

UN MODELO DE COMPETENCIA PARA LAS PLANTACIONES DE TECA DEL AREA EXPERIMENTAL DE LA RESERVA FORESTAL CAPARO (BARINAS-VENEZUELA)

¹Jerez R. Mauricio, ²Lawrence Vincent y ³Ana Y. Moret

Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal, Grupo Genética y Silvicultura, Mérida-Venezuela. Email: aymoret@forest.ula.ve.

RESUMEN

Se probó un conjunto de modelos de competencia basados en el índice de Bella (Bella, 1971) a fin de representar el efecto de la competencia intraespecífica sobre el crecimiento de los árboles en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) de 22 años de edad. Para desarrollar los modelos se tomó una muestra de árboles en parcelas permanentes de rendimiento establecidas en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo (Barinas, Venezuela). Adicionalmente, se tomó una muestra de árboles plantados en cercas para determinar la relación diámetro de copa- diámetro a la altura de pecho bajo condiciones de crecimiento libre (*rdc-d*), esencial para el desarrollo del modelo; la relación *rdc-d* se ajustó a un modelo potencial ($y = aX^b$) mediante regresión no lineal ($R^2 = 0,82$). Se utilizaron análisis de regresión lineal y no lineal para predecir incrementos diamétricos periódicos en función de diversas variantes del índice de Bella. El modelo potencial ajustado por regresión no lineal ($y = aX^b$) se destacó como predictor del incremento diamétrico, con R^2 de 0,69 para incremento periódico de tres años. Los mejores modelos fueron validados correlacionando las estimaciones de incremento generadas por los índices y los valores reales observados para un nuevo conjunto de datos.

Palabras clave: Indices de competencia, Simulación, Teca, Caparo

ABSTRACT

A set of competition models based on the Bella index was used to represent the influence of competition on tree growth for 22-year old teak (*Tectona grandis* L. F.) plantations. A sample of trees was taken from permanent plots established at Caparo Experiment Station at the Caparo Forest Reserve (Barinas, Venezuela). In addition, a sample of trees growing in fences was taken to determine the crown diameter-diameter at breast height relationship (cd-dbh). under free growth conditions The cd-dbh relationship was fitted to a potential model ($y = aX^b$) by using non-linear regression ($R^2 = 0,82$). Periodic increments in dbh were predicted using linear and non-linear regression with Bella's model functions as explanatory variables. A non-linear model ($y = aX^b$) was the best predictor for three- year periodic increments in dbh ($R^2 = 0,69$). The best models were validated through the correlation between the predicted dbh increments and the actual increments observed for a new set of data.

Key words: Competition Index Simulation, Teak, Caparo

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La competencia entre los árboles de una población surge cuando la disponibilidad de recursos es menor que la suma total de los requerimientos de esa población para su crecimiento óptimo (Brand y Magnussen, 1988). Se han realizado numerosos estudios para tratar de cuantificar el efecto de la competencia sobre el crecimiento de los árboles. Para ello se desarrollaron los llamados "Índices de

Competencia", que son fórmulas matemáticas que relacionan diversas características de un árbol y de sus competidores (por ejemplo, diámetro del fuste y/o de la copa, etc.) para tratar de predecir el crecimiento del individuo.

Existen numerosos trabajos sobre modelos de índice de competencia. La mayoría dirigidos a proponer y determinar la eficiencia relativa de un

grupo de índices para una especie o conjunto de ellas (Daniels, 1976; Lorimer, 1983; Martin y Ek, 1984; Daniels *et al.*, 1986; Tomé y Burkhart, 1989; Mugasha, 1989; Biging y Dobertin, 1992).

Munro (1974) distinguió dos clases de modelos de índice de competencia: espacialmente independientes (*DI*) y espacialmente dependientes (*DD*). Los modelos *DI* usan funciones de variables a nivel de sitio y las dimensiones iniciales del árbol sujeto; son fáciles de calcular y requieren poco tiempo de computadora. En general, consisten en alguna función del área basal por hectárea (Spurr, 1962; Glover y Hool, 1979), razones de la dimensión de un árbol a la dimensión promedio en el sitio, o a la dimensión promedio de los árboles dominantes y radio de la copa (Curtis, 1970; Hegyi, 1974; Daniels, 1976). Por otro lado, los *DD* incorporan, de alguna forma, el número, dimensiones y localización de ciertos vecinos, por lo que son sensibles al arreglo espacial de los árboles en el sitio.

Los modelos *DD* son, en general, más complejos y difíciles de calcular que los *DI*; sin embargo, los estudios comparativos realizados entre ambos tipos, arrojan muy poca o ninguna ventaja en la precisión de los modelos *DD* sobre los *DI* (Daniels *et al.*, 1986). Daniels y Burkhart (1988) consideran que los modelos *DD* son más realistas, pues se aproximan más a los procesos biológicos de crecimiento y permiten expresar los tratamientos silviculturales que implican influencias espaciales y competitivas, por ejemplo los aclareos.

Entre los modelos *DD* destacan los índices de intersección de áreas (*área overlap index*), tales como los de Newnham, 1966; Opie, 1968; Gerrard, 1969; Bella, 1971; Ek y Monserud, 1974. Estos índices consideran la llamada *zona de influencia*, que es un área dentro de la cual cada individuo obtiene los recursos que necesita para sus funciones fisiológicas. Esta zona puede ser el área de copa, el área del sistema radical, alguna función de éstas, u otra que pudiera considerarse pertinente. La competencia puede representarse como una expresión del grado en que las zonas de influencia se traslapan entre diversos individuos, y significa que éstos están compitiendo por los mismos recursos

Deben mencionarse también los índices de razón de tamaños ponderados por la distancia -*distance-weighted size ratio index*- (Tomé y Burkhart ;1989); y los índices de área potencialmente disponible -*area potentially available -APA- index*- tales como los de

Brown, (1965); Moore y Budelsky, (1973); Peltz, (1978) y; Alemdag, (1978).

Otros autores (Hatch *et al.*, 1975; Doyle, 1983 - citados por Biging y Dobertin, 1992) han desarrollado modelos que toman en cuenta la posición vertical y el tamaño estimado de la copa de un árbol respecto a sus vecinos (por ejemplo: Doyle, 1983). Recientemente, Holmes y Reed (1991) desarrollaron modelos que incorporan la competencia radical.

En Venezuela se destaca como pionero el trabajo de Fernández (1982) para pino caribe, el cual probó varios índices *DI* y *DD*. Posteriormente, Vincent (1983) comparó tres modelos de índice de competencia en plantaciones de teca en la Reserva Forestal de Caparo: el modelo de Área Basal Puntual (Spurr, 1962), el modelo de Intersección de Zonas de Influencia (Bella, 1971) y el de Índice de Espaciamento-Competencia (Lin, 1969). El autor encontró que el modelo de Bella presentó el mejor comportamiento.

El modelo de Bella

El modelo de Bella es una extensión del concepto de "zona de influencia" de un árbol, ya manejado anteriormente por otros autores (Staebler, 1951; Newnham, 1966; Opie, 1968; Gerrard, 1969 citados por Vincent, 1983) donde se asume que ésta es proporcional a su tamaño, de manera tal que árboles más grandes tendrán una zona de influencia mayor y por lo tanto un mayor "peso" competitivo (Bella, 1971). El modelo considera que árboles cuyas zonas de influencia se traslapan, se hallan en competencia. Como ejemplo, puede observarse la Figura 1 donde se representan cinco árboles con sus respectivas zonas de influencia y relaciones de competencia. El área

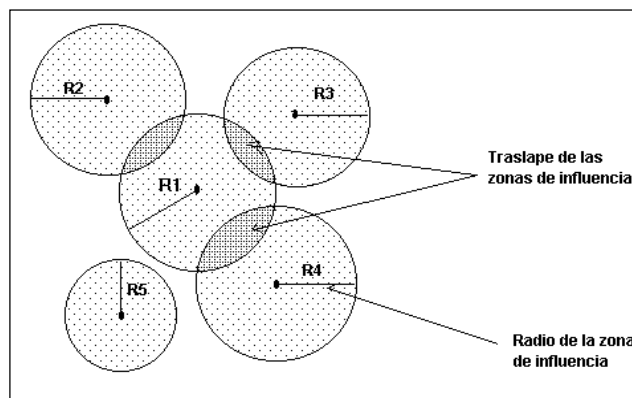


FIGURA 1. Representación de las zonas de influencia de cinco árboles y sus relaciones.

de las zonas de intersección se utiliza para calcular el grado de competencia entre los individuos. El efecto relativo de competencia que un árbol competidor ejerce sobre un árbol sujeto, puede expresarse como una razón entre los diámetros (d) de ambos individuos. Adicionalmente, se asume que el efecto competitivo entre individuos es dependiente de la especie de la que se trate, lo cual es expresado mediante un exponente (EX) y de las condiciones del sitio. La expresión general del modelo es:

$$1. \quad IC_B = \left[(a_i / A) \cdot (d_i / d)^{EX} \right]$$

donde: IC_B : Índice de Bella para un árbol central; a_i : Área de intersección de las zonas de influencia del árbol central y el i -ésimo árbol competidor; A : área de la zona de influencia del árbol central; d_i : diámetro a la altura de pecho del i -ésimo competidor; d : diámetro a la altura de pecho del árbol central; y EX : exponente, parámetro del modelo.

Se asume que el tamaño máximo de la zona de influencia de un árbol, con un diámetro dado, está relacionado al tamaño máximo que puede alcanzar su copa bajo condiciones de crecimiento libre, por lo cual es necesario estimar la relación existente entre el d y el radio de copa en individuos que crecen libres de competencia. Esta relación debe ajustarse por un factor (FE) cuyo valor depende de la especie y que posiblemente es afectado por el sitio y la edad (Bella, 1971). El radio de la zona de influencia viene definido por la expresión

$$2. \quad R_c = (D_c / 2) * FE$$

donde: R_c : Radio de la copa libre; D_c : Diámetro de copa libre, siendo $DC = f(d)$; FE : Factor de Expansión del modelo de Bella y d : Diámetro a la altura de pecho

Si el factor FE es mayor a uno, significa que la competencia se inicia antes de que las copas entren en contacto. La existencia o no de competencia entre dos individuos cualesquiera se determina a través de la expresión

$$3. \quad D \{ <, =, > \} (r_1 + r_2)$$

donde: D : Distancia entre el árbol sujeto y el competidor; r_1 : Radio de la zona de influencia del árbol central o sujeto; r_2 : Radio de la zona de influencia del árbol competidor

Si en la expresión (3) la distancia (D) es mayor o igual que la suma de los radios de las zonas de influencia, entonces no existe competencia; de lo contrario, si $D < (r_1 + r_2)$ existe competencia y, por tanto, debe hallarse el área de intersección de las zonas de influencia, lo cual es un problema de carácter netamente geométrico.

El valor del índice viene dado por la suma de los valores calculados para cada árbol competidor y puede valer entre cero, cuando no hay competencia, y una magnitud indeterminada que depende de los valores asumidos para los parámetros y de las características de los datos de distancia y diámetros de los competidores (Vincent, 1983).

Se ha utilizado el modelo de Bella y modificaciones del mismo como referencia en numerosos estudios comparativos (Biging y Dobertin, 1992; Holmes y Reed, 1991; Tomé y Burkhart, 1989) presentando resultados bastante satisfactorios en casi todos los casos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Area de Estudio

Los datos provienen de plantaciones de teca establecidas en 1973 bajo el "Programa de Investigación Forestal con Fines de Manejo en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo" financiado por CORPOANDES y la Dirección de Recursos Naturales Renovables del M.A.C. (ULA-CORPOANDES, 1973). La Reserva Forestal Caparo está ubicada en el Estado Barinas y corresponde al área geográfica Altos Llanos Occidentales, con una altitud promedio de 100 msnm; precipitación promedio anual de 1900 mm, con una estación seca en Enero-Abril, y temperatura media de 25° C. La zona de vida corresponde a una transición de bosque húmedo tropical hacia bosque seco tropical según Holdridge (Ewel y Madriz, 1976).

Las plantaciones objeto de estudio abarcan una superficie de 42 hectáreas en bosques clasificados como "selva decidua de banco", según la tipificación utilizada en el citado Programa de Investigación

(ULA-CORPOANDES, 1973). En éstas, con el objeto de investigar sobre el crecimiento y técnicas de manejo para la teca, se estableció un conjunto de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento entre 1973 y 1981 a fin de evaluar la respuesta de la especie a diferentes tratamientos silviculturales (régimen de espesura) llevando registro del crecimiento anual y otros parámetros de interés para evaluar el rendimiento.

Muestreo

Muestra para crecimiento libre

Para la determinación de la relación *d* vs. *diámetro de copa* bajo condiciones de crecimiento libre se seleccionó una muestra representativa de árboles de teca de entre 10 y 20 años de edad creciendo en cercas de fincas aledañas a la reserva. Se partió del supuesto de que el radio de la copa que crece perpendicular a la cerca representa el posible radio de copa bajo condiciones de crecimiento libre. Se incluyeron también algunos árboles aislados.

Se seleccionaron 104 árboles considerando categorías diamétricas de 2,5 cm de amplitud. En cada categoría se seleccionó hasta doce árboles como máximo, los cuales debían estar sanos, no bifurcados a menos de 3 m y ser dominantes respecto a sus vecinos más cercanos. A cada árbol se le tomó el *d* (cm), la altura total (m) y proyecciones de copa (m), tomando dos radios para cada proyección.

Selección de la muestra para desarrollar los índices de competencia

Se seleccionaron ocho parcelas permanentes establecidas en la plantación piloto de 1973, caracterizadas por pertenecer a la misma categoría de calidad de sitio (calidad II, según Torres, 1982) y no haber sido aclareadas después de 1988.

Las parcelas se separaron en cuatro grupos, de acuerdo a sus similitudes en cuanto a densidad, área basal y diámetro promedio. En cada grupo se seleccionó aleatoriamente una parcela para desarrollar los modelos, quedando la restante para validación. Las características de las parcelas seleccionadas se presentan en el Cuadro 1.

Del total de árboles de las parcelas de desarrollo, se tomó una muestra aleatoria equivalente al 30% de los individuos presentes en cada categoría diamétrica de 2,5 cm de amplitud para la medición de 22 años de edad. Se descartaron árboles con daños

y problemas fitosanitarios, igualmente aquéllos con registros históricos incompletos.

A cada árbol central se le midió la circunferencia a la altura de pecho (*c*) en *mm*; la altura total (*m*) y; las proyecciones de copa (*m*).

Se hallaron las coordenadas rectangulares de cada árbol dentro de la parcela y de la zona de aislamiento (Silva y Bastardo, 1995). Adicionalmente, se determinaron las coordenadas de algunos árboles fuera de las zonas de aislamiento, que, por su gran tamaño, podrían estar compitiendo con árboles de las parcelas.

Se distinguieron dos tipos de competidores: aquéllos que forman parte de la parcela permanente y aquéllos que se encontraron fuera de la parcela, ya sea en la zona de aislamiento o más allá. A cada árbol se le tomó la *c* y condiciones fitosanitarias. En dos parcelas (9 y 11), se detectó que algunos árboles de la zona de aislamiento fueron cortados accidentalmente en un aclareo reciente. La posición y el diámetro de tocón fuer registrada.

Procesamiento de los datos

Derivación del Modelo para Determinar el Area de la Zona de Influencia

Para definir un modelo de *rdc-d* se utilizó el modelo de regresión lineal simple, con y sin intercepto (Vincent, 1983), y el modelo propuesto por Ek (1974) para determinar el diámetro de copa libre, cuya expresión es

$$1. \quad D_c = b_0 + b_1 (d)^{b_2}$$

donde: D_c : Diámetro de copa; d : Diámetro a la altura de pecho; b_0 , b_1 y b_2 : Coeficientes dependientes de la especie.

Se tomó como variable independiente la suma de las proyecciones de copa perpendiculares a la cerca.

Cálculo del índice de Competencia

Se calcularon los índices de competencia para valores de *FE* y *EX* entre 1,0 y 3,0 con incrementos de 0,5. Para ello se creó un programa que utilizó la *c* para cada árbol, sus coordenadas rectangulares (N-E) y el tipo (central, competidor, aislamiento, etc.). En el caso de los tocones, se estimó *c* a partir del diámetro promedio del tocón, mediante la siguiente fórmula¹:

$$2. \quad C = 0.734602 \times c_t$$

CUADRO 1. Características generales de las parcelas permanentes de aclareo y rendimiento de teca seleccionadas para la muestra.

Parcela	Conjunto	Terreno	Espaciamiento Inicial (m)	Superficie (m ²)	Número de aclareos	Densidad 1995 (arb/ha)
3	Validación	deforestación	2.5 X 2.5	1200,00	2	417
4	Desarrollo	"	2.5 X 2.5	1200,00	2	400
8	Validación	rastrajo	4.0 X 4.0	800,00	1	363
16	Desarrollo	"	4.0 X 4.0	600,00	1	317
9	Validación	"	3.0 X 3.0	800,00	1	388
11	Desarrollo	"	2.5 X 2.5	1000,00	2	400
6	Desarrollo	"	2.0 X 2.0	1200,00	0	1458
17	Validación	"	2.0 X 2.0	600,00	0	1133

donde: C : Circunferencia a la altura de pecho (mm); c_i : Circunferencia a la altura de tocón (mm). El R^2 ajustado fue de 75,8% para un tamaño de muestra = 41.

Se generaron mapas de las parcelas mediante el paquete SURFER. El programa permitió seleccionar los árboles competidores de cada árbol central de acuerdo a los radios de las zonas de influencia definidos con el parámetro FE . Las distancias generadas fueron cotejadas con valores de distancias reales tomados en el campo por Vincent, 1983; Jerez, 1996 (Mediciones realizadas como parte de las actividades de campo de este trabajo.) a fin de constatar su validez.

Derivación de los Modelos de Competencia a partir del Índice de Bella

A partir de listados de mediciones anuales de circunferencia generados por el sistema de información SINFOPLAN² se creó un archivo con los incrementos diamétricos anuales de cada árbol central de las parcelas para el período 1989-1996 (16-23 años de edad) que se unió al que contenía los índices de competencia. Se descartaron incrementos con valor cero o negativo, ya que no presentaron correlación con los índices de competencia ni con el d . Ello puede

ser el reflejo de otras condiciones diferentes a la competencia, tales como problemas de suelo, enfermedades, etc.

Se hicieron análisis de la correlación de los índices con combinaciones de los incrementos corrientes y medios anuales para cada árbol central, considerando periodos de dos, tres y seis años (1993-1995, 1992-1995 y 1989-1995). Se usaron los métodos de Pearson y de Spearman. Adicionalmente, se analizó la correlación entre incrementos diamétricos y d .

No se pudo determinar la correlación para el incremento en el periodo 1995-1996 (un año), ya que las mediciones de circunferencia realizadas en todas las parcelas fueron menores o iguales a las del año anterior para la mayoría de los árboles. Las grandes variaciones observadas en los incrementos anuales, hacen suponer que para esta especie y para las edades consideradas en que los incrementos diamétricos son reducidos, es difícil detectar el efecto de la competencia en periodos muy cortos, ya que éste es enmascarado por diversos factores tales como, variaciones en el contenido de agua de los árboles, el cual se reduce fuertemente durante el período de sequía, produciendo una disminución en la circunferencia; errores de medición, pérdida de la corteza del árbol, etc., que son relativamente comunes.

Se seleccionaron los diez mejores índices de acuerdo a la siguiente clasificación por rangos:

$$3. \quad r_{93-95} + r_{92-95} + r_{89-95} = \text{puntuación}$$

donde: $r_{i,j}$ = Valor del coeficiente de correlación de un índice/método en particular para el periodo i,j .

Luego, se asignó una puntuación entre 1 y 10 para cada índice/método, otorgándose 10 puntos al que ocupó el primer lugar, 9 al segundo y así sucesivamente. Por último, se escogieron los cinco mejores índices, de acuerdo a su ubicación entre los tres de mayor puntuación en alguno de los métodos y/o un puntaje de al menos cinco en cada método.

Selección de los Mejores Modelos

Los índices, junto con transformaciones de éstos ($Ln(X)$, $1/X$, \sqrt{X} , X^2 , X^3 , X^4 .) fueron empleados como variables explicatorias para predecir los incrementos diamétricos de los periodos considerados. Se probaron modelos lineales, no lineales y linealizables. (Cuadro 2).

Los mejores modelos lineales se seleccionaron de acuerdo a los siguientes criterios: R^2 ajustado³, significación de los coeficientes de regresión y simplicidad del modelo. Se incluyó el análisis de residuos. Adicionalmente, se probaron modelos que representaran relaciones de tipo curvilíneo y no lineal, con una sola variable independiente. Estos modelos se usaron solo para predecir los incrementos en el período 93-95. Los modelos multiplicativo y exponencial fueron ajustados "linealizando" previamente las respectivas ecuaciones. Los modelos no lineales fueron ajustados utilizando el método de Mardquart (Draper y Smith, 1981).

Validación de los Resultados

Los modelos seleccionados fueron utilizados para generar estimaciones del incremento medio anual a partir de los datos de los árboles centrales del conjunto de parcelas de validación. Se halló la correlación entre las estimaciones y los incrementos reales observados para cada árbol de la parcela. Se utilizaron los métodos de Pearson y Spearman.

CUADRO 2. Modelos propuestos para ajustes de curvas de incremento vs. índice de competencia en parcelas permanentes en plantaciones de teca de la Reserva Forestal de Caparo, Barinas, Venezuela.

	Forma del modelo	Método de Estimación	Estimador del Incremento Diamétrico
1	$I = a(I_c)^b + \varepsilon$	No Lineal	$\hat{I} = \hat{a}(I_c)^{\hat{b}}$
2	$I = e^{a+b(I_c)} + \varepsilon$	No Lineal	$\hat{I} = e^{\hat{a}+\hat{b}(I_c)}$
3	$\ln I = a + b \ln(I_c) + \varepsilon$	Multiplicativo	$\hat{I} = e^{\hat{a}}(I_c)^{\hat{b}}$
4	$\ln I = a + b(I_c) + \varepsilon$	Exponencial	$\hat{I} = e^{\hat{a}+\hat{b}(I_c)}$
5	$I = a + b \ln(I_c) + \varepsilon$	Lineal	$\hat{I} = \hat{a} + \hat{b} \ln(I_c)$
6	$I = a + b(1 / I_c) + \varepsilon$	Lineal	$\hat{I} = \hat{a} + \hat{b}(1 / I_c)$
7	$I = a_0 + a_1(TI_c) \dots + a_i(TI_c) + \varepsilon$	Llineal	$\hat{I} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1(TI_c) \dots + \hat{a}_i(TI_c)$

I : Índice de competencia

TI : Transformaciones del índice de competencia

a y b : parámetros de los modelos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información sobre la Muestra de Crecimiento Libre

El Cuadro 3 presenta los resultados de los análisis de regresión efectuados para estimar la relación diámetro de copa con el d bajo condiciones de crecimiento libre. Los coeficientes de determinación fueron altos (entre 0,78 y 0,82). Se seleccionó el modelo 4 (modelo de Ek sin intercepto), el cual tiene la propiedad deseable de pasar por el origen, y comportarse asintóticamente para grandes valores de diámetro (Figura 2). Su expresión es:

$$d_c = 0,47473997 X d^{0,84930571}$$

donde: d_c : Diámetro de copa bajo condiciones de crecimiento libre (m) y d : Diámetro a la altura de pecho (cm).

Los resultados obtenidos al usar el modelo lineal con y sin intercepto, coincidieron con los obtenidos por Vincent (1983) para árboles en los bordes de una plantación. Cuando se forzó al modelo a pasar por el origen se obtuvieron valores muy similares para la pendiente (0,22 contra 0,28).

Derivación de los Modelos de Competencia

Correlación entre incremento diamétrico e índices de competencia

El Cuadro 4 y la Figura 3 muestran la relación entre los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman y combinaciones de los parámetros FE y EX para los incrementos diamétricos considerados.

Las menores correlaciones, en todos los casos, se presentaron para el periodo 93-95 (-0,38 a -0,56 -Pearson- y -0,49 a -0,66 -Spearman-), aumentando para el periodo 92-95 (-0,44 a -0,66 para Pearson y -0,74 a -0,77 para Spearman).

Para el período 89-95, se presenta poca diferencia con respecto al periodo 92-95 para el método de Pearson, aunque con mayor variabilidad (-0,39 a -0,67). Con el método de Spearman los coeficientes van de -0,73 a -0,80.

La correlación se reduce sensiblemente al aumentar EX . El incremento de FE no afectó el grado de asociación de los índices con los incrementos. Dicha tendencia, se mantuvo para todos los periodos

independientemente del método de análisis utilizado.

Los mejores índices superaron al d en su grado de asociación con el incremento diamétrico.

Los resultados concuerdan con Vincent (1983) en la mejor correlación observada al aumentar la longitud de los periodos, sin embargo no coinciden en cuanto a la combinación de parámetros con mayor correlación lineal ($FE = 1,5$ y $EX = 2,0$ -Vincent- contra $FE = 1,0$ y $EX = 1,0$ - en el presente estudio -). A partir de estos resultados se seleccionaron los cinco mejores índices los cuales se identificaron de acuerdo a la tabla presentada en el Cuadro 5.

Análisis de regresión entre incrementos periódicos medios anuales y los índices seleccionados

Los índices seleccionados fueron utilizados para predecir incrementos anuales derivados de los incrementos periódicos considerados. En el Cuadro 6 se presentan los resultados del análisis de regresión para los modelos lineales y en el Cuadro 7 para los modelos no lineales y linealizables seleccionados. Para el periodo 93-95. solo se seleccionó un modelo (inverso del índice 4. Los modelos 2 y 3 son ajustes para el periodo 92-95 y poseen R^2 ajustados entre 0,69 y 0,72. Los modelos 4 y 5 corresponden al ajuste para el periodo 89-95. Aquí, el mejor modelo en cuanto a R^2 resultó ser uno con siete variables, sin embargo, su ganancia con respecto al otro modelo (dos variables) es de solo cuatro puntos porcentuales.

Los análisis gráficos de los residuos demostraron para todos los modelos, cierta desviación de la normalidad y ligera heterocedasticidad. El estadístico Durbin-Watson mostró la presencia de autocorrelación positiva, lo cual se justifica ya que evidentemente las observaciones correspondientes a las mismas parcelas pueden estar correlacionadas (competencia). Se detectaron algunas observaciones atípicas e influyentes. Se procedió a identificar los árboles que producían estas observaciones y a su descarte justificado previo análisis de cada caso

En cuanto a los modelos no lineales y "linealizables" seleccionados (6,7,8 y 9) para el periodo 92-95, el R^2 varió entre 0,63 para los modelos linealizables (multiplicativo -6- y exponencial -7-) y 0,68 para los no lineales (8 y 9).

Validación de los modelos

Los resultados del análisis de correlación entre incrementos diamétricos estimados por los modelos

CUADRO 3. Resultados de los análisis de regresión con los modelos seleccionados para establecer la relación diámetro de copa con el diámetro a la altura de pecho bajo condiciones de crecimiento libre.

Parámetro Estadístico	Modelo / tipo			
	1 $a+bX$	2 Lineal $bXa+bX^c$	3 no lineal bX^c	4 no lineal
Coefficientes de Regresión				
<i>a</i>	1,30699 (1) (***)		-3,48876115 -1,00	
<i>b</i>	0,238265 (***)	0,27213203 (***)	1,43596408 1,17	0,47473997 6,52
<i>c</i>			0,62633433 3,83	0,84930571 20,64
Error Estándar				
<i>a</i>	0,41		3,5	
<i>b</i>	0,01	0,004	1,22	0,073
<i>c</i>			0,16	0,04
Coefficiente de Determinación (R²)	0,8144	0,7864	0,8224	0,8192

(1) significativo para alfa = 0,01
 (2) razón entre el error estándar del coeficiente y su valor, en modelos no lineales

Notas:
 Tamaño de la muestra 104
 Variable explicada diámetro de copa
 Variable explicatoria diámetro a la altura de pecho (cm)

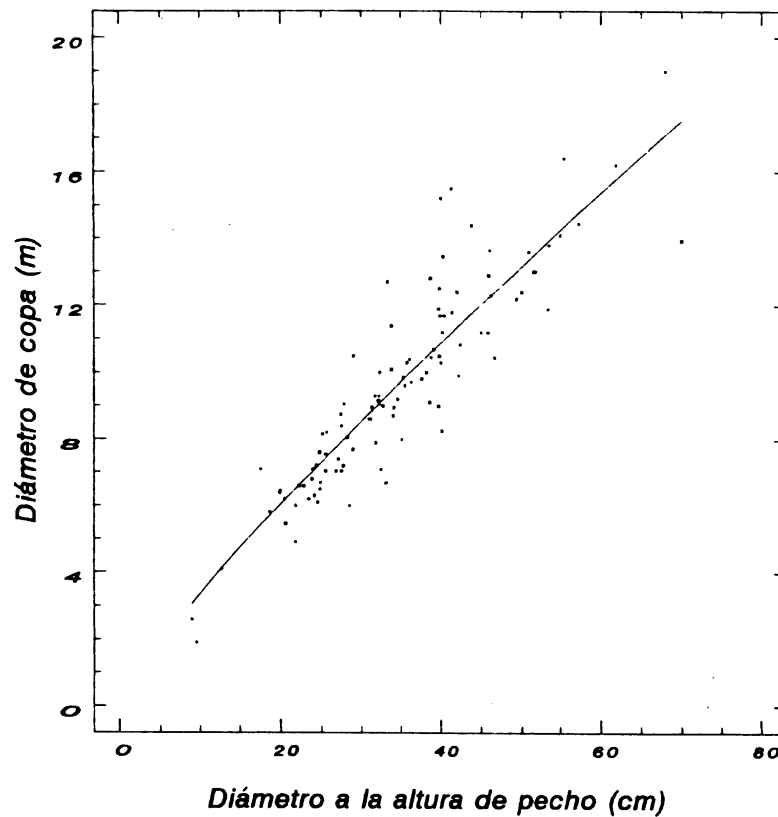


FIGURA 2. Línea de regresión ajustada para la relación diámetro de copa vs. diámetro a la altura de pecho bajo condiciones de crecimiento libre a partir de una muestra de árboles de teca plantada en cercas.

CUADRO 4. Resultados de los análisis de correlación entre los incrementos medios periódicos considerados y los índices obtenidos para diferentes combinaciones de los parámetros FE y EX, según los métodos de Person y Sperman.

a. Correlaciones con el incremento diamétrico para el periodo 1993-1995

	Coeficiente de correlación de Pearson					Coeficiente de correlación de Spearman					
	FE					FE					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
<i>EX</i>						<i>EX</i>					
1,0	-0,54	-0,57	-0,56	-0,55	-0,55	1,0	-0,61	-0,65	-0,63	-0,65	-0,66
1,5	-0,49	-0,52	-0,50	-0,50	-0,49	1,5	-0,61	-0,62	-0,61	-0,63	-0,63
2,0	-0,45	-0,47	-0,46	-0,45	-0,44	2,0	-0,56	-0,58	-0,58	-0,61	-0,59
2,5	-0,41	-0,43	-0,42	-0,41	-0,41	2,5	-0,50	-0,53	-0,53	-0,56	-0,56
3,0	-0,38	-0,40	-0,39	-0,38	-0,38	3,0	-0,49	-0,50	-0,50	-0,52	-0,52
d*	0,52					d*	0,53				

b. Correlaciones con el incremento diamétrico para el periodo 1992-1995

	Coeficiente de correlación de Pearson					Coeficiente de correlación de Spearman					
	FE					FE					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
<i>EX</i>						<i>EX</i>					
1,0	-0,66	-0,64	-0,63	-0,64	-0,65	1,0	-0,77	-0,75	-0,75	-0,76	-0,76
1,5	-0,60	-0,59	-0,58	-0,59	-0,59	1,5	-0,76	-0,76	-0,76	-0,77	-0,76
2,0	-0,55	-0,54	-0,53	-0,54	-0,54	2,0	-0,76	-0,75	-0,75	-0,76	-0,76
2,5	-0,51	-0,49	-0,48	-0,49	-0,49	2,5	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75
3,0	-0,47	-0,45	-0,44	-0,44	-0,44	3,0	-0,74	-0,74	-0,74	-0,75	-0,74
D*	0,71					d*	0,75				

c. Correlaciones con el incremento diamétrico para el periodo 1989-1995

	Coeficiente de correlación de Pearson					Coeficiente de correlación de Spearman					
	FE					FE					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
<i>EX</i>						<i>EX</i>					
1,0	-0,67	-0,63	-0,62	-0,62	-0,63	1,0	-0,78	-0,80	-0,78	-0,78	-0,77
1,5	-0,63	-0,56	-0,55	-0,55	-0,55	1,5	-0,78	-0,80	-0,78	-0,77	-0,76
2,0	-0,56	-0,50	-0,48	-0,49	-0,49	2,0	-0,76	-0,78	-0,76	-0,77	-0,75
2,5	-0,51	-0,45	-0,43	-0,44	-0,44	2,5	-0,75	-0,76	-0,75	-0,74	-0,74
3,0	-0,46	-0,41	-0,39	-0,40	-0,40	3,0	-0,74	-0,75	-0,74	-0,73	-0,73
D*	0,72					d*	0,74				

d* = diámetro a la altura de pecho para 1995 (cm)
 Tamaño de la muestra: 93-95 51
 92-95 75
 89-95 68

CUADRO 5. Características de los cinco mejores índices (combinaciones de FE y EX) obtenidos a partir del análisis de correlación.

Número de identificación	FE	EX	Puntaje obtenido
1	1,0	1,0	16
2	1,5	1,0	19
3	1,5	1,5	12
4	2,5	1,0	16
5	3,0	1,0	16

CUADRO 6. Resultados de los análisis de regresión incremento diamétrico vs. índices de competencia para los modelos lineales seleccionados.

Modelos Lineales					
	1	2	3	4	5
Muestra (n)	51	73	73	68	68
Variable					
Explicada	93-95	93-95	93-95	89-95	89-95
Explicatorias	I4	I4	(L-D-R-S)1	I4	I0,(I-D-R-S-C-Q)4
Coeficientes de regresión					
a	-0,00592 (ns)	-0,07787 (**)	15,9817 (***)	-0,103 (**)	-140,663 (***)
b	2,94105 (**)	6,26177 (***)	5,66213 (***)	5,82782 (***)	-6,28095 (ns)
c			4,17257 (***)		197,3683 (***)
d			-19,453 (***)		-12,4862 (***)
e			-0,0939 (***)		73,17927 (***)
f					0,167716 (***)
g					-0,00185 (**)
h					8,88E-06 (**)
R²	0,4148	0,6889	0,72	0,5226	0,6017
R² ajustado	0,4028	0,6845	0,7043	0,5154	0,5553
SEE	0,093	0,121	0,117	0,155	0,149
DW	0,949			1,053	1,282

ns no significativo
 * significativo a 0,10
 ** significativo a 0,05

*** significativo a 0,01
 SEE : Error estándar de la estimación
 DW : Estadístico de Durbin-Watson

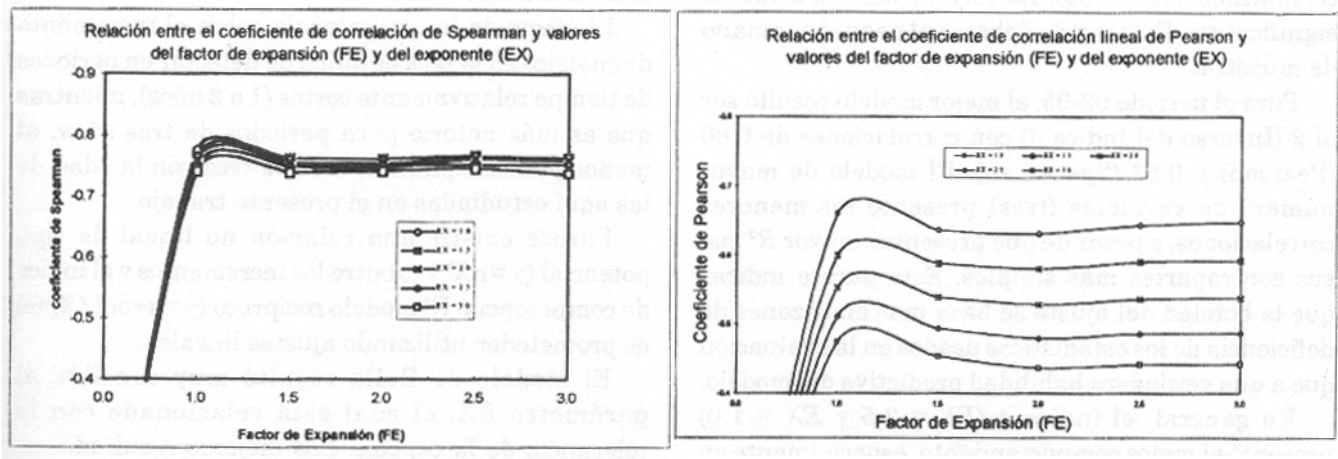


FIGURA 3. Relación entre los coeficientes de correlación y valores del factor de expansión (FE) y exponente (EX) para el incremento diamétrico observado en el período 1992-1995.

CUADRO 7. Resultados de los análisis de regresión incremento diamétrico vs. índices de competencia para los modelos No lineales y Linealizables seleccionados.

Modelos no lineales y linealizables				
Modelo	Multiplicativo 6	Exponencial 7	No lineal 8	No lineal 9
Muestra (n)				
Variable				
Explicada	93-95	93-95	93-95	93-95
Explicatorias	I4	D4	D4	D4
Coefficientes de regresión	(1)			
<i>a</i>	2,37301 (***)	2,39843 (***)	9,75485 3.36	0,24857 2
<i>b</i>	1,31985 (***)	-1,32941 (***)	-1,2494 -11	-0,0848 -9
R ²	0,6365	0,6391	0,6873	0,684
R ² ajustado				
SEE	0,4855	0,4838	0,12006	0,1206
DW			0,66	0,27

Ns no significativo *** significativo a 0,01
 * significativo a 0,10 SEE : Error estándar de la estimación
 ** significativo a 0,05 DW : Estadístico de Durbin-Watson

seleccionados y los incrementos observados para el conjunto de datos de validación se presentan en el Cuadro 8. Se incluye también la correlación entre d e incrementos diamétricos.

Para el periodo 93-95 se obtuvieron las menores correlaciones ($r < 0,50$). La correlación con d fue no significativa. Esto puede deberse al pequeño tamaño de muestra.

Para el periodo 92-95, el mejor modelo resultó ser el 2 (Inverso del índice 4) con correlaciones de 0,80 (Pearson) y 0,82 (Spearman). El modelo de mayor número de variables (tres) presentó las menores correlaciones, a pesar de que presentar mayor R^2 que sus contrapartes más simples. Esto parece indicar que la bondad del ajuste se basa más en razones de deficiencia de los estadísticos usados en la evaluación que a una verdadera habilidad predictiva del modelo.

En general, el índice 4 ($FE = 2,5$ y $EX = 1,0$) presentó el mejor comportamiento, especialmente en los modelos de una sola variable. Igualmente la transformación inversa de este índice fue la mejor. En contraste, Vincent (1983) encontró el mejor comportamiento para la raíz cuadrada del índice con $FE = 1,5$ y $EX = 2,0$.

Los modelos no lineales y "linealizables" dieron resultados elevados (r entre 0,79 y 0,82) en todos los casos. Estos modelos, presentaron un comportamiento más plausible en el ajuste gráfico que aquel de los modelos lineales

El modelo 8 (Figura 4) parece el más apropiado para representar la competencia. Este modelo se caracteriza por ser bastante sencillo (una sola variable), presentar un elevado R^2 y estar entre los que mejor correlación presentaron entre datos reales y pronosticados en la prueba de validación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados indican que el crecimiento diamétrico de la teca puede ser pronosticado con cierta precisión a través del uso de modelos derivados del índice de competencia de Bella.

El efecto de la competencia sobre el incremento diamétrico en la teca es difícil de detectar en períodos de tiempo relativamente cortos (1 a 2 años), mientras que es más notorio para períodos de tres años, al menos para las plantaciones de teca con la edad de las aquí estudiadas en el presente trabajo.

Parece existir una relación no lineal de tipo potencial ($y = aX^b + e$) entre los incrementos y el índice de competencia. El modelo recíproco ($y = a + b(1/X) + e$) es prometedor utilizando ajustes lineales.

El modelo de Bella resultó muy sensible al parámetro EX , el cual está relacionado con la tolerancia de la especie. Los mejores resultados se obtuvieron con el valor 1,0. Si estos resultados y los de Vincent (1983), con un valor de 2,0 son igualmente válidos; esto podría indicar un cambio en la tolerancia de la especie con la edad.

El parámetro FE que se considera asociado a las influencias ambientales, fue poco sensible. Esto podría confirmar que el conjunto de parcelas seleccionadas fue lo suficientemente homogéneo. Sin embargo, al ajustar los índices, se encontró que las mejores combinaciones en los modelos más simples involucraron a $FE = 2,5$, lo que implicaría que la zona de influencia es considerablemente mayor que el área de la Proyección de la copa del árbol.

El diámetro de copa estimado a través de las proyecciones libres de la copa de árboles creciendo

CUADRO 8. Correlación entre el crecimiento diamétrico pronosticado y el incremento diamétrico observado para los periodos 1993-95, 1992-95 y 1989-95 correspondientes a los modelos de regresión seleccionados.

Periodo	1993-95		1992-95			1989-95			1992-95			
	N	35	51	3	d	46	5	d	51	7	8	9
Modelo	1	d (*)	2	3	d	4	5	d	6	7	8	9
Método												
Pearson	0,43	0,25	0,80	0,49	0,74	0,78	0,58	0,68	0,79	0,79	0,79	0,81
Spearman	0,50	0,27	0,82	0,55	0,75	0,78	0,80	0,72	0,82	0,82	0,82	0,82

Nota: todos los resultados significativos para un nivel de significación = 0.01 excepto (*)
 d : Diámetro a la altura de pecho

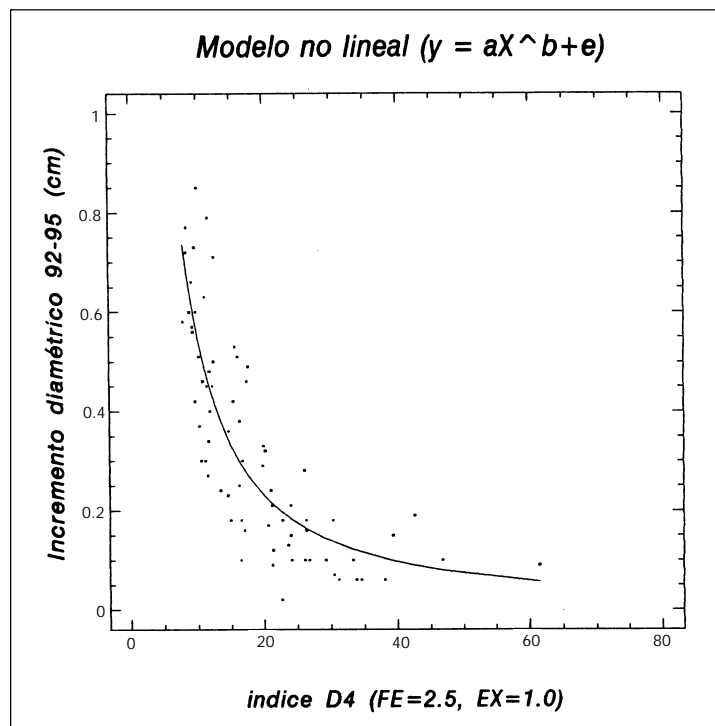


Figura 4. Curva ajustada por el mejor modelo no lineal (Modelo 8) que representa la relación entre el incremento diamétrico medio anual para el periodo 1992-1995 y el índice de competencia

en cercas, parece ser una buena estimación para determinar el área de la zona de influencia bajo condiciones de crecimiento libre. Los modelos no lineales como el de Ek (1974) parecen ser mas apropiados para el ajuste de los datos.

Se recomienda reforzar las pruebas de validación de los modelos obtenidos. En este sentido, la disponibilidad de archivos de datos conteniendo las coordenadas de todos los árboles de una parcela, así como la existencia de programas para calcular rápidamente los índices, conduce a la posibilidad de probar numerosas variantes de este índice y de otros índices de competencia.

NOTAS

- ¹ Fórmula derivada de muestra de árboles tumbados (Moret, 1997)
- ² Sistema de Información para Plantaciones (versión 2.0, 1995) desarrollado por el Ing. de Sistemas Francisco Zerpa y asesorados por los profesores L. Vincent y Mauricio Jerez.
- ³ Este estadístico corrige el problema que se presenta al utilizar el R², que consiste en que éste siempre aumenta a medida que aumenta el número de variables explicatorias, contribuyendo a dar mayor importancia a modelos con elevados números de variables.

REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS

- ALEMDAG, I.S. 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. For. Manage. Inst. Rep. FMR-x-108. 39 p.
- BELLA, I.E. 1971. A new competition model for individual trees. Forest Science, 17:364-372.
- BIGING, G. y M. DOBBERTIN. 1992. A Comparison of Distance-dependent Competition Measures for Height and Basal Area Growth of Individual Conifer Trees. Forest Science, 38(3): 695-720.
- BRAND, D.G. y A. MAGNUSSEN. 1988. Asymmetric, two-sided competition in even-aged monocultures of red pine. Canadian Journal of Forest Research, 18: 901-910.
- BROWN, G.S. 1965. Point density in stems per acre. N.Z. For. Res. Notes, No 38. 11 p.
- BURTON, P. 1993. Some limitations inherent to static indices of plant competition. Canadian Journal of Forest Research, 23:2141-2152.
- CURTIS, R.O. 1970. A simple index of stand density for Douglas-fir. Forest Science. 28(1):92-94.
- DANIELS, R. F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. Forest Science, 22: 454-456.

- DANIELS, R. y H. BURKHART. 1988. An Integrated System of Forest Stand Models. *Forest Ecology and Management*, 23: 159-177.
- DANIELS, R.F.; H.E. BURKHART y T.R. CLASON. 1986. A comparison of competition measures predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 1230-1237.
- DOYLE, T.H. 1983. Competition and growth relationships in a mixed-aged, mixed-species forest community. Ph.D. Thesis, Univ. of Tennessee, Knoxville 86.p
- DRAPER N. R. y H. SMITH. 1981 *Applied regression analysis*. 2nd edition. Wiley, New York.
- EK, A. R. 1974. Dimensional relationships of forest and open grown trees in Wisconsin. Univ. Wisconsin Madison, Sch. of Natural Resour., For. Res. Notes.
- EK, A. R. y R. A. MONSERUD. 1974. FOREST: A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands. Research Report. Univ. Wisconsin Madison, Sch. of Natural Resour., For. Res. Notes. 13 p.
- EWEL, J. y A. MADRIZ. 1968. Zonas de vida de Venezuela: Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Ministerio de Agricultura y Cría, Dirección de Investigación. Caracas. Venezuela.
- FERNÁNDEZ, V. 1982. Estudio sobre la elaboración de un índice de competencia para árboles individuales en plantaciones de *Pinus caribaea var. hondurensis*, en las sabanas orientales de Venezuela. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 17p.
- GELMAN, J. 1994. Beneficios sociales y económicos de las plantaciones forestales. Ponencia en el Foro "Plantaciones forestales: una alternativa de desarrollo económico". Venezuela, 9 p.
- GERRARD, D. J. 1969. Competition quotient: a new measure of the competition affecting individual forest trees. Mich. Agric. Exp. Stn. Res. Bull. No 20.
- GLOOVER, G. L. y J. N. HOOL. 1979. A basal area predictor of loblolly pine plantation mortality. *Forest Science* 25: 275-282.
- HATCH, C.R.; D.J. GERRARD, y J.C. TAPPEINER. 1975. Exposed crown surface area: A mathematical index of individual tree growth potential. *Canadian Journal of Forest Research*, 5: 224-228.
- HEGYI, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. p. 74-90. In: *Growth models for tree and stands simulation*, Fries, J. (ed), Royal Coll. of For., Stockholm, Sweden.
- HOLMES, M.J. y D. REED. 1991. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *Forest Science*, 37(5): 1338-1349.
- JEREZ, M. 1992. Un modelo de simulación del crecimiento para plantaciones en líneas "Método Caparo". Tesis M.Sc., Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Instituto de Estadística Aplicada y Computación. Mérida, Venezuela 110 p.
- LIN, J.Y. 1969. Growing space index and stand simulation of young western hemlock in Oregon. Ph.D. Thesis, Duke University, Durham, NC. 182 p.
- LORIMER, C.G. 1983. Tests of age-independent competition indices for individual trees In *Natural hardwood stands*. *Forest Ecology and Management*, 6: 343-360.
- MARTIN, G.L.; A. R. EK y R.A. MONSERUD. 1977. Control of plot age bias in forest Stand growth simulation models. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1): 100-105.
- MARTIN, G.L. y A.R. EK. 1984. A Comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *Forest Science*, 30(3): 731-743.
- MOORE, J.A. y C.A. BUDELSKY. 1973. A new Index representing individual tree Competitive status. *Canadian Journal of Forest Research*, 3: 495-500.
- MUGASHA, A.G. 1989. Evaluation of simple competition indices for the prediction of Volume increment of young jack pine and trembling aspen trees. *Forest Ecology and Management*, 26: 227-235.
- MUNRO, D. 1974. Forest growth models-a prognosis. p.7-21 In: *Growth models for tree and stand simulation*. Fries. J. (ed) Royal Coll. of For., Stockholm, Sweden.
- NEWNHAM, R.M. 1966. Stand structure and diameter growth of individual trees in a young red pine stand. Can. Dep. For. Rural Dev. Int. Rep, fmr-1, p.19.
- OPIE, J.E. 1968. Predictability of individual tree growth using various definitions of competition basal area. *Forest Science*, 14(3): 314-323.
- PELZ, D. R. 1978. Estimating individual tree growth with tree polygons. In: *Growth models for long term forecasting of timber yields*. J. Fries *et al.* Ed. VPI & SU, School of Forestry and Wildlife Resources. p 172-178
- SILVA, G. y BASTARDO, W. 1995. Parcelas permanentes de rendimiento en plantaciones forestales a campo

- abierto en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo. Informe de Pasantía Escuela de Capacitación Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- SPURR, S. H. 1962. A measure of point density. *Forest Science* 8:85-96.
- STAEBLER, G. R. 1951. Growth and spacing in even-aged stands of douglas-fir. M. F. Thesis, Univ. Michigan. Ann Arbor, Michigan.
- TOMÉ, M. y H. BURKHART. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science*, 35(3): 816-831.
- TORRES, A. 1982. Influencia del sitio y la espesura en el crecimiento de Plantaciones experimentales de teca (*Tectona grandis*) en Caparo, Venezuela. Trabajo de ascenso. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela. 65p.
- VINCENT, L.W. 1980a. Manejo de plantaciones con fines de producción. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela 151 + p. (Oficina de Pub. FCF N. S.4.18).
- _____. 1980b. El enfoque de simulación en la formulación y pruebas de alternativas de regímenes de aclareo en el manejo de plantaciones con fines de producción. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela (mimeog.).
- _____. 1983. Modelos de índice de competencia en plantaciones jóvenes de teca en la Reserva Forestal de Caparo, Edo. Barinas, Venezuela, Trabajo de Asenso Asociado. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- ULA-CORPOANDES, 1973. Programa de Investigación con fines de Manejo en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo.- Informe sobre las actividades del tercer año de labores (6-3-72 al 5-3-73). República de Venezuela.(Universidad de Los Andes-Corporación de los Andes). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida. 262 p.