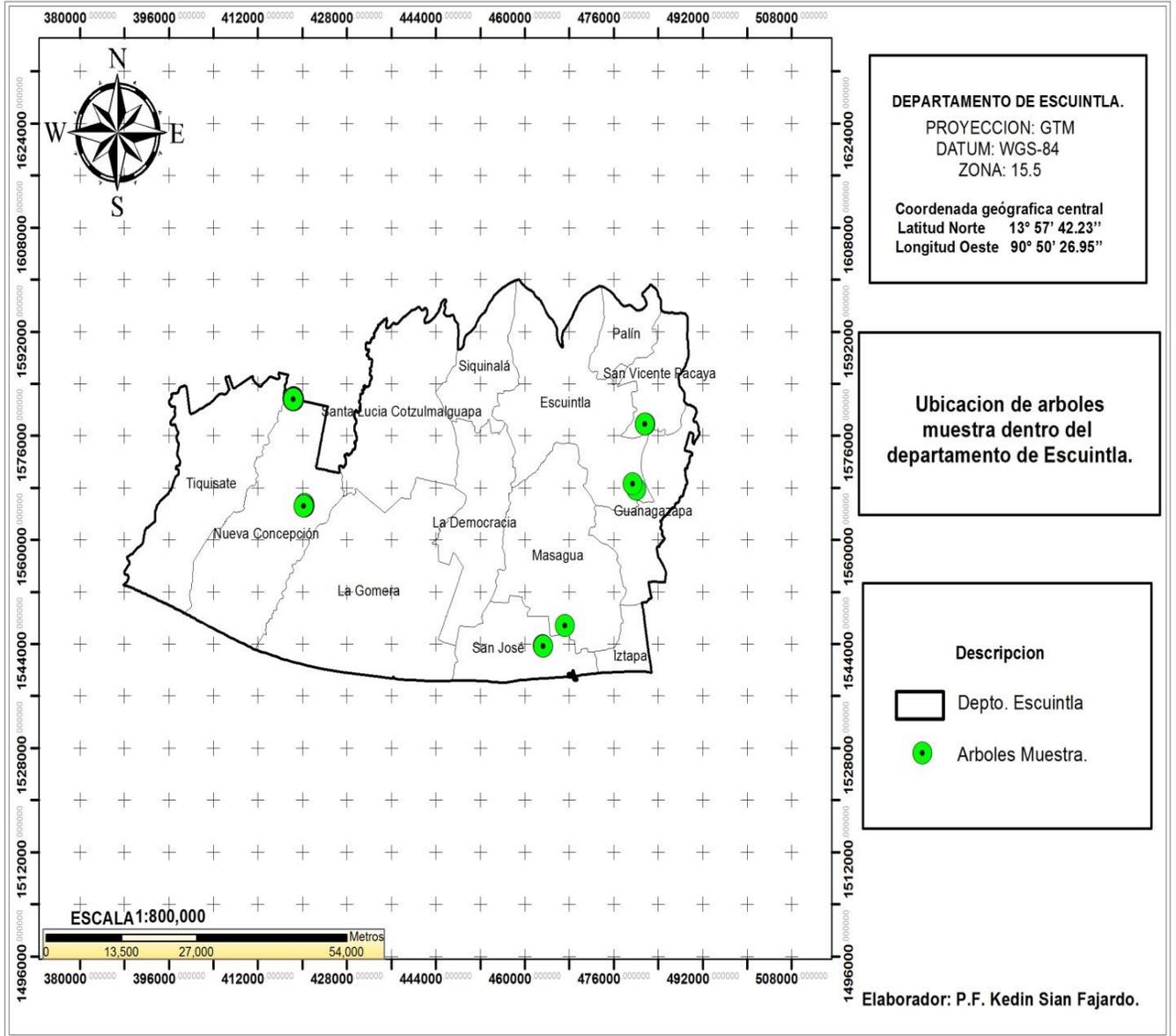


Figura 17. Ubicación geográfica de árboles muestra.

Diagnostico de colinealidad											
Modelo	Dimensión	Índice de condición	Estadísticas de colinealidad		Correlaciones Parcial	Modelo	Dimensión	Índice de condición	Estadísticas de colinealidad		Correlaciones
			Tolerancia	VIF					Tolerancia	VIF	
13	1	1				8	1	1			
	2	9.467	0.011	94.136	-0.617		2	4.484	0.004	278.662	0.705
	3	29.038	0.222	4.511	0.955		3	27.517	0.033	29.88	-0.629
	4	343.025	0.01	100.979	0.633		4	110.394	0.007	149.733	-0.389
10	1	1				7	1	1			
	2	5.122	0.005	203.151	0.104		2	4.872	0.01	105.176	-0.123
	3	23.111	0.014	70.29	-0.172		3	20.128	0.005	203.338	0.312
	4	158.625	0.002	463.912	0.298		4	84.731	0.029	35.017	0.497
9	1	1				2	1	1			
	2	4.524	0.019	53.059	0.541		2	4.664	0.041	24.395	0.519
	3	32.073	0.024	42.325	0.497		3	27.955	0.041	24.395	0.606
	4	47.439	0.011	91.995	-0.16						
11	1	1				14	1	1			
	2	4.183	0.017	58.955	0.597		2	9.563	0.018	55.554	0.806
	3	25.708	0.198	5.043	0.421		3	73.558	0.014	69.861	-0.463
	4	47.911	0.014	72.34	-0.013		4	237.434	0.173	5.78	0.314
5	1	1				3	1	1			
	2	4.232	0.079	12.618	0.45		2	3.898	0.019	53.023	0.234
	3	17.533	0.079	12.618	0.798		3	34.565	0.019	53.023	0.496
4	1	1				1	1	1			
	2	4.061	0.22	4.535	0.189		2	8.734	0.224	4.472	0.934
	3	25.791	0.22	4.535	0.915		3	25.221	0.224	4.472	0.189
12	1	1				6	1	1			
	2	27.912	0.191	5.243	0.862		2	3.421	0.018	56.527	0.601
	3	73.092	0.191	5.243	-0.052		3	31.148	0.018	56.527	-0.072

Tabla 15
Diagnóstico de colinealidad de los modelos evaluados.

Análisis de regresión no lineal									
Modelo 1									
Volumen_total $a+b*Dap^2*Altura$									
Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración			
Volumen total	51	0.05	0.23	-1.60	4.19	3			
Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor		
A	-1E30	1E30	1.0E-03	0.41	0.06	7.01	<0.0001		
B	-1E30	1E30	1.0E-03	5.8E-05	1.6E-06	35.68	<0.0001		
Matriz de correlación de las estimaciones									
	A	B							
A	1.00	-0.84							
B	-0.84	1.00							
Modelo 2									
Volumen_total $a+b*Dap*Altura+c*Dap^2$									
Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración			
Volumen total	51	0.03	0.18	-27.12	-19.39	6			
Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor		
A	-1E30	1E30	1.0E-03	-0.24	0.08	-2.97	0.0047		
B	-1E30	1E30	1.0E-03	1.8E-03	4.2E-04	4.20	0.0001		
C	-1E30	1E30	1.0E-03	6.9E-04	1.3E-04	5.28	<0.0001		
Matriz de correlación de las estimaciones									
	A	B	C						
A	1.00	-0.76	0.63						
B	-0.76	1.00	-0.98						
C	0.63	-0.98	1.00						
Modelo 5									
Volumen_total $a+b*Dap*Altura^2+c*Dap^2$									
Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración			
Volumen total	51	0.03	0.18	-22.68	-14.95	4			
Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor		
A	-1E30	1E30	1.0E-03	0.02	0.06	0.40	0.6907		
B	-1E30	1E30	1.0E-03	4.9E-05	1.4E-05	3.49	0.0010		
C	-1E30	1E30	1.0E-03	9.0E-04	9.8E-05	9.16	<0.0001		
Matriz de correlación de las estimaciones									
	A	B	C						
A	1.00	0.02	-0.27						
B	0.02	1.00	-0.96						
C	-0.27	-0.96	1.00						
Modelo 4									
Volumen_total $a-b*Altura^2+c*Dap^2*Altura$									
Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración			
Volumen total	51	0.05	0.23	-0.21	7.52	5			
Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor		
A	-1E30	1E30	1.0E-03	0.33	0.13	2.51	0.0155		
B	-1E30	1E30	1.0E-03	-6.2E-04	8.1E-04	-0.76	0.4529		
C	-1E30	1E30	1.0E-03	5.5E-05	3.7E-06	14.69	<0.0001		
Matriz de correlación de las estimaciones									
	A	B	C						
A	1.00	0.89	0.64						
B	0.89	1.00	0.90						
C	0.64	0.90	1.00						

Tabla 16
Regresión lineal de los modelos 1, 2, 4 y 5.

Correlaciones parciales para el modelo 2							
Variables de control			V	DH	Variables de control		
DD V	Correlación	1	0.519	DD V	Correlación	1	0.606
	Significancia (bilateral)	-	0.00		Significancia (bilateral)	-	0.00
	g!	0	48		g!	0	48
DH	Correlación	0.519	1	DH	Correlación	0.606	1
	Significancia (bilateral)	0.00	-		Significancia (bilateral)	0.00	-
	g!	48	0		g!	48	0

Correlaciones parciales para el modelo 5							
Variables de control			V	DH	Variables de control		
DD V	Correlación	1	0.45	DD V	Correlación	1	0.798
	Significancia (bilateral)	-	0.00		Significancia (bilateral)	-	0.00
	g!	0	48		g!	0	48
DH	Correlación	0.45	1	DH	Correlación	0.798	1
	Significancia (bilateral)	0.00	-		Significancia (bilateral)	0.00	-
	g!	48	0		g!	48	0

Tabla 17
Correlaciones parciales de los modelos 2 y 5.

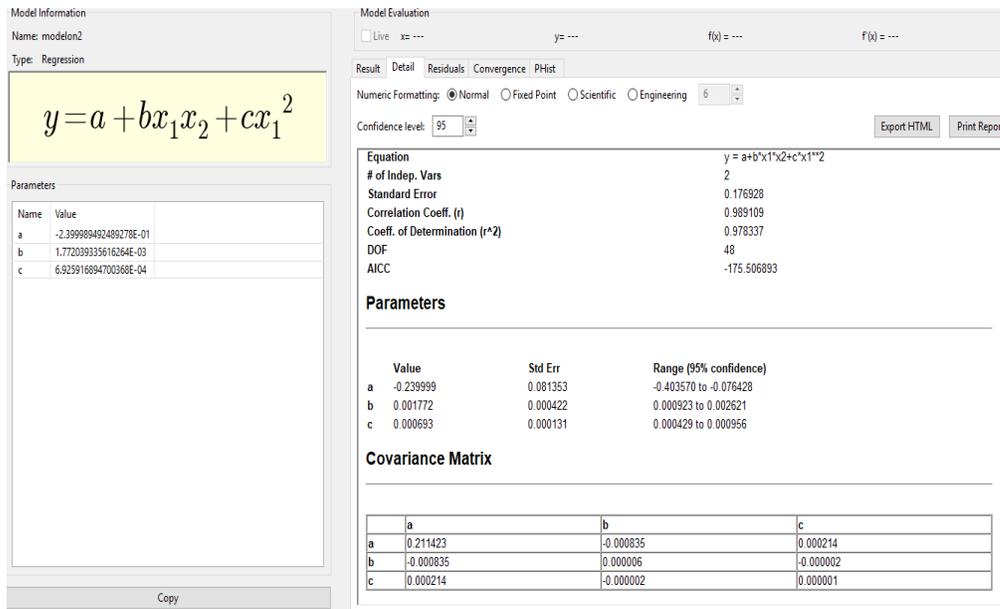


Figura 18. Estadísticos del modelo seleccionado (Curve Expert Professional).

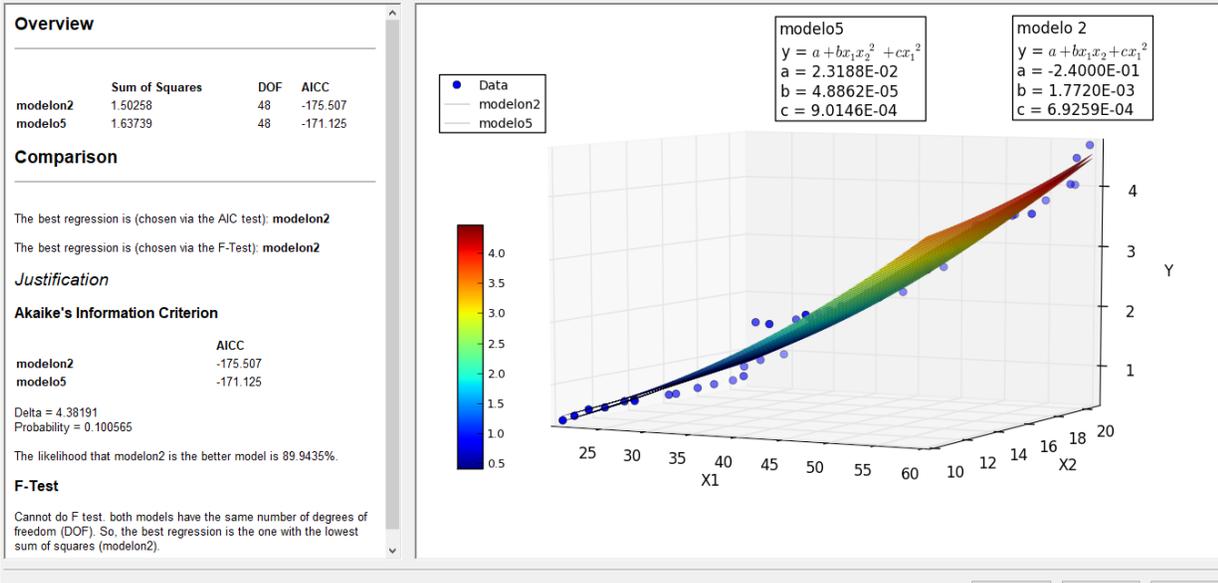


Figura 19. Comparación de los dos mejores modelos.