



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**PRODUCCIÓN DE MADERA EN PLANTACIONES DE HULE (*Hevea
brasiliensis*) EN HUIMANGUILLO, TABASCO**

JUAN PABLO GÓMEZ GONZÁLEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2015

La presente tesis titulado: **Producción de madera en plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis*) en Huimanguillo, Tabasco**, realizada por el alumno: **Juan Pablo Gómez González**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA: 
Dra. Marivel Domínguez Domínguez

ASESOR: 
Dr. Pablo Martínez Zurimendi

ASESOR: 
Dr. Gustavo Ramírez Valverde

H. Cárdenas, Tabasco, México, 10 Junio de 2015.

RESUMEN GENERAL

Uno de los principales problemas que enfrentan los productores de hule es saber cómo estimar el volumen de madera que tienen en sus predios a una edad en turno, a partir de datos obtenidos de un inventario forestal. Ante la necesidad de valorar el aprovechamiento de la madera de hule se ha generado un modelo para la estimación de volúmenes maderables a través de modelos. Para obtener valores para la estimación de los parámetros. Se realizó un inventario dasométrico en 11 plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) establecidas en Huimanguillo, Tabasco. Las plantaciones presentaron edades de 25 a 51 años, densidades de establecimiento de plantación de 570 árb.ha⁻¹; diámetro promedio de 31.35 cm; promedio de alturas dominantes de 27.25 m; área basal promedio de 49.82 m²ha⁻¹; altura comercial de 13.29 m; altura de Pressler de 9.74; volumen maderable de Pressler con corteza 1.47 m³ árbol⁻¹; índice de Reineke de 876. La ecuación de volumen propuesta consideró la forma del árbol a través del volumen de Pressler, para obtener volumen de fuste en pie. Se ajustaron modelos de volumen de Berkhout, Kopezky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher y Polinómico de tercer grado. Aplicando la validación cruzada, el modelo de Kopezky presentó mejor coeficiente de determinación con alta confiabilidad.

Las ecuaciones de volumen y sus expresiones tabuladas son una de las principales herramientas para conocer, de manera confiable, las existencias reales y realizar un manejo sostenible, así como para la gestión forestal. En este contexto, se generó una tabla de volúmenes para *H. brasiliensis* y determinar existencias de madera de hule en Huimanguillo, Tabasco México.

El volumen de madera producido en las plantaciones fue de 443.69 a 693.36 m³.ha⁻¹ y correspondió a un incremento medio anual comprendido entre 15.13 y 13.60 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Estos crecimientos identifican al hule como una de las plantaciones forestales de mayor crecimiento de madera de México. Este modelo se podrá emplear para estimar volumen de árboles, generar tarifa de cubicación y evaluar el potencial productivo de esta especie para el aprovechamiento maderable del hule en Tabasco, en un rango de edades de 25 a 51 años, en las etapas adulta y vejez.

ABSTRACT

One of the main problems faced rubber producers is how to estimate the volume of wood that are on their properties at an age shift from data obtained from a forest inventory. Given the need to evaluate the use of rubber wood it has created a model to estimate timber volumes through models. For fit values for parameters, a dasometric inventory was carried out in 11 plantations of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) established in Huimanguillo, Tabasco. Plantations werw 25 to 51 years old, planting densities of 570 establishment arb.ha⁻¹; average diameter of 31.35 cm; dominant average heights of 27.25 m; 49.82 average basal area m²ha⁻¹; commercial height of 13.29 m; Pressler height of 9.74; Pressler timber volume of 1.47 m³ with bark tree⁻¹; Reineke index of 876. The volume equation proposed consider the shape of the tree through the volume of Pressler, for bole volume up. Berkhout volume models, Kopezky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher and third-degree Polynomial were fit. Applying cross-validation, the model presented Kopezky best coefficient of determination with high reliability: $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$.

Equations weighted volume and expressions are one of the main tools to know, to reliably perform the actual stocks and sustainable management, as well as forest management. In this context, a table of volumes for *H. brasiliensis* was generated and determine rubber wood stocks in Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

The volume of timber produced in plantations was 443.69 to 693.36 m³.ha⁻¹ and corresponded to an annual average increase of 15.13 and 13.60 m³ ha⁻¹ yr⁻¹. These growths identify the rubber as one of the fastest growing forest plantations wood Mexico. This model can be used to estimate volume of trees, cubing generate rate and evaluate the productive potential of this species for timber use of rubber in Tabasco, in an age range of 25-51 years in the adult and old age stages.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más alto y sincero agradecimiento:

Al Colegio de Postgraduados, campus Tabasco, quien me recibió y formó en mis estudios de maestría en su programa producción agroalimentaria en el trópico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme un apoyo económico mediante una beca para realizar mis estudios y formación de maestría.

A la Dra. Marivel Domínguez Domínguez, quien como mi Consejera se condujo en todo momento con alta responsabilidad, ética y profesionalismo, además de distinguirme con su fraternal amistad y apoyo solidario.

A los integrantes de mi Consejo Particular, Dr. Pablo Martínez Zurimendi y Dr. Gustavo Ramírez Valverde, quienes se ocuparon, comprometieron y apoyaron para concluir satisfactoriamente el presente trabajo de investigación de tesis de maestría.

A todas aquellas personas que directa e indirectamente colaboraron para concluir mis estudios.

DEDICATORIA

Lo que haces en vida resuena en la eternidad.

A mi padre Sr. Raquel Gómez Bautista, como una muestra de mi profundo amor, admiración, gratitud y respeto, por sus consejos que nunca puse en saco roto y por hacer de mí lo que soy.

Con alegría dedico este trabajo a mi madre la Sra. Santana González Pérez, por todo lo que me ha dado en esta vida, especialmente por sus sabios consejos y espíritu de lucha constante para seguir adelante.

A Francisco, José Julián, por el gran apoyo que me ha mostrado, a pesar de momentos muy difíciles siempre me alentó hacia delante cuando todo es oscuridad.

A mí querida hermanita Yazmin, por alentarme a seguir superándome y por ser siempre la parte sensible de la familia.

A mi cuñada Marbella; de Bayona y en especial a mi sobrina Yareli y José Eduardo por darme una felicidad muy especial.

A toda la familia Gómez González, con acento especial a mi tío: Carmen Gómez Gómez, por sus constantes muestras de apoyo de capacitación al espíritu de trabajo.

Agradezco a todas las personas que me dan su amistad incondicional y me demuestran su aprecio a José Gabriel, Salomón, Brindis, Omar, Rodolfo, Maribel, Irma, Matías, Virginia, Evarista, Brenda, Luis Humberto, Lauro, Carmen de los Santos, Nataly, Sandra y Lili.

Respetuosamente

Juan Pablo Gómez González

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	III
ABSTRACT.....	V
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos particulares	5
HIPÓTESIS.....	6
REVISIÓN DE LITERATURA	7
La morfología del árbol de hule.....	7
La madera de hule como materia prima.....	7
El suministro de la madera de hule	8
El mantenimiento de la oferta de madera de hule para el futuro.....	8
La importancia del hule natural	10
Estado de la madera de hule como materia prima.....	11
REFERENCIAS.....	13
CAPÍTULO I: ECUACIONES DE VOLUMEN PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN MADERABLE DE <i>HEVEA BRASILIENSIS</i> MÜELL ARG. EN PLANTACIONES DE ETAPAS ADULTA Y VEJEZ.....	17

RESUMEN	18
ABSTRACT.....	19
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVO.....	21
METODOLOGÍA.....	21
Localización del área de estudio	21
Aplicación de encuesta	22
Primera Fase del estudio	23
Caracterización dasométrica	23
Área basal del rodal	24
Índice de densidad del rodal.....	24
Densidad de plantaciones de hule	24
Segunda fase del estudio	25
Selección de árboles “tipo” para cubicar con precisión	25
Medición de variables dasométricas de árboles en pie	26
Cubicación de árboles en pie	26
Análisis estadístico para verificar la normalidad de los datos	28
Selección del modelo de mejor ajuste a los datos	28
Ecuaciones alométricas	28
Análisis estadístico para determinar la ecuación de Volumen	29
Validación de los modelos	30
Cuarta fase del estudio	31
Validación de los modelos de volumen maderable de Rojo <i>et al.</i> (2005), Monroy y Návar (2004)	31
RESULTADOS	32
Primera fase	32
Información obtenida a través de las encuestas	32
Resultados de la Segunda fase	33
Medición de variables dasométricas de árboles en pie	33
Resultados de la Tercera fase.....	33

Prueba de normalidad de los datos.....	33
Correlación de las variables	34
Ajuste de los modelos alométricos.....	34
Análisis estadístico y selección del mejor modelo.....	35
Comparación de observaciones reales con las estimaciones de los mejores modelos.	38
Comparación de los modelos de volumen maderable de Rojo <i>et al.</i> (2005), Monroy y Navar (2004), y Kopezky	39
DISCUSIÓN	44
CONCLUSIÓN	47
REFERENCIAS.....	47
CAPÍTULO II: DETERMINAR LAS EXISTENCIAS DE MADERA DE HULE EN HUIMANGUILLO, TABASCO UTILIZANDO LA ECUACIÓN SELECCIONADA COMO TARIFA DE CUBICACIÓN.....	51
RESUMEN	52
ABSTRACT.....	53
INTRODUCCIÓN	54
METODOLOGÍA.....	56
Localización del área de estudio	56
Aplicación de encuesta	57
Caracterización dasométrica	58
Área basal del rodal	58
Índice de densidad del rodal.....	59
Densidad de plantaciones de hule	59
Incremento medio anual (IMA)	59
Volumen maderable	60

RESULTADOS	61
Determinación del factor de forma	61
Sistema de cubicación.....	62
Resultado de volumen maderable	63
Cubicación de árboles en pie	65
DISCUSIÓN	66
CONCLUSIÓN	69
REFERENCIAS.....	69
CONCLUSIONES GENERALES.....	74

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Localización de las plantaciones inventariadas de hule en Tabasco, México.	22
Figura 2. Gráfico de valor predicho o estimado de la variable dependiente frente a los residuos de la estimación del modelo.	38
Figura 3. Gráficos de dispersión de valor predicho frente al volumen maderable de Pressler (V_{PB}) de los mejores modelos ajustados a partir de la altura total. a) Kopezky; b) Stoate; c) Spurr d) Hohenadl-krenn.....	39
Figura 4. Representación gráfica de residuos de la validación los modelos matemáticos propuestos Monroy y Návar (2004), y Rojo <i>et al.</i> (2011) y este trabajo, frente a las variables de predicción.....	42
Figura 5. Gráficos de dispersión de valor predicho frente al observado en la validación de modelos a partir de la altura total comercial; propuesto por Monroy y Návar (2004) y Rojo <i>et al.</i> (2011): a) Monroy y Návar (2004); b) Kopezky; c) Schumacher; d) variables combinadas; e) Australiana; f) variables combinadas ponderadas.....	43
Figura 6. Localización de las plantaciones inventariadas de hule en Tabasco, México (Palma-López <i>et al.</i> , 2011).	57
Figura 7. Relación volumen maderable y edad.....	64
Figura 8. Altura dominante en plantaciones de hule en Tabasco, México	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de frecuencias de diámetro con corteza (D) y altura total (H) para los 43 árboles de <i>H. brasiliensis</i> utilizados para el sistema ahusamiento-volumen	25
Tabla 2. Ecuaciones alométricas empleadas para la estimación maderable en plantaciones de hule.....	29
Tabla 3. Aplicación y validación de cinco modelos matemáticos para obtención de volumen....	32
Tabla 4. Análisis de varianza y parámetros ajustados por regresión lineal para la obtención del Volumen con el modelo de Kopezky.....	35
Tabla 5. Eficiencia y R^2 ajustada de los modelos de volumen maderable en hule.....	35
Tabla 6. Pruebas de normalidad de las variables observadas o medidas frente al valor estimado de 43 datos.	36
Tabla 7. Estadística para la validación de los modelos.....	36
Tabla 8. Validación de modelos alométricos.....	41
Tabla 9. Cálculos de productividad maderable.....	62
Tabla 10. Coeficiente determinación y correlación de modelos matemáticos para la estimación de volumen de fuste.....	62
Tabla 11. Tabla de volumen (con corteza) para las plantaciones de hule (<i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg.) obtenida a partir del modelo $V = -0.08202 + 0.00087297 * D2$	63
Tabla 12. Tabla de volumen (con corteza) para las plantaciones de hule (<i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg.) obtenida a partir del modelo $V = -0.43263 + 0.00052919 * D2 + 0.00000753 * D2 * H + 0.02009 * H$	63

Tabla 13. Volumen maderable obtenido a partir de las variables observadas o medidas en campo.
..... 64

INTRODUCCIÓN GENERAL

La madera del hule (*Hevea brasiliensis*) se ha convertido en la fuente más importante de materias primas de madera en Malasia. Los árboles de hule, después de 25 a 30 años de producción de látex, disminuyen su rendimiento por debajo de un nivel económico rentable, lo que hace aconsejable realizar el corte de los árboles y así renovar la plantación (Lim *et al.*, 2003; Monroy *et al.*, 2006).

Los árboles de hule son ampliamente plantados en 20 países de todo el mundo para la producción de látex o hule natural (Teoh *et al.*, 2011). Según Shigematsu *et al.* (2011), más del 80% de la superficie total de las plantaciones de hule en el mundo se encuentran en Asia, donde Indonesia, Tailandia y Malasia, cubren entre las tres casi el 70% del cultivo total de hule (Shigematsu *et al.*, 2011).

Indonesia es el mayor cultivador de hule con una superficie de 3,329,000 ha, Tailandia es el segundo (1,968,000 ha), seguido de Malasia (1,315,000 ha), China (618,000 ha) y la India (573,000 ha) (Prabhakaran, 2010). Hay plantaciones de hule y presencia natural de árboles en la cuenca del río Amazonas en Brasil, también se planta al sur y al norte de partes de Brasil, Bolivia, Perú, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guayana Francesa, Surinam y Guayana. Se encuentran también en Guatemala, y en México.

La superficie forestal total reportada en 2010 en millones de hectáreas es: Brasil (519.5); China (206.9); Indonesia (94.4); India (68.4); Malasia (20.5); Tailandia (19.0); Vietnam (13.8); Côte d'Ivoire (10.4); Nigeria (9.0); Filipinas (7.7); Sri Lanka (1.9) (Shigematsu *et al.*, 2013).

México tiene una superficie plantada de hule de 27,165.98 (ha); cosechada de 20, 225.83 (ha); producción 51,396.78 (Ton año⁻¹) y un rendimiento de 2.54 (Ton ha⁻¹año⁻¹) distribuidos en los estados de Oaxaca, Veracruz, Chiapas y Tabasco (SIAP, 2013). La superficie hulera de Tabasco se ubica en los municipios de Macuspana, Jalapa, Teapa y Tacotalpa donde se concentra el 15.93%, en el municipio de Huimanguillo el 82.21%, y en Tenosique el 1.86% restante (SAGARPA, 2005).

Las edades de las plantaciones que se están aprovechando en Tabasco varían de 7 a 46 años. El 24% son plantaciones en estado de “juventud”, que van de 7 a 11 años, el 65% en estado “adulto” 12 a 31 años correspondiente al periodo de producción máxima, y el 11% se consideran plantaciones en estado de “vejez” mayores de 31 años de edad (después de 25 años de producción). La mayor superficie plantada en Tabasco de acuerdo a su estado fisiológico son las que se encuentran en estado “adulto” (Izquierdo-Bautista *et al.*, 2011).

El árbol de hule, es considerado como un material verde, respetuoso del medio ambiente que ha encontrado aplicaciones en todos los sectores de la industria de la madera. A pesar de su importancia como sector socio-económico, el futuro de la industria de la madera de hule en Malasia está bajo escrutinio (Prakash *et al.*, 2006; Ratnasingam *et al.*, 2012).

Los esfuerzos para mejorar la recuperación total de la biomasa de madera disponible y también la ampliación del uso de la madera de hule en México con aplicaciones de alto valor deben ser continuados. El cultivo de hule sigue siendo económicamente rentable, así como el valor neto de la madera (Ratnasingam *et al.*, 2012).

La madera de hule es moderadamente pesada con densidad media (515 kg/m³), baja contracción, grano recto, y el color atractivo, lo que la hace adecuada para la fabricación de muebles. Las características estructurales y anatómicas de la madera de hule se asemejan a los de otras especies de madera dura con muchas de las propiedades físicas y mecánicas comparables a las de la teca (Prabhakaran *et al.*, 2010). Sin embargo, la formación de madera de tensión es un defecto natural que causa diferencias en el secado, la madera, y problemas de acabado.

A pesar de su éxito abrumador, el suministro futuro de madera de hule se ha convertido en una preocupación importante de la industria de productos de madera en el Malasia, ya que se considera que la madera de hule presenta estacionalidad en la oferta y el precio de la materia es cada vez mayor (Ratnasingam *et al.*, 2012).

Debido a las limitaciones tecnológicas asociadas con el uso de aserraderos móviles, la mayoría de los propietarios de aserraderos portátiles prefieren aserrar troncos de mayor diámetro que proporcionan un mejor rendimiento (Ratnasingam, 2011).

La madera aserrada del árbol del hule se utiliza para la fabricación de muebles, piezas de muebles, molduras, mosaicos de madera, entarimado de pisos, contrachapados de madera,

tableros enlistonados y los residuos de aserrío, pueden utilizarse para la fabricación de aglomerados de cemento y madera y tableros de fibra de densidad media (MDF) (Rojo *et al.*, 2011).

Los estudios realizados por Ratnasingam *et al.* (2011) han demostrado que la madera de la especie es importante por los productos de madera de valor agregado que se comercializan, y sus ventas están impulsadas principalmente por su bajo costo.

La durabilidad natural de la madera depende de su composición química y la accesibilidad de nutrientes a organismos. El color es una de las características más utilizadas para la identificación de la madera e indicaciones de uso final (Arakaki *et al.*, 2008). En los países industrializados la madera de hule gracias a su textura, y color blanquecino, presenta características apropiadas para la industria de enchapes y muebles de alta calidad (Rojo *et al.*, 2011).

En Malasia el cultivo del hule y el procesamiento de la madera es rentable en las condiciones siguientes de producción: volumen mínimo de biomasa de fuste mayor de $180 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (hasta 10 cm de diámetro); volumen mínimo de troncos producidos para aserrar de $45 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (Ratnasingam *et al.*, 2011). El costo promedio de trozas por m^3 debería ser US \$ 60 para el año 2012. El volumen mínimo de la madera aserrada producida debe ser de $15 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. El costo aproximado de procesamiento (con exclusión de los costos de tratamiento conservador y secado en horno) debe ser de aproximadamente EU \$ 60 por m^3 . Los costos medios de tratamiento y secado en horno conservadores deberían ser US \$ 75 por m^3 , y el precio mínimo de la madera aserrada de

aproximadamente EU \$ 380 por m³ o más, que puede ser utilizado para pagar los costos del establecimiento de nuevas plantaciones (Rojo *et al.*, 2011). El ingreso de madera puede mejorar la rentabilidad de las plantaciones de hule en un 40%, dependiendo del precio de la madera (Shigematsu *et al.*, 2013).

Por lo anteriormente expuesto, este proyecto busca valorar la producción de madera de árboles de hule que por su edad dejaron de producir látex, así como también los árboles que estando en etapa adulta, terminaron anticipadamente con su etapa productiva. Este aprovechamiento contribuiría a incrementar la rentabilidad del cultivo cuando los productores de hule requieran cosechar la madera e industrializarla y representa una entrada de ingresos significativa al final del ciclo de producción de látex, que puede ser utilizada en parte para pagar los costos del establecimiento de nuevas plantaciones (Rojo *et al.*, 2011).

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la producción de madera en plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis*) en árboles que terminaron su etapa productiva (adulto y vejez).

Objetivos particulares

- Generar una ecuación de volumen de madera con la validación del mejor modelo entre los generados y los publicados para otros estados.
- Determinar las existencias de madera de hule en Huimanguillo, Tabasco utilizando la ecuación seleccionada como tarifa de cubicación.

HIPÓTESIS

- A partir de la ecuación de volumen seleccionada se podrá calcular la producción de madera de hule en el estado de Tabasco.
- El volumen en pie estimado en el modelo de ecuaciones alométricas permitirá asignar las existencias de madera de hule a partir de las edades de las plantaciones.

REVISIÓN DE LITERATURA

La morfología del árbol de hule

Un árbol de hule maduro presenta de 20 a 30 m de altura y su diámetro puede rebasar en promedio 30 cm, con un período productivo entre 25 y 30 años de edad (Prabhakaran, 2010; Ratnasingam *et al.*, 2011). Según Lim *et al.* (2003) el diámetro de los árboles de hule podría alcanzar los 50 cm a la altura del pecho.

El tronco es recto generalmente libre de ramas hasta la altura de 3 a 10 m dependiendo de los clones y la ubicación de crecimiento. Para logística y facilidad de extracción, los troncos de madera de hule se cortan en trozas de 1.8 m (Lim *et al.*, 2003). Con una distancia de plantación de 3 por 7 m, la densidad de población de árboles de hule está generalmente en el rango de 300 a 350 árboles por hectárea (Prabhakaran, 2010; Teoh *et al.*, 2011).

La madera de hule como materia prima

La explotación de la madera de hule por la industria de la madera en Malasia comenzó con el procesamiento de la madera aserrada, principalmente para la exportación a la India y Sri Lanka. De ser un residuo de madera, se convirtió en una materia prima importante para la gran industria de productos de madera en el país (Ratnasingam *et al.*, 2012).

Sin embargo, debe hacerse hincapié en que el éxito comercial de la madera de hule como materia prima de renombre internacional se debe a los intensos esfuerzos de los agentes de la industria tales como Masco Corporation, Hong muebles de teca Industria y UMW Furniture Industries, quienes defendieron el uso de la madera de hule en productos de muebles exportados a los Estados Unidos de América desde 1979 (Ratnasingam *et al.* 2012).

El suministro de la madera de hule

La principal causa de la disminución constante del cultivo hule en el país, está impulsado por el bajo precio de látex (hule natural) y el afán de los productores para convertir los cultivos a otros de mayor rentabilidad, en particular la palma de aceite (Teoh *et al.*, 2011).

La demanda de madera de hule en Malasia (2010) en base al estudio de Ratnasingam *et al.* (2011) demuestran una capacidad de procesamiento anual: cosecha (5.4), aserrado (2.1) muebles (1.9), constructores carpintería y ebanistería (0.6) productos de panel (1.7) millones de m³. Por consiguiente, el 35% de toda la biomasa de madera de hule procesado permanece como residuo, por razones de transporte; el cual debe ser aprovechado de manera eficiente para que la industria siga siendo competitiva en el futuro.

El mantenimiento de la oferta de madera de hule para el futuro

En Malasia el costo promedio de la biomasa de madera de hule por hectárea es de EU \$ 2,000, el cual se aproxima a cerca de 15 dólares EU por m³ de biomasa de madera. Aunque los troncos para aserrar la madera de hule pueden costar hasta 60 dólares EU por m³, los pequeños residuos de dimensiones promedio tienen costo de cerca de 20 dólares EU por m³ (Ratnasingam *et al.*,

2012). Aunque el gobierno ofrece un subsidio de replantación de EU \$ 2,750 por hectárea para los pequeños productores (Shigematsu *et al.*, 2011), no hay ningún incentivo previsto para garantizar la máxima recuperación de la biomasa de madera de hule disponible en el campo durante las actividades de replantación. Para México se otorgan apoyos económicos a productores a través del sistema producto hule y las instituciones como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con el programa PROARBOL para el establecimiento de nuevas plantaciones.

Desde el punto de vista agronómico, la tasa de crecimiento promedio de 10 y 15 m³ha⁻¹año registrado para áreas de hule en Tailandia debe ser capaz de sostener la demanda de madera de hule de la industria de la madera, siempre que la biomasa se maximice (Shigematsu *et al.*, 2011).

Estudios realizados en Kerala y Tamil Nadu, en la India obtuvieron ecuaciones de volumen de árboles a través de modelos de parámetros aleatorios, basados en edad y número de árboles por hectárea para cuatro clones: GT1 de 457.13 m³ha⁻¹ a la edad de 35 años; PB 235 de 247.53 m³ha⁻¹ a la edad de 25 años; RRII 105 de 73.32 m³ha⁻¹ a la edad de 24 años; RRIM 600 de 360.88 m³ha⁻¹ a la edad de 31 años; con un promedio de 500 árb.ha⁻¹; determinadas con un coeficiente de determinación ajustado 0.87 (Meenattoor *et al.*, 2006).

En Malasia, se han seleccionado 20 genotipos de rápido crecimiento que fueron identificados como potenciales clones de madera, con un volumen total de madera de 1.4 a 2.52 m³ árbol⁻¹. La actual producción media estimada de la madera de hule en todo el mundo es de 150-180 m³ha⁻¹. La disponibilidad anual bruta de la madera de hule es de 1.27 millones de m³ en 1997 a 1998, y

la estimación proyectada para 2010 es de 4.24 millones de m³. El tamaño actual del mercado mundial de muebles a base de madera de hule y productos relacionados es una suma de EU \$ 1.5 miles de millones a nivel mundial (Prabhakaran, 2010).

La industria de la madera de hule en Malasia es considerada como un gran éxito, con ingresos de exportación de más de 3 millones de dólares EU anuales en los últimos años, al tiempo que proporciona empleo a casi 75,000 personas en el país (Ratnasingam *et al.*, 2012).

La importancia del hule natural

El uso de madera de hule es principalmente para aplicaciones en muebles. Se extiende su uso para otras aplicaciones como el envasado de alimentos, utensilios de cocina, juguetes para niños, y estructuras de madera de interior (Matan *et al.*, 2009).

Se emplean en todos los sectores de la industria de productos para el hogar, tales como tableros de fibra de densidad media, tableros de partículas, tableros de bloque, madera de chapa laminada, madera contrachapada, madera laminada, tableros de ensambladura recta laminados, chapa, tablero de madera-cemento, los constructores de carpintería y ebanistería, productos de paneles, suelos, puertas, celulosa, muebles, combustible de madera e incluso como medio para el cultivo de hongos (Prabhakaran, 2010; Ratnasingam *et al.*, 2011; Tenorio *et al.*, 2012, Nasir *et al.*, 2013). El aserrín y otros residuos no utilizables son convertidos en briquetas y pellets como combustible. Para aumentar el valor, existe la posibilidad de utilizarlos como bio-residuos, ya que el aserrín de madera de hule es eficiente para la eliminación de tinte Bismarck Brown (un

colorante catiónico); usado como un precursor para la activación en la descontaminación de aguas residuales de la industria textil y teñido (Prakash *et al.*, 2005).

Estado de la madera de hule como materia prima

Dado que la madera de hule es sensible al biodeterioro, por (moho, pudrición por hongos, termitas, barrenador) el proceso de tratamiento de la madera se realiza en dos etapas: impregnación conservante y secado. Los tratamientos de conservación pueden estar dirigidos a corto plazo o de protección temporal o ser de largo plazo o de protección permanente (Matan *et al.*, 2009; Prabhakaran, 2010). Para una protección a largo plazo, a los conservantes de la madera se les permite penetrar profundamente en la madera, proporcionando máxima retención de sal seca y penetración conservante completa por la difusión de inmersión o por los procesos de impregnación a presión (Matan *et al.*, 2009).

En la difusión de inmersión, la madera recién aserrada se sumerge durante un período adecuado en una mezcla de ácido bórico y bórax en agua (Prabhakaran, 2010). En impregnación a presión, los conservantes se impregnan en la madera mediante la creación de un vacío bajo presión y se secan hasta niveles de humedad óptimos en la madera, para evitar variaciones dimensionales en el producto final (Matan, 2009).

El uso excesivo de ethrel podría causar efectos nocivos en la vida de los árboles de hule y finalmente, reducir el rendimiento (Jetro y Simon, 2007; She *et al.*, 2013).

La madera de hule se convirtió en una materia prima importante para la gran industria de productos de madera en Malasia. El cultivo de hule sigue siendo económicamente rentable y el

valor neto de la madera aumenta esta rentabilidad hoy en día (Ratnasingam *et al.*, 2012). La explotación de la madera de hule por la industria de la madera en Malasia comenzó con el procesamiento de la madera aserrada, principalmente para la exportación a la India y Sri Lanka.

Plantar en mayor espaciamiento estimula el crecimiento rápido de diámetro del tallo temprano en la rotación, lo que se traduce en un mayor volumen de la madera de cada árbol (Naji *et al.*, 2012). Por consiguiente, plantar a menor densidad de siembra (usar espaciamientos mayores), se relaciona con la maduración temprana de los árboles (Pande y Singh, 2005).

Los tableros de fibra de densidad media (MDF) exhiben mayor resistencia mecánica y pasan la norma ASTM D1037 para la unión interna y el módulo de ruptura con un espesor de 6 mm y una densidad de 810 kg m⁻³. Sin embargo, de acuerdo con la norma ASTM D 1037 (a), el estándar IB para un tablero con un espesor de 6 mm y la densidad por encima de 750 kg/m³ debería ser más de 0.75 MPa, dentro de los cuales pasaron el estándar mínimo requerido para el cultivo de hule Nasir *et al.* (2013).

La densidad de la madera se considera como un determinante eficaz de propiedades físicas y mecánicas que caracterizan diferentes tipos de madera. Conociéndolas, se pueden saber las características finales del producto (Pande y Singh, 2005; Naji *et al.*, 2012).

El peso específico aproximado de la madera de hule es de 0.56 g cm⁻³ (Teoh *et al.*, 2011). En estudios anteriores sobre diez clones de hule (*Hevea brasiliensis*), las densidades medias básicas observadas oscilan entre 0.51 y 0.57 g cm⁻³ y 0.58 a 0.60 g cm⁻³, respectivamente, es evidente

que la densidad de la madera varía con el clon y la densidad de plantación. Los clones y densidades de siembra se intentan en gran medida ajustar para cumplir con los requisitos de la industria del papel y la pulpa, destacando la densidad ideal básica, del rango de 0.48 a 0.57 g cm⁻³ (Naji *et al.*, 2012).

REFERENCIAS

- Arakaki O., E. Y., T. C. Monteiro P, J. A. Alves C, M. V. da Silva A, P. H. de Oliveira S, D. Eterno T. y M. A. Eduardo S. 2008. Color variation of rubberwood clones and cypress infected by *Gloeophyllum striatum* and *Phanerochaete chrysosporium*. Serviço Florestal Brasileiro. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63:41–45 p.
- Izquierdo-Bautista H., M. Domínguez-Domínguez., P. Martínez-Zurimendi., A. Velázquez-Martínez y V. Córdova-Ávalos. 2011. Problemática en los procesos de producción de las plantaciones de hule *Hevea brasiliensis* Muell Arg. en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 513 - 524.
- Jetro N.N. y G.M. Simon. 2007. Efectos de formulaciones de ácido 2-cloroetilfosfónico como estimulantes de rendimiento sobre *Hevea brasiliensis*. *African Journal of Biotechnology*, 6 (5)523-528.
- Lim, S. C., K. S. Gan y K. T. Choo. 2003. The characteristics, properties and uses of plantation timbers rubberwood and *Acacia mangium*. *Timber technology bulletin*, 26:1-11.

- Matana N. y N. Matan. 2008. Antifungal activities of anise oil, lime oil, and tangerine oil against molds on rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 62: 75–78.
- Matan, N., W. Woraprayote , W. Saengkrajang, N. Sirisombat. y N. Matan. 2009. Durability of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) treated with peppermint oil, eucalyptus oil, and their main components. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63: 621-625.
- Monroy R., C. R., O. A. Aguirre C. y J. Jiménez P. 2006. Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell Arg., en Veracruz. México. Facultad de ciencias Forestales, p: 124-125.
- Naji, H. R., M. H. Sahri, T. Nobuchi y E. Suhaimi B. 2012. Clonal and planting density effects on some properties of rubber wood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). “Rubber tree planting density,” *BioResources*, 7(1): 189-202.
- Nasir M., A. Gupta, M. D. Hossen de Beg, G. Kee C. y A. Kumar. 2013. La fabricación de tableros de fibra de densidad media a partir de madera de hule tratada con enzima (*Hevea brasiliensis*) de fibra y lignina modificada organosolv. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 44: 99–104.
- Pande P. K. y M. Singh. 2005. Inter-clonal, intra-clonal, and single tree variations of wood anatomical properties and specific gravity of clonal ramets of *Dalbergia sissoo* Roxb. *Wood Science and Technology*, 39(5): 351-366.

- Prabhakaran N., K. P. 2010. Rubber (*Hevea brasiliensis*). The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World, p: 237-273.
- Prakash, K. B.G., L. Rose M. y M. Velan. 2005. Adsorption of Bismark Brown dye on activated carbons prepared from rubberwood sawdust (*Hevea brasiliensis*) using different activation methods. Journal of Hazardous Materials, 126: 63–70.
- Prakash, K.B.G., K. Shivakamy, L. Rose M. y M. Velan. 2006. Preparation of steam activated carbon from rubberwood sawdust (*Hevea brasiliensis*) and its adsorption kinetics. Journal of Hazardous Materials, 136: 922–929.
- Ratnasingam, J., F. Ioras y L.Wenming. 2011. Sustainability of the Rubberwood Sector in Malaysia. Not Bot Horti Agrobo, 39(2):305-311.
- Ratnasingam, J., G. Ramasamy, F. Ioras, J. Kaner y L. Wenming. 2012. Production Potential of Rubberwood in Malaysia: Its Economic Challenges. Not Bot Horti Agrobo, 40(2): 317-322
- Rojo M., G.E., R. Martínez. R. y J. Jasso M. 2011. El cultivo de hule en México. Universidad autónoma indígena de México. 1ª. Edición. Libros técnicos: Serie forestal, p: 239-242.
- She F., D. Zhu, L. Kong, J. Wang, F. An y W. Lin. 2013. Ultrasound-assisted tapping of latex from para rubber tree *Hevea brasiliensis*. Industrial Crops and Products, 50: 803-808.
- Shigematsu A., N. Mizoue, T. Kajisa y S. Yoshida. 2011. Importance of rubberwood in wood export of Malaysia and Thailand. New Forests, 41(2)179-189.

Shigematsu A., N. Mizoue, K. Kakada, P. Muthavy, T. Kajisa y S. Yoshida. 2013. Financial potential of rubber plantations considering rubberwood production: Wood and crop production nexus. *Biomass and Bioenergy*, 49: 131-142.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2005. Subdelegación Agropecuaria, Tabasco. Tabasco. 14 p.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2013. Sector presupuestal: Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Consultado el 16 de marzo de 2015.

Tenorio C., R. Moya y D. Camacho. 2012. Propiedades físico-mecánicas de tableros terciados contruidos con especies tropicales de plantaciones para uso estructural. *CERNE*. 18(2) 317-325.

Teoh Y. P., M. M. Don y S. Ujang. 2011. Assessment of the properties, utilization, and preservation of rubberwood (*Hevea brasiliensis*): a case study in Malaysia. 57(4)255-266.

**CAPÍTULO I: ECUACIONES DE VOLUMEN PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN
MADERABLE DE *Hevea brasiliensis* MÜELL ARG. EN PLANTACIONES DE ETAPAS
ADULTA Y VEJEZ**

**ECUACIONES DE VOLUMEN PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN MADERABLE DE
Hevea brasiliensis MÜELL ARG. EN PLANTACIONES DE ETAPAS ADULTA Y VEJEZ**

**VOLUME EQUATIONS FOR ESTIMATING TIMBER YIELD OF *Hevea brasiliensis*
MUELL ARG IN PLANTATIONS OF THE STAGES OF ADULTHOOD AND OLD AGE**

RESUMEN

Ante la necesidad de valorar el aprovechamiento de la madera de hule se ha generado un modelo para la estimación de volúmenes maderables. Para obtener valores para la estimación de los parámetros, se realizó un inventario dasométrico en 11 plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) establecidas en Huimanguillo, Tabasco. Las plantaciones presentaron edades de 25 a 51 años, densidades de establecimiento de plantación de 570 árb.ha⁻¹; diámetro promedio de 31.35 cm; promedio de alturas dominantes de 27.25m; área basal promedio de 49.82 m² ha⁻¹; altura comercial de 13.29 m; altura de Pressler de 9.74; volumen maderable de Pressler con corteza 1.47 m³ árbol⁻¹; índice de Reineke de 876. La ecuación de volumen propuesta consideró la forma del árbol a través del volumen de Pressler, para obtener volumen de fuste en pie. Se ajustaron modelos de volumen de Berkhout, Kopezky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher y Polinómico de tercer grado. Aplicando la validación cruzada, el modelo de Kopezky presentó mejor coeficiente de determinación con alta confiabilidad: $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$. Este modelo se podrá emplear para estimar volumen de árboles, generar tarifa de cubicación y evaluar el potencial productivo de esta especie para el aprovechamiento maderable del hule hevea en Tabasco, en un rango de edades de 25 a 51 años (etapa adulta y vejez).

Palabras claves: Inventario, modelo de Kopezky, hule, Tabasco.

ABSTRACT

Given the need to evaluate the use of rubber wood it has created a model to estimate timber volumes. To obtain values for the estimated parameters, a dasometric inventory was conducted in 11 plantaciones rubber (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.). Established in Huimanguillo, Tabasco. Plantations had ages 25 to 51 años, planting densities of 570 establishment tree.ha⁻¹; average diameter of 31.35 cm; average commanding heights of 27.25m; average basal area of 49.82 m² ha⁻¹; commercial height of 13.29 m; Pressler height of 9.74; Pressler timber volume of 1.47 m³ with bark tree⁻¹; Reineke index of 876. The volume equation proposed consider the shape of the tree through the volume of Pressler, for bole volume up. Berkhout volume models, Kopezky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher and third-degree Polynomial were adjusted. Applying cross-validation, el modelo of Kopezky presented best coefficient of determination with high reliability: $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$. This model can be used to estimate volume of trees, cubing generate rate and evaluate the productive potential of this species for timber harvesting of *Hevea* rubber in Tabasco, in an age range of 25-51 years (adult and old age stage).

Key words: Inventory model Kopezky, rubberwood, Tabasco.

INTRODUCCIÓN

La madera de hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) es una de las más importantes para la industria de productos forestales en la zona tropical, ya que el agotamiento de los bosques y la escasez de otras especies podrá aumentar la importancia de esta por sus diversos productos (Reza

et al., 2011). Según Monroy *et al.* (2006) los árboles de hule disminuyen su rendimiento de látex de los 25 a 30 años de edad productiva, y son abandonadas, quemadas o derribadas, sin que se aproveche su madera. Es aconsejable realizar el aprovechamiento de la madera como una de las alternativas para que el productor obtenga ganancias económicas, extra al aprovechamiento del látex. Ratnasingam *et al.* (2011), reportan que los árboles de hule son materia prima en todos los sectores de la industria de la madera. Por las características estructurales y anatómicas, la madera del hule es adecuada para la fabricación de muebles, tableros de fibra de densidad media, tableros de partículas, madera de chapa laminada, madera contrachapada, tablero de maderamiento, celulosa (papel corrugado), por lo que se busca estimar la producción maderable en árboles de hule, realizando inventarios forestales para generar una tarifa de cubicación mediante la aplicación de ecuaciones alométricas. En Tabasco existe un 24% de plantaciones en estado de “juventud” de los 7 a 12 años, 65% en estado “adulto” 13 a 32 años y 11% en estado de “vejez” mayores de 32 años de edad (Izquierdo-Bautista *et al.*, 2011)

Los modelos alométricos se emplean para estimar volumen de árboles de hule, que estarán explicados en función de unas pocas variables de fácil medición, tales como el diámetro en la altura del pecho a 1.30 m y la altura total (Segura y Hernán y Hernán, 2008). El diámetro es el parámetro medido en todos los árboles en la mayoría de los inventarios forestales, mientras que la altura normalmente se mide en un subconjunto de árboles (Bravo *et al.*, 2007). La edad y el número de árboles por hectárea también se incluyen como variables predictoras (Meenattoor *et al.*, 2006).

El uso de metodología estadística, particularmente los procedimientos de regresión han permitido alcanzar reducciones considerables de costos, sin tener que disminuir la precisión de las estimaciones (Rojas *et al.*, 2014). La modelación del volumen se basa en dos dimensiones básicas, el diámetro normal y la altura, y puede elaborarse para una sola especie o para grupos de especies o un grupo de ellas que compartan un hábito de crecimiento similar (Rojas *et al.*, 2014). Por lo consiguiente, se cuenta con un sistema de cubicación en pie pero existe el inconveniente de que utilizan parámetros que no son medidos comúnmente para esta especie como el diámetro a base de la copa (Dic), altura de fuste limpio (Afl) propuesto por Monroy y Návar (2004); altura comercial (Hc) propuesto por rojo *et al.* (2011) previo a su aprovechamiento e industrialización.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es proponer un modelo de predicción de volumen maderable para (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) para la región de Tabasco México, en plantaciones en etapa adulta y vejez que disminuyeron su producción de látex.

METODOLOGÍA

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, en los ejidos de Pedregal Moctezuma 1^{era} Sección, Ejido Guadalupe Victoria, Chicoacán, y el Guanal. Geográficamente el área de estudio se localiza entre las coordenadas UTM WGS84 15 N 447293 y 1965282; 429604 y 1950092; con una altitud promedio de 75 metros sobre el nivel del mar (Fig. 1). Los climas presentes en este municipios son: Am (f) cálido húmedo con lluvias en verano y Aw (w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura máxima de 31.7 °C , mínima 21.9°C, y anual

de 24.1°C (S.M.N). La zona de estudio corresponde al paisaje geomorfológico de terrazas estructurales (Lomeríos), presentándose relieve con lomerío desde ligeramente convexo hasta fuertemente convexo (Ortiz *et al.*, 2005).

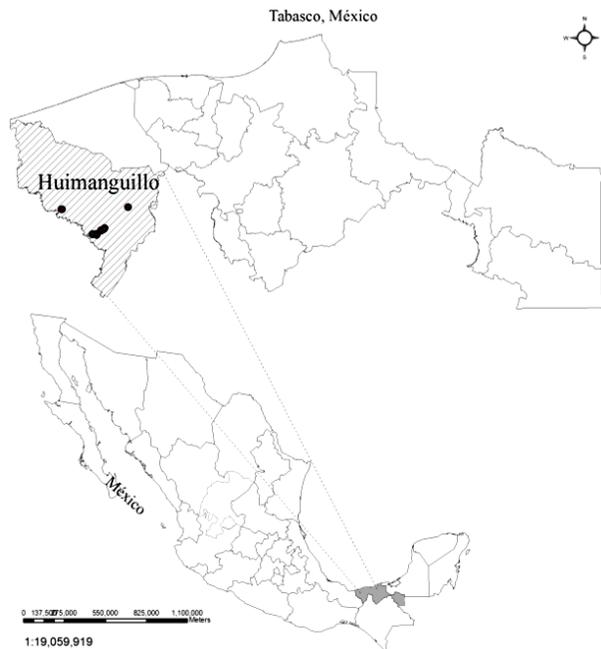


Figura 1. Localización de las plantaciones inventariadas de hule en Tabasco, México.

Aplicación de encuesta

Se realizó la aplicación de entrevistas semiestructuradas a 11 productores, considerando la base de información de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP) en vinculación con el Sistema Producto hule. Se seleccionó el municipio de Huimanguillo, Tabasco porque ahí se distribuye el 80.67% de las plantaciones de hule establecidas. Asimismo, se realizaron recorridos de campo con la finalidad de conocer el manejo silvícola de las plantaciones muestreadas, el estado fisiológico de las plantaciones “adultas” (13 a 32 años) y en

etapa de “vejez” (mayores de 32 años de edad) (Monroy *et al.*, 2006; Izquierdo-Bautista *et al.*, 2011). Las plantaciones seleccionadas para realizar el inventario fueron de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años, edades en que los árboles de hule disminuyen su rendimiento de látex. Por lo consiguiente, este estudio consta de cuatro fases para su realización.

Primera Fase del estudio

Caracterización dasométrica

Se llevó a cabo un inventario forestal en 11 plantaciones de hule (una plantación de 25, 32 y 34 años, dos plantaciones de 31 años, tres plantaciones de 28 y 51 años). Se establecieron 3 parcelas de 20 x 20 m² por plantación, con 23 árboles en promedio por parcela, haciendo un total de 753 árboles, con un área total inventariada de 13,200 m².

De todos los árboles de las 33 parcelas con diámetro mayor a 10 cm se midieron las siguientes variables dasométricas: diámetro a 1.30 m (d) con la forcípula; altura de fuste limpio (h_{fl}) y altura total (h) con una pistola Haga. El diámetro mínimo de inventario se eligió con el requisito de ser un árbol aprovechable para madera de desintegración (8-20 cm) para la fabricación de papel y conglomerados; para puntales (8-15 cm) y postes (10-45 cm); para madera para sierra (20-200 cm), o para madera para desenrollo (15-160 cm) (Rodríguez *et al.*, 2008; Rondeux, 2010).

Área basal del rodal

La medida de densidad más frecuente referida a un rodal es la suma de la sección de los troncos de los árboles a la altura de pecho, denominada área basal (Domínguez *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2012), y se estima con la ecuación:

$$G = \left[\sum_i^n \frac{\pi}{4} * \frac{D^2}{10000} \right] / S$$

NOTA: G= Área basimétrica (m² ha⁻¹); D= diámetro en la altura del pecho (cm); S= tamaño de la parcela (ha).

Índice de densidad del rodal

Una medida extendida de la densidad del rodal es el índice de densidad del rodal (IDR) (en inglés *stand density index SDI*) para cuyo cálculo se necesita el número de árboles por hectárea (N) y el diámetro medio cuadrático en cm (D_g) (Gadow *et al.*, 2007).

$$D_g = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

Densidad de plantaciones de hule

El (IDR) número de árboles que existen en un rodal comparado con un rodal puro, bien poblado y de edad uniforme con un diámetro medio cuadrático de 25 cm (Domínguez *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2012).

$$IDR = N * \left(\frac{D_g}{25} \right)^{1.605}$$

N = Densidad de arbolado (árb.ha⁻¹); Dg = diámetro medio cuadrático (cm).

En esta primera fase de inventario en campo, se calcularon diámetro medio cuadrático (Dg) en cm; altura dominante (H_{dom}) en m.; área basal (G) en m².ha⁻¹; número de árboles por hectárea (N) e IDR las cuales permiten generar la descripción de cualquier masa monoespecífica (Condés y Martínez, 2001).

Segunda fase del estudio

Selección de árboles “tipo” para cubicar con precisión

En la segunda fase de medición de campo, se seleccionaron los árboles a cubicar. De la población de 743 árboles medidos inicialmente, se seleccionaron 43 árboles, en función del diámetro medio cuadrático por cada intervalo de clase diamétrica y de altura, considerando una muestra representativa para inventariar de cada sitio (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de frecuencias de diámetro con corteza (D) y altura total (H) para los 43 árboles de *H. brasiliensis* utilizados para el sistema ahusamiento-volumen

Dg	D \ H							Árboles tipo
		12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	
		10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	
15.81	10-30	II	II	II	I			7
25.5	21-30	I	III	III	III	I		11
35.4	31-40	I	I	III	III	I	I	10
45.2	41-50			I	II	II		5
55.2	51-60			I	I	I		3
65.2	61-70				I	I	I	3
75.2	71-80				I	I	I	3
85.1	81-90					I		1
	Total	4	6	10	12	8	3	43

NOTA: Dg = diámetro medio cuadrático (cm); D = diámetro en la altura del pecho a 1.30 m (cm); H = altura total.

Para realizar la selección de árboles siguiendo los patrones por clase de altura, se aplicó la metodología propuesta por Rojo *et al.* (2005) de índice de sitio, como variable representativa de la productividad de un área forestal. El modelo elegido se basa en la función anamórfica de Weibull (Bailey, 1980). Los parámetros se calcularon en función de las variables descriptoras de la masa forestal, de acuerdo a Condés y Martínez (2001).

De los árboles seleccionados 14 fueron árboles dominantes y 29 codominantes. Se determinaron 6 clases de altura (10-15,16-20, 21-25, 26-36, 31-35, 36-40 m) asimismo se determinaron 8 clases diamétricas (10-20,21-30, 31-40,41- 50, 51-60,61-70,71-80,81-90 cm).

Medición de variables dasométricas de árboles en pie

En los 43 árboles tipo se realizó la medición directa de las variables dasométricas con el Relascopio de Bitterlich: diámetro a inserción de la primera rama (Dic), altura de fuste limpio (h_{fl}), altura total (h), altura comercial (h_c), altura de Pressler (h_{PB}). El diámetro en la altura del pecho (d), se midió con la forcípula. El grosor de la corteza (GC, cm) se midió a 1.30 m de altura con el medidor de corteza o calibrador Haglof.

Cubicación de árboles en pie

El volumen de un árbol en pie (Tabla 2) se determinó en campo con el método de Pressler por medio del Relascopio de Bitterlich (Román, 1999; López, 2005; Rondeux, 2010). Pressler postula que el volumen del fuste, cualquiera que sea su tipo dendrométrico, es igual a dos tercios del área

basal, multiplicada por una altura que Bitterlich denominó altura de Pressler (P) y que es igual a la altura entre la sección transversal a 1.3 m y la sección con diámetro igual a la mitad del diámetro normal, más 1.95 m.

Formula de Pressler para la cubicación de árboles en pie.

$$V_{PB} = \frac{2}{3} * g * h_{PB}$$

$$h_{PB} = hp + 1.95g = \frac{(D)^2}{100} * \frac{\pi}{4}$$

NOTA: V_{PB} = volumen de Pressler (m^3 árbol⁻¹); g = área basal del árbol (m^2); h_{PB} = altura de Pressler (m); h_p = altura del punto de referencia de Pressler (m). Distancia entre el área basal y la sección transversal del árbol cuyo diámetro es igual a la mitad del diámetro normal.

Para obtener la altura de Pressler, primero se ubicó el punto de referencia de Pressler (R) o punto directriz (hp) del árbol, punto en el cual la sección transversal del árbol tiene un diámetro igual a la mitad del diámetro normal.

Con los datos medidos en las parcelas se calcularon las siguientes variables para cada árbol tipo: altura de Pressler (h_{PB}), volumen maderable de Pressler (v_{PB}). Además se calcularon el volumen de madera con corteza y sin corteza a través de factor o coeficiente de forma estimado para esta especie, de acuerdo con Rivas (2006).

Para efectos de validación de las ecuaciones de cubicación se calcularon los volúmenes de fuste (V_f), rama (V_a) y total (V_b), de acuerdo con Román (1999); Monroy y Návar (2004); López (2005); Rojo *et al.* (2011)

Tercera fase

Análisis estadístico para verificar la normalidad de los datos

Se realizó un análisis estadístico de correlación para observar el grado de asociación entre las variables dasométricas diámetro a la altura del pecho, altura total en relación al volumen de Pressler (V_{PB}). También se aplicó una prueba de Shapiro–Wilk para ver si el conjunto de datos de las variables dasométricas de la población se encuentran normalmente distribuidas.

Selección del modelo de mejor ajuste a los datos

Para realizar la selección del modelo se consideraron los siguientes criterios: coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust.) el coeficiente de determinación (R^2) que penaliza por el número de variables independientes y el error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME).

Ecuaciones alométricas

Se probaron nueve ecuaciones alométricas genéricas para la estimación de volumen en árboles de hule propuestas por: Monárrez y Ramírez (2003), Segura y Hernán *et al.* (2008) por su similitud climática y edáficas, con el estado de Tabasco y las condiciones de cálculo similares a las referidas en este estudio de trabajos realizados en el estado de Veracruz, propuestos por Monroy y Návar (2004) y por Rojo *et al.* (2011) (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones alométricas empleadas para la estimación maderable en plantaciones de hule.

Nombre	Ecuación linealizada	No. de Ecuación	Modelo
Berkhout		Ec. 1	$V = a + b * D$
Kopezky		Ec. 2	$V = a + b * D^2$
Hohenadl-Krenn		Ec. 3	$V = a + b * D + c * D^2$
Husch	$\ln V = a + b * \ln(D)$	Ec. 4	$V = e^{a*D^b}$
Spurr		Ec. 5	$V = a + b * D^2 * H$
Stoate		Ec. 6	$V = a + b * D^2 + c * D^2 * H + d * H$
Meyer		Ec. 7	$V = a + b * D^2 + c * D * H + d * D^2 * H$
Schumacher	$\ln V = a + b * \ln(D) + c * \ln(H)$	Ec. 8	$V = e^a * D^{bb} * H^c$
Polinómico tercer grado	$\ln V = a + b * D + c * D^2 + d * D^3$	Ec. 9	$V = e^{(a+b*D+c*D^2+d*D^3)}$

Fuente: Monárrez y Ramírez. 2003; Segura y Hernán *et al.* 2008

NOTA: V= volumen (m³ árbol-1); D = diámetro a la altura de pecho (cm); H = altura total (m); a, b, c, d = parámetros de regresión del modelo; ln= logaritmo base e.

Análisis estadístico para determinar la ecuación de Volumen

La muestra analizada consistió en 43 datos totales, se realizó el procedimiento de aleatorización, y agrupación de datos en 5 grupos para las ecuaciones alométricas de volumen. Se usó 80% de los datos para los procedimientos de modelización con el programa estadístico SAS (2003) y el 20% para la validación; aplicando en ellos la validación cruzada, para ver el comportamiento por cada ecuación. Se corrieron los modelos de Berkhout, Kopezky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher y Polinómico de tercer grado a través de regresión lineal simple para determinar el mejor modelo y obtener la ecuación de volumen de fuste en pie.

Validación de los modelos

Para validar los modelos, la estimación se realizó con el 80% de los datos seleccionados aleatoriamente del conjunto total; el 20% restante se usó para para medir la bondad de los ajustes en forma independiente (Huang *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2006); la comparación del ajuste de los modelos con el error medio del modelo (MRES) , la diferencia absoluta media (AMRES), la eficiencia del modelo (EF) y el coeficiente de determinación ajustado aproximado (aprox- $R^2_{ajust.}$).

$$MRES = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad Ec. 10$$

$$MRES(\%) = 100 \times \frac{MRES}{\bar{y}} \quad Ec. 11$$

$$AMRES = \frac{\sum|(y_i - \hat{y}_i)|}{n} \quad Ec. 12$$

$$AMRES(\%) = 100 \times \frac{AMRES}{\bar{y}} \quad Ec. 13$$

Donde:

MRES: Error medio del modelo

AMRES: Diferencia media absoluta

y_i = valor observado o real

\hat{y}_i = Valor estimado con el modelo

n = Número de observaciones en la validación de los modelos

\bar{y} = Valor promedio de los valores observados o reales

Los modelos se validaron aplicando las fórmulas de eficiencia del modelo (EF) que se considera un estimador para evaluar los modelos aplicados con regresiones no lineales (Huang *et al.*, 2003;

Gadow *et al.*, 2007) y de los resultados del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajust}) del análisis de regresión aplicado.

$$EF = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad Ec. 14$$

Donde:

y_i = valor observado o real

\hat{y}_i = Valor estimado con el modelo

\bar{y}_i = Valor promedio de los valores observados o reales

Donde (SSC) es la suma de cuadrados total, y (SSR) la suma de cuadrados medios de los residuos (Domínguez *et al.*, 2006).

$$Aprox - R^2_{ajust} = \frac{SSC - SSR}{SSC} \quad Ec. 15$$

Donde:

SSC: suma de cuadrado total.

SSR: suma de cuadrados medios de los residuos.

Además se realizó un análisis de sensibilidad de los modelos para ver la variación del valor predicho a través de la obtención del error relativo (Ec.16).

$$Error\ relativo(\%) = 100 \times \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \quad Ec. 16$$

Cuarta fase del estudio

Validación de los modelos de volumen maderable de Rojo *et al.* (2005), Monroy y Návar (2004) Se realizó la estimación de los parámetros de los modelos matemáticos propuestos por Monroy y Návar (2004) y Rojo *et al.* (2011) (Tabla 3) para la obtención del volumen de árbol en pie, es

decir se validaron comparando volumen maderable medido y volumen maderable predicho o estimado con los modelos usando el 100% de los datos. Se aplicó un análisis de regresión lineal, utilizando para ello el programa estadístico SAS (2009); se procederá a probar el ajuste de las ecuaciones con relación a las variables independientes.

Tabla 3. Aplicación y validación de cinco modelos matemáticos para obtención de volumen.

Modelo	Ecuación	No. ecuación
Ecuación combinadas	Variables $V = -0.00336 + 0.00003686 * D^2 * Hc$	Ec.17
Ecuación Schumacher	de $V = 0.02882823 * D^{2.24237} * Hc^{0.74475}$	Ec.18
Ecuación Australiana	$V = -0.03046 + 0.00017592 * D^2 - 0.000087 * Hc + 0.00002363D^2 * Hc$	Ec.19
Ecuación Combinadas Ponderada	Variables $V = -0.00413 + D^2 * Hc * 0.00003657$	Ec.20
*Ecuación Generalizada Ponderada(V_{fuste})	Lineal $V_{fuste} = -0.06399 + 0.009682Dic + 0.000026D^2H$	Ec. 21

Fuente: *Monroy y Nívar., 2004; Rojo *et al.*, 2011.

NOTA: V = volumen (m³); D = diámetro a la altura de pecho (cm); H_c=altura comercial (m);*Dic =diámetro a inserción de la primera rama (cm);

*H= altura total (m).

RESULTADOS

Primera fase

Información obtenida a través de las encuestas

Los árboles de las plantaciones fueron establecidos a espaciamiento de 6 m x 3 m de manera general. Solamente dos plantaciones de edad de 28 años alcanzaron densidad mayor 775 árb.ha⁻¹ y 725 árb.ha⁻¹, debido a establecimientos de viveros en áreas actualmente plantadas de hule. En el manejo silvícola de las plantaciones inventariadas fueron intercalados cultivos agrícolas como maíz (*Zea mays*); frijol (*Phaseolus sp*), piña (*Ananas comosus*) y yuca (*Manihot*

esculenta), actividades realizadas durante los tres primeros años. En los árboles plantados se realizaron podas de formación para mantener el fuste libre de ramas en 7.40 m de altura, para posteriormente realizar la pica. Los productores que ocuparon sus terrenos para viveros aprovechaban para obtener varetas para la extracción de yemas clonales.

Resultados de la Segunda fase

Medición de variables dasométricas de árboles en pie

La máxima área basal de los árboles la presentó la plantación de 51 años de edad. La excepción la constituye la plantación de 34 años con densidad de 575 árb.ha⁻¹ y la de 31 años con densidad de 592 árb.ha⁻¹, establecidas en la misma zona de estudio.

Resultados de la Tercera fase

Prueba de normalidad de los datos

La prueba de normalidad de los datos de los 43 árboles tipo para el ajuste de los nueve modelos alométricos y así seleccionar la mejor ecuación con su estimador de parámetro; en relación a la variable de respuesta Volumen maderable de Pressler (V_{PB}) generó promedio de $1.47 \pm 1.66 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$, con coeficiente de variación de 113.18%. Los valores mínimos y máximos son $7.93 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$ y $0.08 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$, respectivamente. La variable tiene distribución normal aplicando el estadístico de prueba W: 0.75% (ShapiroWilks).

La desviación estándar es muy grande (el coeficiente de variación tiende a uno). Esta desviación se debe a que se buscaron muestras que representaran toda la variabilidad de tamaños de la población. La tendencia si bien ha sido establecida por la media, es confiable, porque se

presentan valores alejados hacia la derecha de la media, las variables fueron estratificadas por clases de diámetro-altura, dentro de un grupo de edades.

Correlación de las variables

El grado de asociación de las variables D y H, como datos observados o medidos con relación a los valores estimados o predichos (V_{PB}), aplicando las pruebas estadísticas de correlación de Pearson basado en la t -student, con la hipótesis planteada $H_0: \rho = 0$; $H_a: \rho \neq 0$; como $t_{cal} > t_{tablas}$, se rechaza $H_0: \rho = 0$, lo cual significa que existe una fuerte asociación entre el diámetro a 1.30 m y V_{PB} . Por lo consiguiente, en la matriz de correlación el coeficiente de correlación muestral estimado es alto $r=0.889$ y significativo ($p<0.0001$), rechazando la hipótesis nula planteada $H_0: \rho = 0$, indicando que existe una fuerte asociación entre el volumen maderable de Pressler (V_{PB}) y el diámetro de los árboles.

Ajuste de los modelos alométricos

El mejor modelo ajustado para determinar la ecuación de volumen para la especie de hule en Tabasco fue la de Kopezky, se muestra en la tabla 4. A continuación se presentan los resultados de los valores del coeficiente de determinación ajustado y la eficiencia de los modelos (Tabla 5).

Tabla 4. Análisis de varianza y parámetros ajustados por regresión lineal para la obtención del Volumen con el modelo de Kopezky.

Fuente	G.L	Suma cuadrados	Cuadrado de media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	95.78147	95.78147	196.46	<.0001
Error	41	19.98923	0.48754		
Total corregido	42	115.77071			
	$R^2=0.8273$	$R^2_{ajust}=0.8231$	Coef Var=47.59736		DW=2.195
Variable	Estimación	Error estándar	Valor t	Pr > t 	Inflación de la varianza
Intercept	-0.08202	0.15346	-0.53	0.5959	0
D ²	0.000873	0.00006228	14.02	<.0001	1

Se puede observar en el análisis de varianza en cumplimiento de las hipótesis estadísticas $H_0: \beta_1 = 0$ Vs. $H_a: \beta_1 \neq 0$; que el valor calculado de $F= 196.46$, permite rechazar la hipótesis de nulidad H_0 , con un valor $p=0.0001$ ($Pr \geq F$). También se observa el coeficiente de determinación $R^2= 0.8273$, explicando el modelo el 82.73% de la variación en V_{PB} .

Tabla 5. Eficiencia y $R^2_{ajustada}$ de los modelos de volumen maderable en hule.

Modelos	$R^2_{ajustada}$	Eficiencia modelo (EF)
Berkhout	0.7933	0.72
Kopezky	0.8261	0.74
Hohenadl-Krenn	0.8279	0.72
Husch	0.8838	0.71
Spurr	0.8258	0.74
Stoate	0.8405	0.73
Meyer	0.8421	0.72
Schumacher	0.9063	0.73
Polinómico tercer grado	0.8878	0.68

Análisis estadístico y selección del mejor modelo

En el estudio de los residuos estudentizados del modelo de Kopezky del volumen de los árboles, dio como resultado una media próxima a uno y la varianza cercana a dos (Tabla 6). La

desviación estándar fue inferior a la varianza. La distribución de los residuos fue normal con ($Pr < W=0.0001$), aunque muestra cierto grado de influencia de apuntamiento del 4.5 % con relación a una distribución normal. Cabe señalar que para esta etapa se demostró que el diámetro promedio (D), altura total (H) y el valor predicho o estimado de volumen de Pressler (V_{PB}) pudieron explicar la significancia en relación a la variable dependiente.

Tabla 6. Pruebas de normalidad de las variables observadas o medidas frente al valor estimado de 43 datos.

Variable	Media	Varianza	Desviación std	Curtosis o apuntamiento	Pr < W
D	37.9930233	338.8063	18.4066906	0.06053063	0.0019
H	26.7906977	53.41833	7.30878447	-0.4799829	0.648
VPB	1.46697674	2.756445	1.66025462	4.53091447	<0.0001

El error medio del modelo o sesgo (MRES) y la diferencia media absoluta (AMRES) resultaron aceptables (dentro de $\pm 10\%$ del valor de la media observada al 95% del nivel de significancia), según Huang *et al.* (2003). En el caso del MRES y AMRES para el modelo de volumen en pie (0.003% y 0.474%), respectivamente (Tabla 7), está acorde a los valores obtenidos en el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajust}) en el análisis de varianza.

Tabla 7. Estadística para la validación de los modelos.

Ecuaciones	EF.		MRES (%)		AMRES (%)		Calif. total
	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	
Kopezky	0.74	1	-1.01	3	32.84	1	5
Stoate	0.73	3	0.72	2	33.25	2	7
Spurr	0.74	2	-1.41	4	33.39	4	10
Hohenadl-krenn	0.72	7	0.32	1	34.09	6	14
Schumacher	0.73	4	3.41	8	33.37	3	15
Meyer	0.72	6	1.51	6	33.79	5	17
Berkhout	0.72	5	-1.43	5	37.09	9	19
Husch	0.71	8	2.64	7	34.31	7	22
Polinómico tercer grado	0.68	9	8.36	9	35.49	8	26

NOTA: MRES= error medio del modelo o sesgo; AMRES= diferencia media absoluta; EF= eficiencia del modelo.

En relación a test de las distancias de Cook (0.125 a 1.125), no se encontraron valores grandes para indicar la influencia de una observación en la estimación. Respecto a la diferencia de ajustes (Dffits) no se obtuvieron valores que sobrepasan en valor absoluto a $|2[(m + 1)/n]^{1/2}|$ consideradas influyentes, ya que los puntos presentan valores cercanos a cero, con una varianza homogénea, por lo que los datos tienen buen ajuste (Jiménez y Rincón, 2001). Los gráficos del valor observado frente a los residuos para la estimación del mejor modelo ajustado, en relación a las variables independientes diámetro en la altura del pecho (D), Altura total (H) y el valor predicho de la variable dependiente Volumen de Pressler (V_{PB}) (Figura 2).

De los nueve modelos, el que mejor eficiencia y mejor coeficiente de determinación ajustado (0.82) presentó en conjunto con MRES y AMRES fue el de Kopezky. Los modelos alométricos de volumen de Husch y Polinómico de tercer grado resultaron muy bajos en la eficiencia, presentando bajo ajuste.

La ecuación generada de Kopezky quedó como sigue:

$$V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$$

Donde

V: Volumen.

D: diámetro a 1.30 m.

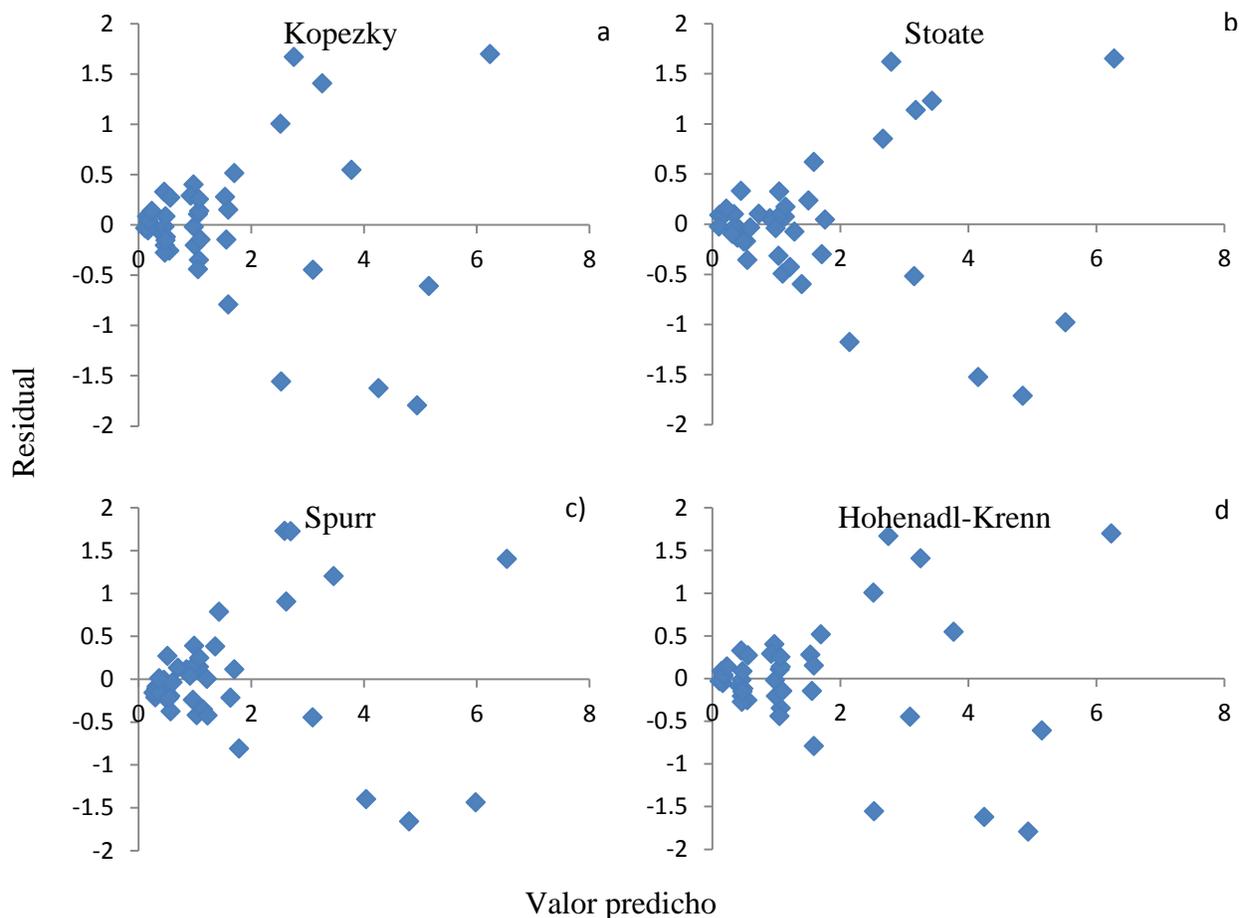


Figura 2. Gráfico de valor predicho o estimado de la variable dependiente frente a los residuos de la estimación del modelo.

Comparación de observaciones reales con las estimaciones de los mejores modelos.

En el gráfico de dispersión de volumen los valores predichos y observados se distribuyen en la línea de ajuste, en un nivel de significancia del 95% (Figura 3). Realizando el análisis de regresión lineal los modelos de mejor ajuste son Kopezky; Spurr; Stoate y Hohenadl-krenn. La ecuación de Kopezky presenta equilibrio en el modelo aplicado para el volumen maderable a edades de 25 a 51 años, con el mejor ajuste entre el valor predicho de volumen y el valor estimado, ajustados a partir de la altura total.

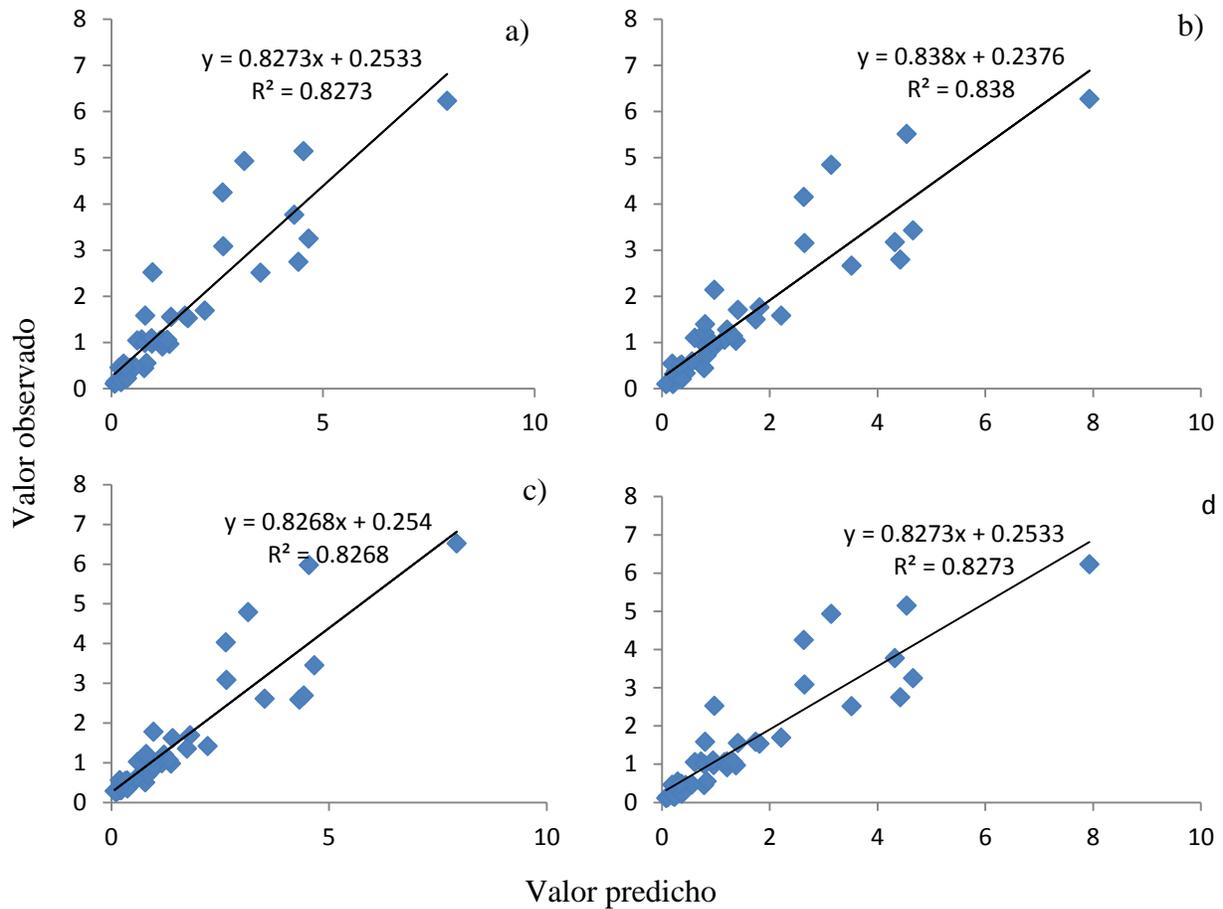


Figura 3. Gráficos de dispersión de valor predicho frente al volumen maderable de Pressler (V_{PB}) de los mejores modelos ajustados a partir de la altura total. a) Kopezky; b) Stoate; c) Spurr d) Hohenadl-krenn

Comparación de los modelos de volumen maderable de Rojo *et al.* (2005), Monroy y Navar (2004), y Kopezky

El error medio del modelo o sesgo (MRES) y la diferencia media absoluta (AMRES) resultaron aceptables (dentro de $\pm 10\%$ del valor de la media observada al 95% del nivel de significancia), según Huang *et al.* (2003), en el caso de la diferencia media absoluta en porcentaje (0.0027% y

0.4739%) que reflejó un valor no muy alto, está en relación a los valores obtenidos en el ajuste de los modelos.

A continuación se muestran los valores correspondientes a los parámetros estimados mediante el análisis de regresión de la población de 43 árboles, con el 100% de los datos. A partir del modelo de Kopezky se obtiene una ecuación equilibrada presentando así mejor distribución de valores residuales; tiene un pequeño sesgo negativo, sobre los volúmenes altos; las restantes ecuaciones tienen un sesgo muy fuerte, con residuos positivos crecientes para los volúmenes mayores, se demuestra heterocedasticidad de varianzas para ambos casos. Demostrando que sí hay relación estadísticamente significativa de los residuales con las variables explicativas.

La validación de la ecuación generada de volumen se evaluó comparando con las ecuaciones propuestas por Monroy y Návar (2004), y Rojo *et al.* (2011). Las ecuaciones de Monroy y Návar, (2004) presentaron valores cercanos a 1 y -1, indicando una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, respectivamente, con una eficiencia del 77% (Tabla 8). En comparación con la ecuación generada; para ambos casos presentaron una ecuación más equilibrada, calificadas por el orden de eficiencia.

Se generó un criterio de calificación que de acuerdo con Sakici *et al.* (2008) consistió en jerarquizar cada estadístico de cada modelo asignando valores consecutivos del 1 al 6 en función al orden de importancia (1 correspondió al mejor valor del estadístico y 6 al valor más pobre), posteriormente la sumatoria de los valores conformó la calificación total a cada modelo, por

comparación se identificaron los mejores modelos, siendo mejores aquellos con el más bajo valor en la calificación total.

Tabla 8. Validación de modelos alométricos.

Modelo	EF.		MRES (%)		AMRES (%)		Calif. total
	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	
*Volumen de fuste Monroy y Návar	0.77	3	-12.3999	2	31.5158	1	6
**Volumen KOPEZKY	0.74	5	-1.0059	1	32.8359	2	8
Schumacher	0.80	1	26.4751	4	33.3432	3	8
Variable combinada	0.77	2	26.2630	3	34.8891	4	9
Australiana	0.73	6	33.4517	6	36.6976	6	18
Variables combinadas ponderadas	0.77	4	26.8975	5	35.1866	5	14

Representación gráfica de residuos de la validación los modelos matemáticos frente a las variables de predicción propuestos por propuestos Monroy y Návar (2004); Rojo *et al.* (2011). Se aprecia que los residuales de las ecuaciones de Kopezky están equilibrados; Monroy y Návar tiene un pequeño sesgo negativo, infravalora los volúmenes altos; las restantes ecuaciones tienen un sesgo muy fuerte, con residuos positivos crecientes para los volúmenes mayores (Figura 4).

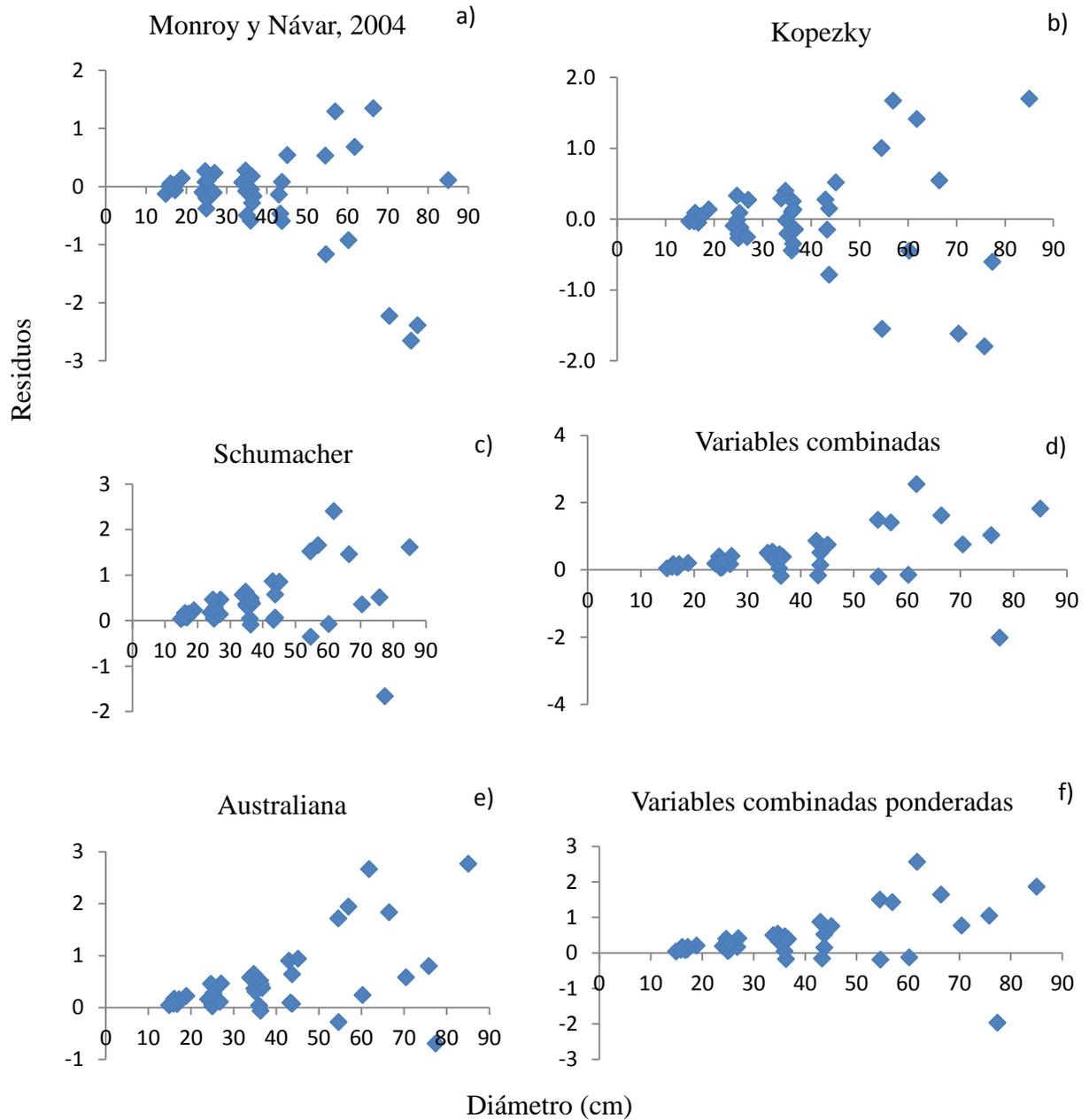


Figura 4. Representación gráfica de residuos de la validación los modelos matemáticos propuestos Monroy y Nívar (2004), y Rojo *et al.* (2011) y este trabajo, frente a las variables de predicción.

La validación de la ecuación de producción regional de hule estudiada por Monroy y Nívar (2004), probadas a partir de la altura total comercial resultó tener un coeficiente de determinación $R^2 = 0.82$, en contraste con las ecuaciones de Rojo *et al.* (2011) que presentan $R^2 = 0.98$. Con relación a las variables observadas se probó el ajuste de las ecuaciones, obteniendo resultados de $R^2 = 0.85$. Por consiguiente, las ecuaciones de Monroy y Nívar, 2004 presentaron valores cercanos a 1 y -1, entre las variables, positiva y negativa, con una eficiencia del 77%, ambas ecuaciones presentaron tener similitud con la ecuación generada (Fig.5).

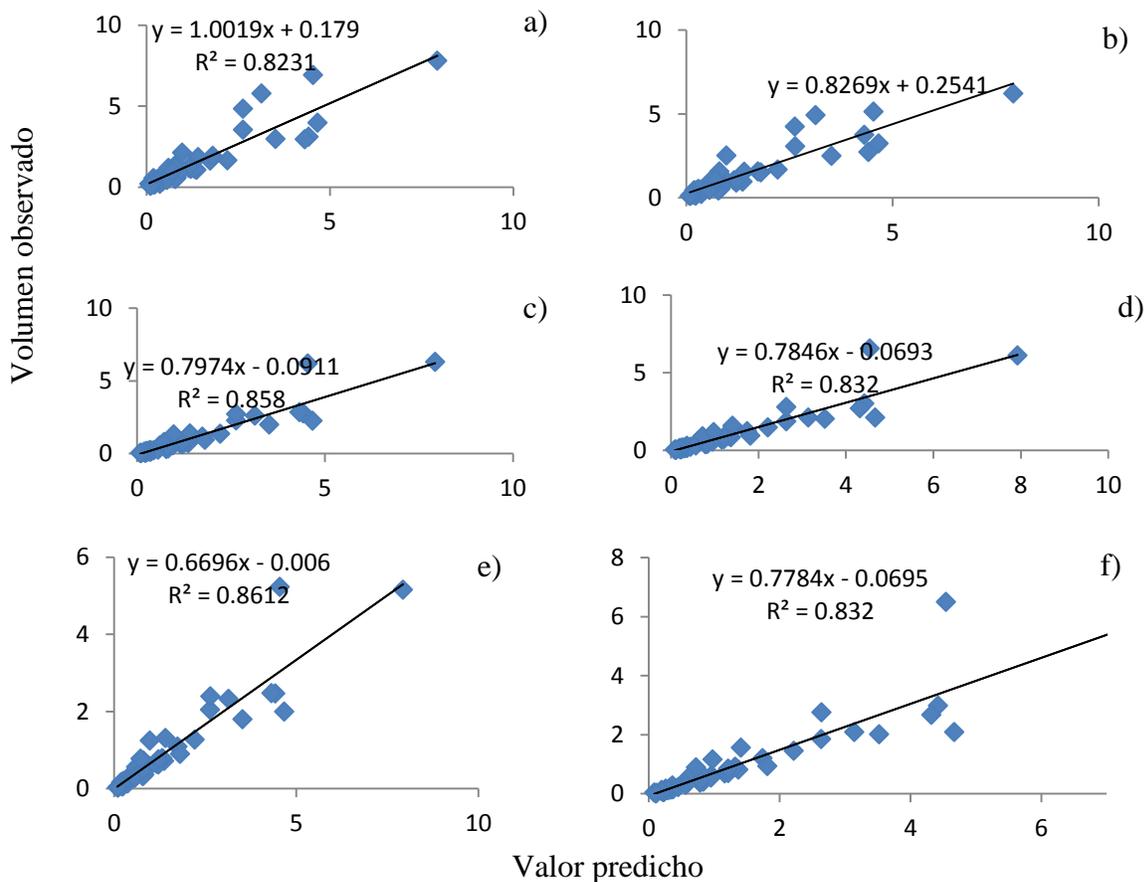


Figura 5. Gráficos de dispersión de valor predicho frente al observado en la validación de modelos a partir de la altura total comercial; propuesto por Monroy y Nívar (2004) y Rojo *et al.* (2011): a) Monroy y Nívar (2004); b) Kopecky; c) Schumacher; d) variables combinadas; e) Australiana; f) variables combinadas ponderadas

DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los datos a partir del inventario dasométrico de las plantaciones de *Hevea brasiliensis* Müell Arg., permitió estimar los parámetros de la ecuación de volumen maderable de esta especie.

El área basal promedio de las plantaciones de *H. brasiliensis* fue de 37.5 m²ha⁻¹ a una edad de 25 años, 49.8 m²ha⁻¹ para 28 años, 41.1 m²ha⁻¹ para 31 años, 54.9 m²ha⁻¹ para 32 años, 32.0 m²ha⁻¹ para 34 años y 65.6 m²ha⁻¹ para 51 años. Este último resultado es superior con el estudio de Monroy *et al.* (2006) con la misma especie, el mismo manejo silvícola y edad de 40 años, en el estado de Veracruz; además se obtuvieron resultados similares en el volumen de madera que reportan 27.2 m²ha⁻¹ a 25 años; pero superiores al compararlo con edad de 34 y 51, en donde las cuales reportan de 31.8 m²ha⁻¹ a 30 años; 35.8 m²ha⁻¹ a 35 años; 39.5 m²ha⁻¹ a 40 años. Las plantaciones en el municipio de Huimanguillo, Tabasco están en el rango de aprovechamiento de edad de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años, las cuales con buenas prácticas de manejo de cultivos podrían presentar mayor producción maderable.

El diámetro de los árboles en las plantaciones de *H. brasiliensis* en Huimanguillo, Tabasco se vio influenciado por la densidad, sitio y manejo del cultivo; no obstante, los resultados de este estudio concuerdan con los de otros realizados en Tailandia, Indonesia, Malasia, India, China, Vietnam, Costa De Marfil, Sri Lanka, Liberia y Filipinas donde se ha mostrado que esta especie alcanza 30 m de altura y 30 cm de diámetro en un periodo de vida económica de más de 30 años (Prabhakaran, 2010). Además, en la región de origen, cuenca del río Amazonas en Brasil se encuentran alturas de 30 m y circunferencia de más de 3 m (Priyadarshan y Demange, 2004). En

otros estudios con esta misma especie, con manejo silvícola en Tezonapa y Uxpanapa, Veracruz, México, reportaron dentro de un rango de edad de 8 a 31 años, valores de altura media en un intervalo de 15.8 a 27.6 m (Monroy *et al.*, 2006). Sin embargo, el diámetro de cualquier especie es altamente sensible a los cambios con la densidad, es decir: parámetros de estructura espacial para la plantación de edad 51 años cuenta con un grado de diferenciación alta (Gadow *et al.*, 2007). En general, el diámetro crecerá con base en el manejo que se aplique a esta especie, es decir, la manera de cosecha y frecuencia de pica, la densidad de plantación, la presencia de enfermedades, la aplicación de fertilizante, y las características genéticas de los clones, entre otros.

Estudios realizados en Kerala y Tamil Nadu, India, obtuvieron ecuaciones de volumen de árboles a través de modelos de parámetros aleatorios basados en edad y número de árboles por hectárea para cuatro clones: GT1 de 457.13 m³ha⁻¹ de 35 años; PB 235 de 247.53 m³ ha⁻¹, 25 años; RRII 105 de 73.32 m³ha⁻¹ a 24 años; RRIM 600 de 360.88 m³ha⁻¹ a 31 años; con un promedio de 500 árb.ha⁻¹; determinadas con un coeficiente de determinación ajustado (0.87) (Meenattoor *et al.*, 2006).

En las plantaciones estudiadas los modelos con mejores ajustes fueron Kopezky, Spurr, Stoate, Schumacher. El modelo de Kopezky, presentó un coeficiente de determinación de 0.82 y la ecuación es válida para árboles con diámetros entre 10 y 85 cm. Otro estudio en plantaciones de Tezonapa y Uxpanapa, Veracruz, México, obtuvieron un R² =0.90 (Monroy *et al.*, 2006). El modelo Schumacher es el más usado en las plantaciones (*H. brasiliensis*) sin embargo, en

Tabasco el modelo fue menos eficiente; otros modelos usados para esta especie han sido Spurr, que han sido ampliamente utilizadas en especies maderables en distintas localidades (Monroy *et al.*, 2006). A excepción de unos pocos casos definidos por la ecuación de volumen de variable combinada, los valores de R^2 (predicción) resultaron por debajo de 0.8 para los casos considerados; en general son más pequeños los errores de predicción de los datos de validación del modelo.

En la validación de ecuación de producción regional propuesta por Monroy y Návar (2004), probadas a partir de la variable altura total comercial, en contraste con las ecuaciones de Rojo *et al.* (2011) para la ecuación de variables combinadas y variables combinadas ponderadas con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.83$; Schumacher $R^2 = 0.85$ y Australiana $R^2 = 0.86$, calculados a partir del modelo de índice de sitio a una edad de referencia de 42 años. Por lo consiguiente, las ecuaciones de Monroy y Návar, 2004 presentaron valores cercanos a 1 y -1, la cual indican una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, con una eficiencia del 77%. En comparación con la ecuación generada, para ambos casos presentaron una ecuación más equilibrada, calificadas por el orden de eficiencia. Sin embargo, la correlación entre variables y las diferencias en el poder de explicación de cada una de éstas, causa que solo algunas de las variables independientes tengan una contribución significativa aplicando los modelos de regresión simple; ya que subestiman el volumen maderable de los árboles de hule a partir de la altura total comercial, hasta la corta fijada con un diámetro en punta delgada a los 10 cm (Rodríguez *et al.*, 2008; Rondeux, 2010).

CONCLUSIÓN

De acuerdo con la modelización de los nueve modelos matemáticos para predecir el volumen de fuste comercial de *Hevea brasiliensis* el modelo de la ecuación Kopezky presentó los mejores ajustes para la predicción del volumen, a través de las relaciones funcionales (diámetro, altura y volumen de Pressler) que registraron la mayor precisión para estas edades de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años; que será utilizado como un modelo de producción regional para el estado de Tabasco, México.

Las ecuaciones fueron ajustadas con la altura de Pressler, esta ecuación funciona para obtener volúmenes de fuste comercial, es decir con un diámetro en punta delgada a los 10 cm. El volumen maderable máximo que presentaron las plantaciones fue $1.88 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ y el mínimo volumen maderable fue de $0.54 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$.

La ecuación ajustada por Monroy y Nívar resultó más eficiente que la presentada en este trabajo. Ambas pueden utilizarse para la cubicación de árboles de 21 a 51 años en el estado de Tabasco, la de Monroy y Nívar exige la medición de diámetro a base de la copa (D_{ic}); mientras que la ajustada en este trabajo predice el volumen exclusivamente a partir del diámetro normal, por lo que requiere de menos mediciones para su utilización. Las ecuaciones de Rojo resultaron menos eficientes y con un sesgo que las hace menos adecuadas para la cubicación de los árboles de hule en Tabasco.

REFERENCIAS

Bravo F., J.A. Delgado., J.F. Gallardo., A. Bravo-Oviedo., R. Ruiz-Peinado., A. Merino., G. Montero., A. Cámara., R. Navarro., C. Ordóñez y E. Canga. 2007. Métodos para

cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales, eds. Fundación Gas Natural. España. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático, p: 65-112.

Domínguez D., M., F. Bravo O. y M. del Río G. 2006. Modelo de tamaño de copa en *Pinussylvestis*L., en bosques del centro de España. *Interciencia*, 31(3):168-175.

Gadow, K.V., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. IUFRO World Series. 59,83,96,115, 164, 242 p.

Huang, S., Y. Yang y Y. Wang. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: Amaro, A., Redd, D., Soares, P. (Eds.) *Modelling Forest Systems*. CABI. p: 271-293.

Izquierdo-Bautista H., M. Domínguez-Domínguez., P. Martínez-Zurimendi., A. Velázquez-Martínez y V. Córdova-Ávalos. 2011. Problemática en los procesos de producción de las plantaciones de hule *Hevea brasiliensis* Muell Arg. en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 513 - 524.

Jiménez M., J. A. 2001. Una generalización de la estadística de cook. *Revista Colombiana de Estadística*. 24 (2): 111-120.

Meenattoor, J. R., T. Gireesh, R.B. Nair y K. Jayaraman. 2006. Calibration of volume prediction equations for different clones of rubber based on random parameter models. *Rubber*

Research Institute of India. Division of Forest Information Management System, KFRI.p:
2-37.

Monárrez-González J. C. y H. Ramírez-Maldonado. 2003. Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* Mtz. en el estado de Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 9(1): 45-56.

Monroy R., C. R., O. A. Aguirre C. y J. Jiménez P. 2006. Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. Ciencia UANL, 9 (3): 261-269.

Monroy R., C. y J. J. Návar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de volumen de Hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) en Veracruz, México. Ciencia Forestal en México, 29 (95): 43-60.

Ortiz, P. M.A., C. Siebe y S. Kram. 2005. Diferenciación ecogeográfica de Tabasco. Cap. 14:305-322. En: Bueno, J., F. Álvarez y S. Santiago (Eds.) Biodiversidad del estado de Tabasco. Instituto de Biología, UNAM-CONABIO. México. 386 p.

Pérez G., G., M. Domínguez-Domínguez., P. Martínez-Zurimendi y J. Etchevers B. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. Madera y bosque, 18(1): 7-24.

Palma-López., D. J., C. J. Vázquez N., E. E. Mata Z., A. López C., M. A. Morales G., R. Chablé P., J. Contreras H. y D.Y. Palma C. 2011. Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco. Colegio

- de Postgraduados Campus Tabasco. Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco, México. 139 p.
- Prabhakaran N., K. P. 2010. Rubber (*Hevea brasiliensis*). The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World, p: 237-273.
- Priyadarshan, P.M., y A. C. Demange. 2004. Cría hevea rubber: formal y genética molecular. Los avances en la genética, 52:51-115.
- Ratnasingam, J., F. Ioras y L. Wenming. 2011. Sustainability of the Rubberwood Sector in Malaysia. Not Bot Horti Agrobo, 39 (2):305-311.
- Reza, N. H., M. Hamami S, T. Nobuchi y E. Suhaimi B. 2011. The effect of growth rate on wood density and anatomical characteristics of Rubber wood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) in two different clonal trails. J. Nat. Prod. Plant Resour, 1(2): 71-80.
- Rivas T., D. 2006. Sistemas de producción forestal. Universidad Autónoma Chapingo. 17 p.
- Rodríguez, F., M Broto y I. Lizarralde. 2008. CUBIFOR: Herramienta para cubicar, clasificar productos y calcular biomasa y CO₂ en masas forestales de Castilla y León. p: 33-39. Disponible en línea: <http://cubifor.cesefor.com.pdf>.
- Rojo M., G.E., J. Jasso M., X. Zazueta A., C.R. Porras A. y A. Velásquez M. 2005. Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas. Ra Ximhai. Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, 1(1): 153-166.

- Rojo M., G.E., R. Martínez R. y J. Jasso M. 2011. El cultivo de hule en México. Universidad autónoma indígena de México. 1ª. Edición. Libros técnicos: Serie forestal. p: 239-242.
- Rondeux, J. 2010. Medición de árboles y masas forestales. Ediciones Mundi-Prensa. México. 2 da. Edi. Escuela Técnica Superior Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, p: 87-91.
- Sakici, O. E., N. Misira, H. Yavuz y M. Misira. 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23 (6): 522-533.
- SAS Institute Inc. 2009. SAS® 9.2 User's Guide. Cary, N.C. SQ Procedure.
- Segura, M. y J.A. Hernán. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas* 46: 89-96.

**CAPÍTULO II: DETERMINAR LAS EXISTENCIAS DE MADERA DE HULE EN
HUIMANGUILLO, TABASCO UTILIZANDO LA ECUACIÓN SELECCIONADA
COMO TARIFA DE CUBICACIÓN**

**DETERMINACIÓN DE EXISTENCIAS DE MADERA DE HULE EN
HUIMANGUILLO, TABASCO UTILIZANDO LA ECUACIÓN SELECCIONADA
COMO TARIFA DE CUBICACIÓN**

**IDENTIFYING STOCKPILES OF RUBBER WOOD IN HUIMANGUILLO, TABASCO
USING SELECTED AS SCALING RATE EQUATION**

RESUMEN

Uno de los principales problemas que enfrentan los productores de hule es saber cómo estimar el volumen de madera que tienen en sus predios con una edad en turno, a partir de datos obtenidos de un inventario forestal. Las ecuaciones de volumen y sus expresiones tabuladas son una de las principales herramientas para conocer, de manera confiable, las existencias reales y realizar un manejo sostenible, así como para la gestión forestal., al alcance de los técnicos forestales tan necesaria información. En este contexto, se realizó una aplicación del modelo aritmético Kopezky: $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$ para generar una tabla de volúmenes para *Hevea brasiliensis* y así determinar existencias de madera de hule en Huimanguillo, Tabasco México; para edades de 25 a 51 años (etapa adulta y vejez). La toma de datos de campo se llevó a cabo mediante un inventario dasométrico en 11 plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) establecidas en Huimanguillo, Tabasco. Las plantaciones presentaron edades de 25 a 51 años, densidades de establecimiento de plantación de 570 árb.ha⁻¹; diámetro promedio de 31.35 cm; promedio de alturas dominantes de 27.25 m; área basal promedio de 49.82 m²ha⁻¹. El volumen de madera que presentaron las plantaciones fue de 443.69 a 693.36 m³.ha⁻¹ y

correspondió a un incremento medio anual de 15.13 y 13.60 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Estos crecimientos identifican al hule como una de las plantaciones forestales de mayor crecimiento de madera de México.

Palabras claves: Inventario, modelo de Kopezky, hule, tablas de volumen, Tabasco.

ABSTRACT

One of the main problems faced rubber producers is how to estimate the volume of wood they have on their farms with an age shift from data obtained from a forest inventory. Equations weighted volume and expressions are one of the main tools to know, to reliably perform the actual stocks and sustainable management, as well as forest management, available to foresters as necessary information. In this context, application of arithmetic performed Kopezky models: $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$ to generate a table of volumes to determine *Hevea brasiliensis* and rubber wood stocks in Huimanguillo, Tabasco, Mexico; for ages 25-51 years (adulthood and old age). The field data collection was carried out by one dasometric inventory in 11 plantations of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) established in Huimanguillo, Tabasco. Plantations had ages 25 to 51, planting densities of 570 establishment árb.ha⁻¹; average diameter of 31.35 cm; dominant average heights of 27.25 m; 49.82 average basal area m²ha⁻¹. The volume of timber plantations presented was 443.69 to 693.36 m³.ha⁻¹ and corresponded to an annual average increase of 15.13 and 13.60 m³ ha⁻¹ yr⁻¹. These growths identify the rubber as one of the fastest growing forest plantations wood Mexico.

Key words: Inventory model Kopezky, rubber wood, volume tables, Tabasco.

INTRODUCCIÓN

La estimación del volumen maderable de un bosque se obtiene a través de la información del inventario forestal donde se realizan las mediciones de los árboles; presentes en una muestra de parcelas de superficie conocida; a partir de esta muestra se estima el valor del predio completo. El número, el tamaño y la distribución de estas muestras están en función de la precisión requerida para estimar los recursos disponibles con que se cuenta aplicando las diversas técnicas de muestreo en campo a fin de obtener la información necesaria (Velasco *et al.*, 2007; Carrillo, 2008).

Los componentes del rendimiento de mayor interés para el administrador forestal son: el volumen y el diámetro promedio. Para conocer el volumen de los rodales, es necesario conocer el número de árboles, la altura y el diámetro promedio (Carrillo, 2008).

Resulta difícil obtener directamente el volumen de los árboles en pie, pero se puede deducir utilizando lo que se conoce como ecuaciones de volumen. Las tablas de volumen son tabulaciones numéricas que expresan combinaciones de diámetro y altura; se generan al sustituir estos valores en las ecuaciones (Velasco *et al.*, 2007). Las ecuaciones de volumen y sus expresiones tabuladas son una de las principales herramientas para conocer, de manera confiable, las existencias reales y realizar un manejo sostenible; así como para la gestión forestal, la comercialización de productos leñosos (Velasco *et al.*, 2006). Se elaboran con variables dasométricas fáciles de medir (diámetro a la altura de 1.3 m (d), la altura total del árbol (h) y el factor de forma (f); los modelos pueden representar el volumen de madera por árbol, a partir de las variables independientes mencionadas (Rondeux, 2010).

Hay ecuaciones de cubicación en México pero existe el importante inconveniente de que utilizan parámetros que no son medidos comúnmente, es decir, que utilizan otras variables distintas del diámetro y la altura que no son fáciles de medir. Así, en la ecuación propuesta por Monroy y Nívar (2004) se utilizan variables como el diámetro en la inserción de la primera rama (D_{ic}); diámetro a 1.30 m al cuadrado (cm) por altura (D^2H); diámetro en la altura del pecho a 1.30 m (D); altura de fuste limpio (h_{fl}); y altura total (H) y para Rojo *et al.* (2011) dadas por el Diámetro a la altura de pecho (D); altura comercial (h_c).

El objetivo del proyecto fue estimar el volumen de fuste con corteza de árboles en pie de *Hevea brasiliensis* mediante una tarifa cubicación en pie, fácil de utilizar en la toma de datos de un inventario forestal, que nos proporciona los volúmenes medios unitarios por clases diamétricas en función del diámetro normal (d), construidas específicamente para esta especie para el estado de Tabasco., para optimizar el cálculo del volumen total, previo a su aprovechamiento e industrialización para esta región.

Al estimar el volumen maderable real para hule permite obtener el valor de sus recursos en condiciones más justas, en beneficio a los productores. El empleo de esta ecuación estima el volumen de árboles en pie, con la aplicación de la variable (Diámetro), permite alcanzar considerables reducciones de costos. Este modelo permite la cuantificación forestal con la validez y la confiabilidad estadística de los resultados (Rojas *et al.*, 2014).

Esta ecuación de volumen está modelada a partir de la altura de pressler, correspondiente a la parte comercial del fuste; se ha elaborado para etapa adulta y vejez (25 a 51 años), y su aplicación es determinar existencias de madera de hule en Huimanguillo, Tabasco México.

METODOLOGÍA

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, en los ejidos de Pedregal Moctezuma 1^{era} Sección, Ejido Guadalupe Victoria, Chicoacán, y el Guanal. Geográficamente el área de estudio se localiza entre las coordenadas UTM WGS84 15 N 447293 y 1965282; 429604 y 1950092; con una altitud promedio de 75 metros sobre el nivel del mar (Fig. 6). Los climas presentes en este municipio son: Am (f) cálido húmedo con lluvias en verano y Aw (w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura máxima de 31.7 °C , mínima 21.9°C, y anual de 24.1°C (S.M.N). La zona de estudio corresponde al paisaje geomorfológico de terrazas estructurales (lomeríos), presentándose relieve con lomerío desde ligeramente convexo hasta fuertemente convexo (Ortiz *et al.*, 2005).

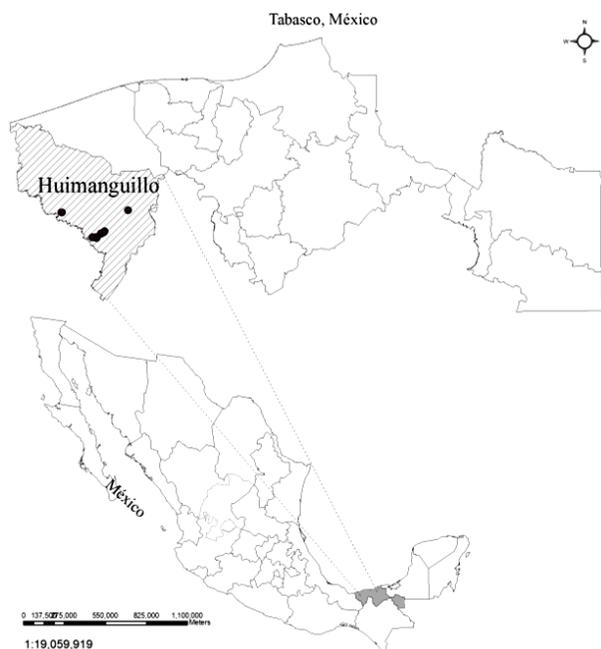


Figura 6. Localización de las plantaciones inventariadas de hule en Tabasco, México (Palma-López *et al.*, 2011).

Aplicación de encuesta

Se realizó la aplicación de entrevistas semiestructuradas a 11 productores, considerando la base de información de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP) en vinculación con el Sistema Producto hule. Se seleccionó el municipio de Huimanguillo, Tabasco porque ahí se distribuye el 80.67 % de las plantaciones de hule establecidas. Asimismo, se realizaron recorridos de campo con la finalidad de conocer el manejo silvícola de las plantaciones muestreadas, el estado fisiológico de las plantaciones “adultas” (13 a 32 años) y en etapa de “vejez” (mayores de 32 años de edad) (Monroy *et al.*, 2006; Izquierdo-Bautista *et al.*, 2011). Las plantaciones seleccionadas para realizar el inventario fueron de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años, edades en que los árboles de hule disminuyen su rendimiento de látex.

Caracterización dasométrica

Se llevó a cabo un inventario forestal en 11 plantaciones de hule (una plantación de 25, 32 y 34 años, dos plantaciones de 31 años, tres plantaciones de 28 y 51 años). Se establecieron 3 parcelas de 20 x 20 m² por plantación, con 23 árboles en promedio por parcela, haciendo un total de 753 árboles, con un área total inventariada de 13,200 m², de acuerdo a Carrillo, (2008).

De todos los árboles de las 33 parcelas con diámetro mayor a 10 cm se midieron las siguientes variables dasométricas: diámetro a 1.30 m (d) con la forcípula; altura de fuste limpio (h_{fl}) y altura total (h) utilizando la pistola Haga. El diámetro mínimo de inventario se eligió por el requisito de ser un árbol aprovechable para madera de desintegración (8-20 cm) para la fabricación de papel y conglomerados; o para puntales (8-15 cm) y postes (10-45 cm); para madera para sierra (20-200 cm), o para madera para desenrollo (15-160 cm) (Rodríguez *et al.*, 2008; Rondeux, 2010).

Área basal del rodal

La medida de densidad más frecuente referida a un rodal es la suma de la sección de los troncos de los árboles a la altura de pecho, denominada área basal (Domínguez *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2012).

$$G = \left[\sum_i^n \frac{\pi}{4} * \frac{D^2}{10000} \right] / S$$

NOTA: G= Área basimétrica (m² ha⁻¹); D= diámetro en la altura del pecho a 1.30 m (cm); S= tamaño de la parcela (ha).

Índice de densidad del rodal.

Una medida extendida de la densidad del rodal es el índice de densidad del rodal (IDR) (en inglés *stand density index SDI*) para cuyo cálculo se necesita el número de árboles n por hectárea y el diámetro medio cuadrático D_g . El diámetro medio cuadrático se obtiene del área basal y del número de árboles (Gadow *et al.*, 2007).

$$D_g = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

Densidad de plantaciones de hule

El (IDR) número de árboles que existen en un rodal comparado con un rodal puro, bien poblado y de edad uniforme con un diámetro medio cuadrático de 25 cm (Domínguez *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2012).

$$IDR = N * \left(\frac{D_g}{25}\right)^{1.605}$$

N = Densidad de arbolado (árb.ha⁻¹); D_g = diámetro medio cuadrático (cm).

En esta primera fase de inventario en campo, se calcularon diámetro medio cuadrático (D_g) en cm; altura dominante (H_{dom}) en m.; área basal (G) en m².ha⁻¹; número de árboles por hectárea (N) e IDR las cuales permiten generar la descripción de cualquier masa monoespecífica (Condés y Martínez, 2001).

Incremento medio anual (IMA)

Correspondiente a la primera fase de campo se estimó el promedio anual del incremento total, se

obtiene dividiendo las dimensiones de un árbol entre su edad, para ello se determinó a partir de los 743 datos. Con relación a lo anterior, se determinó el volumen por superficie y por año ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) para el estado de Tabasco, México., considerando la superficie en producción a nivel estatal.

Se generaron dos tablas de volúmenes con corteza de fuste total, y volumen total, para esta especie incluyendo el diámetro a 1.30 m (d) y altura total (h), utilizando la población de 743 árboles, de aplicación práctica, aplicando los dos mejores modelos Kopezky y Stoate; para la determinación de existencias reales totales por hectárea propuesto por Gómez-González *et al.* (2015).

Volumen maderable

A partir del inventario dasométrico correspondiente a mi primera fase de estudio, con la población de 743 árboles medidos inicialmente se calculó el volumen de madera de fuste con corteza y sin corteza sobre los árboles individuales y volumen maderable total. Para obtener volumen de madera de fuste en pie se aplicó la ecuación generada de Kopezky para un rango de edades de 25 a 51 años (Gómez-González *et al.* 2015):

$$V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$$

Donde

V: Volumen (m^3).

D: diámetro a 1.30 m (cm).

RESULTADOS

Como resultado de este proyecto de investigación, se ha utilizado una herramienta para cubicar árboles en pie, calculando las existencias de madera en 11 plantaciones adultas y viejas. Además se ha elaborado una tabla de volumen que permite su aplicación en los inventarios forestales, dentro de las cuales permite realizar cálculos de forma sencilla; y además de ello se propone una ecuación para cálculos de volumen en pie de una sola entrada; es decir de una sola variable fácil de medir, para el estado de Tabasco, México. Poniendo al alcance de los técnicos forestales tan necesaria información.

Determinación del factor de forma

Con relación al volumen real y volumen aparente calculado a partir del diámetro sin corteza, se determinó que el factor de forma para esta especie de 0.37 para arboles adultos de 12 a 31 años y vejez” de 25 a 51 años de edad y 0.33 para plantaciones en estado de “juventud” de 7 a 11 años.

Con relación a los datos estimados se determinó la productividad total de $65,215.1 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ y unas existencias de madera de $2,268,306.2 \text{ m}^3$, con una superficie total de $4,432.185 \text{ ha}$. Asimismo, se tiene para una edad de 25 a 34 años una superficie de 124.716 ha con una productividad de $1,887.4 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$; con unas existencias de madera de hule de $55,335.03 \text{ m}^3$; de la misma para edades de 35 a 65 años se cuenta con una superficie de 89.981 ha con una productividad $1,223.3 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ y unas existencias en pie de $62,389.2 \text{ m}^3$ (Tabla 9).

Tabla 9. Cálculos de productividad maderable.

IMA m³.ha⁻¹.año⁻¹	V (m³.ha⁻¹)	PRODUCTIVIDAD (m³.año⁻¹)	EXISTENCIAS (m³).	EDAD	Superficie (ha)
				0-24	4217.488
15.13	443.69	1887.4	55335.03	25-34	124.716
13.60	693.36	1223.3	62389.2	35-65	89.981
Total		65215.1	2268306.2		4432.185

Sistema de cubicación

De una manera integral se pueden conjuntar los resultados obtenidos en base al inventario forestal para formar un sistema de ecuación de volumen de una entrada, correspondiente al modelos aritmético Kopezky, misma que es complementada cuando se dispone de la altura total mediante una tarifa de dos entradas a través de las ecuaciones Stoate y Spurr, (Tabla 10)., siendo esta última de precisión similar a la anterior, pero de utilidad más general (es más robusta para ser utilizada fuera de la zona de ajuste, por ejemplo en los municipios de Macuspana o Jalapa.

Tabla 10. Coeficiente determinación y correlación de modelos matemáticos para la estimación de volumen de fuste

Nombre	Ecuaciones	Constante				R²	R² ajust
		a	b	c	d		
Kopezky	$V = a + b * D^2$	-0.08202	0.00087297			0.8273	0.8231
Stoate	$V = a + b * D^2 + c * D^2 * H + d * H$	-0.43263	0.00052919	0.00000753	0.02009	0.838	0.8255
Spurr	$V = a + b * D^2 * H$	0.19692	0.00002264			0.8268	0.8226

NOTA:V= Volumen; D=Diámetro a la altura de pecho (cm); H= Altura total (m).

Estas ecuaciones pertenecen a las llamadas de una entrada o de doble entrada, ya que necesitan de datos fáciles de medir como diámetro normal y altura total. A continuación se presentan las tarifas, o ecuaciones de volumen de una entrada, pues solo necesitan del diámetro normal para hacer la estimación del volumen fustal., para plantaciones evaluadas en etapa de aprovechamiento de edad de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Tabla de volumen (con corteza) para las plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) obtenida a partir del modelo $V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$

Clase diamétrica (cm)	Diámetro medio cuadrático o Diámetro central (cm).	Volumen (m ³ .árbol ⁻¹)
10 - 20	15	0.1362225
21 - 30	25	0.4854105
31 - 40	35	1.0091925
41 - 50	45	1.7075685
51 - 60	55	2.5805385
61 - 70	65	3.6281025
71 - 80	75	4.8502605
81 - 90	85	6.2470125

Ecuación: NOTA: V= Volumen (m³); D= Diámetro a la altura de pecho (cm).

Tabla 12. Tabla de volumen (con corteza) para las plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) obtenida a partir del modelo $V = -0.43263 + 0.00052919 * D^2 + 0.00000753 * D^2 * H + 0.02009 * H$

Clase diamétrica	Diámetro medio cuadrático o Diámetro central (cm)	Altura (m)					
		12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5
10 - 20	15	-0.0257	0.0842	0.1940	0.3039	0.4138	0.5236
21 - 30	25	0.2236	0.3486	0.4735	0.5984	0.7233	0.8483
31 - 40	35	0.5976	0.7452	0.8927	1.0402	1.1877	1.3352
41 - 50	45	1.0963	1.2739	1.4516	1.6292	1.8068	1.9845
51 - 60	55	1.7196	1.9349	2.1502	2.3655	2.5807	2.7960
61 - 70	65	2.4676	2.7280	2.9885	3.2490	3.5094	3.7699
71 - 80	75	3.3402	3.6534	3.9666	4.2797	4.5929	4.9061
81 - 90	85	4.3375	4.7109	5.0844	5.4578	5.8312	6.2046

NOTA: V= Volumen; D= Diámetro a la altura de pecho (cm); H= Altura total (m). *Los valores con fondo verde representan los árboles observados en campo, tomando en cuenta las mediciones de las variables, diámetro y altura, y se refiere a la muestra real obtenida dentro del área de aplicación. Los valores con fondo blanco son los volúmenes que calcula el modelo al introducir los datos, pero no se encontraron árboles de esas clases.

Resultado de volumen maderable

El máximo volumen maderable que presentaron las plantaciones de edad de 51 años fue 693.36

m^3ha^{-1} , y el mínimo de $308.76 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. El máximo volumen maderable de fuste promedio por parcela por árbol lo presentó la plantación de edad de 51 años con $3.21 \text{ m}^3.\text{árb}^{-1}$ (Tabla 13). La plantación que presentó el mínimo volumen maderable fue de edad de 34 años con $0.54 \text{ m}^3.\text{árb}^{-1}$ (Figura 7).

Tabla 13. Volumen maderable obtenido a partir de las variables observadas o medidas en campo.

t Años	V $\text{m}^3.\text{árb}^{-1}$	V $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$
25	0.59	365.35
28	0.77	499.74
31	0.69	408.54
32	0.90	559.11
34	0.54	308.76
51	1.88	693.36

t: Edad; V: Volumen con corteza

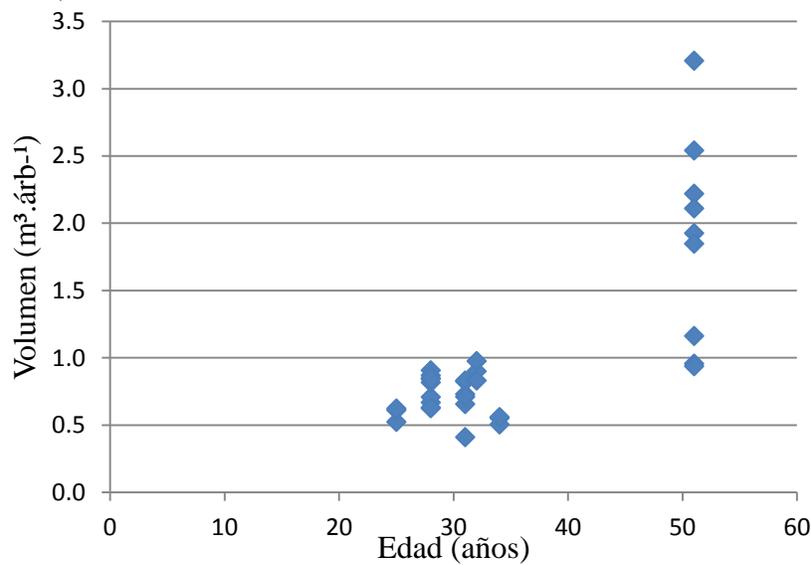


Figura 7. Relación volumen maderable y edad.

Cubicación de árboles en pie

El volumen maderable máximo por árbol lo presentó la plantación de edad de 51 años con 1.88 $\text{m}^3.\text{árb.}^{-1}$ con 693.36 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$. La plantación que presentó el volumen maderable mínimo fue de 34 años con 0.54 $\text{m}^3.\text{árb.}^{-1}$ con 308.76 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$. La figura 8 muestra la relación entre la edad de las plantaciones y la altura dominante y provee información acerca de la productividad futura de las plantaciones de la zona de Tabasco.

La altura dominante de *H. brasiliensis* resultó de 25.5 m a una edad de turno de 25 años, 28.5 m para 28 años, 27.5 m para 31 años, 25.8 m para 32 años, 23.2 m, 34 años y 29.3 m para 51 años.

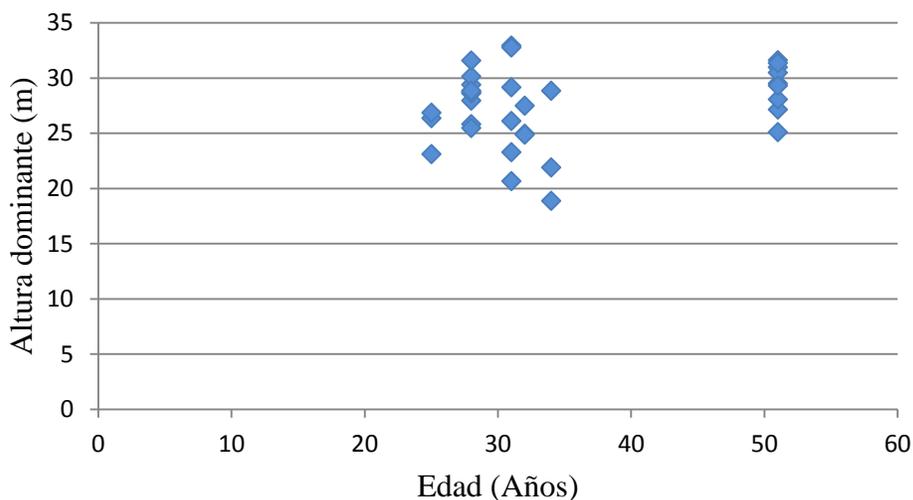


Figura 8. Altura dominante en plantaciones de hule en Tabasco, México

DISCUSIÓN

Las plantaciones forestales de *H. brasiliensis* tropicales están altamente influidas por la densidad y son afectadas en el crecimiento, principalmente, debido a que los árboles requieren mucho espacio u horas luz; para estimular el crecimiento rápido del diámetro del tallo y asimismo lograr un crecimiento más rápido en los árboles sobre todo tratándose de especies perennes caducifolios, para producir mayor volumen de madera (Reza *et al.*, 2011; Naji *et al.*, 2012). El factor densidad del arbolado fue relevante para la productividad de las plantaciones en estudio; en plantaciones evaluadas en Huimanguillo, Tabasco, México presentó para una edad de 25 años con una densidad de 625 árb.ha⁻¹ el volumen maderable fue de 0.59 m³.árbol⁻¹, obteniéndose así 365.35 m³ha⁻¹ mientras que para una edad de 51 años con densidad de 431 árb.ha⁻¹ el volumen fue de 1.88 m³.árbol⁻¹ obteniéndose así 693.36 m³ha⁻¹. La estimación del rendimiento de madera de hule de este estudio es mayor que el valor registrado en Tailandia (FAO, 2009), 250 m³ha⁻¹ con edad de cosecha de 25 a 30 años. Sin embargo Shigematsu *et al.* (2011), reportan IMA de 10 a 15 m³ha⁻¹ año⁻¹ en Malasia. Lo anterior indica que la densidad es un factor que afecta drásticamente el volumen o producto final de la producción de madera, como se ha demostrado en estudios en Malasia, esta última con espaciamientos de 5 m x 4 m y 2 m x 2.5 m (Reza *et al.*, 2011). Por lo consiguiente en Malasia, se ha encontrado volumen total de madera desde 1.4 hasta 2.52 m³ árbol⁻¹ con un estándar de 450 árb.ha⁻¹. Estos valores muestran similitud a los datos encontrados en Tabasco. Prabhakaran. (2010) estimó la producción media de la madera de hule en todo el mundo es de 150-180 m³ha⁻¹ a la edad de corta.

El mayor espaciamiento entre los árboles estimula el crecimiento en diámetro de árboles, generando mayor tamaño, lo que se traduce en un mayor volumen de la madera; el presente estudio es consistente con los hallazgos de las plantaciones de 51 años (Naji *et al.*, 2012). La densidad es un factor que influye fuertemente en el crecimiento de las plantaciones de *H. brasiliensis*, el cual se relaciona con la maduración temprana de los árboles, influyendo así también las prácticas de manejo de cultivos (cobertura del suelo, cultivos intercalados, manejo de malezas, materia orgánica, la inducción de la ramificación, la poda y raleo) (Pande y Singh, 2005).

Otros factores que afectan a las plantaciones son las condiciones de sitio, éstos podrían alterar los resultados en cuanto a su rendimiento maderable, determinadas por el clima, suelos y factores bióticos de un sitio determinado (Gadow *et al.*, 2007; Rappaport y Montagnini, 2014); además de los factores físicos como el viento y las plagas (termitas, barrenador) y enfermedades forestales (pudrición por hongos) que ocasionan daño mecánico o fisiológico al árbol (Jetro y Simon, 2007; Matan *et al.*, 2009; Prabhakaran, 2010; She *et al.*, 2013).

El volumen maderable es un producto final de toda plantación de *H. brasiliensis* al que debe dársele fines comerciales y que se suma a la producción de látex obtenida a lo largo de la vida útil. Resultados de Prabhakaran (2010) y Gadow *et al.* (2007) señalan que el efecto de la densidad sobre el crecimiento se ve reflejado en la altura, debido a que ésta se ve disminuida en su crecimiento con el aumento de la densidad y, por lo tanto, se ve afectado el volumen maderable. Esto se debe principalmente a la competencia por espacio, luz, agua, nutrimentos. El

volumen maderable aplicando la ecuación generada en las plantaciones fue de 365.35 m³.ha⁻¹, 499.74 m³.ha⁻¹, 408.54 m³.ha⁻¹, 559.11 m³.ha⁻¹, 308.76 m³.ha⁻¹, 693.36 m³.ha⁻¹ a edades 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años, respectivamente. En otros estudios con esta misma especie, con manejo silvícola en Tezonapa y Uxpanapa, Veracruz, México, establecidos en suelos acrisoles y vertisoles, profundos y buen drenaje natural con textura migajón arcillo-arenosa y pH de 4.8 a 6.1, con características fisiográficas planos y lomeríos, reportaron volumen total de madera para el clon IAN-710 de 383.4 m³.ha⁻¹ a edad de 25 años; 443.8 m³.ha⁻¹, a 30 años; 499.9 m³.ha⁻¹ a 35 años y 457.39 ha⁻¹ a 40 años, aplicando la ecuación lineal generalizada ponderada, con densidad de 556 árb.ha⁻¹ (Monroy *et al.*, 2006) y en Huimanguillo, Tabasco reportan Rojo y Jasso (2003) 225 m³.ha⁻¹ a 40 años de edad para el Clon PB-5/63.

En estudios realizados por Shigematsu *et al.* (2011) en Camboya, en el Sudeste Asiático; establecidos en suelos ácidos, del trópico húmedo, tipo laterita y lateríticos muy porosos, bien drenado, de moderada a altamente ácido, con características fisiográficas adversas y con las mismas condiciones climáticas (Prabhakaran, 2010), obtuvieron volumen de madera en pie por hectárea a partir de la ecuación de volumen desarrollado por Khun *et al.* (2008) explicados a través de las relaciones funcionales (edad) 40 años con un coeficiente de determinación ajustado (0.96). En primer lugar, se encontró un volumen de madera de hule en pie presentando un rango de 372.8 m³.ha⁻¹ y 213 m³.ha⁻¹ para edad de 30 años (Prabhakaran, 2013).

En Malasia, se ha encontrado volumen total de madera desde 1.4 hasta 2.52 m³ árbol⁻¹ con un estándar de 450 árb.ha⁻¹. Estos valores demuestran tener una similitud a los datos encontrados. En

plantaciones evaluadas en Huimanguillo, Tabasco, México presentó para una edad de 25 años con una densidad de 625 árb.ha⁻¹ un volumen maderable fue de 0.59 m³.árbol⁻¹, obteniéndose así 365.35 m³ha⁻¹ mientras que para una edad de 51 años con densidad de 431 árb.ha⁻¹ el volumen fue de 1.88 m³.árbol⁻¹ obteniéndose así 693.36 m³ha⁻¹. En términos de IMA (incremento medio anual), la madera de hule ha sido competitiva con otras especies forestales. Shigematsu *et al.*, (2011), reportan IMA de *H. brasiliensis* de 10 a 15 m³ha⁻¹año⁻¹ en Malasia; en los estudios realizados en Huimanguillo, Tabasco, México se obtuvo un IMA de 15.13 m³.ha⁻¹.año⁻¹ para una edad de 25 a 34 años y 13.10 m³.ha⁻¹.año⁻¹ para edad de 51 años; que es más alta que la de eucalipto en la misma entidad.

CONCLUSIÓN

Como resultado de este proyecto investigación, se ha elaborado una herramienta para cubicar árboles en pie. Además se ha elaborado una tabla de volumen que permite su aplicación en los inventarios forestales, dentro de las cuales permite realizar cálculos de forma sencilla; y además de ello se propone una ecuación para cálculos de volumen en pie de una sola entrada; es decir de una sola variable fácil de medir, para el estado de Tabasco, México. Poniendo al alcance de los técnicos forestales tan necesaria información.

Las existencias de madera en la entidad son importantes y los crecimientos son equiparables a otras especies de rápido crecimiento.

REFERENCIAS

Carrillo, E.G. 2008. Casos prácticos para muestreos e inventarios forestales. 1^a. Ed. Universidad Autónoma Chapingo, México. p: 45-70.

- Condés, S. y J. Martínez M. 2001. Optimización del tamaño de la parcela de muestreo mediante simulación del inventario forestal. II Congreso Forestal Español. Granada, Spain. Tomo 4: 21-27.
- Domínguez D., M., F. Bravo O. y M. del Río G. 2006. Modelo de tamaño de copa en *Pinus sylvestris* L., en bosques del centro de España. *Interciencia*, 31(3):168-175.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2009. Estudio de perspectivas. Tailandia forestal. Oficina Regional para Asia y el Pacífico, Bangkok.
- Gadow, K.V., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. IUFRO World Series. 59,83,96,115, 164, 242 p.
- International Union of Forestry Research Organizations. 1965. The standardization of symbols in forest mensuration. Maine Agricultural Experiment Station Technical Bulletin 15.
- Izquierdo-Bautista H., M. Domínguez-Domínguez., P. Martínez-Zurimendi., A. Velázquez-Martínez y V. Córdova-Ávalos. 2011. Problemática en los procesos de producción de las plantaciones de hule *Hevea brasiliensis* Muell Arg. en Tabasco, México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14: 513 - 524.
- Monroy R., C. R., O. A. Aguirre C. y J. Jiménez P. 2006. Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Ciencia UANL*, 9 (3): 261-269.
- Monroy R., C. y J. J. Návar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de volumen de Hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) en Veracruz, México. *Ciencia Forestal en México*, 29(95): 43-60.

- Naji, H. R., M. H. Sahri, T. Nobuchi y E. Suhaimi B. 2012. Clonal and planting density effects on some properties of rubber wood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). "Rubber tree planting density," *BioResources*, 7(1):189-202.
- Ortiz, P. M.A., C. Siebe y S. Kram. 2005. Diferenciación ecogeográfica de Tabasco. Cap. 14:305-322. En: Bueno, J., F. Álvarez y S. Santiago (Eds.) Biodiversidad del estado de Tabasco. Instituto de Biología, UNAM-CONABIO. México. 386 p.
- Palma-López., D. J., C. J. Vázquez N., E. E. Mata Z., A. López C., M. A. Morales G., R. Chablé P., J. Contreras H. y D.Y. Palma C. 2011. Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco, México. 139 p.
- Prabhakaran N., K. P. 2010. Rubber (*Hevea brasiliensis*). *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*, p: 237-273.
- Pande P. K. y M. Singh. 2005. Inter-clonal, intra-clonal, and single tree variations of wood anatomical properties and specific gravity of clonal ramets of *Dalbergia sissoo* Roxb. *Wood Science and Technology*, 39(5): 351-366.
- Pérez G., G., M. Domínguez-Domínguez., P. Martínez-Zurimendi y J. Etchevers B. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y bosque*, 18(1):7-24.

- Rappaport, D. y F. Montagnini. 2014. El crecimiento de especies de árboles bajo un caucho (*Hevea brasiliensis*) plantación: restauración nativa a través de la plantación de enriquecimiento en el sur de Bahía, Brasil. *New Forests*, 45(5):715-732.
- Reza, N. H., M. Hamami S, T. Nobuchi y E. Suhaimi B. 2011. The effect of growth rate on wood density and anatomical characteristics of Rubber wood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) in two different clonal trails. *J. Nat. Prod. Plant Resour*, 1(2): 71-80.
- Rodríguez, F., M Broto y I. Lizarralde. 2008. CUBIFOR: Herramienta para cubicar, clasificar productos y calcular biomasa y CO² en masas forestales de Castilla y León. p: 33-39. Disponible en línea: <http://cubifor.cesefor.com.pdf>.
- Rojo M., G.E., J. Jasso M., X. Zazueta A., C.R. Porras A. y A. Velásquez M. 2005. Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas. Ra Ximhai. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 1(1) 153-166.
- Rojo M., G.E., R. Martínez R. y J. Jasso M. 2011. El cultivo de hule en México. Universidad autónoma indígena de México. 1ª. Edición. Libros técnicos: Serie forestal. p: 239-242.
- Rojo, M. G. E. y J. Jasso, M. 2003. Modelos de crecimiento para *Hevea brasiliensis* Muell.Arg., del clon PB-5/63 en Buergos, Tabasco. Resúmenes de memorias. VI Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Sociedad Mexicana de Recursos Forestales-Universidad Autónoma de San Luís Potosí, S. L. P. p: 62-63.
- Rondeux, J. 2010. Medición de árboles y masas forestales. Ediciones Mundi-Prensa. México. 2 da. Edi. Escuela Técnica Superior Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, p: 87-91.

Shigematsu A., N. Mizoue, K. Ide, K. Khun, y M. Pheng. 2011. Estimation of rubberwood production in Cambodia. *New Forests*, 42, (2)149-162.

SAS Institute Inc. 2009. SAS® 9.2 User's Guide. Cary, N.C. SQ Procedure.

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Anuario estadístico de la producción forestal. Consultado el 26 de mayo de 2015.

Velasco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., F. Moreno S. y A. González H. 2007. Tablas de volumen con corteza para *Pinus douglasiana* y *Pinus pseudostrobus* del Sur-Occidente de Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 32(101): 93-115. Disponible en: <<http://revistas.inifap.gob.mx/index.php/Forestales/article/view/88/79>>.

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con la modelización de los nueve modelos matemáticos para predecir el volumen de fuste comercial de *Hevea brasiliensis*, el modelo de la ecuación Kopecky presentó los mejores ajustes para la predicción del volumen, a través de las relaciones funcionales (diámetro, altura y volumen de Pressler) que registraron la mayor precisión para estas edades de 25, 28, 31, 32, 34 y 51 años. La ecuación fue elegida a través del modelo lineal por la mejor distribución de valores residuales.

Las ecuaciones fueron ajustadas con la altura de Pressler para volúmenes de fuste comercial con un diámetro en punta delgada a los 10 cm. El volumen maderable máximo que presentaron las plantaciones fue $1.88 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ y el mínimo volumen maderable fue de $0.54 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$.

La ecuación ajustada por Monroy y Návar resultó más eficiente que la presentada en este trabajo. Ambas pueden utilizarse para la cubicación de árboles de 21 a 51 años.

Se propone una ecuación para cálculos de volumen en pie de una sola entrada, con una sola variable fácil de medir, para el estado de Tabasco, México. Además, se elaboró una tabla de volumen que permite su aplicación en los inventarios forestales para realizar cálculos de forma sencilla, y al alcance de los técnicos forestales.