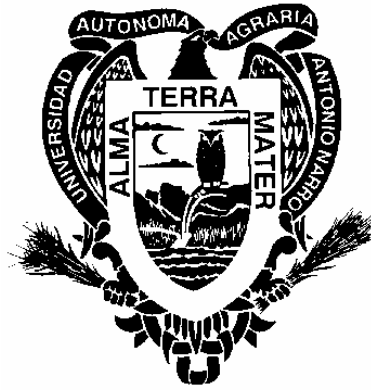


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Evaluación de Cuatro Modelos Matemáticos Usando PROC REG y PROC NLIN,
para Cuantificar Biomasa Aérea en *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila

Por:

CARLOS ROBERTO PÉREZ QUEN

Tesis

Presentada como requisito parcial para

obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Evaluación de Cuatro Modelos Matemáticos Usando PROC REG y PROC NLIN,
para Cuantificar Biomasa Aérea en *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila

Por:

CARLOS ROBERTO PÉREZ QUEN

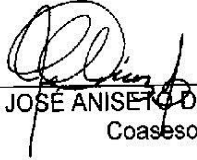
Tesis

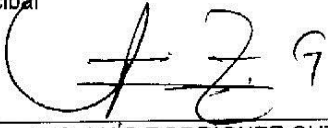
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

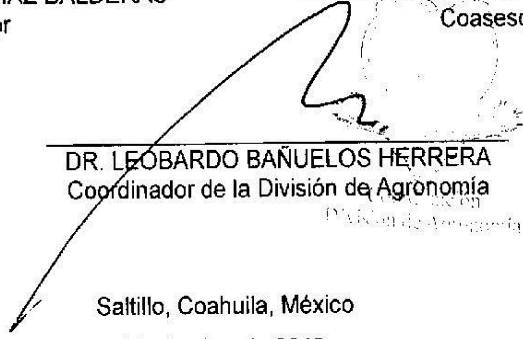
INGENIERO FORESTAL

Aprobada


DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ
Asesor Principal


M.C. JOSÉ ANISETO DÍAZ BALDERAS
Coasesor


M.C. LUÍS RODRIGUEZ GUTIÉRREZ
Coasesor


DR. LEOBARDO BAÑUELOS HERRERA
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Noviembre de 2012

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo amor y cariño:

A **DIOS** que me dio la oportunidad de vivir y darme una familia maravillosa con la que cuento.

Con mucho cariño principalmente a mis padres **Sr. Roberto Pérez Juárez (+)** y **Sra. Lourdes del Carmen Quen Hernández**, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos muy difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén siempre conmigo. Papá aunque físicamente no estés conmigo siempre estarás en mi corazón y en mis recuerdos, porque mucho de este resultado es gracias a ti. Dios te bendiga donde estés.

A mi hermano Dagoberto por estar siempre conmigo y apoyarme siempre, te quiero mucho. A mi prima Martha por ser como una hermana y estar siempre conmigo.

A mis tíos, tías, primos, primas, sobrinos y sobrinas, quisiera nombrarlos a cada uno de ustedes pero son muchos, pero eso no quiere decir que no me acuerde de ustedes, los quiero mucho.

A mi abuelita Ninfa Hernández González (+), a pesar de que no estás ahora en estos momentos conmigo, estoy seguro de que tu alma si lo está, y porque tu sueño fue el verme realizado, te dedico con todo mi corazón mi tesis. Nunca te olvidaré...

A mi abuelita Casiana Juárez Ramírez, que con la sabiduría me ha enseñado a ser quien soy hoy, gracias por tus consejos, por el amor que me has dado y por tu apoyo incondicional en mi vida. Gracias por llevarme en tus oraciones porque estoy seguro que siempre lo haces.

AGRADECIMIENTO

A la UAAAN, mi “Alma Mater”, por haberme dado la oportunidad de haber formado parte de ella y de brindarme todo el apoyo para realizar mis estudios de Ingeniero Forestal con bases sólidas, para ser todo un profesional con buenos valores.

A mis padrinos Margarita Notario y Marcos Suárez, por brindarme su apoyo incondicional en este reto de mi vida.

Al Maestro Carlos Medina, Ing. Benigno Martínez, Sr. David Salavarría y Héctor Hernández, gracias por ese apoyo que tuve de ustedes y que de alguna manera se ve reflejado en la culminación de mi carrera profesional.

A mis amigos, Rocío, David, Ángela, Ma. Antonia, Ma. Elena, Karen, Wendy, Deisy, Rafael, Ismael, Luis Alejandro, José Isabel y Santiago Abelardo, por pasar a mi lado todos los momentos de mi vida universitaria y estar siempre en las buenas y en las malas, jamás los olvidaré.

Al Dr. Jorge Méndez González, asesor de tesis, quien me dio la oportunidad de trabajar con él, gracias por todo su apoyo y confianza que depositó en mi.

A mis Coasesores: M.C. José Aniseto Díaz Balderas y M.C. Luís Rodríguez Gutiérrez; gracias por darme la oportunidad y por el tiempo que me dedicaron para revisar este trabajo.

A todos los Profesores del Departamento Forestal, por compartir sus conocimiento y apoyarme en cada momento que así lo requería, en especial al M.C. Andrés Nájera Díaz, por haberme permitido formar parte del EMC-AN, el cual es de orgullo ya que muy pocos hemos sido los que hemos formado parte de él y gracias por todo su apoyo y consejos.

Gracias a todos aquellos que no están aquí, pero que me ayudaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.

Carlos Roberto Pérez Quen.

Noviembre de 2012.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESÚMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo.....	4
1.2. Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Gases de Efecto Invernadero	5
2.2. Formas de capturar carbono.....	5
2.3. Biomasa forestal	6
2.4. Modelos matemáticos	7
2.5. Procedimiento lineal (PROC REG) y procedimiento no lineal (PROC NLIN)	8
2.6. Medición de biomasa aérea.....	9
2.7. Algunos estudios realizados para estimar biomasa	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1. Ubicación	12
3.2. Descripción del área de estudio.....	13
3.3. Fuente y selección de árboles	13
3.4. Procedimiento	14
3.4.1. Variables evaluadas	14
3.4.2. Pesaje de componentes y obtención de muestras	15
3.4.3. Obtención del peso seco de las muestras.	15
3.4.4. Estimación de la biomasa aérea.....	16
3.5. Análisis estadístico	16
3.6. Ajuste de modelos para calcular biomasa aérea de <i>Pinus greggii</i> Engelm.	16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19

4.1. Estadísticos de regresión promedio por componente de biomasa de <i>Pinus greggii</i> Engelm. para cada modelo usando PROC REG y PROC NLIN	20
4.2. Evaluación de modelos con PROC REG y PROC NLIN por componentes en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Arteaga, Coahuila	26
4.3. Selección del mejor modelo matemático para estimar biomasa de <i>Pinus greggii</i> Engel. por componente	26
4.4. Comportamiento de C.V. y de R^2 en componentes BHR, BF y BT de <i>Pinus greggii</i> Engelm. con el mejor modelo.....	27
5. CONCLUSIONES	34
6. RECOMENDACIONES	36
7. LITERATURA CITADA.....	37
APÉNDICE.....	45

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Modelos probados para estimar biomasa por componente en <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.....	17
Cuadro 2. Valores máximos y mínimos por grupo de variables evaluadas en <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.....	19
Cuadro 3. Selección de mejor modelo de acuerdo a estadísticos de regresión promedio, por componente y total en <i>Pinus greggi</i> Engelm., en Los Lirios Arteaga, Coahuila.	21
Cuadro 4. Comparación de la R^2 por componente con PROC REG y PROC NLIN con estudios recientes, en <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Ubicación geográfica del área CAESA de la UAAAN.....	12
Figura 2. Relación de estadísticos de regresión en la estimación de biomasa, a diferentes tamaños de muestra considerando ambos procedimientos (PROC REG y PROC NLIN).....	29
Figura 3. Relación de biomasa observada y estimada con procedimiento lineal y no lineal por componentes en <i>Pinus greggi</i> Engel., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	31
Figura 4. Biomasa aérea estimada con el modelo 4 en 250 árboles de <i>Pinus greggi</i> Engel., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.....	32
Figura 5. Distribución de residuales del modelo 4 PROC NLIN y modelo 3 PROC REG en el componente Biomasa Total con 250 árboles de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	33

RESÚMEN

En este trabajo se evaluó la efectividad de cuatro modelos matemáticos, para cuantificar biomasa de Hojas y Ramas (BHR), de Fuste (BF) y Total (BT) de *Pinus greggii* Engelm., en un total de 250 árboles. Los datos se clasificaron en ocho grupos de 30 árboles cada uno. Los análisis se realizaron con procedimiento lineal (PROC REG) y no lineal (PROC NLIN), en el paquete estadístico SAS. Los resultados indican que el procedimiento no lineal estima adecuadamente todos los componentes de biomasa, en todos los modelos matemáticos evaluados. La BF es la que mejor se estima, obteniendo una R^2 de 0.93; mientras que el componente que menos se ajusta es BHR, con una R^2 de 0.87. El modelo $y = a x^b c^x$ estima eficientemente todos los componentes de biomasa de *Pinus greggii* Engelm.

PALABRAS CLAVES: modelo matemático, biomasa, análisis de regresión, *Pinus greggii* Engelm. Coahuila.

1. INTRODUCCIÓN

Estudios sobre el calentamiento global señalan un panorama bastante preocupante para los próximos 100 años, las temperaturas medias del globo pudiesen alcanzar incrementos de entre 1.4 y 5.6° C superiores a las previsiones de 1 a 3.5° C hechas con anterioridad (IPCC, 2001). Se sabe que entre los responsables del aumento de la temperatura global está el CO₂ atmosférico, cuya concentración ha aumentado considerablemente a partir de la era industrial debido al uso de los combustibles fósiles; de los 136 Gt C que se estiman fueron emitidas a la atmósfera durante el período 1850 - 1998, el 87% correspondieron a la áreas forestales y el 13 % de cultivo de pastizales (Houghton, 1999; Houghton *et al.*, 1999).

La biomasa ha sido definida como cualquier materia orgánica de origen reciente que se derive de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o de animales (López *et al.*, 2003).

En la actualidad se ha dado una considerable atención a la estimación de biomasa de árboles individuales o rodales forestales. Se han desarrollado ecuaciones que relacionan los componentes raíces, hojas, ramas y fustes, con las características dasométricas de los árboles. El interés radica en entender la productividad del sitio (Bakersville, 1972) y en comparar la productividad del

bosque con modelos convencionales de rendimiento e incremento (Pastor y Bockheim, 1981).

Un modelo representa una abstracción o una representación simplificada de un aspecto de la realidad (Vanclay, 1994). Un modelo únicamente es útil si permite simular, predecir, describir, analizar o evaluar el comportamiento del sistema de una forma más sencilla, más barata, más eficaz o más rápida que la experimentación directa sobre el sistema original. Además, la definición de un sistema mediante una expresión matemática permite obtener una respuesta óptima aplicando técnicas de cálculo analítico y programación lineal (Calama, 2004).

En los proyectos forestales de fijación de carbono es fundamental el desarrollo de modelos matemáticos para estimar el carbono almacenado en árboles, arbustos y palmas (Somarriba y Beer, 1987; IPCC, 2003; Pérez y Kanninen, 2003; Segura *et al.*, 2005; Segura *et al.*, 2006). Dada la importancia ambiental, las ecuaciones de biomasa se han desarrollado en bosques tropicales (Brown *et al.*, 1989), templados (Schroeder *et al.*, 1997; Ter – Mikaelian y Korzukhin, 1997) y algunos tipos de vegetación semiárida (Návar *et al.*, 2001).

El análisis dimensional o alometría es el estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo como resultado de su crecimiento (Huxley, 1932), las relaciones alométricas se han utilizado en especies forestales para estimar la biomasa aérea total a partir del diámetro normal o del área de la albura (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1988; Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996), sirven para relacionar componentes de difícil medición con variables más fáciles de medir (Pastor *et al.*, 1984).

Pinus greggii es una especie endémica de México, se distribuye sobre la Sierra Madre Oriental, presenta rápido crecimiento, en la región norte de México ha mostrado una buena sobrevivencia y desarrollo en sitios secos (400 - 600 mm), características importantes para ser utilizada en plantaciones forestales de restauración en zonas degradadas y para la venta de servicios ambientales por concepto de captura de carbono (Mora, 2010).

1.1. Objetivo

Evaluar cuatro modelos matemáticos usando los procedimientos PROC REG y PROC NLIN, y su eficiencia para cuantificar biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila, México.

1.2. Hipótesis

Ho: Ambos procedimientos PROC REG y PROC NLIN predicen de forma similar la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engel., plantado en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Ha: Ambos procedimientos PROC REG y PROC NLIN no predicen de forma similar la biomasa de *Pinus greggii* Engelm., plantado en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (**GEI**) son vapor de agua (H_2O), bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), óxido de nitrógeno (NO_x), ozono estratosférico (O_3), monóxido de carbono (CO) y clorofluorocarbonos (CFC) (Andrasko, 1990).

Las emisiones naturales de gases de invernadero son relativamente constantes desde hace miles de años, en cambio, las actividades del hombre están dando lugar a que aumente considerablemente la emisión de GEI, entre las fuentes de estos gases están la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y la combustión de madera y carbón vegetal como fuente de energía (Andrasko, 1990).

2.2. Formas de capturar carbono

Consiste en almacenar carbono en los suelos y en la vegetación, siendo el segundo el que asimila el CO_2 atmosférico, formando carbohidratos y ganando volumen (Montoya *et al.*, 1995).

Ordoñez (1999) describe que con el manejo forestal en México, es posible mitigar las crecientes emisiones de CO_2 :

- 1.- Conservando: es decir conservar y crear Áreas Naturales Protegidas y Suelo y el Manejo de bosques naturales, para evitar la liberación del carbono que está ya

fijado, ya que con la destrucción de un bosque se puede liberar a la atmosfera 50 a 400 t C ha⁻¹.

2.- Reforestando: reforestar en áreas o zonas degradadas por medio de plantaciones y/o regeneración natural con tratamientos silvícolas para aumentar el crecimiento, volumen y la extracción de madera de los arboles, con la finalidad de almacenar y aumentar la fijación de carbono.

2.3. Biomasa forestal

La biomasa forestal se define como el peso seco de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo, normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco, frecuentemente para determinarla es necesario separar por componentes, donde lo mas típico es masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta (Schlegel *et al.*, 2000; Gayoso, 2001; Návar *et al.*, 2001; Gasparri y Manghi, 2004; Aguilar, 2009).

La biomasa es importante para cuantificar la cantidad de nutrientes en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación (Fonseca *et al.*, 2009).

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa de un bosque, dentro del primero esta el destructivo que consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando luego su peso seco (Klinge y Herrera, 1983; Brown, 1997; Araujo *et al.*, 1999). Una forma de estimar la biomasa con el método indirecto es a través de ecuaciones y modelos matemáticos.

2.4. Modelos matemáticos

Un modelo matemático es una descripción, en lenguaje matemático, de un objeto que existe en un universo no-matemático. Las previsiones del tiempo, las cuales se basan en un modelo matemático meteorológico; así como con los pronósticos económicos, basados éstos en un modelo matemático referente a economía (Rodríguez y Steegmann, 2012).

La mayoría de las aplicaciones de cálculo (por ejemplo, problemas de máximos y mínimos) implican modelos matemáticos. En términos generales, en todo modelo matemático se puede determinar tres fases:

1. Construcción del modelo. Transformación del objeto no - matemático en lenguaje matemático.
2. Análisis del modelo. Estudio del modelo matemático.
3. Interpretación del análisis matemático. Aplicación de los resultados del estudio matemático al objeto inicial no-matemático.

El éxito o fracaso de estos modelos es un reflejo de la precisión con que dicho modelo matemático representa al objeto inicial y no de la exactitud con que las matemáticas analizan el modelo (Rodríguez y Steegmann, 2012).

Un modelo matemático, de manera muy genérica, puede concebirse como un constructor mental con el que se aspira a estudiar y entender de mejor forma un fenómeno en el que subyace una relación causa efecto del tipo X,Y . En este sentido, el modelo expresa un postulado acerca de esta relación que se define a través de una formulación matemática (Ojeda, 2004).

2.5. Procedimiento lineal (PROC REG) y procedimiento no lineal (PROC NLIN)

En la regresión, un modelo o una ecuación matemática se han desarrollado para describir el comportamiento de una variable de interés. La variable puede ser la tasa de crecimiento de un árbol o el porcentaje de cobertura de la vegetación. Esto se conoce como la variable dependiente, y se denota por variables “Y”. Otros que se cree que proporcionan información sobre el comportamiento de la variable dependiente se incorporan en la ecuación como variables explicativas. Estas variables (por ejemplo, el diámetro de las plántulas) se llaman variables independientes y se denota por “X” (Sit *et al.*, 1994).

Además de las variables independientes en una ecuación de regresión también implica coeficientes desconocidos llamados parámetros que definen el comportamiento del modelo. Parámetros indicados por letras minúsculas (a, b, c, etc.) (Sit *et al.*, 1994). Una curva de respuesta representa la verdadera relación entre las variables dependientes e independientes. En el análisis de regresión, se desarrolla un modelo para aproximar la curva respuesta - un proceso que estima los parámetros a partir de los datos disponibles (Sit *et al.*, 1994).

Un modelo lineal es aquel que es lineal en los parámetros – es decir, cada término en el modelo contiene sólo un parámetro que es una constante multiplicativa de la variable independiente, todos los demás son modelos no lineales (Rawlings, 1988).

Un modelo no lineal es intrínsecamente lineal. Esto significa que puede hacerse lineal con una apropiada transformación (Sit *et al.*, 1994).

2.6. Medición de biomasa aérea

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo (Brown *et al.*, 1989) o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas; el segundo caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles, para ello se debe contar con funciones que estimen la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas (Huxley, 1932).

Las relaciones alométricas se han utilizado en especies forestales de clima templado - frío para estimar la biomasa aérea total y el área foliar, a partir de diámetro a la altura del pecho (DAP; 1.30 m) o del área de la albura (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1988; Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996) sin embargo, su uso en la especie del bosque mesófilo de montaña ha sido escaso.

2.7. Algunos estudios realizados para estimar biomasa

Méndez *et al.* (2005) estimaron la biomasa fustal en *Pinus cooperi* y *Pinus leiophylla*. La investigación se realizó en cuatro predios forestales de la región de El Salto, Durango. La biomasa se estimó a partir de la densidad básica de la madera, la cual se obtuvo de rodajas individuales provenientes del fuste de cada árbol y respetando las medidas comerciales de las trozas. Se ajustaron ecuaciones de las más citadas en la literatura, utilizadas para estimar volumen. Los resultados mostraron que en general los modelos probados predicen bien la

biomasa de ambas especies, reportando que el modelo de Meyer Modificado presentó el mejor ajuste para estimar biomasa fustal en *Pinus cooperi* var *ornelasi* / Mtz ($R^2=0.9692$) y *P. leiophylla* Schl. & Cham. ($R^2=0.9535$). La densidad básica de la madera mostró diferencias entre árboles y entre especies, registrando en *P. leiophylla* la densidad más alta.

Méndez *et al.* (2006) ajustaron ecuaciones matemáticas para estimar volumen, peso verde y biomasa en árboles completos de *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* en una región del municipio de Mexicali, Baja California. La biomasa de esta especie se estima eficientemente con los modelos que incluyen solamente el diámetro a la base, donde los porcentajes se obtuvieron en la biomasa fustal oscilan desde 41.38 hasta 77.27 %, mientras que en las hojas - ramas se presenta una variación desde 22.72 a un máximo de 58.61 %, en intervalos de 13 a 23 cm de diámetro. Los componentes ramas, ramillas y fuste principal mostraron patrones de tendencia diferente a la biomasa total.

Acosta-Mireles *et al.* (2002) generaron ecuaciones alométricas para seis especies forestales del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino (*Quercus spp*) en Oaxaca, México. Todas las ecuaciones fueron de la forma $Y=bX^k$, donde Y es la biomasa aérea (kg), X es el diámetro (cm) a la altura del pecho (DAP) y b y k son los parámetros a estimar. En todos los casos el coeficiente de determinación (R^2) fue mayor que 0.97. Se compararon también los parámetros de las ecuaciones alométricas generadas y se encontró que éstos fueron diferentes para cada especie. Sin embargo, las seis especies se separaron en dos subgrupos, de

tres especies cada uno, y así se ajustó una ecuación alométrica adecuada y suficiente para cada subgrupo. Los coeficientes de determinación para los modelos ajustados en los subgrupos fueron 0.99 y 0.98.

Arroyo y Paredes (2006) ajustaron ecuaciones para estimar biomasa en árboles completos de *Pinus cooperi* por componentes de hojas, ramas, fuste, copa y total. La investigación se realizó en el ejido forestal La Campana de la región del Salto, Durango. El método utilizado para la estimación de biomasa fue el análisis destructivo para los cinco componentes usando 52 árboles. Para la selección del mejor modelo se tomó en cuenta, la bondad de ajuste, así como la satisfacción de los supuestos básicos de la regresión analizados mediante pruebas estadísticas corregidos por heterocedasticidad. Los resultados muestran que en general los modelos probados predicen bien la biomasa total y fustal aunque en las variables ramas, copa y hojas los modelos no mostraron buenos ajustes. El modelo que presentó el mejor ajuste de acuerdo a los criterios estadísticos de selección, fue lineal con una R^2 de 0.563 y un menor error estándar de 11.62.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

El área de estudio se localiza en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El CAESA se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental en Los Lirios, Arteaga, Coahuila, a una distancia aproximada de 45 km de Saltillo, Coahuila; entre las coordenadas geográficas $25^{\circ} 23'$ a $25^{\circ} 24'$ Norte y $100^{\circ} 36'$ a $100^{\circ} 37'$ Oeste, a una altitud de 2280 msnm (Figura 1) (Aguilar, 2009).

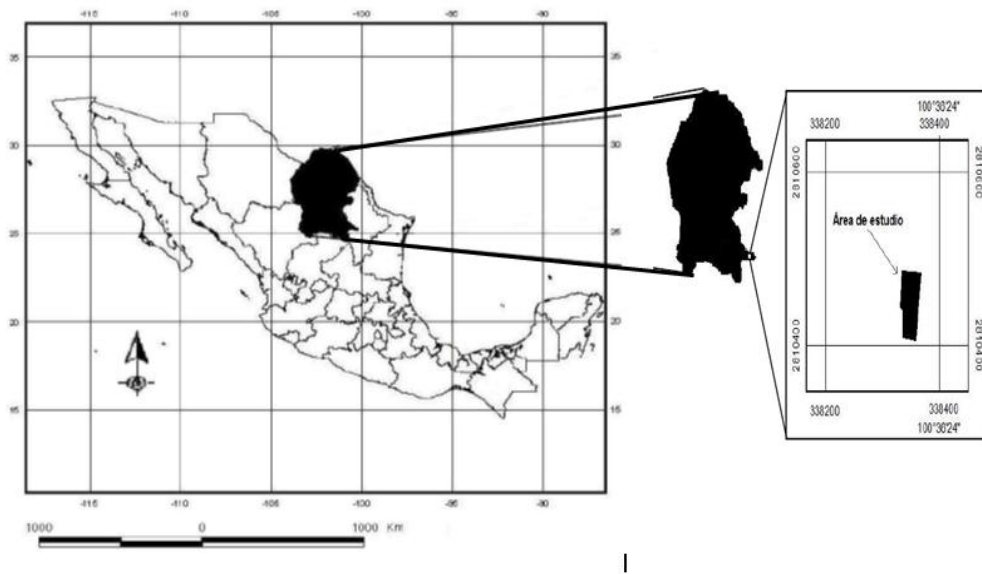


Figura 1. Ubicación geográfica del área CAESA de la UAAAN.

3.2. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la región hidrológica Bravo - Conchos (RH24) y la cuenca hidrológica Rio Bravo - San Juan (24B) (SPP, 1983). Los suelos predominantes son los feozem calcáricos (Hc) y en menor proporción las rendzinas (E), con una textura fina, que se encuentran en fase petrocálica (CETENAL, 1977).

El Clima es templado con verano fresco y largo, con una temperatura media anual de 14.8° C; la temperatura media del mes más frío es de 9° C y del mes más caliente de 19.7° C; siendo los meses de mayo a julio con temperaturas más altas y las más bajas de diciembre a febrero; la precipitación media anual es de 521.2 mm; los meses de mayor precipitación son de junio a septiembre y los más secos son diciembre y enero (CONAGUA, 2001). La fórmula climática del área de estudio es Cb (X') (Wo) (e) g (García, 1987).

3.3. Fuente y selección de árboles

De un total de 250 árboles de *Pinus greggii* Engelm. (provenientes de una plantación) obtenidos de trabajos anteriores: 30 de Aguilar (2009), 20 de Mora (2010) y los demás obtenidos para este estudio, en aclareos realizados en fecha posterior, considerando su vigorosidad, sin deformidades ni plagas o enfermedades y que incluyeran todas las categorías de diámetro y de altura existente según lo descrito por Schelegel *et al.* (2000), se realizaron grupos de 30 árboles cada uno. Esta agrupación se obtuvo mediante un método aleatorio con remplazo, que fue dando una base de datos de las siguientes variables; Diámetro

(cm), Altura (m), Diámetro de Copa (cm), Diámetro de Base (cm), Biomasa de Hojas y Ramas (kg), Biomasa de Fuste (kg), Biomasa Total (kg), Porcentaje de Hojas y Ramas (kg) y Porcentaje de Fuste (kg).

Un total de ocho grupos quedó constituido para el análisis estadístico, quedando la agrupación de la siguiente manera: (G1 = 30 árboles que representan el 12 %; G2 = 60 el 24 %; G3 = 90 el 36 %; G4 = 120 el 48 %; G5 = 150 el 60 %; G6 = 180 el 72 %; G7 = 210 el 84 %; G8 = 250 el 100%) y también por componente (BHR; BF y BT).

3.4. Procedimiento

3.4.1. Variables evaluadas

A los árboles elegidos en el área de estudio, se les midió y registró cada una de las variables de los árboles muestra, para lo cual las medidas fueron de dos formas, la primera con el árbol en pie y la segunda después de derribado el árbol; este procedimiento ha sido recomendado por Schelegel *et al.* (2000).

A cada árbol en pie se le midió, el diámetro basal (0.05 m), el diámetro a 0.30 m, el diámetro normal (1.30 m) y el diámetro en donde inicia la copa, utilizando la cinta diamétrica con la posición más correcta; se midió también el diámetro de copa con flexómetro, así mismo se contó el número de verticilos a través del conteo visual.

Con el uso de motosierras, los árboles fueron derribados mediante el método direccional con el fin de evitar daños a la plantación. Además se utilizaron lonas colocadas en el suelo, con el objetivo de evitar la pérdida de los componentes vegetales al momento del derribo del árbol. Una vez derribado, a cada árbol se le midió la altura total desde la base del tallo hasta el ápice, utilizando la cinta métrica de 20 m.

3.4.2. Pesaje de componentes y obtención de muestras

Se procedió a seguir la metodología propuesta por Brown, (1997) y Gayoso *et al.* (2002), la cual consistió en separar cada componente: hojas, ramas y fuste, éste último fue seccionado (trozas) a partir de la base del tallo hasta 1.30 m y las siguientes a cada metro hasta llegar a un diámetro no menor de 0.03 m.

Cada componente (hojas, ramas y fuste) se pesó en su totalidad en estado fresco con una báscula con capacidad de 12 kg, del peso total de los componentes hojas y ramas que se obtuvo, se pesó una muestra representativa la cual fue empaquetada en bolsas de papel etiquetadas con una clave de identificación (nombre del componente, peso de la muestra, número de árbol y fecha).

3.4.3. Obtención del peso seco de las muestras.

Las muestras de cada componente fueron introducidas en estufas de secado (FELISA ESTUFAS) de tipo convencional pertenecientes al laboratorio de Ingeniera Forestal de la UAAAN, con el fin de obtener el peso constante o anhidro. Las muestras de follaje fueron secadas a una temperatura promedio de 75° C, y

las ramas y rodajas a temperaturas promedio de 80° C (Nájera, 1999; Méndez *et al.*, 2005; Pacheco *et al.*, 2007). Para identificar el peso constante o anhidro de cada muestra, se realizó un monitoreo cada tercer día, el cual consistió en pesar cada muestra con una báscula (OHAUS) de gran precisión (0.001 gr) y capacidad de 2610 gr.

3.4.4. Estimación de la biomasa aérea

Para obtener la biomasa seca aérea del árbol de *Pinus greggii* Engelm., se obtuvo el contenido de humedad para cada componente (hojas, ramas y fuste) y posteriormente su biomasa seca. Con los valores de biomasa seca de cada uno de los componentes (hojas, ramas y fuste) se realizó una sumatoria, obteniéndose así la biomasa seca total del árbol.

3.5. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos para obtener los parámetros de cada modelo usando ambos procedimientos PROC REG y PROC NLIN por grupo y por componente se realizaron en el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0 (Apéndice 1). Las gráficas fueron elaboradas en el programa Sigma Plot. 10.0

3.6. Ajuste de modelos para calcular biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm.

En este estudio se evaluaron cuatro modelos (Cuadro 1) propuestos por (Sit *et al.*, 1994), para estimar la biomasa por componente: Hojas y Ramas (BHR); Fuste (BF); y Total (BT), con el procedimiento PROC REG y PROC NLIN del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0, por grupo.

Cuadro 1. Modelos probados para estimar biomasa por componente en *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Modelo	Forma lineal	Forma no lineal
1	$y = a + bx + cx^2$	$y = a (x - b)^2 + c$
2	$\text{Ln}(y) = a + b x$	$y = a b^x$
3	$\text{Ln}(y) = a + b \text{Ln}(x)$	$y = a x^b$
4	$\text{Ln}(y) = a + b \text{Ln}(x) + c x$	$y = a x^b c^x$

Donde: y = biomasa de hojas y ramas (kg), fuste (kg) y total (kg); x = diámetro a la altura del pecho (cm); a, b y c = parámetros estadísticos; Ln = logaritmos natural.

El procedimiento para verificar el ajuste de los modelos y para evaluar la cuantificación de biomasa entre ambos procedimientos fue el siguiente:

1. Los parámetros de los modelos de cada componente de biomasa se estimaron mediante el procedimiento PROC REG y PROC NLIN del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0.
2. Se analizaron gráficamente los datos ajustados y residuales para evaluar el comportamiento de ambos.
3. La evaluación de los modelos se fundamentó en los siguientes criterios: a) el valor más alto del coeficiente de determinación (R^2), b) el valor más bajo del error (S_{xy}), c) el valor más bajo del coeficiente de variación (C.V.), d) distribución de residuales y e) Índice de Furnival (I.F.). Esto está fundamentado en la literatura según Sit *et al.* (1994)

4. La calificación de los estadísticos de la regresión, se realizó promediando los ocho grupos por componente: Hojas y Ramas, Fuste y Total, obteniendo el mejor modelo (Apéndice 2).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluaron 250 árboles de la especie *Pinus greggii* Engelm., fueron agrupados en 30 individuos haciendo un total de ocho grupos, comprendieron un diámetro normal entre 3.00 cm como mínimo y 18.70 cm como máximo, altura de 3.60 m a 10.90 m. Con respecto a los valores obtenidos en el componente de Biomasa de Hojas y Ramas osciló entre 1.21 a 62.08 kg, mientras que en Biomasa de Fuste vario de 1.25 a 110.15 kg, y la Biomasa Total de 3.62 a 172.25 kg (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores máximos y mínimos por grupo de variables evaluadas en *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Grupo	Diámetro a		Altura		BHR		BF		BT	
	1.30 m (cm)		(m)		(kg)		(kg)		(kg)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	4.00	15.40	3.90	9.40	1.82	52.60	3.04	62.28	4.86	106.49
2	3.00	18.00	3.60	10.90	2.42	62.08	3.62	110.15	6.04	172.23
3	3.00	18.70	3.50	10.90	1.21	62.08	1.31	110.15	3.62	172.23
4	3.00	16.20	3.60	10.40	2.22	52.60	1.25	67.43	4.26	106.49
5	3.00	18.00	3.50	10.10	1.21	56.88	1.25	72.52	3.62	118.74
6	3.00	18.70	3.50	10.90	1.21	62.08	1.25	110.15	3.62	172.23
7	3.00	18.70	3.50	10.90	1.21	62.08	1.25	110.15	3.62	172.23
8	3.00	18.70	3.50	10.90	1.21	62.08	1.25	110.15	3.62	172.23

Donde BHR = biomasa de hojas y ramas; BF = biomasa de fuste; BT = biomasa total (kg)

De acuerdo a los datos del Cuadro 2, se puede observar el comportamiento de los valores de las variables estudiadas, en este caso se tomaron en cuenta el diámetro normal a 1.30 m (cm), y la altura (m), con su valores correspondientes de biomasa de hojas y ramas (BHR), biomasa de fuste (BF) y biomasa total (BT). Se puede decir que estos valores andan entre 3.00 cm y 18.70, es decir se hacen presentes las categorías diamétricas de 5, 10, 15 y 20.

4.1. Estadísticos de regresión promedio por componente de biomasa de *Pinus greggii* Engelm. para cada modelo usando PROC REG y PROC NLIN

Los resultados de los estadísticos promedios de la regresión estimada por componente (BHR, BF y BT) y por modelo, con ambos procedimientos (PROC REG y PROC NLIN) fueron:

Cuadro 3. Selección de mejor modelo de acuerdo a estadísticos de regresión promedio, por componente y total en *Pinus greggi* Engelm., en Los Lirios Arteaga, Coahuila.

Componente	Modelo	Procedimiento	R²	C.V.	Sxy	I.F.
BHR	1	REG	0.65	46.54	6.00	6.00
		NLIN	0.65	46.54	6.00	6.00
	2	REG	0.63	47.22	6.09	18.87
		NLIN	0.87	45.80	5.91	6.00
	3	REG	0.61	48.73	6.29	19.51
		NLIN	0.87	46.51	6.00	6.00
	4	REG	0.64	47.15	6.08	18.87
		NLIN	0.87	45.76	5.90	5.90
BF	1	REG	0.81	35.93	7.20	7.20
		NLIN	0.81	35.93	7.20	7.20
	2	REG	0.78	38.05	7.62	18.87
		NLIN	0.92	35.40	7.09	7.20
	3	REG	0.76	40.24	8.07	30.74
		NLIN	0.92	35.74	7.17	7.17
	4	REG	0.81	35.70	7.15	27.22
		NLIN	0.93	34.94	7.00	7.00
BT	1	REG	0.78	37.24	12.26	12.26
		NLIN	0.78	37.24	12.26	12.26

2	REG	0.75	38.74	12.74	62.83
	NLIN	0.92	36.63	12.05	12.26
3	REG	0.74	40.50	13.35	65.92
	NLIN	0.91	37.17	12.24	12.24
4	REG	0.78	37.08	12.21	60.23
	NLIN	0.92	36.36	11.97	11.97

Donde: BHR = biomasa de hojas y ramas (kg); BF = biomasa de fuste (kg); BT = biomasa total (kg); R^2 = coeficiente de determinación; C.V.= coeficiente de variación; Sxy = error estándar; REG = procedimiento lineal; NLIN = procedimiento no lineal; I.F.= Índice de Furnival.

En Coeficiente de determinación promedio (R^2), para el modelo 1 en BHR fue de 0.65, para BF es 0.81 y para BT fue de 0.78 en ambos procedimientos; para el modelo 2 para BHR fue de 0.63 y 0.87, en BF es 0.78 y 0.92 y para BT fue 0.75 y 0.92 con procedimiento PROC REG y PROC NLIN respectivamente; para el modelo 3 los resultados obtenidos fueron, para BHR 0.65 y 0.87; para BF 0.76 y 0.92, para BT 0.74 y 0.91 respectivamente y para el modelo 4 tenemos que para BHR fue de 0.64 y 0.87, para BF es 0.81 y 0.93 y para BT fue 0.78 y 0.92 para los dos procedimientos respectivamente (Apéndice 2 y cuadro 3). En todos los casos la biomasa de fuste es la que mejor es estimada en los modelos no lineales, las diferencias de R^2 van desde 0.12 a 0.16 comparados con los lineales.

En cuanto al Coeficiente de Variación, el modelo 1 mostró en BHR 46.54 %, en BF 35.93 % y para BT fue de 37.24 %, en ambos procedimientos; en el modelo 2

se obtuvo lo siguiente: BHR 47.22 y 45.80 %, en BF fue de 38.05 y 35.40 % y en BT se obtuvo 38.74 y 36.63 % con procedimiento PROC REG y PROC NLIN respectivamente; para el modelo 3 en BHR fue de 48.73 y 46.51 %, en BF es 40.24 y 35.74 % y en BT fue de 40.50 y 37.17 % respectivamente y para el modelo cuatro el resultados en BHR fue de 47.15 y 45.76, para BF 35.70 y 34.94 y para BT 37.08 y 36.36 para los dos procedimientos respectivamente (Apéndice 2 y cuadro 3). De la mismas manera en el coeficiente de variación se tiene que el menor valor para este estadístico, se da en biomasa de fuste con diferencias que van desde 0.76 %, 2.65 % y 4.5 % esto en los modelos 4, 2 y 1 respectivamente y el modelo que tiene menor coeficiente de variación es el modelo 4 en su forma no lineal.

En Referencia al Error Estándar (S_{xy}), en el modelo 1 se obtuvo en BHR 6.00 kg, en BF 7.20 y BT 12.26 kg en ambos procedimientos; para el modelo 2 se obtuvo en BHR 6.09 y 5.91 kg, en BF 7.62 y 7.09 kg y en BT 12.74 y 12.05 kg con procedimiento PROC REG y PROC NLIN; para el modelo 3 en BHR fue de 6.29 y 6.00 kg, en BF 8.07 y 7.17 kg y en BT fue de 13.35 y 12.24 kg respectivamente y por último en el modelo 4 se obtuvo que en BHR fue de 6.08 y 5.90 kg, en BF fue de 7.15 y 7.00 kg y finalmente en BT fue de 12.21 y 11.97 kg (Apéndice 2 y Cuadro 3). En este estadístico se encontró que el menor error de biomasa en kilogramos se dio en el componente biomasa de hojas ramas precisamente en el modelo 4 en su forma no lineal con un error de 5.90 kg y en el modelo 4 entre lineal y no lineal hay una diferencia de 0.18 kg.

Los resultados referente a R^2 comparados con Mora (2010) quien obtuvo 0.90 para Biomasa de Hojas, 0.95 en Biomasa de Ramas, 0.98 en Biomasa de Fuste y 0.9669 para Biomasa Total, en *Pinus greggii* Engelm. se puede apreciar que en ambos estudios el mejor ajuste se da en Biomasa de Fuste (BF) con 0.93 para este estudio y 0.96 con Mora (2010) y en los cuatro modelos evaluados; a diferencia de Aguilar (2009) obtuvo el mejor ajuste en el componente de Biomasa Total (BT) *Pinus greggii* Engelm. con un valor de 0.94 (Cuadro 4).

Díaz *et al.*, (2007) obtuvo una R^2 de 0.98 en biomasa total de *Pinus patula* Schl el Chamy por otro lado Pacheco *et al.*, (2007) obtuvieron una R^2 de 0.89 en *Pinus greggii* Engelm. para biomasa total. Es importante mencionar que los modelos evaluados de los estudios anteriores, fueron realizados con procedimiento PROC REG.

Cuadro 4. Comparación de la R^2 por componente con PROC REG y PROC NLIN con estudios recientes, en *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Componente	Aguilar (2009) PROC REG	Mora (2010) PROC REG	Este estudio							
			PROC REG (modelo)				PROC NLIN (modelo)			
			1	2	3	4	1	2	3	4
BHR			0.65	0.63	0.61	0.74	0.65	0.87	0.87	0.87
BH	0.65	0.90								
BR	0.89	0.95								
BF	0.92	0.98	0.81	0.78	0.76	0.81	0.81	0.92	0.92	0.93

BT	0.95	0.97	0.78	0.75	0.74	0.78	0.78	0.92	0.91	0.92
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Donde: R^2 = coeficiente de determinación; BHR = biomasa de hojas y ramas (kg);
 BF = biomasa de fuste (kg); BT = biomasa total (kg).

Es notorio que los estudios realizados por Aguilar (2009) y Mora (2010) en BHR se obtuvieron los datos R^2 de 0.77 y 0.92, para BF 0.92 y 0.98 y para BT 0.95 y 0.97, de acuerdo a estos resultados se puede decir que para regresión lineal ambos estudios los modelos presentaron mejor R^2 para el componente de BHR comparando el procedimiento PROC REG, pero con procedimiento PROC NLIN los cuatro modelos evaluados en este trabajo presentaron mejor R^2 comparados con Aguilar (2009), pero comparados con Mora (2010) el encontró mejor R^2 en sus modelos.

Sin embargo para el componente BF se ajustó mejor el modelo 4 en este estudio con el procedimiento PROC NLIN comparado con Aguilar (2009) y comparando con Mora (2010) el obtuvo mejor R^2 .

Por último para el componente BT ambos procedimientos PROC REG y PROC NLIN presentaron menor R^2 comparados con los mismos autores.

Esto no significa que los modelos evaluados no estimen bien los componentes, ya que se tiene que tomar en cuenta que fueron evaluados por grupo, por lo que habría que evaluar los modelos de los autores mencionados a n número de datos para poder asegurar que los modelos que ellos evaluaron y con el procedimiento PROC REG son mejores.

4.2. Evaluación de modelos con PROC REG y PROC NLIN por componentes en *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila

Una vez que se obtuvieron los parámetros básicos de la regresión de la estimación, se procedió a evaluar los modelos de acuerdo a los criterios establecidos en la metodología, tomando en cuenta los dos procedimientos (Cuadro 3); de los cuales mostró como mejor modelo el 4, en los tres componentes (BHR, BF y BT) con el procedimiento PROC NLIN. De acuerdo a estos resultados.

Cabe señalar que en el análisis de datos demuestra que el modelo 1 para los componentes de BHR, BF y BT promedio fue el mismo comparados con los modelos 2, 3 y 4, que sus valores fueron diferentes en ambos procedimientos. A diferencia del trabajo de tesis realizado por Mora (2010) en el cual para cada componente el ajuste se dio en un modelo diferente.

4.3. Selección del mejor modelo matemático para estimar biomasa de *Pinus greggii* Engelm. por componente

De acuerdo a los resultados de los estadísticos de la regresión obtenidos y de la evaluación de los modelos por componente en sus dos procedimientos, se considera al modelo 4 como el modelo que mejor estima de una manera óptima la biomasa de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila, con el procedimiento PROC NLIN ya que obtuvo los siguientes valores:

Coeficiente de determinación de 0.87, Coeficiente de Variación de 45.76 % y error de 5.90 kg en el componente BHR; de igual forma en BF fue de 0.93, 34.94 % y 7.00 kg, respectivamente y para BT se obtuvo 0.92, 36.36 % y 11.97 kg en el mismo orden, pero sobre todo para poder comparar entre modelos con procedimiento PROC REG y PROC NLIN fue fundamental obtener el Índice de Furnival ya que cuando las ecuaciones no tienen la misma forma de la variable dependiente, , invariablemente se debe de utilizar este índice (Jayaraman, 1999).

4.4. Comportamiento de C.V. y de R^2 en componentes BHR, BF y BT de *Pinus greggii* Engelm. con el mejor modelo.

El comportamiento de C.V y R^2 del modelo 4 (Cuadro 1), el cual fue seleccionado anteriormente, se presenta a continuación, considerándose ambos procedimientos, para distinguir gráfica y visualmente porqué fue elegido el procedimiento PROC NLIN.

Los resultados demuestran que para el C.V. usando PROC NLIN, en el tamaño de muestra de 90 datos que representa el 36 % para BHR el ajuste es mejor ya que el porcentaje del C.V. es menor con un valor de 37.78 %, mientras que para BF y BT el mejor ajuste se da en el tamaño de muestra con 60 datos, ya que cuentan con el menor porcentaje de C.V., con 28.15 y 31.08 % respectivamente (Figura 2).

En cuanto a la R^2 , la tendencia es la misma ya que para BHR el ajuste fué mejor en el tamaño de muestra de 90 datos, con un valor de 0.91; para BF y BT el ajuste mejor es en el tamaño de muestra de 60 datos, esto debido a que cuenta con el mayor valor en este estadístico con 0.96 y 0.94 respectivamente (Figura 2).

De acuerdo con Creighton y Kauffman (2008) quienes obtuvieron valores de R^2 0.96 en *Metrosideros polimorfa* con 36 árboles en Biomasa de Fuste y en *Dendonea viscosa* con 20 árboles fue 0.95 en Biomasa Total y para el presente estudio se obtuvo en BHR con 90 árboles una R^2 de 0.91 y para BF y BT con 60 árboles se obtuvo 0.96 y 0.94 respectivamente.

Los resultados del trabajo actual nos haría caer en el error de que los datos obtenidos por los otros autores Creighton y Kauffman (2008) es correcto, comparados con los del presente trabajo; sin embargo se puede decir que cuando la muestra es mayor tenemos mas confiabilidad en nuestros resultados ya que se toma en cuenta un mayor numero de la población lo cual aumenta la confiabilidad de los resultados; por otro lado todos los resultados andan alrededor de una R^2 de 0.90 por lo que seria necesario ver el comportamiento de los estadísticos de los estudios anteriores en muestras iguales a los de este estudio.

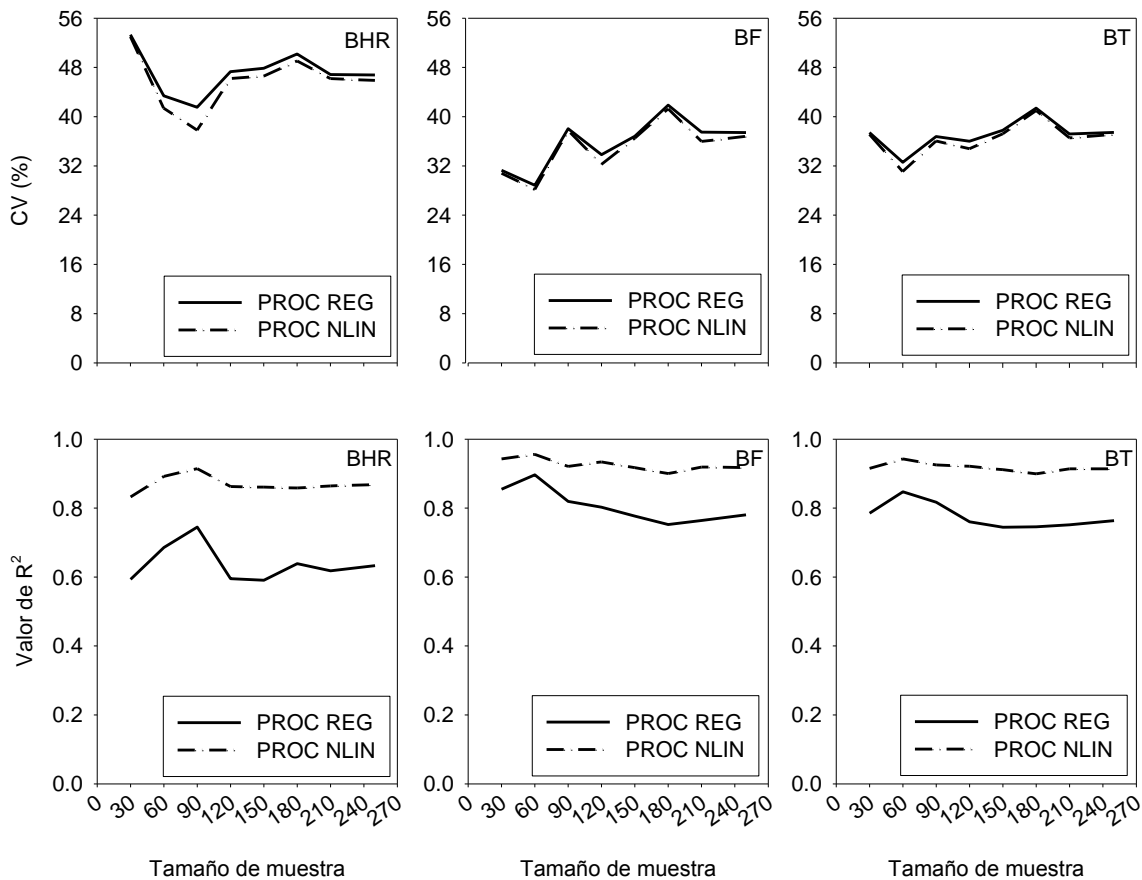
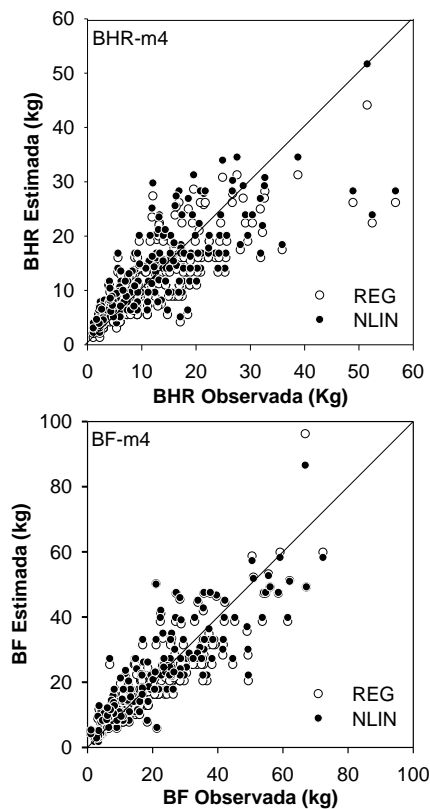


Figura 2. Relación de estadísticos de regresión en la estimación de biomasa, a diferentes tamaños de muestra considerando ambos procedimientos (PROC REG y PROC NLIN).

No siempre los modelos que mejor se ajustan a las muestras realizan las mejores estimaciones de los valores reales. Al respecto Hair *et al.* (1999) menciona que el objetivo de un análisis de regresión no es encontrar el mejor ajuste sólo para la muestra sino desarrollar el modelo que mejor describa la población en su conjunto.

En Figura 3 se aprecia la relación que existe entre la Biomasa observada y Biomasa estimada utilizando el modelo 4 (Cuadro 1) con un tamaño de muestra de 250 árboles, en los tres componentes y con procedimiento PROC REG y PROC NLIN; que la relación que existe en el componente BF observada y BF estimada es similar ya que se relacionan bien a la línea 1:1 mejor que los componentes BHR y BT, pero también se distingue que el PROC NLIN se ajusta mejor, según la relación 1:1



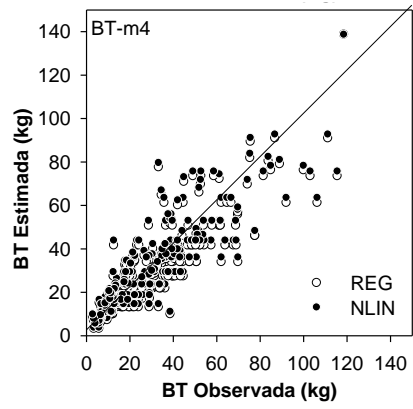


Figura 3. Relación de biomasa observada y estimada con procedimiento lineal y no lineal por componentes en *Pinus greggi* Engel., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

En la Figura 4 se aprecia el comportamiento de los datos estimados con el modelo seleccionado, observándose la relación directa que existe entre las variables estudiadas.

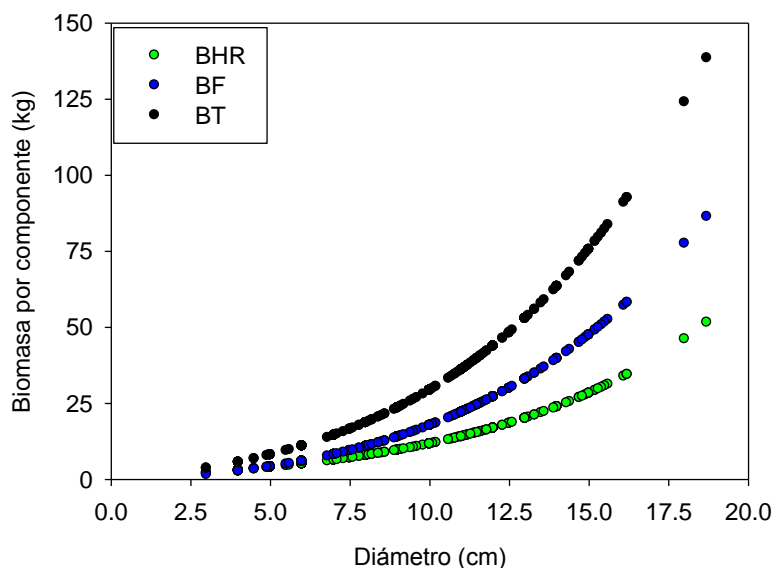


Figura 4. Biomasa aérea estimada con el modelo 4 en 250 árboles de *Pinus greggi* Engel., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

De acuerdo con Hair *et al.* (1999), la principal medida utilizada para evaluar el valor teórico de la regresión es el residuo, es decir, la diferencia entre la variable dependiente efectiva y su valor predictivo. La distribución equilibrada generada demuestra el comportamiento homogéneo y consistente de las estimaciones realizadas.

En este estudio los residuales del modelo 4 en su forma no lineal para el componente biomasa total presenta heterocedasticidad, es por esa razón que entre mas grande es el diámetro mas error muestra, por ejemplo el dato de categoría 20 tiene el siguiente valor: diámetro de 18.70 y un residual de -19.71 kg, se puede decir que subestima a la biomasa; por otro lado se encuentra el modelo 3 en su forma logarítmica y con el mismo dato, el cual tiene un diámetro de 18.70 pero con un residual de 0.12, es decir ha disminuido o cumple con el supuesto básico de normalizar los datos. (Figura 5).

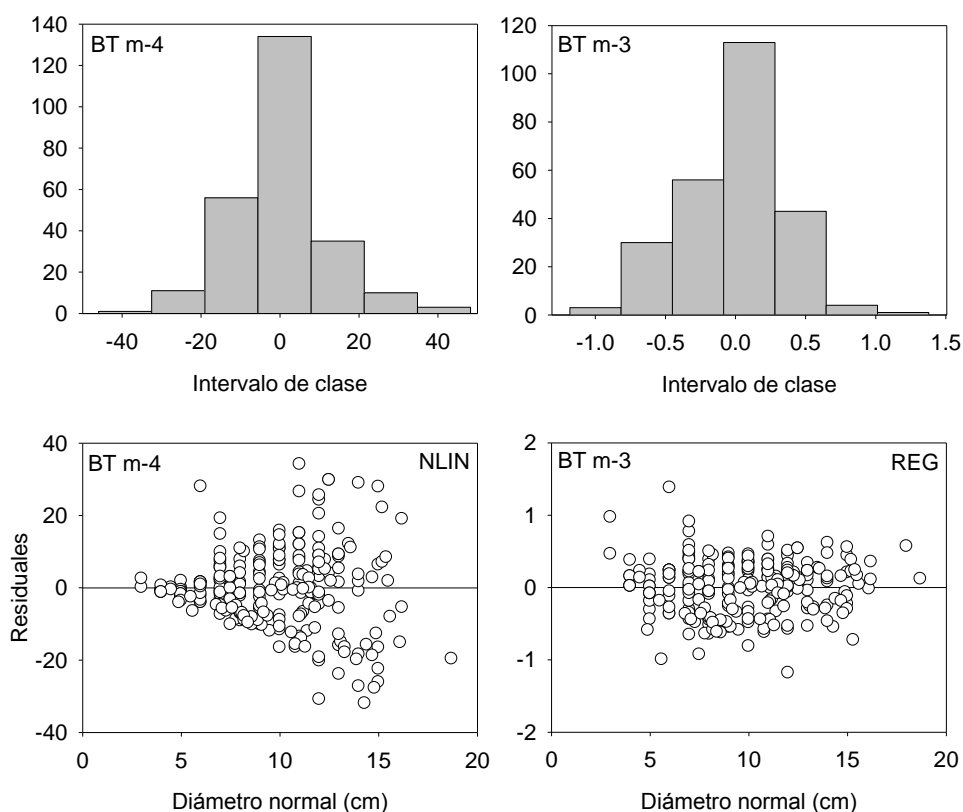


Figura 5. Distribución de residuales del modelo 4 PROC NLIN y modelo 3 PROC REG en el componente Biomasa Total con 250 árboles de *Pinus greggii* Engelm., en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

5. CONCLUSIONES

Los cuatro modelos evaluados con los procedimientos PROC REG y PROC NLIN se ajusta bien la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm. en Arteaga, Coahuila.

El componente que mejor se ajusta a los modelos evaluados, es Biomasa de Fuste (BF), dado que cuenta con los mejores estadísticos de regresión, mientras que la Biomasa de Hojas Ramas, registra los ajustes más bajos.

El Procedimiento PROC NLIN calcula adecuadamente todos los componentes de biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm., dado que cumple con lo establecido en la metodología en cuanto a mejores estadísticos, cuenta con una R^2 mayor, un C.V. menor y un Error (Sxy) menor, y sobre todo el estadístico de más validez para poder comparar ambos procedimientos es que tiene menor Índice de Furnival.

El modelo cuatro $y = a x^b c^x$ con el procedimiento PROC NLIN es el que mejor estima la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila, en el componente de Biomasa de Fuste.

El decidir entre un modelo lineal y uno no lineal; se debe elegir el modelo en su forma lineal siempre y cuando la estructura del modelo sea logarítmico, ya que

esta estructura corrige los errores de heterocedasticidad y cumple con el supuesto básico de normalidad.

Entre modelos lineales logarítmico y no logarítmico; se debe seleccionar un logarítmico

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda que el modelo seleccionado en este análisis, que estima la biomasa por componente y total, sean utilizados en plantaciones de *Pinus greggii*, en la Sierra de Arteaga, Coahuila, con categorías diamétricas de 5 a 20 cm.

Además se recomienda analizar otros modelos para estimar la biomasa por componente y total, para poder llevarlos a cabo en otras áreas geográficas y con otras especies.

Dado que la especie de *Pinus greggii* Engel., tiene gran importancia, de acuerdo a la literatura revisada se recomienda aprovechar al máximo este beneficio que por sí sola la especie nos da, como por ejemplo: para venta de carbono, protección y restauración de suelos, así como de paisajismo y recreación.

Pinus greggii Engelm., es una especie que tiene un gran potencial para almacenar carbono (CO₂) por lo que es recomendable elegir familias de las procedencias del CAESA de la UAAAN y ampliar su base genética con la familia del sitio de origen, para establecer un banco que permita conservar esta especie.

7. LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velasquez-Martínez y J.D. Etchevers-Barra (2002).** Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Aguilar C.J. (2009).** Captura de carbono en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila. Tesis de licenciatura. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 60 p.
- Andrasko K (1990).** El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *Unasyuva* 4: 3-9 p.
- Araújo, T.M., Higuchi, N, De Carvalho Jr, JA (1999).** Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management* 117: 43-52.
- Arroyo T.J. y J.E. Paredes G. (2006).** Estimación de la biomasa total y por componente de hojas, ramas, copa y fuste en *Pinus cooperi*, de la Región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango. Tesis profesional de licenciatura. Instituto Tecnológico de El Salto. 48 P.
- Baskerville, G.L. (1972).** Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2:49-53.
- Brown, S. (1997).** Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Congreso Forestal Mundial. Antalya Turquía. Vol. 1 Tema 4. 107-121.

- Brown, S., A. J. Gillespie and A. E. Lugo. (1989).** Biomass estimation methods for tropical forest with application to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.
- Calama, S., (2004)** Modelo interregional de selvicultura para *Pinus pinea* L. aproximación mediante Funciones con componentes aleatorios. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 73-99 p.
- Castellanos, B. J., A. Velásquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. Fierros G. (1996).** Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- CETENAL (1977)** Carta Edafológica. Arteaga G14 C34. Escala. 1:50,000. México.
- Chapman, J. W. and S. T. Gower. (1991).** Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 21: 1533-1543.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2001).** Dirección local de Coahuila, Precipitación y temperaturas de la estación meteorológica de San Antonio de Las Alazanas, Arteaga, Coahuila. Periodo 2000-2005 (Documento inédito).
- Creighton, M.L. and J.B. Kauffman (2008).** Allometrics models for predicting aboveground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica* 40(3): 313-320.

- Díaz, F.R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. (2007).** Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques, 13: 25-34.
- Fonseca G W, Alice G F, Rey B J M (2009).** Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Bosque 30(1): 36-47.
- García E (1987).** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 245 p.
- Gasparri I, Mangui E (2004).** Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales Argentinas. Informe final. República Argentina. Ministerio de Salud y Ambiente.
- Gayoso J (2001).** Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. Revista Forestal Iberoamericana 1: 1-13.
- Gayoso, J., J. Guerra, D. Alarcón (2002).** Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 p.
- Geron, C.D., and G. A. Ruark (1988).** Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. Can. J. For. Res. 18(10): 1298-1304.

- Grier, C. C., and R. H. Waring (1974).** Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20: 205-206.
- Hair, J.F. Anderson, R. E. Tatham, R. I. Blach, W.C. (1999).** Analisis multivariante. Quinta edición. Prentice Hall Iberia. Madrid. España. 832 p.
- Husch B. (2001).** Estimación del contenido de carbón de los bosques. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 9 p.
- Houghton, R. A. (1999).** The anual net flux of carbón to the atmosphere change in land use 1850 1990. *Tellus*, 51: 298 313.
- Houghton, R.A., J.L. Hackles, and K.T. Lawrence (1999).** The U. S. carbon budget, contribution from land use change. *Science*, 285: 574-578.
- Huxley J. S. (1932).** Problems of relative growth. The Dial Press, New York. 276 p.
- INEGI. (2000).** Carta topográfica. San Antonio de las Alazanas G14 C35. Escala 1:50,000. México.
- IPCC (2001).** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, C.A. Johnson, and K. Maskell (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- IPCC (2003).** Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change, and Forestry. National Greenhouse Gas Inventories Programme, The intergovernmental Panel on Climate Change, J. Penman, et al. (eds.).

- K. Jayaraman (1999)** Forestry Research Support Programme For Asia And The Pacific. A Statistical Manual For Forestry Research. FAO
- Klinge H, Herrera R (1983).** Phytomass structure of natural plant communities on spodosols in Southern Venezuela: The tall Amazon Caatinga Forest. *Vegetation* 53: 65-64.
- López D, L Soto, G Jiménez, S Hernández (2003)** Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. *Interciencia* 28:334-339.
- Méndez G. J., A.S. Méndez., J.A. Nájera L. y V.G. Ontiveros (2006).** Modelos para estimar volumen y biomasa de árboles individuales de *Prosopis glandulosa*, var. Torreyana en el Ejido Jesús González Ortega No 1, Mpio. de Mexicali, B.C. *Agrofazz* 6(2): 225-239.
- Méndez, G. J., F. Morales C., V.J. Ruíz G., J.A. Nájera L., J.J. Graciano L., J.J. Nívar C. (2005).** Ajuste de modelos para estimar biomasa fustal en *Pinus cooperi* y *P. leiophylla*, de la región de El Salto, Dgo. México. *Agrofaz*, 5: 883-892.
- Montoya G, L Soto, Ben de Jong, K Nelson, P Farias, P Y Tic, J Taylor, R Tipper (1995).** Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.

- Mora C. E. (2010).** Carbono almacenado en la fitomasa aérea en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila. Tesis de licenciatura. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 65 p.
- Nájera L. J. A. (1999).** Ecuaciones para estimar biomasa, volumen y crecimiento en biomasa y captura de carbono en diez especies típicas del Matorral Espinoso Tamaulipeco del nordeste de México. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. N.L. Mex. 93p.
- Návar, J., N. González., J. Graciano (2001).** Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre de 2001, Valdivia – Chile.
- Ojeda, M.M. (2004).** La modelación estadística. Foro de Matemáticas del Sureste 2003. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Conduacan Tabasco, México. 70-76 P.
- Ordóñez J A B (1999).** Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Primera edición. Desarrollo Gráfico Editorial, S. A. de C.V. Municipio Libre 175, Col. Portales México D.F. 73 p.
- Pacheco E.F. C., A. Aldrete, A. Gómez, A.M. Fierros, V.M. Cetina y H. Vaquera (2007).** Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana 30: 251-254.

- Pastor, J. and J. G. Bockheim (1981).** Biomass and production of an aspen mixed hardwood-spodosol ecosystem in northern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 11:132-138.
- Pastor, J., J.D. Aber, J.M. Melillo (1984).** Biomass prediction using generalized allometric regressions for some northeast tree species. *For. Ecol. Man.* 7:265-274.
- Pérez, L.D. and Kanninen M. (2003).** Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15(1): 199-213.
- Rawlings, J.O. (1988).** Applied regression analysis: a research tool. Wadsworth and Brooks, Belmont, Calif.
- Rodríguez J.A., C. Steegmann P. (2012).** Modelos matemáticos. Disponible en www.uoc.edu/in3/emath/docs/Modelos_matematicos.pdf.
- Schelegel, B., J. Gayoso, J. Guerra (2000).** Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 21p.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo. R. Birdsey and C. Cieszewski (1997).** Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *For. Sci.* 43 (3): 424-434.

Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) (1983). Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. G14-7. Escala 1:25000. México.

Segura, M. Kanninen, M. Suarez D. (2005). Allometric models for tree volumen and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1): 2-8.

Segura, M. Kanninen, M. Suárez D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68: 143-150.

Segura M, Andrade H J (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforesteria en las Américas*. No.46.

Sit, V. and P-C. Melanie (1994). Catalog of curves for curve fitting. (Biometrics information handbook series, ISSN 1183-9759 No.4.

Somarriba, E.J. and Beer J.W. (1987). Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 18: 113-126.

Ter-Mikaelian, M.T. and M.D. Korzukhin (1997). Biomass equations for sixty five North American Tree species. *For. Ecol. Man.*, 97: 1-24.

Vanclay, J. K., (1994). Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests, CAB International, Wallingford, UK. School of Environmental Science and Man. 304 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. Programa SAS para la evaluación de los modelos 1, 2, 3 y 4 para describir la biomasa por componente y por grupo y por procedimiento PROC REG Y PROC NLIN.

```
DATA BIOMASA;  
INPUT DN H DC DB BHR BF BT PHR PF GRUPO$;  
DN2=(DN**2);  
CARDS;
```

```
PROC SORT DATA=BIOMASA OUT=BIOMASA1;  
BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL BHR=DN DN2;BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL BF=DN DN2;BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL BT=DN DN2;BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=5 B=10 C=30;  
XB=(DN-B);  
MODEL BHR=A*XB**2+C; BY GRUPO;  
DER.A=XB**2;
```

```
DER.B=-2*A*XB;  
DER.C=1;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=5 B=10 C=30;  
XB=(DN-B);  
MODEL BF=A*XB**2+C; BY GRUPO;  
DER.A=XB**2;  
DER.B=-2*A*XB;  
DER.C=1;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=5 B=10 C=30;  
XB=(DN-B);  
MODEL BT=A*XB**2+C; BY GRUPO;  
DER.A=XB**2;  
DER.B=-2*A*XB;  
DER.C=1;  
RUN;
```

```
DATA BIOMASA;  
INPUT DN H DC DB BHR BF BT PHR PF GRUPO$;  
LBHR=LOG(BHR);LBF=LOG(BF);LBT=LOG(BT);  
CARDS;
```

```
PROC SORT DATA=BIOMASA OUT=BIOMASA1;  
BY GRUPO;
```

RUN;

PROC REG DATA=BIOMASA1;
MODEL LBHR=DN;BY GRUPO;
RUN;

PROC REG DATA=BIOMASA1;
MODEL LBF=DN;BY GRUPO;
RUN;

PROC REG DATA=BIOMASA1;
MODEL LBT=DN;BY GRUPO;
RUN;

PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=1.25;
BX=B**DN;
ABX=A*BX;
MODEL BHR=ABX;BY GRUPO;
DER.A=BX;
DER.B=DN*ABX/B;
RUN;

PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=1.25;
BX=B**DN;
ABX=A*BX;
MODEL BF=ABX;BY GRUPO;
DER.A=BX;
DER.B=DN*ABX/B;
RUN;

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=1.25;
BX=B**DN;
ABX=A*BX;
MODEL BT=ABX;BY GRUPO;
DER.A=BX;
DER.B=DN*ABX/B;
RUN;
```

```
DATA BIOMASA;
INPUT DN H DC DB BHR BF BT PHR PF GRUPO$;
LBHR=LOG(BHR); LDN=LOG(DN); LBF=LOG(BF); LBT=LOG(BT); DN2=(DN**2);
CARDS;
```

```
PROC SORT DATA=BIOMASA OUT=BIOMASA1;
BY GRUPO;
RUN;
```

```
PROC REG DATA = BIOMASA1;
MODEL LBHR=LDN; BY GRUPO;
RUN;
```

```
PROC REG DATA = BIOMASA1;
MODEL LBF=LDN; BY GRUPO;
RUN;
```

```
PROC REG DATA = BIOMASA1;
MODEL LBT=LDN; BY GRUPO;
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=4.0;
XTOB=DN**B;
MODEL BHR=A*XTOB; BY GRUPO;
DER.A=XTOB;
DER.B=A*XTOB*LOG(DN);
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=4.0;
XTOB=DN**B;
MODEL BF=A*XTOB; BY GRUPO;
DER.A=XTOB;
DER.B=A*XTOB*LOG(DN);
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;
PARAMETERS A=4.0 B=4.0;
XTOB=DN**B;
MODEL BT=A*XTOB; BY GRUPO;
DER.A=XTOB;
DER.B=A*XTOB*LOG(DN);
RUN;
```

```
DATA BIOMASA;
INPUT DN H DC DB BHR BF BT PHR PF GRUPO$;
LDN=LOG(DN);LBHR=LOG(BHR);LBF=LOG(BF);LBT=LOG(BT);
CARDS;
```

```
PROC SORT DATA=BIOMASA OUT=BIOMASA1;  
BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL LBHR=LDN DN; BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL LBF=LDN DN; BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC REG DATA=BIOMASA1;  
MODEL LBT=LDN DN; BY GRUPO;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=4.0 B=2.0 C=0.5;  
XBXC = (DN**B)*(C**DN);  
AXBXC = A*XBXC;  
MODEL BHR = AXBXC;BY GRUPO;  
DER.A = XBXC;  
DER.B = AXBXC*LOG(DN);  
DER.C = AXBXC*DN/C;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=4.0 B=2.0 C=0.5;  
XBXC = (DN**B)*(C**DN);  
AXBXC = A*XBXC;
```

```
MODEL BF = AXBXC;BY GRUPO;  
DER.A = XBXC;  
DER.B = AXBXC*LOG(DN);  
DER.C = AXBXC*DN/C;  
RUN;
```

```
PROC NLIN DATA=BIOMASA1;  
PARAMETERS A=4.0 B=2.0 C=0.5;  
XBXC = (DN**B)*(C**DN);  
AXBXC = A*XBXC;  
MODEL BT = AXBXC;BY GRUPO;  
DER.A = XBXC;  
DER.B = AXBXC*LOG(DN);  
DER.C = AXBXC*DN/C;  
RUN;
```

Apéndice 2. Parámetros y estadísticos de cuatro modelos para estimar biomasa por componente y grupo en *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Modelo	Regresión	Componente	Grupo	C.V.	R ²	Sxy	CME	I.F.	PRUEBA K-S	a	b	c
1	REG	BHR	1	52.86	0.60	6.81	46.36	6.81	*	8.75	-2.17	0.24
1	REG	BHR	2	43.76	0.68	5.95	35.41	5.95	*	11.38	-2.39	0.24
1	REG	BHR	3	40.00	0.76	5.08	25.76	5.08	*	8.83	-2.01	0.22
1	REG	BHR	4	46.35	0.61	5.70	32.50	5.70	*	-1.54	0.36	0.11
1	REG	BHR	5	47.13	0.60	6.40	40.91	6.40	*	4.36	-0.98	0.17
1	REG	BHR	6	49.72	0.65	6.32	40.00	6.32	*	7.30	-1.76	0.21
1	REG	BHR	7	46.26	0.63	5.82	33.87	5.82	*	2.11	-0.44	0.14
1	REG	BHR	8	46.24	0.64	5.95	35.41	5.95	*	4.30	-0.99	0.17
				46.54	0.65	6.00	36.28	6.00				
1	REG	BF	1	32.40	0.84	6.33	40.07	6.33	*	23.17	-6.05	0.53
1	REG	BF	2	32.75	0.87	6.65	44.28	6.65	*	25.80	-6.57	0.56
1	REG	BF	3	38.15	0.82	7.80	60.81	7.80	*	12.94	-3.56	0.39
1	REG	BF	4	32.23	0.82	6.27	39.26	6.27	*	4.41	-1.74	0.32
1	REG	BF	5	37.54	0.77	8.03	64.41	8.03	*	11.65	-3.36	0.40
1	REG	BF	6	41.53	0.76	8.16	66.60	8.16	*	10.08	-2.88	0.36
1	REG	BF	7	35.91	0.78	7.00	48.98	7.00	*	5.05	-1.62	0.29

1	REG	BF	8	36.91	0.79	7.39	54.61	7.39	*	8.41	-2.51	0.34
				35.93	0.81	7.20	52.38	7.20	*			
1	REG	BT	1	37.54	0.78	12.17	148.14	12.17	*	31.91	-8.22	0.77
1	REG	BT	2	34.97	0.82	11.86	140.63	11.86	*	37.17	-8.96	0.81
1	REG	BT	3	37.13	0.81	12.30	151.25	12.30	*	21.77	-5.57	0.61
1	REG	BT	4	34.84	0.78	11.06	122.32	11.06	*	2.87	-1.37	0.42
1	REG	BT	5	38.09	0.74	13.31	177.26	13.31	*	16.01	-4.35	0.57
1	REG	BT	6	41.46	0.74	13.42	180.11	13.42	*	17.38	-4.64	0.57
1	REG	BT	7	36.52	0.76	11.71	137.06	11.71	*	7.15	-2.07	0.43
1	REG	BT	8	37.37	0.76	12.29	151.01	12.29	*	12.71	-3.50	0.51
				37.24	0.78	12.26	150.97	12.26				
1	NLIN	BHR	1	52.86	0.60	6.81	46.36	6.81	<0.0100	0.24	4.48	3.89
1	NLIN	BHR	2	43.76	0.68	5.95	35.41	5.95	0.01	0.24	4.88	5.56
1	NLIN	BHR	3	40.00	0.76	5.08	25.76	5.08	<0.0100	0.22	4.60	4.20
1	NLIN	BHR	4	46.35	0.61	5.70	32.50	5.70	<0.0100	0.11	-1.71	-1.84
1	NLIN	BHR	5	47.13	0.60	6.40	40.91	6.40	<0.0100	0.17	2.83	2.97
1	NLIN	BHR	6	49.72	0.65	6.32	40.00	6.32	<0.0100	0.21	4.12	3.66
1	NLIN	BHR	7	46.26	0.63	5.82	33.87	5.82	<0.0100	0.14	1.56	1.77
1	NLIN	BHR	8	46.24	0.64	5.95	35.41	5.95	<0.0100	0.17	2.87	2.89

				46.54	0.65	6.00	36.28	6.00				
1	NLIN	BF	1	32.40	0.84	6.33	40.07	6.33	0.08	0.53	5.70	5.91
1	NLIN	BF	2	32.75	0.87	6.65	44.28	6.65	<0.0100	0.56	5.84	6.60
1	NLIN	BF	3	38.15	0.82	7.80	60.81	7.80	<0.0100	0.39	4.53	4.89
1	NLIN	BF	4	32.23	0.82	6.27	39.26	6.27	<0.0100	0.32	2.72	2.05
1	NLIN	BF	5	37.54	0.77	8.03	64.41	8.03	<0.0100	0.40	4.25	4.50
1	NLIN	BF	6	41.53	0.76	8.16	66.60	8.16	0.01	0.36	4.04	4.27
1	NLIN	BF	7	35.91	0.78	7.00	48.98	7.00	<0.0100	0.29	2.81	2.77
1	NLIN	BF	8	36.91	0.79	7.39	54.61	7.39	<0.0100	0.34	3.68	3.78
				35.93	0.81	7.20	52.38	7.20				
1	NLIN	BT	1	37.54	0.78	12.17	148.10	12.17	<0.0100	0.77	5.32	10.05
1	NLIN	BT	2	34.97	0.82	11.86	140.60	11.86	0.13	0.81	5.55	12.32
1	NLIN	BT	3	37.14	0.81	12.30	151.30	12.30	0.64	0.61	4.55	9.09
1	NLIN	BT	4	34.84	0.78	11.06	122.30	11.06	0.11	0.42	1.62	1.76
1	NLIN	BT	5	38.10	0.74	13.32	177.30	13.32	<0.0100	0.57	3.82	7.71
1	NLIN	BT	6	41.46	0.74	13.42	180.10	13.42	<0.0100	0.57	4.07	7.93
1	NLIN	BT	7	36.52	0.76	11.71	137.10	11.71	<0.0100	0.43	2.40	4.68
1	NLIN	BT	8	37.37	0.76	12.29	151.00	12.29	<0.0100	0.51	3.41	6.74
				37.24	0.78	12.26	150.98	12.26				

2	REG	BHR	1	52.79	0.60	6.80	46.24	21.16	*	0.16	0.22
2	REG	BHR	2	41.76	0.71	5.68	32.25	18.36	*	0.43	0.20
2	REG	BHR	3	38.70	0.78	4.91	24.12	14.97	*	0.17	0.21
2	REG	BHR	4	50.29	0.54	6.19	38.27	18.66	*	0.00	0.23
2	REG	BHR	5	47.34	0.60	6.42	41.27	20.63	*	0.19	0.21
2	REG	BHR	6	50.11	0.64	6.37	40.64	19.36	*	0.07	0.22
2	REG	BHR	7	48.99	0.58	6.16	37.98	18.86	*	0.12	0.22
2	REG	BHR	8	47.78	0.62	6.15	37.81	19.01	*	0.11	0.22
				47.22	0.63	6.09	37.32	18.87			
2	REG	BF	1	30.75	0.86	6.01	36.11	22.71	*	0.28	0.24
2	REG	BF	2	28.18	0.90	5.73	32.79	22.19	*	0.44	0.23
2	REG	BF	3	42.04	0.78	8.59	73.83	32.25	*	0.34	0.24
2	REG	BF	4	37.35	0.76	7.26	52.73	27.29	*	0.15	0.26
2	REG	BF	5	37.53	0.77	8.02	64.40	31.78	*	0.32	0.24
2	REG	BF	6	44.74	0.72	8.79	77.30	32.86	*	0.29	0.24
2	REG	BF	7	42.06	0.70	8.20	67.21	30.98	*	0.34	0.24
2	REG	BF	8	41.76	0.73	8.36	69.90	31.80	*	0.27	0.24
				38.05	0.78	7.62	59.28	28.98			
2	REG	BT	1	36.79	0.79	11.93	142.23	58.61	*	0.91	0.23

2	REG	BT	2	31.25	0.86	10.60	112.32	53.76	*	1.12	0.22
2	REG	BT	3	38.55	0.80	12.77	163.00	62.02	*	0.96	0.22
2	REG	BT	4	39.61	0.71	12.57	158.09	60.98	*	0.79	0.25
2	REG	BT	5	38.10	0.74	13.32	177.36	68.27	*	0.96	0.23
2	REG	BT	6	43.40	0.72	14.05	197.35	68.03	*	0.89	0.23
2	REG	BT	7	41.43	0.69	13.28	176.42	64.94	*	0.93	0.23
2	REG	BT	8	40.77	0.72	13.40	179.67	66.07	*	0.90	0.23
				38.74	0.75	12.74	163.31	62.83			
2	NLIN	BHR	1	52.21	0.84	6.72	45.22	6.81	<0.0100	1.46	1.23
2	NLIN	BHR	2	41.32	0.89	5.62	31.57	5.95	>0.1500	1.82	1.21
2	NLIN	BHR	3	37.62	0.92	4.77	22.79	5.08	0.01	1.61	1.21
2	NLIN	BHR	4	47.42	0.85	5.83	34.02	5.70	<0.0100	2.05	1.19
2	NLIN	BHR	5	46.46	0.86	6.30	39.75	6.40	<0.0100	1.84	1.20
2	NLIN	BHR	6	48.97	0.86	6.23	38.80	6.32	<0.0100	1.65	1.21
2	NLIN	BHR	7	46.51	0.86	5.85	34.24	5.82	<0.0100	2.04	1.19
2	NLIN	BHR	8	45.91	0.87	5.91	34.92	5.95	<0.0100	1.88	1.20
				45.80	0.87	5.91	35.16	6.00			
2	NLIN	BF	1	30.34	0.94	5.93	35.14	6.33	>0.1500	1.33	1.28
2	NLIN	BF	2	28.08	0.96	5.71	32.55	6.65	<0.0100	1.66	1.26

2	NLIN	BF	3	38.07	0.92	7.78	60.54	7.80	<0.0100	2.39	1.22
2	NLIN	BF	4	33.58	0.93	6.53	42.61	6.27	<0.0100	2.21	1.23
2	NLIN	BF	5	36.44	0.92	7.79	60.69	8.03	<0.0100	2.05	1.24
2	NLIN	BF	6	41.72	0.90	8.20	67.21	8.16	>0.1500	2.34	1.22
2	NLIN	BF	7	37.45	0.91	7.30	53.27	7.00	<0.0100	2.68	1.21
2	NLIN	BF	8	37.51	0.91	7.51	56.39	7.39	<0.0100	2.43	1.22
				35.40	0.92	7.09	51.05	7.20			
2	NLIN	BT	1	36.44	0.92	11.82	139.60	12.17	<0.0100	2.74	1.26
2	NLIN	BT	2	31.11	0.94	10.55	111.30	11.86	0.03	3.33	1.24
2	NLIN	BT	3	35.97	0.93	11.91	141.90	12.30	<0.0100	3.99	1.21
2	NLIN	BT	4	36.18	0.91	11.48	131.90	11.06	<0.0100	4.19	1.22
2	NLIN	BT	5	37.12	0.91	12.97	168.30	13.32	<0.0100	3.82	1.22
2	NLIN	BT	6	41.19	0.90	13.33	177.80	13.42	<0.0100	3.98	1.22
2	NLIN	BT	7	37.51	0.91	12.02	144.60	11.71	<0.0100	4.68	1.20
2	NLIN	BT	8	37.51	0.91	12.33	152.10	12.29	<0.0100	4.27	1.21
				36.63	0.92	12.05	145.94	12.26			
3	REG	BHR	1	54.59	0.57	7.03	49.44	21.88	*	-2.13	1.98
3	REG	BHR	2	47.92	0.62	6.52	42.47	21.07	*	-1.67	1.81
3	REG	BHR	3	43.80	0.72	5.56	30.90	16.94	*	-2.01	1.92

3	REG	BHR	4	47.23	0.60	5.81	33.74	17.52	*	-2.23	2.02
3	REG	BHR	5	48.53	0.58	6.59	43.36	21.14	*	-1.95	1.91
3	REG	BHR	6	52.57	0.60	6.69	44.72	20.31	*	-2.16	1.98
3	REG	BHR	7	47.45	0.61	5.97	35.64	18.27	*	-2.09	1.95
3	REG	BHR	8	47.72	0.62	6.14	37.72	18.98	*	-2.15	1.98
	REG			48.73	0.61	6.29	39.75	19.51			
3	REG	BF	1	38.10	0.79	7.45	55.43	28.14	*	-2.23	2.20
3	REG	BF	2	43.68	0.76	8.88	78.78	34.39	*	-1.98	2.11
3	REG	BF	3	43.69	0.76	8.93	79.77	33.52	*	-2.00	2.10
3	REG	BF	4	33.69	0.80	6.55	42.90	24.62	*	-2.30	2.25
3	REG	BF	5	40.82	0.73	8.73	76.18	34.56	*	-2.00	2.12
3	REG	BF	6	44.77	0.72	8.80	77.40	32.88	*	-2.11	2.14
3	REG	BF	7	37.97	0.76	7.40	54.78	27.97	*	-2.01	2.11
3	REG	BF	8	39.22	0.76	7.85	61.65	29.86	*	-2.18	2.18
				40.24	0.76	8.07	65.86	30.74			
3	REG	BT	1	41.28	0.74	13.38	179.13	65.77	*	-1.52	2.11
3	REG	BT	2	42.78	0.74	14.51	210.46	73.59	*	-1.17	1.98
3	REG	BT	3	41.99	0.76	13.91	193.45	67.56	*	-1.30	2.02
3	REG	BT	4	35.84	0.76	11.37	129.39	55.16	*	-1.56	2.15

3	REG	BT	5	40.45	0.71	14.14	199.86	72.47	*	-1.29	2.03
3	REG	BT	6	44.45	0.71	14.39	206.99	69.67	*	-1.44	2.07
3	REG	BT	7	38.01	0.74	12.19	148.53	59.58	*	-1.36	2.04
3	REG	BT	8	39.22	0.74	12.89	166.25	63.56	*	-1.47	2.09
				40.50	0.74	13.35	179.26	65.92			
3	NLIN	BHR	1	52.17	0.84	6.72	45.15	6.72	<0.0100	0.05	2.34
3	NLIN	BHR	2	44.10	0.88	6.00	35.98	6.00	0.13	0.07	2.24
3	NLIN	BHR	3	40.33	0.90	5.12	26.19	5.12	<0.0100	0.05	2.36
3	NLIN	BHR	4	46.17	0.86	5.68	32.25	5.68	<0.0100	0.14	1.96
3	NLIN	BHR	5	47.07	0.86	6.39	40.80	6.39	<0.0100	0.09	2.13
3	NLIN	BHR	6	49.78	0.85	6.33	40.09	6.33	<0.0100	0.05	2.33
3	NLIN	BHR	7	46.19	0.86	5.81	33.76	5.81	<0.0100	0.11	2.03
3	NLIN	BHR	8	46.25	0.87	5.95	35.42	5.95	<0.0100	0.08	2.14
				46.51	0.87	6.00	36.21	6.00			
3	NLIN	BF	1	32.18	0.94	6.29	39.53	6.29	0.04	0.02	2.88
3	NLIN	BF	2	32.09	0.94	6.52	42.53	6.52	<0.0100	0.02	2.95
3	NLIN	BF	3	38.04	0.92	7.77	60.44	7.77	<0.0100	0.05	2.57
3	NLIN	BF	4	32.16	0.93	6.25	39.09	6.25	<0.0100	0.08	2.40
3	NLIN	BF	5	37.33	0.91	7.98	63.69	7.98	<0.0100	0.05	2.59

3	NLIN	BF	6	41.43	0.90	8.14	66.28	8.14	<0.0100	0.06	2.49	
3	NLIN	BF	7	35.88	0.92	6.99	48.89	6.99	<0.0100	0.09	2.31	
3	NLIN	BF	8	36.85	0.92	7.38	54.43	7.38	<0.0100	0.06	2.45	
				35.74	0.92	7.17	51.86	7.17				
3	NLIN	BT	1	37.30	0.91	12.09	146.20	12.09	0.02	0.06	2.65	
3	NLIN	BT	2	34.99	0.93	11.87	140.80	11.87	<0.0100	0.06	2.68	
3	NLIN	BT	3	37.14	0.92	12.30	151.30	12.30	<0.0100	0.09	2.50	
3	NLIN	BT	4	34.73	0.92	11.02	121.50	11.02	0.05	0.19	2.22	
3	NLIN	BT	5	37.99	0.91	13.28	176.30	13.28	<0.0100	0.11	2.41	
3	NLIN	BT	6	41.42	0.90	13.41	179.80	13.41	<0.0100	0.11	2.43	
3	NLIN	BT	7	36.47	0.91	11.69	136.70	11.69	<0.0100	0.19	2.20	
3	NLIN	BT	8	37.34	0.91	12.28	150.70	12.28	<0.0100	0.14	2.33	
				37.17	0.91	12.24	150.41	12.24				
4	REG	BHR	1	53.32	0.59	6.87	47.17	21.37	*	-1.27	1.22	0.08
4	REG	BHR	2	43.38	0.69	5.90	34.81	19.08	*	-0.55	0.82	0.11
4	REG	BHR	3	41.52	0.74	5.27	27.76	16.05	*	-1.64	1.57	0.04
4	REG	BHR	4	47.30	0.60	5.82	33.85	17.55	*	-1.68	1.51	0.06
4	REG	BHR	5	47.87	0.59	6.50	42.19	20.86	*	-1.64	1.62	0.03
4	REG	BHR	6	50.19	0.64	6.38	40.76	19.39	*	-1.33	1.22	0.09

4	REG	BHR	7	46.83	0.62	5.89	34.71	18.03	*	-1.57	1.48	0.05
4	REG	BHR	8	46.78	0.63	6.02	36.24	18.61	*	-1.67	1.54	0.05
				47.15	0.64	6.08	37.19	18.87	*			
4	REG	BF	1	31.30	0.85	6.12	37.40	23.11	*	-0.16	0.37	0.20
4	REG	BF	2	28.85	0.90	5.86	34.37	22.72	*	0.04	0.33	0.20
4	REG	BF	3	38.06	0.82	7.78	60.51	29.20	*	-0.69	0.90	0.14
4	REG	BF	4	33.82	0.80	6.58	43.23	24.71	*	-0.87	0.92	0.16
4	REG	BF	5	36.81	0.78	7.87	61.94	31.17	*	-0.64	0.85	0.15
4	REG	BF	6	41.88	0.75	8.23	67.71	30.76	*	-0.68	0.84	0.15
4	REG	BF	7	37.50	0.76	7.31	53.43	27.62	*	-0.70	0.90	0.14
4	REG	BF	8	37.42	0.78	7.49	56.11	28.49	*	-0.92	1.04	0.13
				35.70	0.81	7.15	51.84	27.22				
4	REG	BT	1	37.41	0.78	12.13	147.12	59.61	*	0.06	0.72	0.16
4	REG	BT	2	32.60	0.85	11.05	122.21	56.07	*	0.46	0.55	0.16
4	REG	BT	3	36.78	0.82	12.18	148.37	59.17	*	-0.37	1.16	0.10
4	REG	BT	4	36.00	0.76	11.43	130.60	55.42	*	-0.48	1.13	0.12
4	REG	BT	5	37.80	0.74	13.21	174.55	67.73	*	-0.35	1.16	0.10
4	REG	BT	6	41.40	0.75	13.40	179.55	64.89	*	-0.28	1.01	0.12
4	REG	BT	7	37.20	0.75	11.92	142.20	58.30	*	-0.38	1.15	0.10

4	REG	BT	8	37.44	0.76	12.31	151.57	60.69	*	-0.53	1.24	0.10
				37.08	0.78	12.21	149.52	60.23				
4	NLIN	BHR	1	52.99	0.83	6.83	46.59	6.83	*	0.28	1.18	1.11
4	NLIN	BHR	2	41.38	0.89	5.63	31.67	5.63	*	5.89	-0.81	1.29
4	NLIN	BHR	3	37.79	0.91	4.80	23.00	4.80	*	2.46	-0.28	1.23
4	NLIN	BHR	4	46.20	0.86	5.68	32.29	5.68	*	0.03	3.17	0.90
4	NLIN	BHR	5	46.59	0.86	6.32	39.98	6.32	*	1.19	0.31	1.17
4	NLIN	BHR	6	49.06	0.86	6.24	38.94	6.24	*	0.90	0.41	1.17
4	NLIN	BHR	7	46.18	0.86	5.81	33.75	5.81	*	0.33	1.28	1.07
4	NLIN	BHR	8	45.86	0.87	5.90	34.84	5.90	*	0.69	0.69	1.13
				45.76	0.87	5.90	35.13	5.90				
4	NLIN	BF	1	30.81	0.94	6.02	36.25	6.02	>0.1500	3.15	-0.61	1.35
4	NLIN	BF	2	28.15	0.96	5.72	32.72	5.72	<0.0100	4.07	-0.59	1.32
4	NLIN	BF	3	37.76	0.92	7.72	59.57	7.72	<0.0100	0.39	1.18	1.11
4	NLIN	BF	4	32.26	0.93	6.27	39.32	6.27	<0.0100	0.03	2.97	0.95
4	NLIN	BF	5	36.52	0.92	7.81	60.97	7.81	<0.0100	1.18	0.38	1.20
4	NLIN	BF	6	41.27	0.90	8.11	65.76	8.11	<0.0100	0.30	1.37	1.09
4	NLIN	BF	7	35.96	0.92	7.01	49.12	7.01	<0.0100	0.07	2.42	0.99
4	NLIN	BF	8	36.79	0.92	7.36	54.24	7.36	<0.0100	0.21	1.65	1.07

				34.94	0.93	7.00	49.74	7.00				
4	NLIN	BT	1	37.12	0.92	12.03	144.80	12.03	<0.0100	2.24	0.14	1.24
4	NLIN	BT	2	31.08	0.94	10.54	111.10	10.54	0.04	10.44	-0.77	1.32
4	NLIN	BT	3	36.06	0.92	11.94	142.60	11.94	<0.0100	1.89	0.49	1.17
4	NLIN	BT	4	34.79	0.92	11.04	121.90	11.04	0.05	0.06	3.06	0.93
4	NLIN	BT	5	37.21	0.91	13.00	169.10	13.00	<0.0100	2.42	0.32	1.19
4	NLIN	BT	6	41.01	0.90	13.27	176.20	13.27	<0.0100	0.96	0.95	1.13
4	NLIN	BT	7	36.54	0.91	11.71	137.20	11.71	<0.0100	0.29	1.89	1.03
4	NLIN	BT	8	37.11	0.91	12.20	148.90	12.20	<0.0100	0.72	1.21	1.10
				36.36	0.92	11.97	143.98	11.97				

Donde: BHR = biomasa de hojas y ramas (kg) BF = biomasa de fuste (kg); BT= biomasa total (kg); R^2 = Coeficiente de determinación; C.V.= coeficiente de variación (%); Sxy = error (kg); a, b y c = Parámetros estadísticos. IF = Índice de furnival; K-S= Prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov

* Valor de $P > 0.05$.