

## PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LÁTEX EN PLANTACIONES COMERCIALES DE HULE (*Hevea brasiliensis* MÜLL. ARG.) EN OAXACA, MÉXICO

### PREDICTION OF LATEX PRODUCTION IN COMMERCIAL PLANTATIONS OF RUBBER TREE (*Hevea brasiliensis* MÜLL. ARG.) IN OAXACA, MÉXICO

Gustavo Enrique Rojo Martínez<sup>1\*</sup>, Jesús Jasso Mata<sup>1</sup>, J. Jesús Vargas Hernández<sup>1</sup>, Alejandro Velázquez Martínez<sup>1</sup> y David Jesús Palma López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa Forestal, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. C.P. 56230. Correo electrónico: grojo@colpos.mx.

<sup>2</sup>Programa en Producción Agroalimentaria en el Trópico, Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco, México. C.P. 85570.

\* Autor responsable

#### RESUMEN

Esta investigación se realizó en la región hulera del Papaloapan, en el Estado de Oaxaca, México, con el objetivo de generar una ecuación para predecir la producción de látex del clon IAN-710 de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. Se utilizó información dasométrica de 1562 árboles provenientes de 82 sitios temporales de muestreo de plantaciones comerciales de este clon, de entre 7 y 42 años de edad. Las principales variables asociadas con la producción de látex fueron el diámetro normal (a 1.30 m), la altura total y la edad de los árboles. Se compararon tres modelos de los tipos: variable combinada generalizada de forma cuadrática, logarítmica generalizada, gamma incompleta de forma exponencial, con una o más de las variables anteriormente mencionadas. La ecuación que tuvo uno de los mejores ajustes ( $R^2 = 0.8755$ ) para la predicción de la producción de látex (P), fue el modelo de la gamma incompleta de forma exponencial ( $P = \beta_0 d^{\beta_1} e^{\beta_2 d}$ ) con base en el diámetro normal (d) y con una desviación estándar de 0.1239. La producción comercial de látex inicia con 1.561 kg/árbol x año, se incrementa hasta alcanzar un máximo de 2.446 kg/ árbol x año en árboles de 25 cm de diámetro; luego inicia su declinación gradual hasta 1.065 kg/ árbol x año en árboles con diámetro de 49 cm. La vida útil de la plantación es de 30 años de edad.

**Palabras clave:** *Hevea brasiliensis*, modelos de predicción, hule, producción.

#### SUMMARY

The present study took place in the Papaloapan rubber region, located in Oaxaca State, México. Its purpose was to generate an equation to estimate and predict latex production of clon IAN-710 of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. Dasometric information of 1562 trees of this clon in 82 sites of commercial plantations between 7 and 42 years was used for the evaluation. The variables diameter breast height (d), total height and age of the trees influenced latex production. Three kinds of prediction models were compared: generalized combined variable in a quadratic equation, generalized logarithmic equation and incomplete gamma in an exponential form, taking into account one or more of the former variables. The best adjusted equation to predict latex production was the incomplete gamma in an exponential form,

$P = \beta_0 d^{\beta_1} e^{\beta_2 d}$  with standard deviation of 0.1239 and  $R^2$  of 0.8755. Commercial production of latex initiated with 1.561 kg/ tree x year<sup>-1</sup>, which increased up to 2.446 kg/ tree x year when diameter was 25 cm. After this stage a gradual declination occurred down to 1.065 kg/tree x year when a diameter of 49 cm is reached. The longevity of latex production for a plantation is up to 30 years.

**Index words:** *Hevea brasiliensis*, prediction model, rubber, production.

#### INTRODUCCIÓN

El árbol del hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.), originario de Brasil, es una de las 11 especies del género *Hevea* (familia Euphorbiaceae) que se utiliza en plantaciones a gran escala. Existen cerca de 10 millones de ha en el mundo para satisfacer la demanda mundial de la industria del látex la cual es de 5 852 000 t año<sup>-1</sup>. El 92 % de las plantaciones comerciales se concentra en el sudeste asiático (IRSG, 2000). Indonesia, Tailandia y Malasia poseen 36, 20 y 17 %, respectivamente, de la superficie mundial plantada con la especie (IRSG, 2000). De la producción mundial de hule natural, dichos países en el mismo orden contribuyen con 30.5, 18.6 y 24.9 %, respectivamente. En América Latina los principales productores son Brasil con 180 000 ha y Guatemala con 37 500 ha (CMH, 2000). El mayor consumo mundial de látex ocurre en los países de Europa con 19 % y en Estados Unidos de Norte América, con 18.4 % (IRSG, 2000).

México cuenta con más de 25 500 ha de plantaciones forestales; 14 000 ha en desarrollo y sólo un poco más de 11 500 están en producción, con cerca de 7 000 t año<sup>-1</sup>; sin embargo, el consumo medio anual de hule natural en

México es de 70 000 t año<sup>-1</sup>, por lo que el país importa 63 000 t al año, lo que representa 90 % de las necesidades del país (CMH, 2002). El país cuenta con un potencial de más de 400 000 ha para establecer plantaciones, en los estados de Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Tabasco (CMH, 2001). De las plantaciones ya establecidas, 54 % se localiza en el Estado de Veracruz (Tezonapa, Las Choapas, Uxpanapa y Acayucan), 32 % en Oaxaca (región del Papaloapan, con predominio de la zona de Tuxtepec), 8 % en Chiapas (regiones Selva, Palenque y Tapachula), y 6 % en Tabasco (Macuspana y Huimanguillo) (CMH, 2002). El rendimiento promedio en México es de 1 880 kg (de hule fresco) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> que corresponde a 940 kg (de hule seco) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Pición, 1999). En el mundo la producción media es de 1 500 kg (de hule seco) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Planting Recommendations Committee, 1998).

Tradicionalmente el árbol del hule ha sido utilizado en plantaciones desde hace más de cien años para la producción de látex en México y en el mundo (Martínez, 1986); sin embargo, el apoyo a las plantaciones de hule se redujo considerablemente en las décadas de 1980 y 1990 debido a la producción de hule sintético derivado del petróleo (Grist *et al.*, 1995). En los últimos años ha resurgido el interés por el látex natural por sus características físico-químicas que no se pueden obtener de otras sustancias, para la manufactura de preservativos y guantes quirúrgicos, así como en neumáticos de mayor seguridad en vehículos y aviones (Frederico *et al.*, 1995). A pesar de la importancia industrial del árbol del hule, en México no existe suficiente información sobre el potencial productivo de la especie. Un aspecto esencial en la planeación del manejo de las plantaciones es determinar los factores que influyen sobre la producción de látex en una plantación (Priyani, 1996; Grist *et al.*, 1995).

Los modelos matemáticos son una herramienta analítica muy usada para la generación de conocimiento en el estudio del crecimiento y producción de masas forestales sujetas a un régimen de cultivo (Vanclay, 1995; Castedo *et al.*, 2001). La diversidad de modelos en cuanto a estructura, componentes, construcción y propósitos de utilización se debe a que el crecimiento y producción son procesos complejos y dinámicos (Zeide, 1993; Vanclay, 1995). La cualidad de abarcar procesos dinámicos con cambios continuos en el tiempo, ha sido uno de los puntos más relevantes para la adopción generalizada de los modelos matemáticos como herramienta de investigación biológica (Siavannen *et al.*, 1988; Álvarez *et al.*, 1999).

En especies forestales es común utilizar los modelos de rendimiento forestal, basados en relaciones funcionales entre la magnitud del crecimiento y los factores o variables que explican este rendimiento, para estimar y predecir la

productividad de las especies (Pienaar y Harrison, 1988; Newnham, 1992; Bailey, 1994; Tewari y Gadov, 1999; Valdez y Lynch, 2000). También es común estimar la producción de biomasa o de cualquier otro producto de interés (resinas, látex, etc.) en función de características dendrométricas fáciles de medir directamente en campo, tales como el diámetro a la altura del pecho y el área basal (Wykoff, 1990; Muhairwe *et al.*, 1993; Návar *et al.*, 1997). Estos modelos se refieren a un sistema de ecuaciones que predicen el rendimiento de un rodal o plantaciones en una amplia variedad de condiciones (Benavides y Manzanilla, 1993; Zamudio y Rivero, 1997; Arteaga, 2000). En sentido amplio, el término incluye curvas y tablas de rendimiento, que son análogas a las ecuaciones, pero que han sido formuladas en una forma gráfica o tabular (Zeide, 1993; Davel y Trincado, 2000). La mayoría de las ecuaciones se han desarrollado fundamentalmente para especies de coníferas que tienen una arquitectura de copa mucho más simple que las especies arbóreas de las angiospermas (Ramírez, 1981; Fuente *et al.*, 1998; Castedo y Álvarez, 2000; Maldonado y Návar, 2000). De los pocos trabajos en México sobre angiospermas para predicción del rendimiento en combinación con el índice de sitio, son los realizados en caoba (*Swietenia macrophylla* King) (García *et al.*, 1998). A pesar de la importancia económica-industrial de *Hevea brasiliensis*, no existen estudios relacionados con el desarrollo de ecuaciones de predicción para estimar la productividad de esta especie (Grist *et al.*, 1995).

El objetivo del presente estudio fue generar una función matemática para predecir la producción de látex por árbol, mediante la determinación del grado de asociación entre las variables dasométricas y la producción de látex en plantaciones de diferentes edades de *H. brasiliensis*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción general del área de estudio

El estudio se realizó en la región del Papaloapan, en el Estado de Oaxaca, donde existen cerca de 7 500 ha de plantaciones comerciales de hule (CMH, 2001), la mayoría de las cuales tienen entre 7 y 42 años de edad (CMH, 2001). Las plantaciones se encuentran distribuidas geográficamente en una región entre las coordenadas 17° 20' a 18° 36' L N y 95° 42' a 96° 41' L W. Dentro de esta zona, las plantaciones de hule ocupan los sitios de mayor calidad, en elevaciones entre 20 y 880 msnm, zona que tiene un poco más de 350 000 ha de superficie ejidal y más de 700 000 ha de terreno comunal, con usos pecuario, agrícola y forestal (CMH, 2001).

### Variables evaluadas

Los datos empleados en este trabajo provienen de una muestra de 1 562 árboles seleccionados de 82 sitios de muestreo temporales en 41 plantaciones del clon IAN-710 de *H. brasiliensis*, con edades comprendidas entre 7 y 42 años. Se trató de cubrir la variabilidad de edades, de modo que en la muestra final estuviesen adecuadamente representadas todas las edades de plantación. Los criterios para incluir dichas plantaciones en la muestra fueron: (a) que no existieran evidencias de daños por plagas, enfermedades o deterioro por acciones mecánicas; (b) tener un espaciamiento de 6 x 3 m; y (c) tener una edad entre 7 y 42 años. En cada plantación seleccionada se establecieron dos sitios temporales de forma circular (500 m<sup>2</sup> cada uno), en la que se identificaron con un número secuenciado cada uno de los árboles incluidos en ellos, mismos a los que se les registró la edad en función de la fecha de plantación (**e**) con base en los registros existentes de la plantación, y se aseguró que todos correspondieran al clon en estudio.

En los meses de junio a julio de 2000 se midieron las siguientes variables dasométricas: (1) altura total (**h**) y altura de fuste limpio (**altf**) en metros, con un clinómetro Haga; la altura del fuste limpio se definió con base en el punto del tronco donde se encontró la primera bifurcación; (2) diámetro normal con corteza (**d**) en centímetros, medido con cinta diamétrica a una altura de 1.30 m del suelo; (3) grosor de corteza (**gc**) en centímetros, medido a 1.30 m de altura del nivel del suelo con un medidor de corteza; (4) proyección de copa en dirección norte-sur (**pcns**) y este-oeste (**pceo**) en metros, medida con cinta métrica como la proyección vertical de la copa sobre el terreno; y (5) la producción de látex (**P**) en kg (en peso fresco)/árbol x año.

Para determinar la producción de látex se aplicó un sistema de pica de media espiral descendente (1/2  $\searrow$  S) en la corteza cada 3 días (d/3) durante 10 meses al año (10m/  $\searrow$  12), de junio 2000 a marzo 2001. Durante este periodo de estudio en los días preestablecidos se efectuó la pica al amanecer (6:00 a 9:00 h) con una profundidad de pica de entre 1.2 y 1.5 mm, después de verificar que el tablero de pica estuviera limpio para evitar desbordamiento de látex. Entre 5 y 6 h después de iniciada la pica se cosechó el látex de los árboles, en el mismo orden que la pica. El látex de cada árbol se llevó al centro de acopio en donde se registró el peso fresco correspondiente, en gramos.

### Análisis estadístico

En el análisis preliminar de la información, los datos de campo fueron codificados, ordenados, sintetizados y elaborados hasta el punto de tener valores de las variables que alimentaron los modelos en formato de Excel para

Windows para su empleo inmediato. Después del registro se efectuaron estimaciones del grado de asociación entre variables independientes (**e**, **h**, **altf**, **d**, **gc**, **pcns** y **pceo**) mediante técnicas de correlación con el procedimiento PROC CORR de SAS (SAS, 1992), que permitieran evadir la colinealidad y eliminar las variables altamente correlacionadas. Para determinar la naturaleza de la respuesta de la producción de látex con respecto a las variables independientes, se realizó un análisis gráfico de la relación entre estas variables y así estimar el tipo de ecuación requerida en el modelo; es decir, si ésta debería incluirse en forma lineal, cuadrática, exponencial, etc. Puesto que el análisis gráfico mostró una tendencia cuadrática, se determinó utilizar modelos como: (a) variable combinada generalizada de forma cuadrática (Clutter *et al.*, 1983); (b) logarítmica generalizada (Clutter *et al.*, 1983) y (c) la gamma incompleta de forma exponencial (Herrera y Barreiras, 2000):

a) Variable combinada generalizada

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3^2 + \dots + \beta_n X_n^2 + \xi_i$$

b) Logarítmica generalizada

$$Y = \beta_0 + X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_n^{\beta_n} + \xi_i$$

c) Gamma incompleta

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} e^{-\beta_2 X_1} + \xi_i$$

donde: Y = variable dependiente;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  = coeficientes de regresión;  $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$  = variables independientes; e = base de logaritmo natural; y  $\xi_i$  = elementos aleatorios de error no correlacionados, con media 0 y varianza constante  $\sigma^2$ .

Para la generación del modelo definitivo con las variables que influyeran en la producción de látex, se procedió a efectuar un análisis de regresión, mediante el procedimiento PROC STEPWISE (Max R) del paquete estadístico SAS (SAS, 1992). Los datos con los que se alimentó el modelo fueron: **d**, **h**, **altf**, **gc**, **pcns** y **pceo** como variables independientes y **P** como variable dependiente.

Una vez seleccionados los modelos con las variables que contribuyeron a explicar la variabilidad de la producción de látex, se realizó el ajuste de las ecuaciones de regresión que mejor predijera el comportamiento de ésta. Para el análisis de regresión se utilizó el procedimiento PROC REG de SAS (SAS, 1992). Se utilizaron las opciones VIF y COLLIN (factores de inflación de varianza y diagnóstico de colinealidad, respectivamente) para detectar

posibles problemas de multicolinealidad. El criterio para la selección del mejor modelo se basó en el menor cuadrado medio del error (CME), mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), menor desviación estándar (DE), significancia de modelo (F), prueba de normalidad, análisis gráfico de residuales y un mínimo de variables independientes (Draper y Smith, 1981; Clutter *et al.*, 1983; Ferreira, 1990). La normalidad de los residuales y la homogeneidad de varianzas, se evaluaron con prueba de normalidad del procedimiento PROC UNIVARATE de SAS (SAS, 1992) y el análisis de residuales (Martínez y Castillo, 1987; Rebollo, 1996). Una vez elegido el mejor modelo para la predicción de producción de látex, con base en los criterios indicados, se procedió a generar la curva de producción de látex.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis previo de la correlación entre variables independientes permitió detectar una alta correlación ( $r=0.99$ ) y dependencia entre la edad y el diámetro normal. Debido a la singularidad entre estas dos variables independientes se optó por trabajar con el diámetro normal, ya que dicha variable, además de obtenerse directamente, también es más fácil y rápida de medir en campo y permite aplicar el concepto de alometría (Brown *et al.*, 1989; Ketterings *et al.*, 2001). Las demás variables independientes (**h**, **altf**, **gc**, **pcns** y **pceo**) no presentaron evidencias de colinealidad con el diámetro normal, por lo que fueron consideradas en el procedimiento de regresión por pasos.

Esta técnica permitió seleccionar al diámetro normal y a la altura total como las variables adecuadas para el caso.

Se compararon diferentes funciones de predicción de producción de látex, para elegir la de mejor ajuste a los datos de campo. En el Cuadro 1 se presenta un resumen de las mejores funciones, derivado del análisis de varianza y regresión. Todas las funciones fueron significativas, con valores de coeficiente de determinación relativamente elevados, cuadrado medio del error pequeño y desviación estándar aceptable, que indican un ajuste adecuado de los modelos. Sin embargo, los modelos que utilizaron al diámetro y la altura en forma lineal, cuadrática o logarítmica, que tuvieran los valores de ajuste ( $R^2$ ) < 0.75, los valores de error (CME) > 0.09 y de desviación estándar (DE)  $\geq$  0.30, no fueron considerados.

A pesar de que los seis modelos restantes fueron significativos y todos presentaron buenos ajustes ( $R^2 > 0.80$ ), se eligió el modelo  $\text{Log}(P) = \log \beta_0 + \beta_1 \log d - \beta_2 d$  (gamma incompleta), porque dio uno de los mejores ajustes para predecir la producción de látex ( $R^2 = 0.875$ ), con el menor CME (0.015) y desviación estándar (0.12), y uti-

liza una sola variable predictora, el diámetro normal, que es fácil de medir directamente en el campo. La producción de látex está asociada al número de mantos laticíferos y a la densidad de los vasos en el interior del manto (Narayanan *et al.*, 1990). Aunque el grosor de corteza influye en cierto grado, es el diámetro normal del tronco del árbol el que determina el número de mantos laticíferos, por lo que es una variable determinante para predecir la producción del látex en *H. brasiliensis* (Narayanan *et al.*, 1990). Además, el diámetro del tronco es una medida indirecta de la actividad del cambium en los árboles, por lo que representa al mismo tiempo un índice de la actividad fisiológica del individuo. Por estas razones, el diámetro normal es generalmente muy utilizado con el principio de alometría para predecir el rendimiento o crecimiento de otros órganos en los árboles (Álvarez *et al.*, 1999; Tewari y Dadow, 1999). El modelo que tuvo el mayor ajuste ( $R^2 = 0.926$ ) tiene el inconveniente de que requiere la medición de la altura además del diámetro normal y tuvo un CME y una desviación estándar lógicamente mayor que el modelo de la gamma incompleta (Cuadro 1).

Cuadro 1. Indicadores de ajuste para los modelos de predicción de la producción de látex del clon IAN-710 de Hevea brasiliensis Müll. Arg.

| Modelo  | $R^2$ (%) | CM Error | Desviación estándar | Pr > F |
|---|-----------|----------|---------------------|--------|
| <b>Variable combinada generalizada</b>  |           |          |                     |        |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \xi_i$   | 50.86     | 0.167    | 0.40                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \xi_i$                                 | 72.53     | 0.093    | 0.30                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 h^2 + \xi_i$                   | 83.79     | 0.055    | 0.23                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 h + \beta_3 h^2 + \beta_4 d h^2 + \xi_i$ | 91.85     | 0.029    | 0.17                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d h + \beta_3 d^2 + \beta_4 h + \xi_i$       | 92.56     | 0.025    | 0.15                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 d^2 h + \xi_i$                 | 84.34     | 0.053    | 0.23                | 0.0001 |
| $P = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 h + \beta_3 d^2 h + \xi_i$                 | 86.46     | 0.046    | 0.21                | 0.0001 |
| <b>Logarítmica generalizada</b>   |           |          |                     |        |
| $\text{Log}(P) = \beta_0 + \beta_1 \log d + \beta_2 \log h + \xi_i$             | 76.86     | 0.092    | 0.16                | 0.0001 |
| <b>Gamma incompleta</b>   |           |          |                     |        |
| $\text{Log}(P) = \log \beta_0 + \beta_1 \log d - \beta_2 d + \xi_i$             | 87.55     | 0.015    | 0.12                | 0.0001 |

P = Producción de látex (kg/árbol x año);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  y  $\beta_4$  = Coeficientes de regresión; d = Diámetro normal en cm; h = Altura total en m; log = Logaritmo natural; y  $\xi_i$  = Elementos aleatorios de error no correlacionados, con media 0 y varianza constante  $\sigma^2$ .

En el Cuadro 2 se presentan los resultados básicos del análisis de regresión correspondientes a la ecuación  $\text{Log}(P) = \log \beta_0 + \beta_1 \log d - \beta_2 d$ . Esta ecuación permite estimar satisfactoriamente la producción anual de látex por árbol, lo que se confirma al observar los errores estándar de los estimadores de los parámetros (variación mínima) y la prueba de "t-student", ya que ambas muestran evidencia significativa del efecto de la variable involucrada sobre la producción de látex. La prueba de normalidad "W" ( $\text{Pr} \geq 0.0001$ ) (Cuadro 2) sugiere una distribución normal de las desviaciones (errores) del modelo. De igual forma, los factores de inflación de varianzas (FIV) y los eigenvectores (EG) muestran un comportamiento satisfactorio, ya que valores FIV mayores de 4 y valores EG cercanos a cero indicarían problemas de colinealidad, lo que sugeriría

existencia de dependencia lineal entre variables (Draper y Smith, 1981). En este caso los valores de FIV y EG cumplen con los requisitos mínimos.

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza correspondiente a la ecuación que predice la producción anual de látex con base en el diámetro normal del árbol para el clon IAN-710 de Hevea brasiliensis Müll. Arg.

| CM        | CM Error             | Desviación estándar | Valor de F | Valor de W | Valor de R <sup>2</sup> | CV   |
|-----------|----------------------|---------------------|------------|------------|-------------------------|------|
| Modelo    | 84.41                | 0.015               | 5627.33    | 0.8862     | 0.8755                  | 9.43 |
| Variable  | Estimación Parámetro | Error estándar      | Prob > t   | FIV        | Eigenectores            |      |
| $\beta_0$ | 5.9420               | 0.10218116          | 58.152     | 0.0000     | 2.83603                 |      |
| $\beta_1$ | 3.0591               | 0.04336070          | 70.153     | 1.19906    | 0.13078                 |      |
| $\beta_2$ | -0.1204              | 0.00145291          | 82.891     | 2.42167    | 0.22958                 |      |

CM: Cuadrado medio; F: Prueba de F = CM del Modelo entre CM del error; W: prueba de normalidad; CV: coeficiente de variación; FIV: Inflación de varianzas.

En la Figura 1 se muestra la tendencia de los residuales con un comportamiento adecuado de los mismos (Draper y Smith, 1981). En general, los puntos se distribuyen aleatoriamente a ambos lados del eje X con valor de cero, sin ninguna tendencia o sesgo de la ecuación. La gráfica demuestra que existe una variabilidad que oscila entre 0.25 y -0.48 en kg/ árbol x año. Por tanto, el análisis de los residuales no muestra tendencias que denoten la presencia de problemas de heteroscedasticidad; es decir, la distribución de los errores es normal.

Como resultado de lo anterior se deduce que el modelo de la función gamma incompleta permite realizar estima-

ciones adecuadas de la producción de látex en función del diámetro normal del árbol, ya que los árboles de hule por sus características fisiológicas y de vigor tienden a un pico máximo de producción en su madurez y posteriormente presentan una declinación gradual hasta su declive comercial (Devakumar *et al.*, 1988).

Como una herramienta de apoyo a la evaluación de plantaciones de hule se elaboró la curva de producción de látex por árbol (Figura 2) con respecto al diámetro normal del mismo, con la ecuación  $P = \beta_0 d^{\beta_1} e^{-\beta_2 d}$ . Los datos de la curva inician con una categoría diamétrica de 14 cm, que es cuando se inicia la pica comercial en el árbol del hule.

Como se puede observar, la producción de látex inicia con 1.561 kg/árbol x año, que incrementa hasta alcanzar un pico máximo de 2.446 kg/árbol x año en árboles de 25 cm de diámetro normal. Con base en los datos de crecimiento en diámetro de las plantaciones muestreadas, la máxima producción se obtendría a los 18 años de edad. A partir de este valor inicia su declinación gradual hasta 1.065 kg/árbol x año en árboles con diámetro de 49 cm. Sin embargo, debe considerarse que la producción de látex, como cualquier otra expresión del crecimiento de los árboles, está determinada por la naturaleza genética de los árboles y las condiciones ambientales del sitio donde se desarrollan (Daniel *et al.*, 1982; Klepac, 1983). Por tanto,

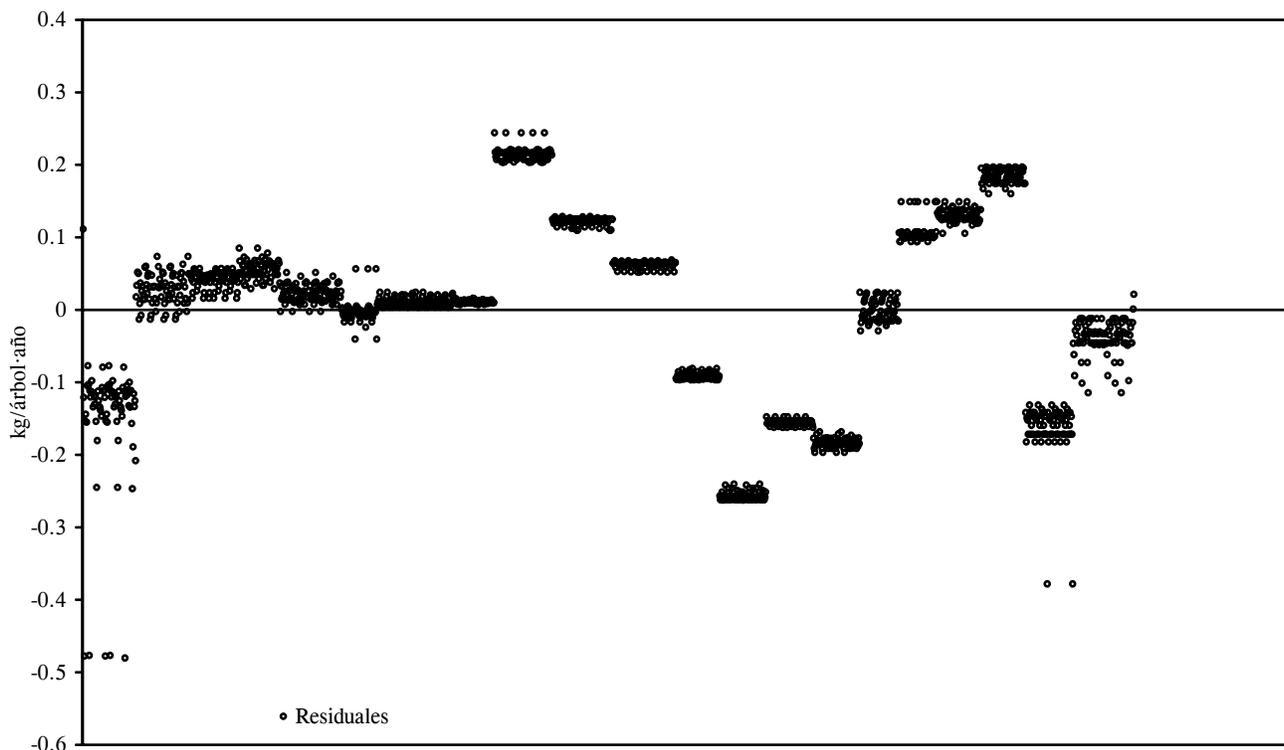


Figura 1. Diagrama de dispersión de residuales de la ecuación  $\log(P) = \log \beta_0 + \beta_1 \log d - \beta_2 d$ , que predice la producción de látex en Hevea brasiliensis Müll.

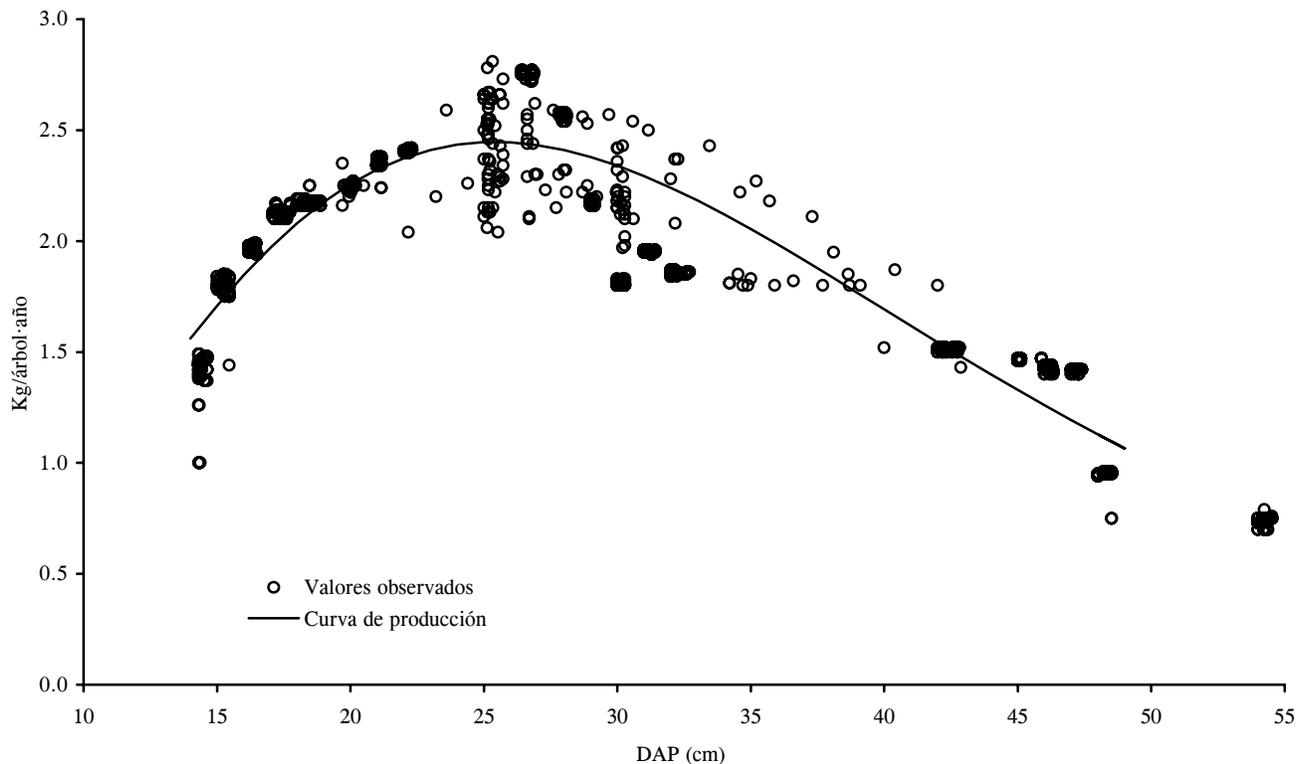


Figura 2. Relación entre la producción de látex y el diámetro normal del árbol del hule (*Hevea brasiliensis* Müll Arg.).

la curva de producción de látex podría variar en otros clones de hule u otros sitios de plantación. Por ejemplo, Labarre y Serier (1995) encontraron que el clon GT1 en Malasia, con manejo intensivo (fertilización, podas y uso de estimulantes en la pica) tiene una producción inicial de 1.05 kg (de hule fresco)/árbol x año a los 7 años, una producción máxima de 4.02 kg/árbol x año a los 18 años de edad y una declinación gradual hasta 0.8 kg/árbol-año a los 39 años de edad. En esas condiciones, el clon GT1 duplica la producción de látex del clon IAN-710 en Oaxaca, con una madurez fisiológica similar en ambos clones. Es importante señalar que en México las prácticas de manejo después de establecida la plantación de hule se restringen generalmente al control de malezas y a la poda de los árboles.

En la curva de producción (Figura 2), que concuerda con los estudios realizados por Labarre y Serier (1995), se distinguen tres periodos en el ciclo de producción del clon IAN-710: un periodo juvenil de 7 a 12 años (de 14 a 18 cm de diámetro normal); un periodo de madurez entre 13 y 20 años (de 20 a 27 cm de diámetro normal); y un periodo de vejez después de los 25 años de edad (32 cm de diámetro normal). Durante el tercer periodo disminuye la producción de la enzima polimerasa que sintetiza el látex por

el metabolismo en los vasos laticíferos, debido a la explotación continua del árbol y a los desequilibrios nutritivos u hormonales (Annamalainathan *et al.*, 1998). En este periodo, con el fin de aprovechar al máximo el potencial productivo del árbol, se recomienda la pica intensiva (descendente e inversa) y finalmente la pica a muerte (“sangrado” intensivo del árbol) (Narayanan *et al.*, 1990). Debido a que un gran número de árboles muere en esta etapa, la producción de látex por unidad de superficie de terreno disminuye considerablemente, hasta que ya no es rentable mantener la plantación con ese propósito. Debido a lo anterior, la vida útil de la plantación se alcanza alrededor de los 30 años, cuando los árboles tienen un diámetro normal entre 37 y 40 cm. En ese momento se puede aprovechar la madera de los árboles, ya que esta no sufre deterioro con el exudado de látex, como sucede con la resina en los pinos, cuando ésta fluye a través de los vasos resiníferos que se localizan en el xilema. En el árbol del hule los vasos laticíferos se encuentran en el floema y sólo reciben nutrientes, almidón y azúcares del cambium, pero no modifican la estructura del xilema (Compagnon, 1998).

**CONCLUSIONES**

Es posible estimar razonablemente la producción de látex de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 a

partir de ecuaciones de regresión. Las variables dasométricas diámetro normal y altura total, son variables que influyen en la producción de látex en el árbol del hule del Clon IAN-710. En cambio, la altura de fuste limpio, el grosor de corteza y la proyección de las copas del árbol del hule no fueron útiles para predecir la producción de látex. La ecuación que mejor ajuste tuvo para predecir la producción de látex fue el modelo  $P = \beta_0 d^{\beta_1} e^{-\beta_2 d}$  (función gamma incompleta) con una desviación estándar de 0.1239 y un coeficiente de determinación de 0.8755.

El diámetro normal fue la variable que mejor predice la producción de látex debido a que está asociada al número de mantos laticíferos y a la densidad de los vasos en el interior del manto, y es el diámetro normal del tronco del árbol el que determina el número de mantos laticíferos, que la hace ser una variable útil para predecir la producción de látex en *H. brasiliensis*. Además, el diámetro del tronco es una medida indirecta de la actividad del cambium en los árboles, por lo que representa al mismo tiempo un índice de la actividad fisiológica del individuo.

La ecuación de predicción de producción de látex fue elaborada con datos de las plantaciones establecidas en la región del Papaloapan, Oaxaca. Cualquier uso que se le dé fuera de esta región podría representar sesgos en la estimación de la producción. Existen muy pocos estudios sobre el árbol del hule y en general sobre los clones de esta especie en México. Por tanto, es importante realizar más estudios sobre esta especie, que permitan conocer las características de productividad de látex y madera.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexicano del Hule, A. C. y al Fondo Nacional de Empresas en Solidaridad (FONAES) por el apoyo económico y logístico otorgado para la realización de esta investigación. Simultáneamente, el agradecimiento se hace extensivo al Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco por el apoyo brindado al autor durante su estancia como estudiante en 1999.

### BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez G J, R Rodríguez S, A Vega G (1999) Elaboración de un modelo de crecimiento dinámico para rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait en Galicia. Inv. Agraria: Sist. Rec. For. 8 (2):319-334.
- Annamalainathan K, D Nair, J Auzac (1998) Respiration in soft bark tissue of tapped and untapped trees of *Hevea*. Indian J. Nat. Rubber Res. 11(1) 23-30.
- Arteaga M B (2000) Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayototla, Guerrero. Rev. Chapingo S. Ciencias For. 6(2)151-157.
- Bailey R L (1994) A compatible volume taper model based on the Schumacher and Hall generalized constant form factor volume equation. For. Sci. 40:303-313.
- Benavides S J de D, H Manzanilla B (1993) Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio de *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede para el A.D.F. Tapalpa, Jalisco. Ciencia For. Méx. 18(74):121-138.
- Brown S, J R Gillespie, E A Lugo (1989) Biomass estimation methods tropical forest with applications to forest inventory data. For. Sci 35(4):881-902.
- Castedo D F, G Álvarez J (2000) Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don. en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Inv. Agraria: Sist. Rec. For. 9(2):253-268.
- Castedo D F, G Ruiz, G Álvarez (2001) Modelización de la relación altura diámetro para *Pinus pinaster* Ait. en Galicia mediante la función de densidad bivalente  $S_{bb}$ . Inv. Agraria: Sist. Rec. For. 10(1):111-125.
- Clutter J L, J C Forston, L V Pienaar, G H Brister, R L Bailey (1983) Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley and Sons. New York. 333 p.
- CMH (2000) Manual para el Cultivo del Hule: *Hevea brasiliensis* en México. Consejo Mexicano del Hule, A.C. México, D.F. 168 p.
- CMH (2001) Información de Campo. Unidad de Investigación y Desarrollo. Consejo Mexicano del Hule A. C. 60 p.
- CMH (2002) Estadísticas Básicas. Consejo Mexicano del Hule, A.C. 90 p.
- Compagnon P (1998) El Caucho Natural, Biología-Cultivo-Producción. CIRAD-CMH. Mexico, D.F. 695 p.
- Daniel T W, A J Helms, S F Baker (1982) Principios de Silvicultura. McGraw-Hill. New York. 492 p.
- Davel M, G Trincado (2000) Evaluación de modelos fustales para *Pseudotsuga menziesii* en la Patagonia Andina Argentina. Inv. Agraria: Sist. Rec. For. 9(1): 319-334.
- Devakumar A S, R G Gururaja, R Rajagopal, R P Sanjeeva, M J George, K R Vijayakumar, D F Sethuraj (1988) Studies on soil-plant-atmosphere system in *Hevea*: seasonal effects on water relations and yield. Indian J. Nat. Rubber Res. 1:25-60.
- Draper N, H Smith (1981) Applied Regression Analysis. John Wiley and Sons. New York. 709 p.
- Ferreira O (1990) Métodos Estadísticos Aplicados a la Medición Forestal. Honduras. 123 p.
- Frederico J C, P C Aparecida, A Atamar (1995) Rubber growing soils in Sao Paulo, Brazil. Indian J. Nat. Rubber Res. 8(2):75-84.
- Fuente A E, A Velázquez M, J Torres R, H Ramírez M, C Rodríguez F, S Trinidad A (1998) Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en pueblos mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. Ciencia For. Méx. 23 (84):1-8
- García C X, H Ramírez H, C. Rodríguez F, J Jasso H, C A Ortiz S (1998) Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en Quintana Roo, México. Ciencia For. Méx. 23 (84): 9-19.
- Grist P, M Ken, T Lo (1995) Modelling rubber growth as a function of climate and soils. Indonesian Rubber Res. Inst.: Imperata Project Paper 1995/6.
- Herrera H J G, S Barreras A (2000) Análisis Estadístico de Experimentos Pecuarios. Primera ed. Colegio de Postgraduados. 117 p.
- International Rubber Study Group IRSG (2000) Rubber Statistical Bull. 37:12-60 p.
- Ketterings M Q, R Coe, V N Meine, Y Ambagau, C A Palm (2001) Reducing uncertainty in the use of allometric equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. For. Ecol. Manag. 146(1-3):199-209.
- Klepac D (1983) Crecimiento e Incremento de Árboles y Masas Forestales. Segunda ed. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo México. 95 p.
- Labarre M A, J B Serier (1995) L'hevea. Editions Maisonneuve et Larousse. Paris, Francia. 238 p.

- Maldonado A D, J Návar (2000)** Ajuste de funciones de ahusamiento de cinco especies de pino en plantaciones en la Región del Salto, Durango, México. *Rev. Chapingo S. Ciencias Forestales* 6(2):159-164.
- Martínez C F (1986)** Las lecciones de historia. *In: El Hule en México.* Ediciones Copilco S.A. México. pp:102-113 .
- Martínez G A, M Castillo A (1987)** Teoría de la Regresión con Aplicaciones Agronómicas. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México, México. 418 p.
- Muhairwe C, V Lemay, A Kozak (1993)** Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.* 24:252-259.
- Narayanan R, C Y Ho, K Chen (1990)** Clonal Correlation between yield structural characters, latex constituents and plugging index. *J. Rubber Res. Inst. Malaysia* 24:1-14.
- Návar C J, C Domínguez A, A Contreras C, M Estrada C (1997)** Ajuste de siete modelos de ahusamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl. del nordeste de México. *Agrociencia Serie Rec. Nat. Renovables* 31(1):73-81.
- Newnham R M (1992)** Variables form taper functions for four Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 22:210-223.
- Pienaar L V, N W Harrison (1988)** A stand table projection approach to yield prediction in unthinned even-aged stands. *For. Sci.* 34:804-808
- Picón R L (1999)** Manual para el Cultivo del Hule *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. SAGARPA-CMH-INIFAP. Veracruz, México. 103 p.
- Planting Recommendations Committee (1998)** Planter's Bulletin. Malaysian Rubber Board 3(3):1-17.
- Priyani S (1996)** The growth, phase change and rejuvenation of trees with special reference to *Hevea brasiliensis* (Müll. Arg.). *J. Rubber Res. Inst. Malaysia* 78:1-14.
- Ramírez M H (1981)** Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Ciencia For. Méx.* 16(70):87-108.
- Rebolledo R H (1996)** SAS en Microcomputadoras. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 93 p.
- SAS Institute Inc (1992)** System for Regression. Cary, NC USA. 210 p.
- Siavanan R, E Burk, R Ek (1988)** Construction of a stand growth model utilizing photosynthesis and respiration relationships in individual trees. *Can. J. For. Res.* 18:1027-1035
- Tewari V P, K Dadow (1999)** Modeling the relationship between tree diameters and heights using  $S_{bb}$  distribution. *For. Ecol. Manag.* 199:171-176.
- Valdez L R, B Lynch T (2000)** Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de *Pinus patula* en Puebla, México. *Agrociencia Serie Rec. Nat. Renovables* 43(6):747-758.
- Vanclay J K (1995)** Growth models for tropical forest: A synthesis of models and methods. *For. Sci.* 14:7-42.
- Wykoff W R (1990)** A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains. *For. Sci.* 36:1077-1104.
- Zamudio B, B Rivero (1997)** Modelos de crecimiento. *Rev. Chapingo S. Ciencias Forestales* 3(51):3-38.
- Zeide B (1993)** Analysis of growth equations. *For. Sci.* 39(3):594-616.