

# CURVAS POLIMÓRFICAS DE ÍNDICE DE SITIO PARA *CUPRESSUS LUSITANICA* EN LA REGIÓN CENTRAL DE COSTA RICA

## *Polimorphic site index curves for Cupressus lusitánica in the Central Region of Costa Rica*

FERNANDO MORA CH.<sup>1</sup>, VÍCTOR MEZA P.<sup>1</sup>, ORLANDO  
CHINCHILLA M.<sup>1</sup>, ELADIO CHAVES S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Universidad Nacional (UNA),  
Heredia, Costa Rica.

Correo electrónico:fernando.mora.chacon@una.cr; moraf2005@yahoo.com;  
victor.meza.picado@una.cr; orlando.chinchilla.mora@una.cr

<sup>2</sup>Investigador jubilado, echaves1@ice.co.cr; el.chaves@hotmail.com

Recibido Junio 2014, Aceptado Diciembre 2014

## Resumen

Se propone un nuevo conjunto de curvas de índice de sitio para clasificar los terrenos ocupados con plantaciones coetáneas de Ciprés (*Cupressus lusitánica* Mill.) en la Región Central de Costa Rica. Se utilizó una muestra compuesta por 21 árboles, talados y seccionados en un estudio anterior y los promedios de altura dominante de 44 parcelas permanentes de muestreo, pertenecientes a cuatro ensayos de aclareo y rendimiento. A través del análisis fustal se generó información equivalente a un total de 373 árboles, con edades comprendidas entre 3 y 31 años de edad, cuyos diámetros con corteza (a 1,30 m) oscilan entre 7,88 cm y 47,80 cm y cuyas alturas totales van desde 4,59 m hasta 34,20 m. Las parcelas permanentes han sido medidas y conservadas durante 26 años, esto es desde los 8 hasta los 34 años de edad. Tanto los árboles como las parcelas provienen de la misma región comprendida en el estudio. La muestra total equivale a 1.104 pares de datos de altura dominante-edad, con la cual se ajustaron todos los modelos. Para escoger la ecuación más adecuada se probó un total de ocho ecuaciones lineales y no lineales (pero linealizables) y 12 modelos no lineales. La ecuación seleccionada fue la de Prodan (1.951), ya que presentó un buen ajuste estadístico y mostró un buen comportamiento cuando se graficó contra los valores observados; la ecuación tiene los siguientes estadísticos:  $r = 0,95$ ;  $R^2_{adj} = 91,03$ ;  $MSE = 7,432$  y  $SEE = 2,726$ .

*Palabras claves:* Clasificación de sitios, altura dominante, crecimiento en altura, modelos de crecimiento, funciones de crecimiento, ecuación de Prodan.

## Abstract

A new set of site index curves is proposed to classify the land occupied with even-aged plantations of Mexican Cypress (*Cupressus lusitánica* Mill.) in the Central Region of Costa Rica.

Mora C., Fernando *et al.*

Sample used were 21 trees, cut down and sectioned in a previous study, and the averages of 44 permanent sampling plots belonging to four thinning and yield trials. Through the stem analysis it was generated information equivalent to a total of 373 trees, ranging 3 to 31 years of age, where diameters over bark (a.b.h.) ranged from 7,88 cm to 47,80 cm and total heights ranged from 4,59 m to 34,20 m. Permanent plots have been measured and maintained during 26 years, that is since the age of 8 until the age of 34. Both trees and plots came from the same region comprised in the study. The total sample is equivalent to 1104 pairs of dominant height-age data, used for adjust of models. In order to choose the best model, a total of eight equations linear and non-linear (but linealizable) and 12 non-linear models have been tested. The equation selected was that of Prodan (1951), since it presented a good statistical fit and showed a good graphical behavior when graphed against the observed values. This equation presented the following statistics:  $r = 0,95$ ;  $R^2_{adj} = 91,03$ ;  $MSE = 7,432$  and  $SEE = 2,726$ .

*Key words:* Site classification, dominant height, height growth, growth models, growth functions, Prodan equation.

## 1. Introducción

Un sistema de clasificación de sitios, desarrollado para una especie en particular, constituye la base fundamental para planificar el manejo forestal ya que se convierte en una plataforma que permite generar información sobre los crecimientos y los rendimientos y estos, a su vez, se constituyen en criterios esenciales para realizar los análisis económicos y financieros que permiten determinar la rentabilidad de las plantaciones y visualizar los diferentes escenarios de manejo, con el objetivo de orientar el desarrollo de la masa forestal hacia su cosecha final.

En relación con la clasificación de sitios vale la pena aclarar que un sistema de clasificación basado en “índices de sitio” permite realizar clasificaciones más puntuales y por lo tanto más precisas que el procedimiento basado en “clases de calidad de sitio”, el cual procede mediante generalizaciones que ocurren cuando se agrupa un sinnúmero de sitios dentro de una misma clase. Dependiendo de los objetivos del trabajo se podrá optar por utilizar una u otra modalidad. Cuando se trabaja bajo el sistema de índices de sitio es de vital importancia conocer la “edad base” que se usó para construir el sistema de clasificación, pues de tal valor depende la exactitud de todo el sistema. La edad base también es conocida como: edad clave, edad de referencia, edad indicadora, o, edad índice (cualquiera de estos sinónimos sería perfectamente correcto de utilizar).

Es recomendable utilizar el sistema basado en índices de sitio (IS) cuando se realizan evaluaciones puntuales (p. ej., cuando se trabaja con tablas de crecimiento y rendimiento en el manejo de los rodales de una especie dada); especialmente si son masas cercanas al turno de rotación, o bien, cuando son masas cuya madera es muy valiosa. El sistema de clases de calidad de sitio (CS) está más recomendado cuando se

desea establecer relaciones generales utilizando promedios (p. ej., cuando se desea determinar los factores críticos que afectan el desarrollo de una especie bajo diferentes calidades de sitio).

Es bueno recalcar que el Ciprés (*Cupressus lusitánica* Miller) es una especie que ha sido extensamente estudiada, ya que se ha diseminado por varios continentes y varios países y en la actualidad existe una gran cantidad de información acerca de su ecología, silvicultura y manejo. Concretamente, el crecimiento y la calidad de sitio han sido bastante estudiados en América Latina, África del Este y Oceanía.

### 1.1. Estudios de calidad de sitio en América Latina

En Costa Rica, Goitia (1.954) estudió el incremento volumétrico en función del diámetro y del sitio. Trabajando en un rango altitudinal de 790 a 2.060 m.s.n.m., desarrollando una clasificación de sitios basada en la relación altura total (en pies) y diámetro a. p. (en pulgadas). Para clasificar el crecimiento de la altura dominante Goitia utilizó un diámetro base de 19 pulgadas (48,26 cm), medido a 4,5 pies de altura (1,37 m). Más tarde, Groenendijk (1.983) construyó curvas de índice de sitio (IS) y tablas de crecimiento y rendimiento preliminares para *C. lusitánica* utilizando la altura media, y para clasificar su crecimiento utilizó una edad base de 57 años; por su parte Alfaro (1.983), haciendo uso de esta clasificación de sitios, estudió la relación del IS con algunas variables fisiográficas, químicas y físicas del suelo para la especie. Tanto Groenendijk (1.983) como Alfaro (1.983), trabajaron en la Región Central de Costa Rica. Posteriormente, Chinchilla (1989) trabajó en un rango de elevación de 1.000 a 1.900 m.s.n.m., en la zona de distribución del Ciprés utilizando una edad base de 20 años para construir nuevas curvas para esta especie. Por otro lado, Hughell y Chaves (1.990), utilizando datos de parcelas permanentes de Costa Rica, Guatemala y El Salvador, desarrollaron un modelo preliminar de crecimiento y rendimiento para *C. lusitánica* en América Central. Los autores utilizaron la ecuación ajustada por Chinchilla (1.989) para asignar los valores de IS a las parcelas que formaban la muestra.

En Guatemala, López (1.992) estudió el crecimiento y el rendimiento del ciprés común (*C. lusitánica*) en tres localidades del departamento de Guatemala, y Castillo (1.993) desarrolló tablas de producción preliminares para la misma especie en los departamentos de Sacatepéquez y Guatemala (ambos citados por Tzirin 1.998); este autor estableció índices de sitio (IS) preliminares para Ciprés y tres especies de pinos que crecen en la región de Copán, Alta Verapaz, trabajando en un rango altitudinal de 600 a 1.500 m. s. n. m. Los IS fueron determinados con una edad base de 17 años y agrupados en cuatro clases de calidad de sitio. Estos valores fueron utilizados para llevar a cabo un análisis de correlación con factores fisiográficos y con variables físicas y químicas del suelo; con las variables seleccionadas ajustó un modelo de regresión con el fin de estimar la calidad de sitio en lugares que no cuentan con plantaciones de

Mora C., Fernando *et al.*

*C. lusitanica*. Por otra parte, Argueta (2.011) estudió el crecimiento y la productividad de la especie en 30 sitios diferentes de Guatemala; utilizando el incremento medio anual, tanto en altura total como en volumen estableció relaciones con variables edáficas y fisiográficas; sin embargo, no llevó a cabo ningún análisis para relacionar el crecimiento y la productividad con los índices de sitio.

Tschinkel (1.972a), confeccionó un grupo de curvas de IS, para *C. lusitanica* en la región de Antioquia, Colombia, para ello utilizó una edad base de 15 años. Alternativamente este autor desarrolló un método sencillo para pronosticar el IS antes de plantar, con base en la pendiente y en una clasificación visual de la topografía (Tschinkel, 1.972b). Este autor determinó que esta especie es excepcionalmente sensible al sitio y que su crecimiento es lento sobre formas topográficas convexas. Más tarde, del Valle (1.975) estudió el crecimiento y el rendimiento de *C. lusitanica* en la región antes dicha, y para asignar un valor de IS a las parcelas de muestreo, utilizó la ecuación ajustada por Tschinkel (1.972a), con una edad base de 15 años.

Correa (1.987) realizó un trabajo sobre el crecimiento y el rendimiento de *C. lusitanica* en cuatro municipios del departamento de Antioquia, Colombia; haciendo uso de una edad base de 15 años consiguió elaborar curvas de IS para la especie. Más tarde, Gutiérrez (1989) llevó a cabo una clasificación de sitios para Ciprés en tres municipios de la región antes dicha, trabajando en un rango altitudinal de 1.600 a 2.500 m.s.n.m. y utilizando una edad base de 20 años.

## 1.2. Estudios de calidad de sitio en el Este de África

Alder (1.975, citado por Nyamai 1.996) desarrolló curvas de índice de sitio para plantaciones de coníferas en las tierras altas del Este de África trabajando con tres especies exóticas de gran valor para la industria: *P. patula*, *P. radiata* y *C. lusitanica*. Por su parte, Pukkala y Pohjonen (1.993) estudiaron el rendimiento de esta última especie en Etiopía. Estos autores compararon su trabajo con otros dos realizados en Tanzania por Klitgaard y Mikkelsen (1.976) y Pikkarainen (1.986) y concluyeron que el menor crecimiento de esta especie en Etiopía se puede deber a que se encuentra creciendo en altitudes mayores y con precipitaciones más bajas. Más tarde Teshome y Petty (2.000) utilizaron datos de *C. lusitanica*, proveniente de Munessa-Shashemene Forest, Etiopía, para ajustar ecuaciones de IS utilizando una edad base de 15 años. Posteriormente, Mamo y Sterba (2.006) ajustaron ecuaciones de IS para la especie en los distritos de crecimiento de Munessa y Gambo-Shashemene, en Etiopía. Al final de su trabajo recomendaron que cuando se desarrollen y utilicen funciones de IS, los distritos de crecimiento sean tomados en cuenta como una posible fuente de variación en la forma de las curvas.

African Forest Forum (2.011) cita a Waneme y Wachiuri (1.975) que construyeron

curvas de IS para *C. lusitanica* en Kenia. En Kenia, Mathu (1.977) construyó curvas de IS para la misma especie con una edad base de 20 años, mas tarde en 1.983 estudió el crecimiento, el rendimiento y el manejo silvicultural de las tres especies maderables más importantes que crecen en las partes altas de Kenia (*C. lusitanica*, *P. patula* y *P. radiata*). En el caso de la primera, el autor se propuso predecir el desarrollo de la altura dominante en función de la edad y del IS. Por su parte, Ngugi et al. (2.000) utilizaron una edad base de 15 años para ajustar una curva promedio de altura dominante para cada una de las seis regiones forestales de Kenia; los autores encontraron diferencias en el patrón de crecimiento en dos de las seis regiones analizadas.

### 1.3. Estudios de calidad de sitio en Oceanía

En Nueva Zelanda varios investigadores unieron esfuerzos para determinar la manera en que la silvicultura de plantaciones afecta la calidad de sitio y la productividad de los terrenos forestales en el largo plazo; entre ellos Richardson et al. (1.999), Schoenholtz et al. (2.000), Watt et al. (2.005), Watt et al. (2.008), Watt et al. (2.009) y Ross et al. (2.009). Concretamente, Watt et al. (2.009) ampliaron la perspectiva de la clasificación de sitios al presentar un sistema robusto para estimar la productividad forestal a escala nacional. Los autores lograron desarrollar un modelo de regresión múltiple para estimar el IS para *C. lusitanica* utilizando criterios muy diversos (p. ej. climáticos, edáficos, vegetacionales y otros), como variables independientes obtenidas de mapas auxiliares de alcance nacional y de superficies interpoladas; haciendo uso de este modelo de superficies de productividad, construyeron índices de sitio para *C. lusitanica* con una edad base de 30 años. Como resultado de su trabajo produjeron mapas que representan la variación espacial del IS para Ciprés en Nueva Zelanda.

La evidencia documentada demuestra que las clasificaciones de sitio se pueden utilizar como una herramienta práctica en la planificación forestal. Por ejemplo, en Costa Rica hay quienes proponen que los incentivos a la reforestación se paguen de acuerdo con los rendimientos que alcancen las plantaciones y esto, lógicamente, está ligado a la productividad de sitio. Sin embargo, existe una carencia de información pues no se cuenta con datos que abarquen la totalidad de las especies ni la totalidad de los terrenos y en plazos acordes con los turnos de rotación. Por lo tanto, será trabajo de los centros de investigación, asociados a entidades públicas, solucionar esta carencia de datos y facilitar la transferencia de información para que llegue al dominio público.

En relación con la clasificación de sitios, Curtis (1.964) cita cuatro requisitos que deberá cumplir un sistema idealizado, desarrollado para producir curvas de índice de sitio:

1. Que sea capaz de estimar con exactitud la forma de la curva promedio de crecimiento en altura, libre de las distorsiones producidas por la asociación entre la edad del rodal y la calidad de sitio.

Mora C., Fernando *et al.*

2. Que permita medir la variación en la forma de las curvas de crecimiento para los diferentes sitios, de manera que se pueda investigar posteriormente la relación entre el crecimiento y los factores del sitio.
  3. Que disponga de un método para evaluar la confiabilidad de las curvas derivadas; y,
  4. Que minimice el uso de los juicios subjetivos.
- Bailey y Clutter (1.974) añaden dos requisitos más:
5. El sistema ideal debe producir curvas que sean independientes de la edad base (la cual, generalmente, se escoge de manera arbitraria); y,
  6. No debe requerir una estimación “a priori” del índice de sitio.

El presente trabajo representa uno más entre los diferentes esfuerzos realizados con el objetivo de evaluar la calidad de los terrenos para *C. lusitanica* en Costa Rica desde que Goitia, en 1.954, iniciara este tipo de trabajos; sin embargo, de ninguna manera constituye un documento definitivo acerca del tema, pues en el futuro vendrán otros autores con colecciones de datos más extensas, con edades más avanzadas y con mediciones más actualizadas. El objetivo del presente trabajo es el de seleccionar un modelo adecuado, de acuerdo con los criterios citados, que represente acertadamente el crecimiento de la altura dominante para *Cupressus lusitanica* Miller y que permita construir curvas actualizadas de índice de sitio para esta importante especie en la Región Central de Costa Rica.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio se pretende actualizar las curvas de índice de sitio construidas por Chinchilla (1.989), las cuales fueron construidas utilizando una muestra conformada únicamente por árboles talados y seccionados, con el objetivo de analizar la secuencia de anillos de crecimiento y reconstruir el desarrollo de la altura total para *C. lusitanica*, en la zona de distribución en Costa Rica.

### 2.1. Descripción de la muestra

Para cumplir con este objetivo se utilizó la muestra original de 21 árboles cortados y seccionados por Chinchilla (1.989) para análisis fustal, combinados con los datos de 44 parcelas permanentes de muestreo pertenecientes a cuatro ensayos de aclareo y rendimiento establecidos por Chaves y colaboradores, entre 1.982 y 1.989.

La información que brindaron los análisis fustales equivale a la medición de 373 árboles, con edades comprendidas entre 3 y 31 años de edad, cuyos diámetros con corteza (a 1,30 m), oscilan entre 7,88 cm y 47,80 cm y cuyas alturas totales van desde 4,59 m hasta 34,20 m. Por su parte, las parcelas permanentes se comenzaron a medir cuando las plantaciones alcanzaron 8 y 10 años de edad y han sido monitoreadas y conservadas prácticamente durante tres décadas, produciendo un total de 731

promedios de altura dominante. Tanto los árboles como las parcelas provienen de la misma región donde se realizó el estudio. La muestra total equivale a 1.104 pares de datos de altura dominante-edad, con los cuales se ajustaron todos los modelos.

## 2.2. Descripción de los sitios

Los sitios donde se localizan los ensayos formales de manejo y el año de instalación de los ensayos en su orden son, Sitio 1: Tarbaca (1.982); Sitio 2: Paraíso (1.983); Sitio 3: Caragral (1.989) y Sitio 4: San José de la Montaña (1.989). Tanto los sitios de los ensayos, como los puntos de muestreo para análisis fustal se ubican en un rango altitudinal que va de 1.100 hasta 1.900 msnm. La precipitación oscila entre los 1.474 mm y los 2.550 mm. La temperatura varía desde 15 hasta 20 °C. Todas las localidades presentan un período seco bien marcado que va de 3 a 4,5 meses y un período lluvioso que oscila entre 7,5 y 9 meses, con un máximo de precipitación en los meses de septiembre y octubre (IMN, 1.981).

El relieve de estos terrenos es variable y se puede decir que comprende desde sitios planos hasta lugares quebrados. Los sitios planos poseen pendientes entre 5 % y 10 %; los sitios inclinados presentan pendientes que oscilan entre 20 % y 40 %; y, en los sitios quebrados los porcentajes de inclinación varían de 40 % a 60 %.

Los análisis de los suelos en los sitios donde se ubican las parcelas de crecimiento y rendimiento, evidencian que estas localidades presentan un pH ligeramente ácido (de 5,5 a 5,7), de acuerdo con Alfaro (1.983).

Cuadro 1. Resumen de las variables edáficas que caracterizan los sitios donde se ubican los ensayos formales de manejo para Ciprés (*Cupressus lusitánica* Mill.), en la Región Central de Costa Rica.

Localidad	Mg cmol (+) L <sup>-1</sup>	P mg L <sup>-1</sup>	K cmol (+) L <sup>-1</sup>	Ca cmol (+) L <sup>-1</sup>
Sitio 1	2,36	2,5	0,29	4,25
Sitio 2	0,90	2,0	0,10	3,25
Sitio 3	n.h.d.	n.h.d.	n.h.d.	n.h.d.
Sitio 4	3,20	2,8	0,31	6,25

NOTA: Valores tomados de Alfaro (1.983). No hay datos = n.h.d.

Como se puede ver el contenido de Mg se encuentra por debajo del nivel crítico en tres de las cuatro localidades (no se dispone de datos para el Sitio 3). También se observa que el nivel de P, K y Ca fue bajo en los tres sitios mencionados. Además, todos los sitios presentan una textura Arcillosa a Franco arcillosa, excepto el Sitio 1, cuya textura resultó ser Arcillosa (de Franco arenosa a Franco arcillosa).

## 2.3 Modelos probados

Para escoger la ecuación más adecuada se probó un total de 20 modelos: ocho lineales y no lineales (pero linealizables) y 12 no lineales. Entre los primeros se encuentran algunos de los modelos más sencillos de operar desde el punto de vista estadístico, ya que su manipulación se realiza a través del procedimiento de mínimos cuadrados y, además, son las funciones más simples en términos de la cantidad de coeficientes que emplean. De entre los modelos lineales que se utilizaron para probar el ajuste de los datos algunas funciones ya han sido utilizadas en trabajos previos; entre ellos, el modelo Cuadrático y el Semi-logarítmico (Semilog), muy utilizados en aplicaciones biológicas; el modelo Logarítmico (Log-Log), utilizado por Friday (n. d.) para construir las curvas de IS para Teca (*Tectona grandis*) en Puerto Rico. A estos se agregan dos modelos poco conocidos para los forestales, el modelo “Doble Recíproco” (DR) y el modelo “Raíz Cuadrada de Y-Logaritmo de X” (RCY-LOGX). La lista continúa con la ecuación de Schumacher (1.939). Los otros dos modelos que complementan la lista pueden ser definidos como modelos no lineales, pero linealizables; estos son, Prodan (1.951, citado por Thompson et al. 1.984) y Bailey y Clutter (1.974), los cuales, a través de una serie de transformaciones, es posible ajustarlos utilizando cuadrados mínimos lineales. En Costa Rica, la ecuación de Prodan (1.951) fue usada por Fonseca (1.986) para ajustar las curvas de IS para Jaúl (*Alnus acuminata*) y el modelo de Bailey y Clutter (1.974) fue utilizado por Mora y Meza (2.003a) para construir las curvas de IS para plantaciones de T. grandis en la Vertiente del Pacífico.

En el segundo grupo se probaron 12 modelos no lineales con el fin de ajustar los datos de la muestra. De todos estos, los primeros cuatro son muy conocidos y de uso común. Estos son, Mistcherlich o Monomolecular, Weibull, Gompertz y Richards (conocido como modelo de Chapman-Richards; Richards 1.959 y Chapman 1.961). Todos estos modelos se pueden obtener a partir de una misma función, la ecuación de von Bertalanffy (1.938) que también fue probada con los datos de la muestra. A esta lista se agregaron siete modelos más, los cuales constituyen variaciones de algunos de los modelos de la lista anterior. A partir del modelo de Gompertz se obtiene el modelo Gompertz modificado; de la ecuación de Richards (1.959) se obtienen el Modelo Natural de Crecimiento cuando  $c = 1$  y la Función Logística Generalizada cuando  $c = -1$ ; de esta última se obtiene la Función Logística o Autocatalítica, cuando  $d = 1$ . También se probaron dos versiones de ambas funciones logísticas, reescritas y recompuestas por Sit y Poulin-Costello (1.994). Finalmente, se adjunta el modelo de Schumacher (1.939) en su forma no lineal.

Todos estos modelos han demostrado ser muy útiles para ajustar datos de crecimiento y rendimiento en el campo forestal. En este segundo grupo se encuentran los modelos más complejos de ajustar, en vista de la cantidad de coeficientes que emplean y, estadísticamente, requieren del uso de mínimos cuadrados no lineales. Sin embargo,



son simples de manipular, flexibles y fáciles de explicar biológicamente.

## 2.4 Construcción de las curvas de índice de sitio para Ciprés

Para los datos altura-edad que componen la muestra, obtenidos de las plantaciones de Ciprés que crecen en la Región Central de Costa Rica, el modelo más satisfactorio fue el de Prodan (1.951), ya que cumplió con las condiciones establecidas en los objetivos:

$$H = (E^2)/(a + b * E + c * E^2) \quad (1)$$

Donde, a, b y c son los coeficientes a ser ajustados; H es la altura dominante (m) y E representa la edad.

Para poder ajustar este modelo mediante mínimos cuadrados, es necesario remover la variable  $E^2$  del numerador de la fracción, de manera que al despejar esta variable pasa al lado contrario del igual.

$$E^2/H = a + b * E + c * E^2 \quad (2)$$

Con el fin de facilitar la manipulación de esta función, es necesario crear una nueva variable, a la cual llamaremos Z; de forma tal que  $Z = (E^2/H)$ . Entonces,

$$Z = a + b * E + c * E^2 \quad (3)$$

Donde, a, b y c son los coeficientes a ser ajustados; Z es la nueva variable dependiente; y E se lee como se estipuló en la función original. Al correr este modelo con los datos de la muestra se obtuvieron los siguientes coeficientes,  $a = 0,465523$ ;  $b = 0,538814$  y  $c = 0,0183663$ ; sustituyendo los valores calculados para estos coeficientes en la fórmula anterior se obtiene:

$$Z = 0,465523 + 0,538814 * E + 0,0183663 * E^2 \quad (4)$$

Con esta ecuación se puede generar un conjunto de curvas anamórficas (o de “pendiente común”) si despejamos a, o bien, polimórficas (o de “intercepto común”) despejando b. Esta decisión dependerá del patrón de crecimiento que muestren los datos de altura dominante. En nuestro caso, dadas las variaciones en la forma de las curvas de crecimiento en altura, se considera que el segundo método puede producir mejores resultados para *C. lusitánica* que el método de “pendiente común”.

Bajo esta premisa se procedió a construir un juego de curvas polimórficas para Ciprés en la Región Central de Costa Rica, pero para esto fue necesario poner a variar el coeficiente b (pendiente del modelo), de acuerdo con el índice de sitio; bajo este enfoque b es conocido como “coeficiente de sitio” y de ahora en adelante se

Mora C., Fernando *et al.*

denominará  $b_i$ .

Antes de proceder a construir las curvas fue necesario realizar un par de despejes previos. La definición de índice de sitio dice que cuando la edad ( $E_i$ ) asume el valor de la edad base ( $E_b$ ), la altura dominante ( $H_i$ ) es igual al índice de sitio ( $IS$ ); teniendo en cuenta este enunciado se procedió a sustituir estas dos variables en la Ecuación (2), quedando expresada de la siguiente forma,

$$Eb^2/IS = a + b_i * Eb + c * Eb^2 \quad (5)$$

Por otro lado,  $b_i$  depende del índice de sitio y puede ser despejado de la ecuación anterior de la siguiente manera,

$$b_i = (Eb/IS) - (a/Eb) - c * Eb \quad (6)$$

Sustituyendo  $b_i$  en la ecuación original se obtiene la siguiente función,

$$b_i = (Eb/IS) - (a/Eb) - (c * Eb)$$
$$H_i = E_i^2 / (a + ((Eb/IS) - (a/Eb) - (c * Eb)) * E_i + (c * E_i^2)) \quad (7)$$

Donde,  $a$  y  $c$  son los mismos coeficientes de la ecuación original;  $E_i$  es cualquier edad; y  $E_b$  es la edad clave (o edad base) para Ciprés en la Región Central de Costa Rica, que para fines del presente estudio es igual a 24 años.

Finalmente, al sustituir en la fórmula anterior los valores de los coeficientes calculados por la regresión, se obtuvo la siguiente ecuación, con la cual se construyó un sistema de curvas polimórficas de índice de sitio.

$$b_i = (24/IS) - (0,465523/24) - (0,0183663 * 24)$$
$$H_i = E_i^2 / (0,465523 + ((24/IS) - (0,465523/24) - (0,0183663 * 24)) * E_i + (0,0183663 * E_i^2)) \quad (8)$$

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Análisis del modelo seleccionado

Con la ecuación totalmente desarrollada se pudo generar un juego o conjunto de curvas de índice de sitio que cubren todo el intervalo de edades y de alturas dominantes representadas en la muestra. Los estadísticos que caracterizan a esta ecuación son:

Debido a que fue necesario utilizar transformaciones lineales para ajustar los coeficientes de la ecuación no lineal de Prodan (1.951), el coeficiente de correlación múltiple ( $r$ ) deberá ser considerado solo como una aproximación. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica el 91,05 % de la variabilidad en la variable dependiente ( $Z$ ). El estadístico  $R^2_{adj}$  (que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de coeficientes y diferente número de variables independientes) es igual a 91,03 %. El SEE muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,726, valor que se puede utilizar para construir límites en el caso de nuevas observaciones.

Cuadro 2. Resumen de los estadísticos que respaldan la ecuación ajustada mediante regresión múltiple, a partir del modelo de Prodan (1951), para *C. lusitánica* Mill. en la Región Central de Costa Rica

Modelo	$\frac{y}{x}$	$r$	$R^2$	$R^2_{adj}$	MSE	SEE	MAE
Prodan (1 951)	1.104	0,95	91,05	91,03	7,432	2,726	1,588

NOTA:  $r$  = coeficiente de correlación múltiple,  $R^2$  = coeficiente de determinación;  $R^2_{adj}$  = coeficiente de determinación ajustado; MSE = cuadrado medio del error; SEE = desviación estándar de las estimaciones;  $y$ , MAE = error absoluto promedio

El valor promedio de los residuos, conocido como MAE, es igual a 1,588. El estadístico de Durbin-Watson ( $DW=0,19015$ ) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa; en este caso, el valor de  $P$  es menor que 0,05 ( $P=0,0000$ ), por lo que existe indicación de una posible correlación serial a un nivel de confianza del 95 %. Sin embargo, es bueno recordar que cuando se trabaja con datos generados mediante análisis fustal la presencia de autocorrelación resulta inevitable debido a la forma en que los datos son producidos. Obviamente, la estimación de los parámetros se realizó con modelos de regresión lineal y no lineal de efectos fijos, los cuales asumen que hay igualdad de varianzas, normalidad e independencia de los errores. Sin embargo, cuando los datos provienen de eventos repetidos en el tiempo, o en el espacio, sobre las mismas unidades experimentales, como es el caso de las parcelas permanentes o del análisis fustal, la estructura de la matriz de varianzas y covarianzas de los residuos no corresponde con los supuestos de los modelos de regresión clásicos, ya que no es posible aleatorizar el factor temporal y/o espacial, lo cual conlleva a la violación del supuesto de independencia de los errores (Schabenberger y Pierce 2.002).

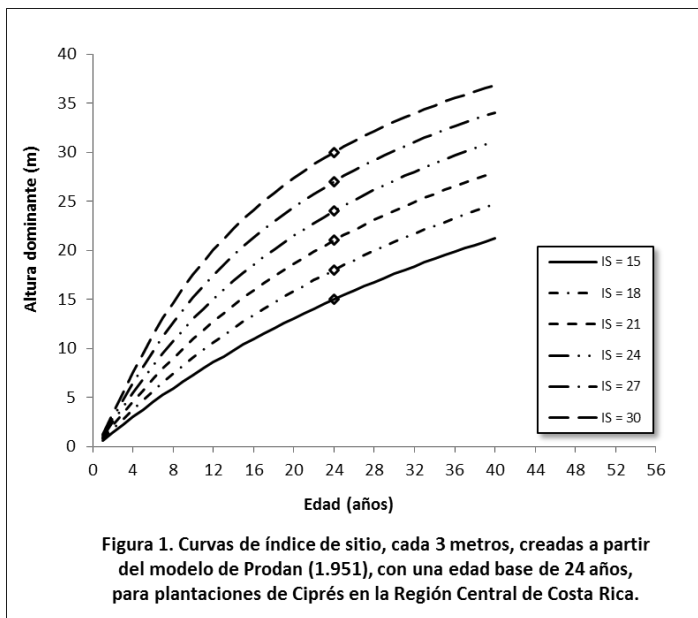
También se debe tener en cuenta que los modelos altura-edad se caracterizan por presentar problemas de heteroscedasticidad, los cuales ocurren porque las varianzas de los residuos aumentan conforme aumenta la edad.

En el ANOVA, el valor de  $P$  es menor que 0,05 ( $P=0,0000$ ), lo cual indica que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables a un nivel de confianza

del 95 %. Para el caso de las variables independientes, el valor más alto de P es igual a 0,0000, esto es, menor que 0,05, por lo cual resulta estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95 %. Por esta razón, se considera que no es necesario eliminar ninguna de las variables del modelo.

### 3.2 Curvas de índice de sitio

Con el fin de mantener cierto nivel de precisión y cubrir todo el intervalo de alturas y de edades presentes en la muestra, se generó una familia de curvas que identifican los índices de sitio cada tres metros (Figura 1). Los índices de sitio van desde 15 hasta 30 y el ámbito de edades va desde 1 hasta 34 años, con una ligera proyección hasta 40 años; no creemos que represente mayor riesgo proyectar para un período tan corto, tomando en cuenta la consistencia de las estimaciones y la robustez de la base de datos.



Las dos primeras curvas (IS = 15 y 18) aparecen como los sitios de peor calidad para el crecimiento de Ciprés, en los cuales no sería aconsejable invertir con fines comerciales, ya que se esperarían rendimientos muy bajos en volumen. Las dos curvas siguientes (IS = 21 y 24) representan los sitios de calidad media, donde se podría esperar que *C. lusitanica* alcance, con buenas prácticas silvícolas, rendimientos de moderados a buenos en madera comercial. Finalmente, las últimas dos curvas (IS = 27 y 30) personifican a los sitios de mejor calidad; en estos sitios se pueden esperar rendimientos más altos en el menor tiempo posible y son los lugares donde las prácticas silviculturales intensivas estarían más que justificadas. Para clarificar este

punto se analizan algunas cifras concretas.

Con el fin de contrastar el crecimiento en altura en el mejor sitio ( $IS = 30$ ), con el peor de ellos ( $IS = 15$ ), se pueden establecer comparaciones en términos de la altura dominante. Un rodal de *C. lusitanica* creciendo en un sitio bueno podría alcanzar una altura de 5,5 m en tan solo 3 años, mientras que otro que crezca en un sitio malo tardaría 7 años para lograrlo. En un sitio de la mejor calidad, a una masa le tomaría 15 años llegar a 23,0 m, mientras que en el peor de los sitios apenas alcanzaría 10,0 m en el mismo número de años. Finalmente, un rodal creciendo en el mejor sitio ( $IS = 30$ ) podría llegar a tener casi 36,0 m en 37 años, otro que se encuentre en el sitio malo ( $IS = 15$ ) apenas podría alcanzar 20,0 m en el mismo período de tiempo. Todos los demás sitios presentan valores intermedios, localizados entre ambos extremos.

Esto da una idea de la importancia de seleccionar muy bien los sitios que se van a plantar con una especie determinada, con el fin de evitar errores y fracasos que fueron comunes en el pasado. También es importante resaltar que se debe escoger la especie más adecuada para cada sitio, de manera que se puedan aprovechar apropiadamente las condiciones que ofrece cada localidad. En otras palabras, parte del éxito logrado en los programas de reforestación consiste en escoger el sitio más adecuado para cada especie, y/o, la especie más adecuada para cada sitio.

Con la finalidad de cotejar gráficamente el comportamiento de las curvas ajustadas en relación con los datos de la muestra y comprobar la eficacia de la ecuación ajustada, se

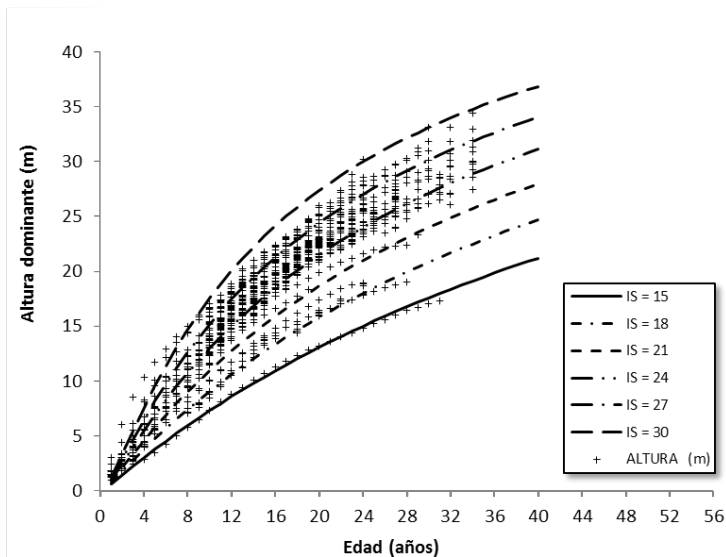


Figura 2. Curvas de índice de sitio, cada 3 metros, sobrepuestas a la muestra de alturas dominantes para plantaciones de Ciprés en la Región Central de Costa Rica.

presenta el juego de curvas de índice de sitio, generadas con el modelo de Prodan (1.951; citado por Thompson et al. 1.984), superpuesto al total de puntos que conforman la muestra (Figura 2).

Se puede ver claramente que las curvas de índice de sitio cubren casi en su totalidad el intervalo creado por las alturas dominantes cuando se grafican contra la edad. Solamente hay una pequeña porción de un árbol de análisis fustal, el cual representa un sitio bueno, que se sale del intervalo creado por las curvas en la parte superior de la nube de puntos, entre las edades de 1 y 8 años; y en la parte inferior hay otro árbol que se sale ligeramente, entre las edades de 5 y 10 años y entre 22 y 31 años, y que representa el sitio más malo incluido en la muestra. Por lo demás, el resto de los árboles y parcelas se mantienen dentro del rango esperado.

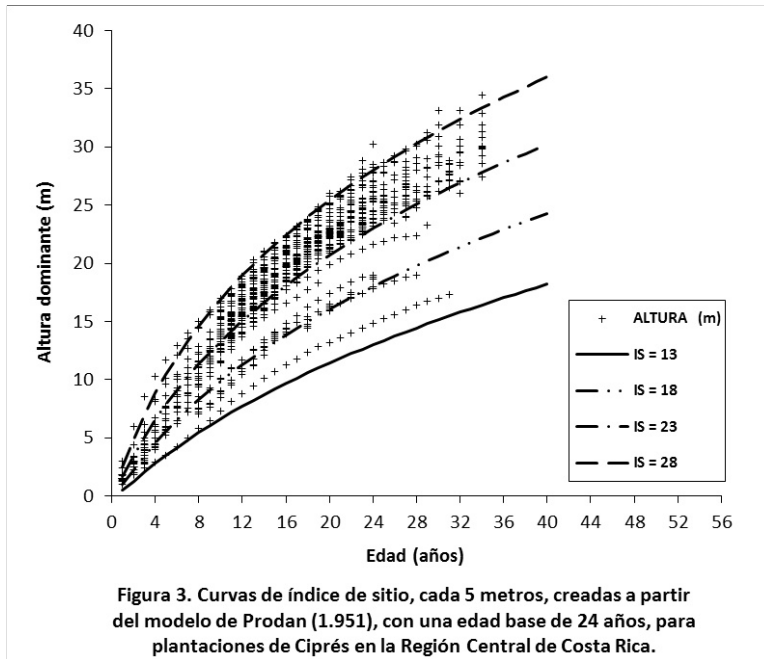
### 3.3 Clases de calidad de sitio

Por otra parte, sabemos que existen personas interesadas en trabajar con clases de calidad de sitio en lugar de utilizar el sistema puntual, mas preciso, de índices de sitio; de esta manera, el presente sistema de clasificación le permitirá, a cualquier persona interesada en trabajar bajo ese principio, asumir cinco clases de calidad de sitio, utilizando para ello los intervalos creados entre las curvas. Así, el primer intervalo entre las curvas  $IS = 15$  y  $18$  se llamaría Clase I, entre las curvas  $IS = 18$  y  $21$  sería la Clase II, entre las curvas  $IS = 21$  y  $24$  daría la clase III, entre  $IS = 24$  y  $27$  permitiría definir la clase IV y finalmente, las curvas  $IS = 27$  y  $30$  delimitarían la clase V. La evaluación de la calidad de sitio procedería de la misma manera que con los índices de sitio: las clases inferiores serían las de peor calidad y en consecuencia, las clases superiores serían las de mejor calidad; solo que bajo esta modalidad se trabajaría por agrupación de datos, lo cual le resta precisión al sistema.

### 3.4 Un sistema de clasificación más sencillo

Con el fin de facilitar el trabajo a aquellos forestales que anteponen la simplicidad sobre la precisión, se ha creado un conjunto de curvas más sencillo, para hacer más fácil la manipulación del sistema de clasificación de sitios (Figura 3). Bajo esta nueva propuesta se intenta cubrir todo el intervalo de alturas con solamente cuatro curvas. De esta manera se podrían asumir tres clases de calidad de sitio (en clases de cinco metros), con los índices de sitio comprendidos entre 13 y 28.

Es así como las dos primeras curvas ( $IS = 13$  y  $18$ ) delimitan la peor clase de calidad de sitio, la cual se podría llamar Mala; entre las curvas  $IS = 18$  y  $23$  queda comprendida la clase de calidad Media y, finalmente la mejor clase se encuentra delimitada entre el  $IS = 23$  y  $28$ , la cual se podría denominar como Buena. Obviamente este es un enfoque un tanto simplista y carente de precisión; sin embargo, existen algunos profesionales que prefieren trabajar de esta manera. La única curva que se repite, tanto en la Figura 2 como en la Figura 3, es la curva de índice de sitio 18; ciertamente, ambas curvas son equivalentes.

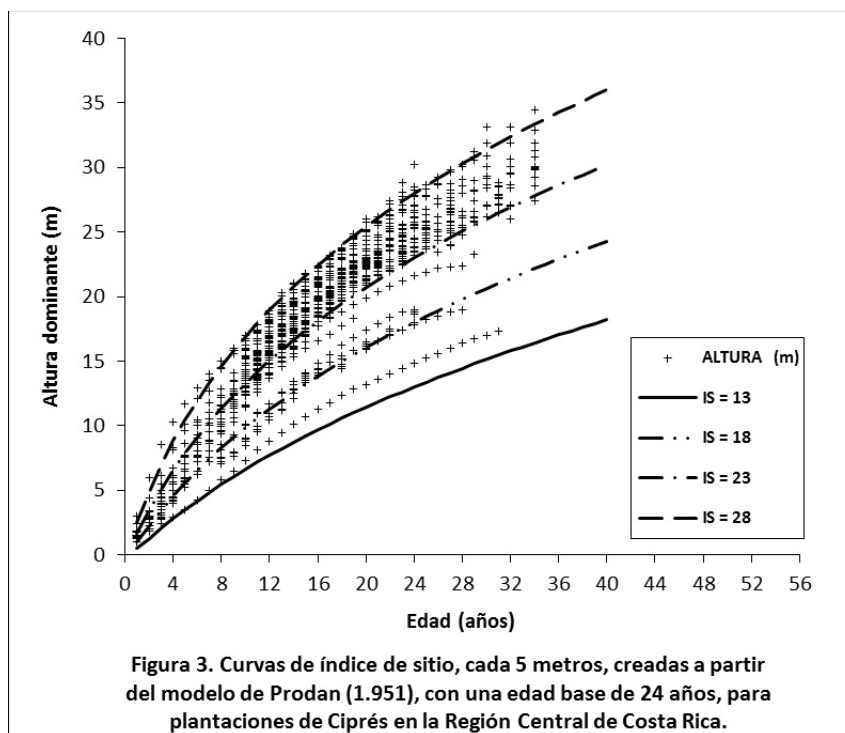


### 3.5 Discrepancia de las curvas con los puntos extremos y algunas medidas correctivas

Se puede observar en este caso (Figura 3), que las curvas de índice de sitio casi cubren en su totalidad el intervalo creado por la muestra de alturas dominantes cuando se grafican contra la edad. Se puede ver en el extremo inferior que la curva  $IS = 13$  presenta algunos puntos ubicados sobre la línea (entre las edades 4 y 6) y a partir de la edad 10 se aleja mucho de esta serie de datos. Sin embargo, en el otro extremo, la curva  $IS = 28$  no alcanza a sobrepasar todos los puntos ubicados en el límite superior; específicamente, entre las edades 2 y 7 años, entre 20 y 24 años, y finalmente, entre las edades 29 y 34 años.

Para solventar esta situación existen al menos tres medidas correctivas que se aplican utilizando la misma ecuación, sin tener que echar mano a otro modelo: 1) agregar una curva más ( $IS = 33$ ) la cual estaría pasando a bastante distancia de los puntos extremos, con lo cual el sistema de clasificación de sitios perdería sencillez; 2) cambiar los índices de sitio actuales y trabajar con índices de sitio más altos; y, 3) cambiar la edad base, recreando entonces todo el sistema de clasificación de sitios. Aunque parezca un tanto extrema esta medida, se puede ver el efecto que tendría si se define una nueva edad base y nuevos índices de sitio para Ciprés en la Región Central de Costa Rica.

La Figura 4 presenta el mismo esquema de clasificación de sitios, construido con la ecuación anterior, pero con una edad base de 20 años. Al igual que en la Figura 3, la intención es abarcar todo el intervalo de alturas con solamente cuatro curvas, separadas cada cinco metros. Aunque los índices de sitio son identificados con la misma numeración, esto es del 13 al 28, vale la pena aclarar que no se trata de los mismos índices de clasificación del esquema anterior (Figura 3). Esto se debe a que se eligió una edad de referencia más joven para clasificar el crecimiento de la altura dominante, haciendo que todo el sistema se desplace hacia una edad base más temprana. Esto provoca que las curvas que en el sistema anterior alcanzaban las alturas 13, 18, 23 y 28 metros a la edad de 24 años, ahora lo hagan cuatro años antes, causando que las curvas suban a un nivel más alto, dando la impresión de que varían un poco su pendiente; pero debe recordarse que se trata de la misma ecuación.



De esta manera se aprecia, que en este caso (Figura 4), la curva IS = 13 se acerca más a los datos que en la figura anterior (Figura 3), hasta el punto de que sigue el crecimiento mostrado por un árbol proveniente de análisis fustal durante gran parte de su recorrido (exceptuando las edades entre 4 y 13 años). Obviamente, este árbol representa el sitio más malo registrado por la muestra. En el otro extremo, la curva de IS = 28 alcanzó a sobrepasar los puntos más extremos y prácticamente pasa rozando algunos de ellos en el límite superior de la muestra de alturas. Con la evidencia a mano vemos que el objetivo se cumplió, logrando abarcar todo el intervalo de alturas



dominantes creado por los datos. Cabe destacar que Chinchilla (1.989) construyó las curvas de índice de sitio para *C. lusitánica* utilizando una edad base de 20 años; sin embargo, en su momento, este autor consideró que era necesario desarrollar curvas cada dos metros, desde un IS = 11 hasta un IS = 29, para un total de 10 curvas.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Al combinar la información proveniente de las parcelas permanentes con los datos derivados de los análisis fustales se pudo comprobar gráficamente que ambos conjuntos de datos se complementaron bastante bien pues no se registraron distorsiones, ni se produjeron discrepancias entre los datos que pudieran invalidar el intento de conjuntar ambos tipos de información.

Por el contrario, la combinación de parcelas permanentes con análisis fustales produjo un conjunto de datos más completo y armónico, donde los análisis fustales suplieron la información faltante, especialmente en las primeras edades (los ensayos se comenzaron a medir a los 8 y 10 años de edad), así como en otras secciones del gráfico.

El sistema de clasificación de sitios desarrollado en el presente trabajo es bastante preciso y presenta curvas de crecimiento en altura dominante cada 3 metros, las cuales son clasificadas a una edad base de 24 años; y los índices de sitio van desde 15 hasta 30 y el ámbito de las edades desde 1 hasta 34 años. De esta manera, el sistema abarca prácticamente todo el rango de alturas dominantes y todo el intervalo de edades registrado en la base de datos. Sin embargo, las curvas muestran una ligera proyección hasta los 40 años; no obstante, se cree que no representa mayor riesgo si se proyecta para un período tan corto, tomando en cuenta la consistencia de las estimaciones y la robustez de la base de datos.

En caso de que se desee modificar el presente sistema de clasificación de sitios (ya sea, variando la cantidad de curvas utilizadas, cambiando los índices de sitio establecidos, o bien, modificando la edad base), se deberá seguir el mismo procedimiento que se usó a la hora de construirlo, haciendo uso de las mismas ecuaciones desarrolladas.

### 4.2 Recomendaciones

Utilizando la misma base de datos se debería experimentar con técnicas alternativas de ajuste como son los modelos de regresión de efectos mixtos, o bien las ecuaciones diferenciales estocásticas, con el fin de minimizar los efectos de autocorrelación

Mora C., Fernando *et al.*

asociados a las técnicas utilizadas en el levantamiento de la información, y de heteroscedasticidad asociados con la relación altura-edad.

Se debería explorar la relación que existe entre el crecimiento y la producción de *C. lusitanica* con los índices de sitio obtenidos bajo el presente sistema de clasificación, utilizando para ello variables como los incrementos en altura y en volumen para esta misma especie. La información sobre los crecimientos y la producción se podría tomar de las tablas de crecimiento y rendimiento ya existentes (Groenendijk 1.983; Hughell y Chaves 1.990), o bien, de aquellas que están actualmente en construcción por parte de investigadores del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), de la Universidad Nacional.

También se podrían establecer correlaciones entre ciertos factores del ambiente (p.ej., edáficos, climáticos, fisiográficos) con los índices de sitio generados por el presente sistema de clasificación, con el fin de desarrollar un sistema de clasificación de sitios para *C. lusitanica*, a partir de ciertas variables del ambiente, aplicable a terrenos desprovistos de árboles de esta especie.

## 5. Referencias bibliográficas

- AFRICAN FOREST FORUM. 2011. Forest Plantations and Woodlots in Kenya. A. F. F. Working Paper Series, Volume 1 Issue 13. En línea: <http://www.sifi.se/wp-content/uploads/2012/02/Forest-plantations-and-woodlots-in-Kenya.pdf> [Consultado: 17/03/2015].
- ALFARO, M.A. 1.983. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill.) en el Valle Central, Costa Rica. Trabajo de grado. Licenciatura en Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 111 p.
- ARGUETA, P. 2011. Diagnóstico de la situación actual de los incentivos forestales, evaluación de las características de sitio que influyen en el crecimiento y productividad del ciprés común (*Cupressus lusitanica* Miller) en plantaciones forestales y servicios prestados en la región V.2 del Instituto Nacional de Bosques-INAB. Trabajo de grado. Ingeniero Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 100 p.
- BAILEY, R. L y J. L. CLUTTER. 1.974. Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science* 20(2):155-159.
- CHAPMAN, D. G. 1.961. Statistical problems in population dynamics. *Proceedings Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. University of California Press, Berkeley. 53 - 168 pp.
- CHINCHILLA, O. 1.989. Curvas de índice de sitio para Ciprés (*Cupressus lusitanica* M.) en la zona de distribución artificial en Costa Rica. Trabajo de grado. Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales, con énfasis en Producción Forestal. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 84 p.
- CORREA, M. 1.987. Rendimiento y crecimiento del Ciprés (*Cupressus lusitanica* M.), en Antioquia. Trabajo de grado. Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia,

- Seccional de Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 152 p.
- DEL VALLE, J. I. 1975. Crecimiento y rendimiento de *Cupressus lusitánica* Mill. en Antioquia, Colombia, utilizando parcelas permanentes. Trabajo de grado M.Sc. UCR/CATIE. Turrialba, Costa Rica. 111 p.
- FONSECA, W. 1986. Curvas de índice de sitio para *Alnus acuminata* H.B.K. en la zona de distribución natural en Costa Rica. Trabajo de grado. Licenciatura en Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 74 p.
- FRIDAY, K. S. (n. d.). Site Index Curves for Teak (*Tectona grandis* L.) in the Limestone Hill Region of Puerto Rico. TRI Working Paper No. 14. Tropical Resources Institute, Yale School of Forestry and Environmental Studies. 47 p.
- GOITIA, D. J. 1954. Estudio del incremento volumétrico del *Cupressus lusitánica* en relación a la edad y al sitio. Trabajo de grado. M. Sc. IICA. Turrialba, Costa Rica. 70 p.
- GROENENDIJK, H. 1983. Tablas de crecimiento de *Cupressus lusitánica* para el Valle Central de Costa Rica. Dirección General Forestal. San José, Costa Rica. 13 p.
- GUTIÉRREZ, G. 1989. Evaluación de la calidad de sitio en plantaciones forestales, con especial referencia a *Cupressus lusitánica* Mill. Trabajo de grado. Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Seccional de Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 129 p.
- HENAO, H. 1982. Estudio de rendimientos y rentabilidad en una plantación de Teca (*Tectona grandis* L.F.) del departamento de Córdoba, Colombia. Crónica Forestal y del medio ambiente 2(1-2):1-78. Medellín, Colombia.
- HUGHELL, D. y E. CHAVES. 1990. Modelo de crecimiento y rendimiento de Ciprés (*Cupressus lusitánica* Mill.) en Costa Rica, Guatemala y el Salvador. Silvoenergía (Costa Rica) No. 38.
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL. 1981. Anuario Meteorológico. Resumen de 10 años de registros. San José, Costa Rica. 215 p.
- KEOGH, R.M. 1980. Teca (*Tectona grandis* Linn.F.): cuadro provisional de la clasificación de sitios para el Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. In: IUFRO/MAB/Forest Service Symposium: Wood production in the Neotropics via plantations. 8-12 September, 1980. Río Piedras, Puerto Rico.
- MAMO, N. y H. STERBA. 2006. Site index functions for *Cupressus lusitánica* at Munesa-Shashemene, Ethiopia. Forest Ecology and Management 237(1-3):429-435.
- MATHU, W. J. K. 1977. *Cupressus lusitánica* Miller growth and yield studies in Kenya. Master of Science in Forestry Thesis. University of Dar-es-Salaam, Tanzania. University of Nairobi, Kenya. 115 p.
- MATHU, W.J.K. 1983. Growth, yield and silvicultural management of exotic timber species in Kenya. Doctor of Philosophy Thesis. The University of British Columbia, Department of Forestry. Vancouver, B.C. Canada. 276 p.
- MORA, F y V. MEZA. 2003a. Curvas de índice de sitio para Teca (*Tectona grandis* Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica. En: Plantaciones de Teca (*Tectona grandis*): Posibilidades y perspectivas para su desarrollo (disco compacto), 26 al 28 de Noviembre de 2003, Heredia, Costa Rica. 16 p.
- NGUGI, M. R., E. MASON y A. WHYTE. 2000. New growth models for *Cupressus lusitánica* and *Pinus patula* in Kenya. Journal of Tropical Forest Science 12(3):524-541.
- NYAMAI, D. O. 1996. Review of Kenyan Agricultural Research. Trees and Forestry. Center for Arid Zones Studies, University of Wales, Bangor. Vol. 28. En línea: <http://pages.bangor.ac.uk/~azs80f/projects/kard/KenyaAgriculturalResearchDatabase.html> [Consultado: 21/03/2015].

Mora C., Fernando *et al.*

- PUKKALA, T. y V. POHJONEN. 1993. Yield of *Cupressus lusitanica* in Ethiopia. Tiivistelmä: *Cupressus lusitanica* tuotos Etiopiassa. *Silva Fennica* 27(3):195-207.
- RICHARDS, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10:290-300.
- RICHARDSON, B., M. F. SKINNER y G. WEST. 1999. The role of forest productivity in defining the sustainability of plantation forests in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 122(1-2):125-137.
- ROSS, C. W., M. S. WATT, R. L. PARFITT, R. SIMCOCK, J. DANDO, G. COKER, P. W. CLINTON y M. R. DAVIS. 2009. Soil quality relationships with tree growth in exotic forests in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 258(10):2326–2334.
- SIT, V. y M. POULIN-COSTELLO. 1994. Catalog of curves for curve fitting. *Biometrics Information Handbook No. 4*. Forest Science Research Branch, Ministry of Forests, Province of British Columbia, Victoria, B.C.
- SCHOENHOLTZ, S. H., H. V. MIEGROET y J. A. BURGER. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138(1-3):335-356.
- SCHUMACHER, F. X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *Journal of Forestry* 37(11):819-820.
- TESHOME, T. y J. A. PETTY. 2000. Site index equation for *Cupressus lusitanica* stands in Munesa Forest, Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 126(3):339-347.
- THOMPSON, R., R. ALFARO y G. MANNING. 1984. Site index curves for Lodgepole pine from southeastern Yukon. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Information Report BC-X-247, Pacific Forest Research Center. 12 p.
- TSCHINKEL, H. 1972a. La clasificación de sitios y el crecimiento de *Cupressus lusitanica* en Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*. 27(1):3-30.
- TSCHINKEL, H. 1972b. Factores limitantes del crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitanica* en Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*. 27(2):2-55.
- TZIRIN, J. R. 1998. Índices de sitio preliminares para *Cupressus lusitanica* Miller, *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret & Golfari, *Pinus maximinoii* H.E. Moore y *Pinus strobus* L. var. *chiapensis* Martínez, establecidas en plantación en el Proyecto de reforestación Saquichaj, Cobán, Alta Verapaz. Trabajo de grado. Ingeniero Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 67 p.
- VON BERTALANFFY, L. 1938. A quantitative theory of organic growth. *Hum. Biol.* 10:181-213.
- WATT, M.S., G. COKER, P. W. CLINTON, M. R. DAVIS, R. PARFITT, R. SIMCOCK, L. GARRETT, T. PAYNE, B. RICHARDSON y A. DUNNINGHAM. 2005. Defining sustainability of plantation forests through identification of site quality indicators influencing productivity. A national view for New Zealand. *Forest Ecology and Management* 216:51-63.
- WATT M.S., M.R. DAVIS, P. W. CLINTON, G. COKER, C. ROSS, J. DANDO, R. L. PARFITT y R. SIMCOCK. 2008. Identification of key soil indicators influencing plantation productivity and sustainability across a national trial series in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 256(1-2):180-190.
- WATT. M. S., D. J. PALMER, H. DUNGEY y M. O. KIMBERLEY. 2009. Predicting the spatial distribution of *Cupressus lusitanica* productivity in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 258(3):217-223.