

Regímenes de Espaciamiento Inicial y Aclareo en Plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.f.) en Venezuela.

Mauricio Jerez¹, mjerezr@cantv.net.ve; Lawrence Vincent¹, Larryvin@telcel.net.ve; Yajaira Moret², aymoret@ula.ve; Ronalds González³, RonaldsG@hotmail.com.

Resumen

Presentamos los resultados de investigaciones en el área del manejo de plantaciones de Teca en Venezuela, usando como marco de trabajo un diagrama de manejo de densidad (DMD). Estos diagramas representan gráficamente las relaciones temporales entre la densidad del rodal y las dimensiones de los árboles, la altura mayor del rodal y el volumen medio del rodal. Con ellos es posible desarrollar y proyectar regímenes de espesura a lo largo del turno, determinar la factibilidad operacional y edad óptima para realizar los aclareos y contrastar los posibles efectos de un número de regímenes de espesura. La base para la construcción del diagrama fue una red de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento monitoreada por más de 25 años, así como parcelas temporales provenientes de inventarios rutinarios. Proponemos cuatro escenarios o regímenes para el manejo de las plantaciones de teca en Venezuela. Regímenes con espaciamientos relativamente estrechos y aclareos frecuentes parecen ser los más promisorios para el manejo de plantaciones de Teca, aunque espaciamientos más amplios parecen ser atractivos si se desea madera de mayores dimensiones en turnos más reducidos. La comparación del presente diagrama, con uno desarrollado para la India parece indicar que las relaciones básicas tamaño densidad en la Teca no varían considerablemente para diferentes regiones. Los DMDs se basan en principios biológicos robustos y deberían ser tomados en cuenta para el desarrollo de futuros modelos de simulación que combinen componentes empíricos y biológicos.

Abstract

We show the results of research in teak plantation management in Venezuela through the use of a density management diagram (DMD). These diagrams represent graphically the temporal relationships among stand density, tree dimensions, top height, and mean stand volume. They make possible to develop and project stocking management schedules along the rotation length, determine the feasibility and optimum age for thinnings, and testing the effects of alternative stocking management schedules. Data for the diagram came from a set of permanent yield and growth plots monitored for more than 25 years. Data from temporal inventory plots was used as well. We propose four stocking regimes for teak plantation management in Venezuela. The most promising regimes appear to be those with relatively narrow spacing and several thinnings before the final harvest. However, wide spacing regimes are appealing if large logs are desired in shorter rotations. Comparisons of our diagram with other diagram developed for India appear to indicate that the basic size-density relationships for teak do not vary considerably across regions. The DMDs are based on sound biological principles and should be taken into account when developing future simulation models combining biological and empirical components.

¹Centro de Forestales y Ambientales de Postgrado, ²Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal, ³Escuela de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Introducción

El problema: régimen de espesura

En Venezuela, así como en países centroamericanos y del Caribe se están estableciendo plantaciones de Teca bajo el régimen de incentivos fiscales y otras modalidades de inversión. La Teca (*Tectona grandis* Linn.) es una especie reconocida por su valor, existiendo plantaciones de edad avanzada y objeto de aprovechamiento y con participación en el mercado interno e internacional en diferentes países, entre ellos Panamá, Trinidad y Tobago, Costa Rica, Nicaragua y Venezuela.

Venezuela cuenta con aproximadamente 6000-10000 ha plantadas con la especie en la región conocida como Llanos Occidentales. Estas plantaciones fueron establecidas en los años 70 y 80, en su mayor parte por entes públicos y concesionarias privadas que operaban en las reservas forestales. No fue sino hasta los años 90 cuando esta especie fue incorporada al mercado mediante el aprovechamiento de productos de pequeñas dimensiones provenientes de aclareos. Actualmente, las nuevas plantaciones están siendo realizadas por pequeños propietarios, cuya actividad primaria es la agrícola o pecuaria, y que ven en esta especie un complemento a sus ingresos.

Un problema que se enfrenta, especialmente en las plantaciones nuevas, es en relación con la prescripción del régimen de espesura (RE), que consiste en la combinación de tres elementos: espaciamiento inicial, la sobrevivencia (SV) durante la fase de establecimiento y los aclareos. Los primeros dos elementos actúan en conjunto en la fase de establecimiento para determinar la masa forestal a partir de la cual se practica el conjunto de aclareos. La SV está relacionada con las técnicas de cultivo. Por ejemplo, un espaciamiento relativamente amplio (3 m x 3 m; densidad moderada; 1100 árboles/ ha) con una tasa relativamente alta de SV puede arrojar resultados similares a un espaciamiento más reducido (por ejemplo 2,5 m x 2,5 m) con una tasa menor de SV. El resultado es la densidad real de establecimiento que es el punto de partida para el régimen de aclareos. Otra posibilidad es utilizar un espaciamiento reducido (densidad inicial alta) con un aclareo no-comercial (“waste thinning”) con miras a calidad y buena distribución espacial. Se trata de una situación de optimización del RE que bien puede determinar el éxito o fracaso económico de la plantación. Ahí radica la importancia de este empeño.

El Enfoque

En la búsqueda de metodologías para el manejo óptimo de especie en Venezuela, se han realizado numerosas investigaciones con relación al crecimiento y rendimiento de las plantaciones bajo diferentes regímenes de espesura. A fin de presentar e integrar estos resultados y dar algunos lineamientos para el manejo de las plantaciones en diferentes condiciones, se propone un esquema que emplea el enfoque de “diagrama de manejo de densidad” (DMD) (Drew y Flewelling 1977, Long 1985, Kumar *et al.*1995) que se apoya en los resultados de más de 25 años de mediciones en parcelas permanentes de aclareo rendimiento (PPAR) y parcelas temporales establecidas en plantaciones de los Llanos Occidentales de Venezuela. El DMD se puede usar en combinación con un modelo de densidad que describe cambios en la densidad (mortalidad) durante la fase de establecimiento (FE). Esta fase consiste en el espaciamiento inicial y el conjunto de técnicas de establecimiento y mantenimiento (control de maleza) que, conjuntamente con las condiciones edáficas y climáticas, determinarán las características de la masa forestal (plantación) establecida (Vincent 1991). La fase de establecimiento

termina en el momento en que se “estabiliza” la mortalidad, una vez superada la etapa de prendimiento de las plantas y superada mayormente la competencia entre las plantas y la maleza. Otro criterio que marca el final de la FE es la formación del dosel y/o el inicio de la competencia entre los árboles plantados. En Teca la FE puede durar entre poco más de un año y alrededor de tres variando según el espaciamiento (densidad inicial).

El Modelo de Densidad

La manipulación de la espesura es el medio más eficiente de que dispone el silvicultor para lograr los objetivos del manejo de plantaciones forestales. El nivel de espesura (ocupación) del rodal afecta una serie de atributos del mismo tales como su diámetro medio, volumen, conicidad media, longitud media de copa, tamaño de ramas, vigor de los árboles y longitud de la rotación. A la vez, estos atributos afectan la cantidad y calidad de la madera producida y por ende su valor comercial. Asimismo, el vigor del rodal y su resistencia a plagas y enfermedades también dependen del nivel de espesura. La elección de un régimen de espesura, es por tanto, una decisión crítica de la cual depende la consecución de los objetivos del manejo (Farndern 1996).

El modelo de densidad pretende establecer un marco teórico para la optimización del establecimiento y manejo de plantaciones forestales con fines de producción. En primer lugar diferencia entre la fase de establecimiento y la fase de manejo. La primera corresponde a todo lo referido a la creación de una masa forestal desde la preparación del sitio hasta el momento en que puede considerarse establecida la plantación. Este corresponde aproximadamente al momento en que la competencia entre árboles plantados desplaza la competencia entre estos y la maleza. Otro criterio es la estabilización de la sobrevivencia. La fase de manejo corresponde al lapso desde que termina la fase de establecimiento hasta el final del turno e incluye todo lo referido al aclareo y poda.

La ventaja de esta separación radica en la naturaleza diferente de los problemas y aspectos técnicos y especialmente al hecho de contar con un criterio de densidad meta de establecimiento. Esta es la “densidad deseada” que constituye un elemento importante en la planificación y posterior evaluación de la implementación del plan de establecimiento de una plantación ya que permite orientar las técnicas de preparación de terreno, producción de plantas, plantación y mantenimiento hacia una meta concreta. Por otra parte permite determinar un punto de referencia concreto para los aclareos. El resultado operativo es la densidad real de establecimiento.

El régimen de espesura es la combinación del conjunto de técnicas que determinan la densidad a lograr al final de la fase de establecimiento y los aclareos. En una situación de no aplicar aclareos, el régimen de espesura se reduce a lo referido a la fase de establecimiento, es decir el espaciamiento inicial y las técnicas de establecimiento que determinan en buena parte la sobrevivencia (el otro elemento que escapa del control es el factor climático).

Diagramas de manejo de densidad

Uno de los métodos más efectivos de planificar el manejo de la espesura en plantaciones es a través del uso de los diagramas de manejo de densidad (Drew and Flewelling 1977, Long 1985). Estos diagramas representan gráficamente las relaciones temporales entre la densidad del rodal, la altura mayor, el

diámetro cuadrático (dq) y el volumen medio del rodal. Con ellos es posible desarrollar y proyectar regímenes de aclareo a lo largo del turno, determinar la factibilidad operacional y edad óptima para realizar los aclareos y contrastar los posibles efectos de un número de regímenes de espesura (Farnden 1996, Kumar *et al.* 1995).

Los diagramas de manejo de densidad (DMDs) fueron propuestos por (Drew and Flewelling 1979, Farnden 1996) basándose en teorías desarrolladas por investigadores japoneses (Ando 1962, Tadaki 1963). Estas teorías se basan a la vez en el “principio del autoaclareo” (*self-thinning principle*) propuesto por Yoda *et al.* (1963). De acuerdo a este principio, existe una relación entre el tamaño máximo y la densidad máxima que pueden ocurrir dentro de un rodal relativamente homogéneo de plantas, y que es determinada por la mortalidad ocurrida debido al efecto de la competencia (mortalidad denso-dependiente). Si se construye un gráfico representando el logaritmo de los valores de la biomasa o volumen de un rodal en función de los correspondientes valores del logaritmo de la densidad (Figura 1) provenientes de mediciones, se puede observar que existe un límite superior para las posibles combinaciones de tamaño y densidad y que puede representarse por una línea con pendiente aproximada de $-1,5$ (pero véanse críticas a este límite –Séller 1985, Sackville *et al.* 1995).

Para cualquier densidad, existe un tamaño máximo promedio que puede ser alcanzado. En los inicios del desarrollo del rodal, el tamaño del árbol medio del rodal se incrementa sin que ocurra mortalidad denso-dependiente. A medida que la trayectoria del rodal se aproxima a la línea límite de tamaño-densidad ($t-d$), cualquier incremento adicional en el tamaño del árbol medio del rodal irá acompañado por reducciones en densidad. Al continuar el crecimiento en tamaño, la mortalidad se acelerará y la trayectoria del rodal se desplazará paralelamente a la línea $t-d$. Adicionalmente a la línea $t-d$, en los DMDs se representan otras dos líneas por debajo de esta: La línea de inicio de la mortalidad denso-dependiente (Línea B) y la línea del límite inferior de máxima producción del rodal (Línea C) que indica las combinaciones de tamaño densidad a partir de las cuales la masa forestal ocupa totalmente el

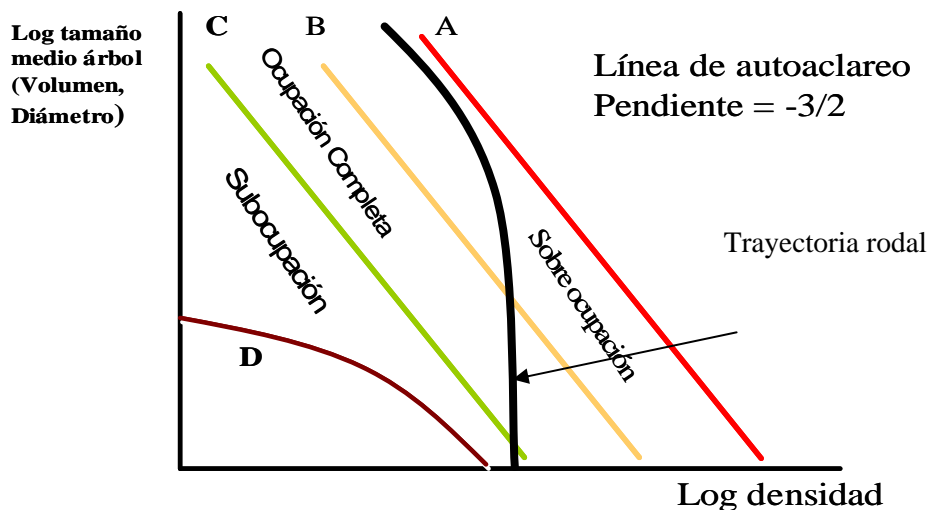


Figura 1. Diagrama de densidad. Líneas que definen el grado de ocupación de un rodal. Línea de máxima densidad o de autoaclareo (A); Línea de inicio de la mortalidad denso-dependiente (B); Línea de inicio de la ocupación completa del rodal (C) y Línea de cierre del dosel (D).

sitio y el rodal es altamente productivo (Saunders y Puettmann 2000). Las líneas anteriores pueden representarse en términos de densidad

relativa utilizando como base algún índice de densidad. La densidad relativa es la razón entre la densidad actual y la densidad máxima (definida por la línea t-d) para un tamaño medio del árbol. Adicionalmente se puede representar una línea que indica las combinaciones de tamaño densidad donde debería ocurrir el cierre del dosel (Línea D).

Para maximizar la producción, el silvicultor debería mantener el rodal entre las líneas de máxima producción y de inicio de la mortalidad durante la mayor parte del turno. Otra línea de interés es la línea de cierre del dosel. Generalmente la línea de densidad máxima del diagrama para una determinada especie es hallada a partir de parcelas de inventario o parcelas permanentes de aclareo y rendimiento establecidas en plantaciones dentro del área de interés (puede ser desde una región geográfica o un país hasta regiones más localizadas, por ejemplo, Llanos Occidentales de Venezuela. Las líneas restantes generalmente se consideran como un porcentaje de la densidad máxima y usualmente los valores son asumidos, aunque valores más precisos pueden ser hallados si suficientes datos están disponibles.

Materiales y métodos

Area de Estudio

Los Llanos Occidentales de Venezuela abarcan una superficie de aproximadamente 150000 km². El clima se caracteriza por una marcada estación seca (Diciembre a Marzo) con una temperatura media de 25 a 27 °C y precipitación media anual entre 1600 y 1800 mm, características de la zona de vida Bosque Seco Tropical. Los suelos son en su mayor parte planicies aluviales inundables con diferenciaciones fisiográficas de dique, napa y cubeta (Franco 1982). El desarrollo de la vegetación varía desde el estero herbáceo, sabana, hasta bosque estacional siempre verde (Zambrano *et al.* 1995).

Datos

Los datos abarcan información proveniente de investigaciones realizadas en parcelas permanentes de aclareo y rendimiento (PPAR) y parcelas temporales y permanentes de inventario establecidas en los Llanos Occidentales de Venezuela, principalmente en las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo. En Caparo, las plantaciones fueron establecidas entre los años 1971 y 1973 bajo espaciamientos iniciales 2 m x 2 m; 2,5 m x 2,5 m; 3 m x 3 m y 4 m x 4 m. Las plantaciones de 1971 se establecieron en terreno previamente deforestado y utilizado en cosechas de maíz durante dos o tres años con un tiempo indeterminado de “descanso” en “rastrojo” que no pasó de cinco años. Las plantaciones de 1973 se establecieron en terreno de bosque alto deforestado en forma manual (motosierra, hacha y machete), quema controlada. El terreno correspondió a la SD Banco según el esquema de la tipificación desarrollado en Caparo (Vincent 1970). En el primer año se obtuvo una cosecha de maíz el cual se sembró al mismo tiempo de la plantación de Teca. El espaciamiento fue de 2,5 m x 2,5 m sobre toda la superficie de aproximadamente 21 ha. Las plantaciones objeto de estudio en la Reserva Forestal Ticoporo fueron establecidas entre 1970 y 1981 en una superficie de aproximadamente 1000 ha con espaciamientos desde 2 m x 2 hasta 3,5 x 3,5 m. Tanto en Caparo como en Ticoporo se utilizaron

plantones tipo stump corto. La procedencia de la semilla parece ser Trinidad. Se ha dicho que la mayor parte de las plantaciones de la especie en Venezuela provienen de esta fuente originaria y de un muy reducido número de individuos, por lo que estas plantaciones podrían presentar problemas de consanguinidad (Vicente Garay, comunicación personal).

En Caparo, se estableció una red de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento a fin de investigar la influencia de los espaciamientos y aclareos en el rendimiento de la Teca. Dichas parcelas son rectangulares y tienen superficies que varían entre los 800 y 1600 m². La mayoría de las parcelas se establecieron entre los 2 y 10 años de edad. Se ha venido realizando el seguimiento de las mismas de manera anual o bianual hasta hoy día (30 años de edad). Las parcelas en Ticoporo provienen principalmente de inventarios temporales realizados en aproximadamente 30 rodales con edades entre 15 y 26 años. Las parcelas utilizadas fueron circulares de 250 a 500 m². El Cuadro 1 muestra el rango de algunas características de la masa forestal a intervalos de cinco años.

Los datos provenientes de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento están almacenadas en un sistema de información para plantaciones (SINFOPLAN, Zerpa *et al.* 1997). Dicho sistema procesa los datos de las parcelas permanentes y calcula las estadísticas descriptivas de las mismas tales como densidad, diámetro promedio, altura promedio, altura mayor, área basal, diámetro cuadrático y volumen con y sin corteza, por categorías diamétricas de 1 cm de amplitud. Las parcelas de Inventario fueron procesadas mediante un sistema de información para inventarios de parcelas temporales (SAMAN, Zerpa *et al.* 1997). Este sistema, además de las estadísticas descriptivas, provee estimaciones estadísticamente confiables sobre los parámetros del rodal (media, desviación estándar e intervalos de confianza).

Cuadro 1. Valores mínimos y máximos de densidad, diámetro cuadrático, altura promedio y volumen con corteza para las parcelas permanentes y temporales establecidas en rodales de Teca de los Llanos Occidentales de Venezuela.

Edad (años)	Nº de parcelas	Densidad (árboles/ha)	Dq (cm)	Alturas (m)	Volumen (m ³ /ha)
0,0-5,0	28	500-2125	5,8-15,0	7,0-14,4	18,6-158,3
5,0-10,0	110	483-2125	11,0-24,0	11,0-20,0	52,0-302,0
10,0-15,0	175	236-1758	14,0-28,0	14,0-24,0	47,0-417,0
15,0-20,0	328	120-1608	11,0-42,0	5,0-28,0	50,0-547,0
20,0-25,0	422	120-1842	13,0-52,0	5,0-29,0	50,0-571,0
25,0-30,0	148	120-1483	17,0-37,0	6,0-29,0	47,0-501,0

Construcción del diagrama de densidad

El diagrama se caracteriza por representar las relaciones entre el diámetro cuadrático (d_q , cm) y la densidad (árboles/ha) del rodal en escala doble logarítmica (Figura 1). El grado relativo de ocupación se representa en dicho diagrama, mediante el trazado de una línea de máxima densidad, la cual tiene una pendiente de $-1,605$ e intersecta el punto de índice de densidad máximo hallado para la especie ó población objeto de estudio. El índice de densidad del rodal de Reineke (1933, -IDR-), expresa el

número de árboles por hectárea con un diámetro de 25 cm que pueden ocupar un sitio dado y viene dado por:

$$IDR = D \times (d_q / 25)^{1.605} \quad (1)$$

donde, D = densidad (arb/ha) y d_q = diámetro cuadrático

El máximo IDR (IDR_{max}) obtenido para las plantaciones de Teca estudiadas fue de 1100 árboles por hectárea, en tanto que el valor reportado para plantaciones en Kerala, India (Kumar *et al.* 1995) fue de 1200 árboles/ha. En el presente trabajo asumiremos el valor de 1100 como apropiado para las plantaciones de los Llanos Occidentales de Venezuela.

La línea de inicio de la mortalidad denso-dependiente fue asumida provisionalmente como 55 % del máximo IDR (605 árboles/ha) en función del comportamiento observado en las PPAR de Caparo. Se asumió un 35 % del IDR_{max} (385 árboles/ha) como límite inferior a partir del cual se puede considerar que el sitio está totalmente ocupado (Kumar *et al.* 1995). Estas líneas se trazan con la misma pendiente asumida para la línea de máxima densidad. Finalmente se trazaron dos líneas adicionales, una línea que representa el límite inferior del %IDR donde el crecimiento del árbol individual se asume como máximo (Long, 1985, Kumar *et al.* 1995) y que equivale al 25 % del IDR_{max} y una línea de cierre del dosel (Jerez *et al.* 1999). La línea de cierre del dosel proviene de una muestra de árboles de Teca que crecieron libres de competencia y viene dada por:

$$R_c = 0,47473997 \times d^{0,84930571}, R^2 = 0,82 \quad (2)$$

donde R_c = radio de copa (m), d = diámetro a la altura de pecho (cm).

En el diagrama también se superponen isolíneas de volumen. Dichas isolíneas fueron derivadas relacionando el volumen con corteza estimado por hectárea para plantaciones en Caparo con los respectivos valores de densidad y diámetro cuadrático. La ecuación es:

$$V = 0,000025 \times D^{1,179473} \times d_q^{2,738205}, R^2 = 0,96, ee = 8,2 \text{ m}^3/\text{ha} \quad (3)$$

donde: V = volumen con corteza (m^3/ha), D = densidad (árboles/ha), d_q = diámetro cuadrático (cm) y ee es el error estándar.

El volumen por hectárea usado en la ecuación anterior fue calculado a partir de los volúmenes de los árboles individuales de la parcela, utilizando una ecuación de volumen desarrollada por Moret *et al.* (1998) y proviene de una muestra de 175 árboles estratificada por categorías diamétricas. La ecuación viene dada por:

$$\ln V_{cc} = -1,0689230 + 0,963638 \ln(d^2 h), R^2 = 0,98, ee = 0,01 \text{ m}^3 \quad (4)$$

donde: V_{cc} = volumen con corteza (m^3) excluyendo el tocón, d = diámetro a la altura de pecho (cm), h = altura total y \ln es el logaritmo natural. Los sistemas de información SINFOPLAN y SAMAN generaron los volúmenes por hectárea estimados a partir de las parcelas utilizando dicha ecuación.

Los diagramas de densidad no representan explícitamente como varía la relación tamaño -densidad en función de la edad. Sin embargo, si se asume que la altura mayor es una función de la edad y que es aproximadamente igual para rodales de edades similares creciendo en lugares con aproximadamente la misma calidad de estación, entonces es posible representar el componente temporal en dichos diagramas. La siguiente ecuación provisional representa las isolíneas de altura mayor:

$$H_m = 7,791931 + 0,666463 \times D^{-0,20556} \times d_q^{1,524162}, R^2 = 0,85, ee = 1,3 m \quad (5)$$

donde H_m = altura mayor (m) y los demás símbolos como antes. La relación altura mayor-edad viene dada por la siguiente ecuación:

$$H_m = \exp\left(3,428326 - \frac{4,05452}{Edad}\right), R^2 = 0,92, ee = 1,9 m \quad (6)$$

Todas las ecuaciones fueron derivadas de información de las PPAR de Caparo para un rango de edades entre 1,8 y 30 años. Los modelos no lineales fueron ajustados mediante el procedimiento MODEL de SAS v. 8.1.

El diagrama de densidad fue implementado en la hoja de cálculo Excel. El diagrama final generado por la hoja de cálculo junto con las trayectorias y ubicación de algunas de las parcelas usadas para construirlo se presentan en la Figura 2.

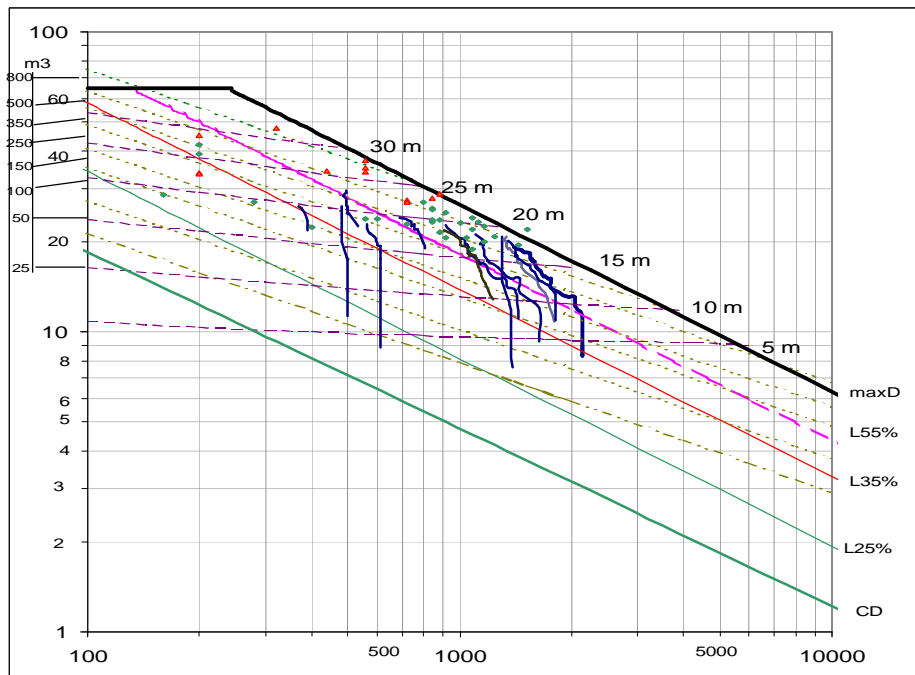


Figura 2. Diagrama de manejo de la densidad construido a partir de los datos provenientes de plantaciones de Teca en los Llanos Occidentales en Venezuela y representando las trayectorias de algunas parcelas permanentes de crecimiento y la ubicación de algunas parcelas temporales. En el diagrama, maxD = línea de máxima densidad, Lnn% = líneas de densidad relativa y CD línea de cierre del dosel.

Aplicaciones del diagrama

Los diagramas de densidad permiten, por una parte, planificar el régimen de espesura a partir de los productos deseados tanto al final del turno como para los diferentes aclareos a realizarse y definir la densidad necesaria al final de la fase de establecimiento para obtener dichos productos. Por otro lado, también permite estimar el rendimiento al final del turno y durante los aclareos, así como la edad de dichas intervenciones, partiendo de una densidad de establecimiento determinada o bien, de una densidad existente en una plantación que ya tiene varios años de establecida (corrección del curso del manejo). Se ilustra la utilización de los DMDs proponiendo cuatro escenarios en función de los productos de uso más común provenientes del aprovechamiento de la Teca en Venezuela (Cuadro 2), así como de las alternativas de espaciamiento más prometedoras. Los escenarios son los siguientes:

Escenario 1: Régimen con un solo aclareo intensivo para la producción de madera aserrada para muebles, carpintería y machihembrado. Se desea determinar cual sería la densidad inicial de implantación, edad del turno y edad e intensidad de aclareos, si se desea producir madera para aserrío (dq = 40 cm) al final del turno y madera para machihembrado y carpintería (dq = 20 cm).

Escenario 2 Régimen con aclareos frecuentes para la obtención de productos de una gama de productos antes del turno. Se desea determinar cual sería la densidad inicial de implantación, edad del turno y edad e intensidad de aclareos, si se desea producir madera para aserrío de alta calidad (dq = 45 cm) al final del turno y madera para aserrío de pequeñas dimensiones (dq = 35 cm), machihembrado y carpintería (dq = 20 cm) y varas (dq = 15 cm).

Escenario 3 Régimen con espaciamiento amplio (4 m x 4 m, 6 m x 2,5 m) y un solo aclareo. Este régimen permite la combinación con cultivos agrícolas durante los primeros años de la plantación. Se desea estimar el turno para la producción de madera para machihembrado (dq = 20 cm) y madera para aserrío (dq = 45 cm).

Escenario 4 Régimen estándar. Un propietario planta Teca a 3 m x 3 m. ¿Cuál sería el régimen a seguir si el manejo se mantiene dentro de los límites de ocupación máxima del manejo?

Cuadro 2. Características dimensionales de los productos obtenidos de aclareo de plantaciones de Teca para diferentes usos (modificado de Osorio, 1997).

Productos	Dimensiones *		Volumen	
	Diámetro (cm)	Longitud (m)	m ³ /piezas	Piezas/m ³
Aserrío	20	3	0,0942	11
Carpintería	15	2	0,0353	28
Vigas	15	4	0,0708	14
Varas	10	4	0,0314	32
Estantillos	12	3	0,0339	29
Parales	8	3	0,0151	66

*diámetro y longitud mínima

Los dos primeros escenarios permiten ilustrar el uso de los DMDs para planificar el manejo en función de productos deseados antes de haber establecido la plantación. Los dos últimos escenarios ejemplifican el uso de los diagramas cuando el propietario ya ha predeterminado el espaciamiento inicial, bien sea por tradición (3 m x 3 m) ó por la necesidad de realizar cultivos agrícolas para pagar costos de establecimiento.

Resultados y discusión

En los Cuadros 3 y 4 se resumen los regímenes especificados para cada uno de los escenarios propuestos. Igualmente en la Figura 3 se presentan las trayectorias de la masa en el diagrama de densidad para cada uno de los regímenes. Para el **Escenario 1** donde se planifica obtener madera para aserrío y realizar un aclareo único, se hizo una planificación hacia atrás (Cuadro 3 y Figura 3-E1). Primero se determinó que el $dq = 40$ cm es alcanzado con una densidad de 300 árboles/ha, altura mayor de 27 m y producirá un volumen de 450 m³/ha. La ecuación 6 que relaciona edad y H_m permite inferir que el turno ocurre a los 31 años de edad. Si se desea que el potencial de crecimiento se concentre en el árbol individual en lugar de la masa, entonces el IDR limitante puede asumirse como 25 % del IDR_{max} . (Kumar *et al.* 1995). Un $dq = 20$ cm puede obtenerse al alcanzar un 55% del IDR a una densidad de aproximadamente 1000 árboles/ha. Es decir, un único aclareo puede realizarse extrayendo 700 árboles/ha. La H_m sería aproximadamente 17 m y la edad del aclareo 7 años. El volumen en pie sería de aproximadamente 250 m³/ha y el volumen extraído de 150 m³/ha. Asumiendo una mortalidad del 10%, la densidad inicial de implantación sería de alrededor de 1110 árboles/ha equivalente a un espaciamiento de 3 m x 3 m. El rendimiento en este régimen sería de alrededor de 600 m³/ha. Las variaciones en dq debidas a las características del aclareo, son representadas por variaciones en la pendiente de las líneas que representan los aclareos. Por ejemplo, en un aclareo sistemático geométrico, la línea de aclareo tendrá pendiente cero, ya que el dq antes del aclareo será similar al dq después del aclareo.

Igualmente, se procedió con el **Escenario 2** o régimen de aclareos frecuentes (Cuadro 3 y Figura 3-E2). Este régimen tiene un turno de 37 años ($dq = 45$ cm) con un rendimiento de 450 m³/ha. Los productos previstos de los raleos se obtendrían a los 24 años (35 cm), 8 años (20 cm) y 5 años (15 cm) con volúmenes de 150, 125 y 100 m³/ha respectivamente. El espaciamiento inicial debería ser de alrededor de 1600 árboles/ha. El rendimiento total de este régimen es de 855 m³/ha.

En el caso del **escenario 3** que combinaría espaciamientos amplios con cultivos agrícolas (Cuadro 4 y Figura 3-E3), de acuerdo al diagrama, se podría realizar un único aclareo a los 10 años de edad con un $dq = 25$ cm y luego realizar la corta final a los 30 años con un dq de 45 cm. Para alcanzar el diámetro meta de 45 cm se excedió el límite de 55% de IDR lo que en teoría produciría una mortalidad de aproximadamente un 10 %. El volumen total producido sería de aproximadamente 700 m³/ha.

En el **escenario 4** (Cuadro 4 y Figura 3-E4) con un espaciamiento inicial de 3 m x 3 m y manteniendo el desarrollo de la plantación dentro de los límites de máxima producción conduce a la aplicación de un aclareo a los 6,5 años de edad y otro alrededor de los 14 años de edad. Este régimen produce un rendimiento total alto (750 m³/ha), pero la proporción del volumen en aclareos es relativamente baja (250 m³/ha).

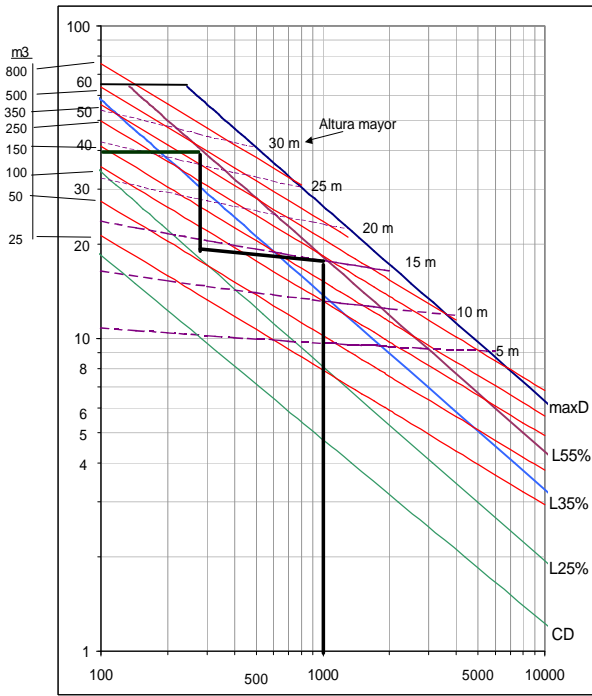
Cuadro 3. Escenarios de planificación desde el final del turno hacia hasta la obtención de la densidad inicial.

Escenarios	dq	H_m	Edad	Mortalidad	Vuelo (árbs/ha)		Volumen (m ³ /ha)		
	(cm)	(m)	(años)	(%)	en pie	eliminado	original	extraído	en pie
E1 Régimen para aserrío con un solo aclareo									
Aprovechamiento final	40	27	31	0	300	300	450	450	0
Raleo 1 (selectivo)	22	17	7	0	1000	700	250	150	100
Final fase establecimiento				10	1000				
Densidad inicial					1110				
Volumen total extraído (m ³ /ha)								600	
E2 Régimen con aclareos frecuentes									
Aprovechamiento final	45	27,5	37	0	225	225	480	480	0
Raleo 3 (selectivo)	35	26	24	0	375	150	400	150	250
Raleo 2 (selectivo bajo)	20	19	8	0	800	425	250	125	125
Raleo 1 (sistemático)	15	14	5	0	1400	600	225	100	125
Densidad fase establecimiento				10	1400				
Densidad inicial					1550				
Volumen total extraído (m ³ /ha)								855	

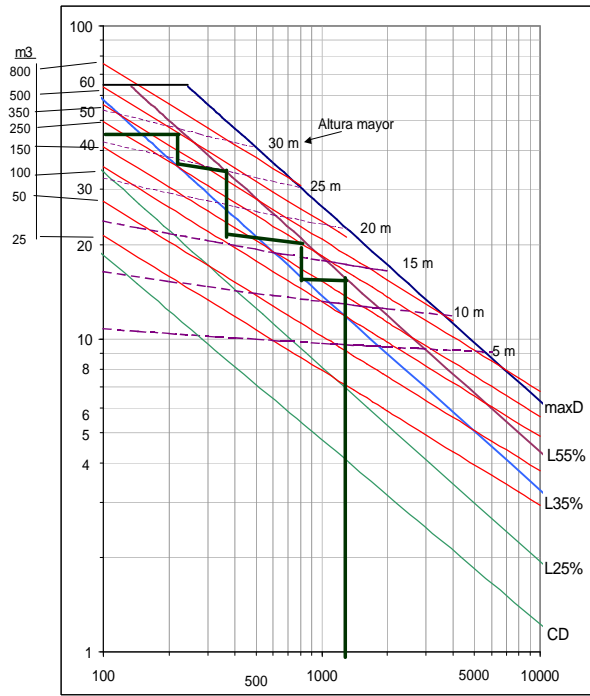
Cuadro 4. Escenarios de planificación desde el establecimiento hasta el aprovechamiento final.

Escenarios	Vuelo (arb/ha)		Mortalidad	H_m	Edad	dq	Volumen (m ³ /ha)		
	en pie	eliminado					antes	extraído	después
E3 Régimen espaciamento amplio									
Densidad inicial	625		5		0				
Densidad fase establecimiento	594		0						
Raleo 1 (moderado por lo bajo)	594	294	0	20	10	25	350	200	150
	300		10	27	30	45	500	500	0
Aprovechamiento final	270	270							
Volumen total extraído (m ³ /ha)								700	
E4 Régimen estándar									
Densidad inicial	1110		10						
Densidad fase establecimiento	1000		10						
Raleo 1 (fuerte por lo bajo)	900	400		16	6,5	20	250	100	150
Raleo 2 (por lo bajo)	500		5						
	475	175		23	14	30	375	150	225
Aprovechamiento final	300	300		27	30	40	500	500	0
Volumen total extraído (m ³ /ha)								750	

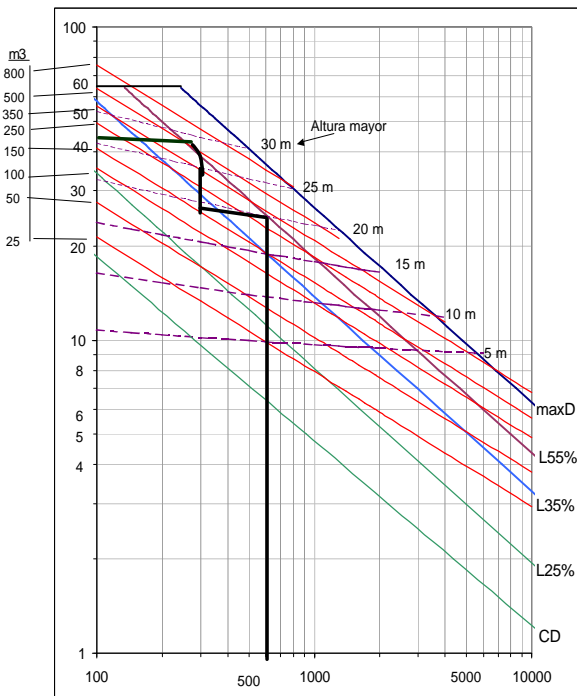
De acuerdo a estos resultados, los regímenes de espaciamentos estrechos con aclareos frecuentes parecen ser más productivos en cuanto a rendimiento total que los regímenes de espaciamentos más amplios o pocos aclareos. Sin embargo, espaciamentos más amplios, permiten alcanzar diámetros mayores en tiempos más cortos. Un aspecto que no es considerado aquí, pero que es factible de incluir con la información disponible es la calidad y cantidad de los productos obtenidos de los aclareos y el



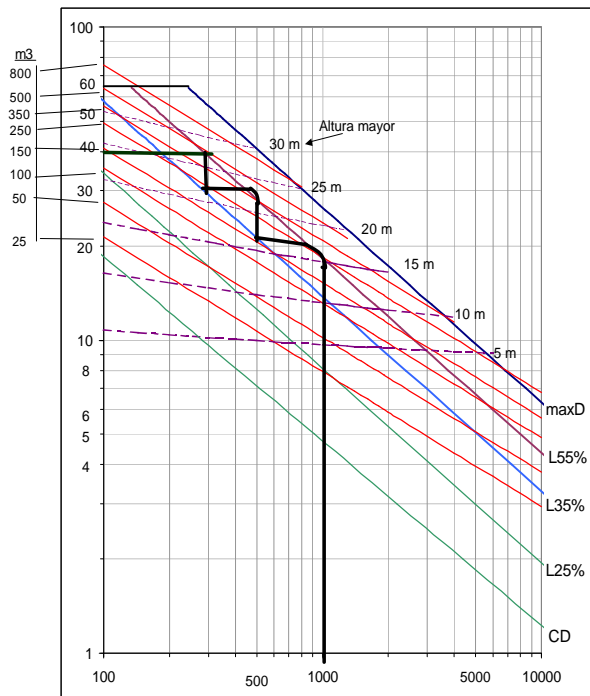
E1



E2



E3



E4

Figura 3. Regímenes de espesura trazados en el diagrama de densidad para los cuatro escenarios propuestos. Escenarios: E1 Régimen para aserrío con un solo aclareo, E2 Régimen con aclareos frecuentes, E3 Régimen espaciamiento amplio y E4 Régimen estándar. MaxD es la línea de máxima densidad y CD es la línea de cierre del dosel

aprovechamiento final. Para ello se han realizado investigaciones sobre distribuciones diamétricas (Quevedo 2002), ecuaciones de perfil (Mora 2001) y estudios sobre la calidad de la madera producida por estas plantaciones. Osorio (1997) encontró que las proporciones de madera aprovechable con respecto al volumen total eran mayores para los espaciamientos amplios, o si se realizaban aclareos intensivos a edad temprana. El autor, sin embargo, no consideró la posible reducción en la calidad de la madera producto de un menor grado de autopoda y la formación de aletones.

Los DMDs no toman en cuenta explícitamente los aspectos económicos. Si bien, desde el punto de vista del rendimiento biológico, ciertos regímenes pueden dar mejores rendimientos que otros para los aclareos y el aprovechamiento final, el efecto de las variables económicas tales como tasas de interés, costos de oportunidad, establecimiento y aprovechamiento no es tomado en cuenta. Los escenarios presentados aquí, sin embargo, también parecen los más promisorios desde el punto de vista económico. Osorio (1997) realizó estudios de rentabilidad en la Teca basándose en la información de las PPAR de Caparo y en los costos de establecimiento y precios de venta para la época. Este autor encontró que espaciamientos reducidos y la falta de aplicación de aclareos en las plantaciones no conducen a plantaciones rentables. Por otro lado, encontró que espaciamientos relativamente reducidos (1110-1600 árboles/ha) con aclareos frecuentes a muy frecuentes (3 a 5) y con un primer aclareo temprano (5 a 6 años) son los de mayor rentabilidad. Igualmente, fueron rentables aunque en menor medida, los regímenes con espaciamientos amplios. En este último caso, sin embargo, no se tomó en cuenta los posibles efectos beneficiosos tanto en lo económico como en lo biológico de la combinación con cultivos agrícolas. La incorporación de restricciones económicas a estos diagramas puede lograrse con relativa facilidad, aunque requeriría implementar el diagrama de manera numérica. Aunque hasta el momento, los propietarios privados han utilizado la especie principalmente para plantaciones en cercas, la utilización de espaciamientos relativamente reducidos con un primer aclareo a los seis años parece ser una opción muy atractiva para los pequeños finqueros. El manejo posterior de estas plantaciones, sin embargo, no parece estar bien definido. Los DMDs pueden ser utilizados para preparar regímenes alternativos de espesura que puedan ser propuestos de manera sencilla a pequeños y medianos propietarios.

Existen algunas diferencias entre el diagrama elaborado para estas plantaciones y el desarrollado por Kumar *et al.* (1995) para las plantaciones en Kerala, India. Estas diferencias, sin embargo, parecen no ser demasiado grandes y pueden deberse a diferencias en las características de los datos y ecuaciones utilizadas. Nuestra base de datos es más limitada en cuanto al rango de edades. La ecuación de altura mayor es solo provisional y está construida con datos provenientes de plantaciones establecidas en relativamente similar calidad de estación. El efecto de la calidad de sitio, aunque no afecta las relaciones tamaño densidad, si influye en las edades a las cuales un rodal se encontrará en una determinada posición dentro del diagrama (Saunders y Puettmann 2000). A menor calidad de sitio, más años tardará un rodal en alcanzar la línea de autoaclareo. De cualquier modo, las semejanzas, apoyan la robustez desde el punto de vista biológico de dichos diagramas.

Los DMDs parecen ser una herramienta útil para la especificación preliminar de regímenes de espesura en plantaciones ya que permiten examinar una serie de variables silviculturales y biométricas simultáneamente, particularmente, las relaciones entre crecimiento del rodal, tamaño de los árboles y edad del turno, lo cual ejemplifica el problema de la optimización en la silvicultura. Los diagramas de manejo, sin embargo, son únicamente un paso previo al desarrollo de modelos más precisos de simulación. Estudios en el área de la Ecología de la Producción, sin embargo, han encontrado que los

principios en que se basan estos diagramas están directamente con relacionados con la dinámica de la biomasa foliar y la eficiencia de crecimiento (Jack y Long 1996, Dean y Baldwin, 1996a,b), por lo que su integración en modelos de simulación puede ayudar en la construcción de modelos de simulación que integren aspectos ecológicos y fisiológicos con aspectos económicos y silviculturales.

Conclusiones

Los DMDs son herramientas útiles para la planificación de regímenes de espesura en plantaciones de Teca ya que permiten examinar varias alternativas rápidamente y a que están basadas en principios biológicos robustos, además, tienen diversas limitaciones, principalmente debido a la no inclusión de variables de tipo económico.

La comparación del presente diagrama, con el desarrollado para la India por Kumar *et al.* (1995) parece indicar que las relaciones básicas tamaño densidad en la especie no varían considerablemente para diferentes regiones.

Regímenes con espaciamientos relativamente estrechos y aclareos frecuentes parecen ser los más promisorios para el manejo de plantaciones de Teca, aunque espaciamientos más amplios parecen ser atractivos si se desea madera de mayores dimensiones en turnos más reducidos.

Recomendaciones

Profundizar en el estudio de la relación entre el manejo del régimen de espesura y las restricciones de tipo económico (mercado, costos de establecimiento e intervenciones) y tecnológico (por ejemplo, proporciones albura-duramen, defectos de la madera).

Explorar en mayor profundidad la factibilidad de usar DMDs para planificar y corregir el manejo en plantaciones de Teca.

Implementar un DMD en un lenguaje de programación u hoja de cálculo, a fin de calcular automáticamente los regímenes de espesura.

Desarrollar un DMD que incorpore las variables económicas como restricciones a la planificación de los regímenes de espesura.

Analizar el efecto de la variabilidad genética en las relaciones tamaño densidad en plantaciones de Teca.

Tomar en cuenta los principios en los que se fundamentan los DMDs para el desarrollo de futuros modelos de simulación que combinen componentes empíricos y biológicos.

Bibliografía

- Ando, T. 1962. Growth analyses on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc). II analysis of stand density and growth. Tokyo, Japan. 77 p .
- Dean, T.J; Baldwin, V.C. Jr. 1996a. Growth in loblolly pine plantations as a function of stand density and canopy properties. *Forest Ecology and Management* 82:49-58.
- Dean, T.J; Baldwin, V.C. Jr.. The relationship between Reineke's stand-density index and physical stem mechanics. *Forest Ecology and Management* 81:25-34.
- Drew, T.J; Flewelling, T.J. 1979. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *Forest Science* 25(3):518-532.
- Farndern, C. 1996. Stand density management diagrams for lodgepole pine, white spruce and interior douglas-fir., Canadian Forest Service. Pacific Forestry Centre. Victoria, British Columbia, Canada.
- Franco, W. 1982. Estudio y levantamiento de sitios con fines de manejo forestal en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Edo. Barinas. Trabajo de Ascenso. Mérida, Venezuela Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Instituto de Silvicultura.
- Jack, S.B; Long, J.N. 1996. Linkages between Silviculture and Ecology: an analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management* 86:205-220.
- Jerez, M; Vincent, L ; Moret, Y. 1999. Un modelo de competencia para las plantaciones de teca del área experimental de la reserva forestal Caparo (Barinas, Venezuela). *Revista Forestal Venezolana* 43(2):157-171.
- Long, J.N. 1985. A practical approach to density management. *Forestry Chronicles* 61:23-27.
- Mora, E. 2001. Evaluación de la variación del diámetro del fuste en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.F.) con análisis de mediciones repetidas y curvas de perfil en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. 62 p.
- Osorio, O. 1997. Regímenes de Espesura y sus Efectos en la Rentabilidad de Teca (*Tectona grandis* L.F.) en Caparo, Venezuela. Tesis MsC. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. 121 p.
- Quevedo, A. 2002 Modelado de Distribuciones Diamétricas en Plantaciones de Teca del Area Experimental de Caparo. Tesis MsC. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales. 65 p.
- Moret, Y; Jerez, M ; Vincent, L. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.

- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46:627-638.
- Sackville Hamilton, N. R; Matthew, C; Lemaire, G. 1995. In defence of the $-3/2$ boundary rule: a re-evaluation of self-thinning concepts and status. *Annals of Botany* 76:569-577.
- Saunders, M. R; Puettman, K.J. 2000. A preliminary white spruce density management diagram for the Lake States. St. Paul, Minnesota, Department of Forest Resources, College of Natural Resources and Minnesota Agricultural Experiment Station. University of Minnesota. 14 p.
- Tadaki, Y. 1963. The pre-estimating of stem yield based on the competition density effect. Tokyo, Japan, Government Forest Experimental Station. 17 p.
- Vincent, L. W. 1991. Un modelo de especificación de la densidad en plantaciones forestales. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. 20 p.
- Vincent, L. W. 1970. Estudio sobre la Tipificación del Bosque con Fines de Manejo en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. 255 p.
- Weller, D.E. 1987. A re-evaluation of the $-3/2$ power rule of self-thinning. *Ecological Monographs* 57(1):23-43.
- Yoda, K; Kira T; Ogowa, H; Kozumi, K. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology Osaka City University* 14:107-129.
- Zambrano, T. J; Vincent, L. 1995. Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) en los Llanos Occidentales de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 39(1): 1-119.
- Zerpa, F; Vincent, L; Jerez, M. 1997. SINFOPLAN. Sistema de Información para el Manejo de Plantaciones. Manual del Usuario. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. 20 p .
- Zerpa, F; Vincent, L; Jerez, M, 1997. SAMAN. Sistema de Información para Procesamiento de inventarios en Plantaciones Forestales. Manual del Usuario. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. 25 p.