

# Conceptos básicos para la modelación del crecimiento forestal

Jari Hynynen<sup>1</sup>

## Resumen

El uso de los bosques está determinado por los objetivos y las restricciones que aplican a la actividad forestal. El manejo forestal es una herramienta para alcanzar los objetivos propuestos en cuanto a la utilización de los bosques bajo determinadas condiciones. Uno de los objetivos del proyecto CapFor fue encontrar herramientas aplicables para apoyar las decisiones de manejo forestal por medio de modelos de crecimiento. En este artículo se introducen, de manera general, algunos enfoques comunes y métodos aplicados en la modelación de la dinámica del rodal en bosques plantados y manejados para la producción de madera y biomasa. Además, se describe un proceso simple para la creación de un sistema de predicción que ayude a la planificación del manejo forestal de la plantación.

**Palabras clave:** Ordenación forestal; desarrollo forestal; modelos de crecimiento; técnicas de predicción; simulación; métodos estadísticos.

## Summary

**Basics for forest growth modeling.** Forest utilization is determined by both the objectives and the restrictions applied to the activity. Forest management is a tool to attain the objectives for the utilization of forests under determined conditions. As one of its objectives, project CapFor decided to create tools for supporting management decisions using growth models. This article provides general information on well-known approaches and methods used for simulating the dynamics of forest planted and managed for biomass and timber production. Also, a simple process for the development of a prediction system is described. This prediction system is intended to help in the planning of management of forest plantations.

**Keywords:** Forest management; forestry development; growth models; forecasting techniques; simulation; statistical methods.

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Forestales de Finlandia. jari.hynynen@metla.fi

## Introducción

El uso de los bosques está determinado por los objetivos y las restricciones que se deben tener en cuenta en la actividad forestal; el manejo forestal, en consecuencia, es una herramienta para alcanzar los objetivos que nos fijamos en cuanto a la utilización de los bosques bajo determinadas restricciones. El manejo forestal incluye una serie de decisiones para definir la implementación de actividades; por ello, es primordial que se tomen las decisiones correctas y en el momento adecuado, para lo que se requiere una planificación cuidadosa de las prácticas de manejo. Para la planificación de la gestión forestal se necesita una gran cantidad de información de diversas fuentes. En primer lugar, necesitamos información actualizada sobre los recursos forestales que se van a gestionar; además, podríamos necesitar información sobre las características de las plantaciones forestales establecidas, o información sobre la propiedad de la tierra que será plantada para la producción de madera y biomasa. En segundo lugar, necesitamos hacer predicciones sobre el futuro desarrollo de los bosques. Para ello, debemos conocer las opciones de manejo posibles y factibles entre las que vamos a seleccionar aquellas que responden mejor a nuestros objetivos. Esto incluye información confiable sobre la capacidad de producción de diferentes especies de árboles, y las respuestas de estas especies a las prácticas de manejo.

Los modelos de crecimiento y rendimiento son herramientas para apoyar la toma de decisiones, ya que permiten obtener información sobre el desarrollo futuro de los bosques. En el mejor de los casos, un modelo de crecimiento ofrece, de manera concisa, la información relevante sobre las características de crecimiento y comportamiento de las especies de árboles en diferentes condiciones de crecimiento, para la

toma de decisiones. Los modelos pueden desarrollarse en forma de tablas de producción, funciones de crecimiento simples o sofisticados sistemas de apoyo a la toma de decisiones. El formato en el que se aplican los modelos puede variar según el uso previsto y el medio ambiente operacional.

Los modelos de crecimiento forestal se diseñan siempre con un propósito y pueden emplearse como herramientas de investigación para ayudarnos a estructurar y comprender fenómenos o procesos complicados. Por otro lado, los modelos se pueden aplicar directamente en la práctica, como herramientas para la toma de decisiones. Para efectos prácticos de planificación del manejo forestal, los modelos estadísticos de crecimiento y rendimiento han resultado muy útiles y de uso generalizado. Según Burkhart (1992), los tipos más comunes de información proporcionada por los modelos de crecimiento son la actualización de inventarios, la evaluación de prácticas silviculturales, la planificación del manejo y la programación de la cosecha.

Dependiendo del uso previsto del modelo se fijan diferentes requisitos para su funcionamiento (Figura 1).

Para el desarrollo de un modelo se requieren varias condiciones: 1) un adecuado conocimiento biológico y ecológico, así como la comprensión de los factores que afectan el crecimiento y la dinámica de los rodales de las especies de árboles a modelar; 2) un conjunto de datos de mediciones empíricas que cubran las condiciones de crecimiento y variedad de las prácticas de manejo aplicadas es decir, el área prevista de aplicación del modelo; 3) métodos estadísticos adecuados para ser aplicados en el ajuste del modelo; 4) la discusión crítica y sin ambigüedades e información del rendimiento esperado del modelo, incluyendo la recomendación de la zona de aplicación, restricciones e información sobre las condiciones en las que el modelo no debe ser utilizado.

En la literatura relacionada con los modelos y su aplicación en los sistemas de planificación aparecen una gran cantidad de términos, muchas veces poco claros. En este artículo, entendemos por *'modelo'*

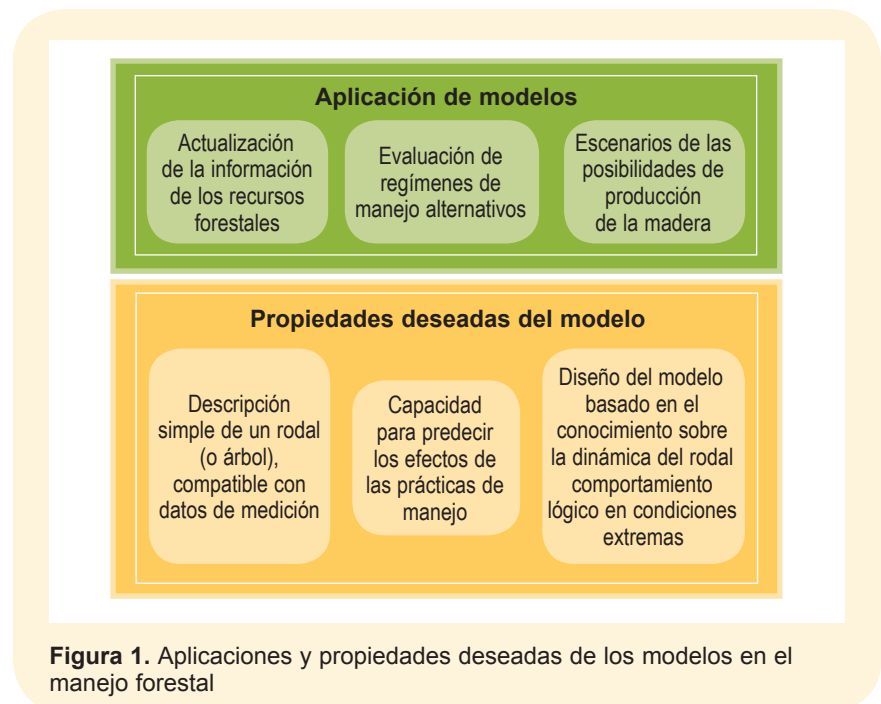


Figura 1. Aplicaciones y propiedades deseadas de los modelos en el manejo forestal

una o más ecuaciones que predicen una propiedad, estado o desarrollo de una característica o evento (p.e., volumen del árbol o crecimiento en altura). Con el fin de predecir el desarrollo del rodal, muchos modelos deben ser aplicados de forma simultánea. Un *simulador* es una plataforma en la que los modelos se aplican como un sistema de predicción que produce predicciones de crecimiento y rendimiento. Los simuladores de crecimiento y rendimiento son el núcleo de los *sistemas de apoyo a la toma de decisiones* diseñados para el manejo forestal.

En el proyecto CapFor, el objetivo fue encontrar herramientas aplicables para el apoyo de las decisiones de manejo forestal, y promover el uso de modelos como apoyo a la toma de decisiones. No existe literatura científica muy abundante disponible que aborde el desarrollo y uso de modelos. Este artículo pretende introducir, de manera práctica algunos enfoques y métodos aplicados en la modelación de la dinámica del rodal en bosques plantados, manejados para la producción de madera y biomasa. El tema se analiza en términos generales, sin referencias a la literatura.

### **Datos de modelación**

El papel de los datos empíricos es crucial, tanto en el desarrollo del modelo como en su aplicación. Aunque la estructura básica de un modelo se basa a menudo en una serie de factores de información que afectan el objeto a ser modelado, se necesitan datos fiables para obtener valores adecuados para el ajuste de los parámetros del modelo. Los datos para la modelación deben cubrir la variación en las condiciones de crecimiento en las que el modelo será aplicado.

También se requieren datos cuando se aplican los modelos. Ya desde la etapa de desarrollo del modelo, se debe tener en cuenta la disponibilidad y características de los

datos. En la práctica, los datos empíricos de medición de una plantación forestal se miden en inventarios forestales que incluyen información limitada de las características del lugar. Por lo tanto, es importante que la descripción del sitio en un modelo sea compatible con los datos de las condiciones reales en las que se aplica el modelo. Por ejemplo, los modelos que requieren como datos de entrada una descripción detallada a nivel de árbol en plantación no son de mucho uso, si en la etapa de aplicación sólo hay pocas características de rodal medidas en datos de inventario.

Existen diferentes tipos de datos forestales en función de su uso previsto. Para propósitos prácticos, los inventarios forestales son la forma más común de obtener datos del bosque. Para fines de investigación, por lo general se prefieren los experimentos diseñados.

Los datos de inventarios forestales constituyen usualmente una muestra bastante grande, representativa y objetiva de la superficie forestal inventariada. Estos datos son especialmente adecuados para el seguimiento del estado de los bosques (recursos forestales, vitalidad, etc.). Estos son los tipos de datos más comunes a los que se aplican los modelos. Para la modelación, estos datos se ajustan mejor a los modelos estáticos que predicen características dadas; por ejemplo, volumen de biomasa, estructura o distribución de tamaño de rodal. También son adecuados si el objetivo es diseñar un modelo que proporcione una predicción imparcial para el área forestal inventariada. Un muestreo representativo para la actualización de los datos de inventario puede ser deseable para modelos de crecimiento de corto plazo.

En los datos de inventario, por lo general están bien representados los tipos más comunes de bosques, aunque no las condiciones extremas de crecimiento o tratamientos.

Por lo tanto, estos datos rara vez son adecuados para modelar la respuesta a diferentes tipos de prácticas de manejo, ya que los tratamientos extremos a menudo están muy mal representados.

Los experimentos diseñados se establecen principalmente para fines de investigación. Estos experimentos permanentes que se miden repetidamente tienen un diseño estadístico experimental que permite el análisis estadístico y la comparación de diferentes tratamientos. El objetivo del experimento diseñado es obtener la respuesta a un tratamiento dado y, al mismo tiempo, minimizar la variación. Este tipo de experimentos es adecuado para evaluar los efectos de las prácticas de manejo forestal, tales como respuesta al espaciamiento, raleos pre-comerciales y comerciales, fertilización, poda, etc. Los experimentos permanentes son medidos repetidamente, cada cierto tiempo durante períodos de largo plazo. El tamaño de la parcela es a menudo lo suficientemente grande para la modelación de las dinámicas del rodal; sin embargo, estas parcelas experimentales forman una muestra subjetivamente elegida. Normalmente se establecen en sitios muy homogéneos y con espaciamiento regular entre los árboles. Los resultados obtenidos en este tipo de rodales no pueden ser generalizados a las plantaciones comerciales comunes.

### **Enfoques comunes para el desarrollo de modelos**

El objetivo del análisis estadístico de los datos empíricos es evaluar la magnitud y la significancia estadística de los factores relevantes y generales que afectan el estado y la estructura o dinámica de un árbol o un rodal. Un modelo es el resultado del análisis estadístico de los datos de las mediciones empíricas; es una descripción simplificada y concisa de una característica o un proceso expresada en formato matemático.

En el desarrollo del modelo, el objetivo es incluir correlaciones, regularidades y patrones que afectan al objeto a ser modelado (por ejemplo, volumen del fuste o incremento en el área basal del rodal). Cuando se aplica el modelo, las dependencias son generalizables a un rodal (o a un árbol) al cual se aplica el modelo. Un modelo (crecimiento) es una manera eficaz de llevar a la práctica los resultados de investigación.

Los factores más importantes que influyen en el crecimiento y rendimiento se pueden encontrar en la mayor parte de modelos de crecimiento y rendimiento. En primer lugar, las propiedades del sitio que obviamente afectan el crecimiento y rendimiento, así como los efectos del clima (temperatura, precipitación), la textura del suelo y la fertilidad. Además, el tamaño de los árboles o la cantidad del material en crecimiento por unidad de área afectan la capacidad fotosintética, la absorción de agua y nutrientes y, en consecuencia, la capacidad de producción de biomasa. La tasa de crecimiento de los árboles durante su ciclo de vida sigue un patrón de crecimiento específico para la especie. Por lo tanto, la edad de la plantación o la edad de los árboles a menudo forman parte de las variables que determinan los modelos de crecimiento. A veces, la altura dominante del rodal se aplica para describir la etapa de desarrollo del rodal en relación con otros rodales de la misma edad. Por último, el grado de competencia entre árboles, dentro de un rodal, por recursos, agua, nutrientes y luz es una fuerza impulsora importante que afecta tanto la tasa de crecimiento como la distribución del crecimiento. Dependiendo del tipo de modelo, el grado de competencia puede ser incluido como característica que representa la densidad del rodal (en modelos a nivel de rodal), y como variables referentes a la situación competitiva de un árbol dado en un rodal.

En la mayoría de los modelos de crecimiento y rendimiento se supone que el impacto de los factores de crecimiento es multiplicativo. Esto permite la linearización del modelo cuando se ajusta a los datos mediante la aplicación de la transformación logarítmica.

Para propósitos de manejo forestal, se ha desarrollado y aplicado una gran variedad de diferentes tipos de modelos, aunque los más comunes son los modelos a nivel de rodal. Estos buscan predecir características como volumen del rodal, área basal, número de tallos, altura dominante, diámetro medio, etc. Los modelos a nivel de rodal son los más adecuados para la modelación de las plantaciones forestales, por tratarse estas de rodales homogéneos de la misma edad y especie única. Estos modelos son relativamente fáciles de construir y aplicar, pues no se necesitan muchos datos y se basan en las características comúnmente medidas en el rodal. Las variables que describen los factores de crecimiento determinantes en modelos a nivel de rodal son el índice de sitio, la edad y variables dependientes de la densidad de rodal (volumen, área basal, número de tallos...).

El efecto de las prácticas de manejo también se puede incluir en los modelos a nivel de rodal pues generalmente se describen en ese nivel. Por ejemplo, el efecto de raleo se puede introducir en un modelo usando una variable categórica simple (raleado o no), o con una variable que se refiera a la intensidad de raleo (% de la ocupación retirada). Muchos modelos suponen que el efecto del raleo debe tenerse en cuenta en la reducción del valor de la variable densidad del rodal.

En la aplicación de los modelos a nivel de rodal, la unidad más pequeña de resolución es un rodal y los resultados del modelo son las medias y sumas por unidad de área de las características del rodal, como el volumen de troncos por hectárea,

la altura dominante del rodal, el diámetro medio, etc. Si se necesitara una descripción más detallada de la dinámica del rodal, que incluya información de variación dentro del rodal y dinámica de su estructura, se podría considerar la modelación del árbol individual. En los modelos de árbol individual, por definición, el objeto modelado es un árbol. Estos tipos de modelos requieren información de medición a nivel de árbol en los datos para la modelación, así como en los datos que van a ser aplicados. La ventaja es una capacidad de predicción detallada de la dinámica de rodales. Ellos son aplicables en la modelación de rodales con estructura heterogénea, como los bosques mixtos. En los modelos a nivel de árbol, la mayoría de las variables determinantes son las mismas que en los modelos a nivel de rodal, pero se suelen incluir las dimensiones de árboles (dap, altura, longitud de copa, etc.) para describir el tamaño de un árbol. Además de las variables de competencia a nivel de rodal (densidad de la masa total), el estado de la competencia de un árbol individual con respecto a otros árboles puede describirse con variables tales como tamaño del árbol relativo o área basal de árboles más grandes. Mediante la aplicación de esas variables es posible predecir la dinámica del rodal de una manera más detallada.

### **Desarrollo de un sistema de predicción para una plantación forestal**

A continuación se presenta un ejemplo simple del proceso de construcción de un sistema de predicción para plantaciones forestales, con fines de planificación del manejo. Este proceso consta de cuatro pasos. La meta es desarrollar un método sencillo para evaluar los impactos del manejo forestal en la producción de madera de una plantación forestal de una sola especie y de edad homogénea. Para el modela-

do, hemos adoptamos un conjunto de modelos estadísticos basados en datos de medición de las plantaciones forestales.

### Paso 1. Predicción del volumen del fuste

El volumen de madera comercial es una de las principales características de la plantación forestal que inciden en la decisión de manejo. Necesitamos conocer los volúmenes de fustes por clase diamétrica con el fin de evaluar el valor de las cosechas. El método más ampliamente aplicado para la predicción del *volumen del tronco* es la modelación del volumen como una función del diámetro y la altura del árbol.

Para el desarrollo de este tipo de modelo se necesitan datos de muestras de árboles de diferentes tamaños y edades talados en la plantación; tales datos deben incluir el diámetro, la altura y el volumen de las muestras. Los modelos de volumen para teca desarrollados por Pérez y Kanninen (2003) sirven como ejemplo de este tipo de enfoque de modelación. Estos autores construyeron un modelo para el volumen total del tronco a partir del diámetro y la altura de los árboles como variables determinantes. El modelo permite predecir el volumen del tronco hasta un diámetro superior definido por el usuario. Con este sistema es posible predecir el volumen de madera en árboles de una manera flexible.

### Paso 2. Predicción de la capacidad de producción del sitio

El potencial de producción de una plantación se define principalmente por el clima y las propiedades del sitio. La predicción fiable de la capacidad de producción de un sitio es uno de los pilares de los sistemas de predicción del crecimiento y rendimiento. Necesitamos conocer la capacidad de producción de una especie forestal que crece en determinado sitio, con el fin de predecir

su crecimiento y rendimiento. El índice de sitio es el método que más se usa para la evaluación de la calidad de sitio en plantaciones forestales. En plantaciones monoespecíficas y coetáneas se ha encontrado que el desarrollo de la altura de los árboles expresa bien el potencial de producción de un rodal. Esta es una variable bastante insensible a la densidad del rodal y a las prácticas de manejo usadas para controlar la densidad de la masa aplicando el raleo por lo bajo.

Para evaluar el índice de sitio, se modela primero el crecimiento en altura de los árboles dominantes en función de la edad de la plantación. Para eso necesitamos los datos de edad del rodal, altura dominante y de medición de árboles en pie o árboles derribados de parcelas de muestreo, temporales o permanentes. Los datos deben incluir las observaciones de rodales de diferentes edades con el fin de modelar el crecimiento en altura durante la vida entera de la plantación. Una vez construido el modelo de crecimiento en altura dominante, se puede aplicar el modelo de predicción de índice de sitio y la curva de índice de sitio (es decir, la curva de crecimiento en altura dominante) para cualquier rodal.

### Paso 3. Predicción de la distribución del tamaño de los árboles en una plantación

En la práctica, sólo se miden o calculan en los inventarios características a nivel de rodal, tales como el área basal, número de tallos, diámetro medio, altura media, etc. Con el fin de estimar el valor de la madera comercial aprovechable, se requiere una información más detallada de la estructura de las remociones potenciales. Para la estimación de la cantidad de madera comercial por clase diamétrica necesitamos saber la variación en el tamaño de los árboles dentro de un rodal.

En las plantaciones forestales, podemos hacer predicciones razonables del contenido de madera en pie con la ayuda de la información a nivel de rodal y los modelos que predicen la distribución del tamaño de los árboles en función de las características medidas.

Para la modelación de la distribución del tamaño se necesitan datos de medición temporal o de largo plazo, de todos los árboles de una parcela de muestreo; las dos variables más importantes son el diámetro y la altura. Para predecir la distribución de tamaños, en términos del volumen de fuste, necesitamos conocer tanto la distribución del diámetro y de altura.

Muy a menudo, la distribución del tamaño se modela con funciones paramétricas de densidad, tales como la función Beta de Johnson SB o la función Weibull. Los modelos de Siipilehto y Siitonen (2004) y Siipilehto (2011) son buenos ejemplos de un enfoque moderno de modelado de distribución de tamaños.

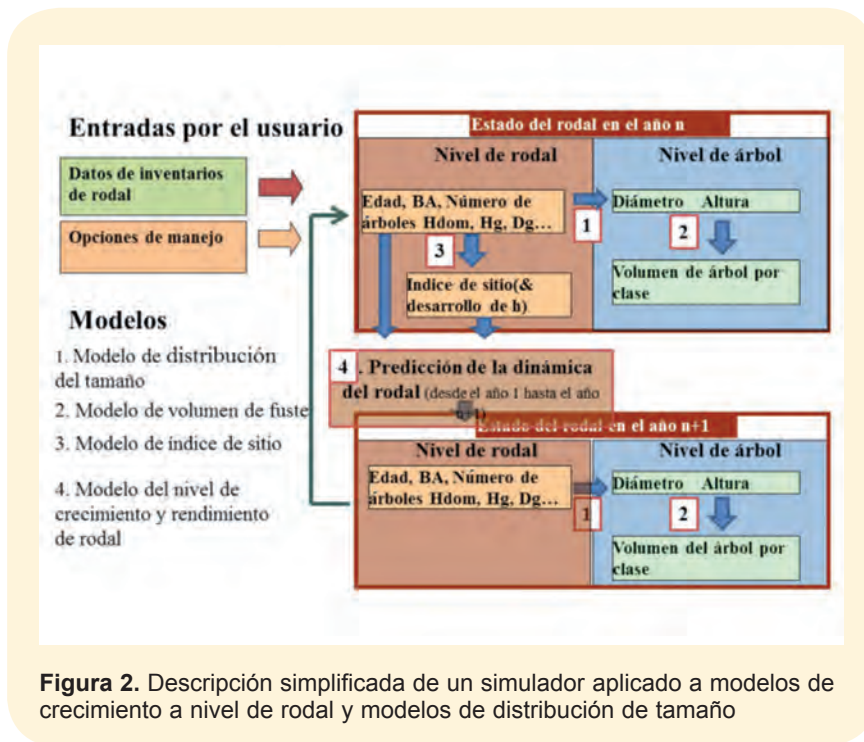
Con base en las características del rodal medidas podemos crear una lista de árboles con información de diámetros y alturas y luego estimar el volumen de madera comercial por clase diamétrica.

### Paso 4. Predicción de la dinámica del rodal

El desarrollo de modelos de predicción de un rodal es el núcleo del sistema de simulación. Debido a que estamos desarrollando un sistema de predicción para plantaciones forestales homogéneas, podemos predecir la dinámica con la ayuda de modelos a nivel de rodal.

En la modelación de la dinámica del rodal de una plantación manejada se hace especial énfasis en una descripción fiable de la dinámica del rodal y las respuestas a las prácticas de manejo. El control de densidad (raleos) es el tratamiento más comúnmente aplicado, y afecta en gran medida la competencia





**Figura 2.** Descripción simplificada de un simulador aplicado a modelos de crecimiento a nivel de rodal y modelos de distribución de tamaño

entre los árboles. Con el fin de predecir la dinámica de una plantación se deben construir modelos que ayuden a determinar la supervivencia y el incremento en el tamaño de los árboles. Debido a que siempre habrá algo de mortalidad en las plantaciones, en el sistema de predicción se debe incluir el modelo de predicción de la magnitud de la mortalidad natural. El enfoque más común es modelar la disminución del número

de plantas en función de la edad de la plantación.

Existen varias alternativas para modelar el incremento de la madera del tronco de una plantación a nivel de rodal. Una opción es desarrollar directamente el modelo para el volumen total del tronco (incremento en área basal del rodal). Además, los modelos de crecimiento para las características medias del rodal tales como diámetro medio

y la altura media se desarrollan a menudo como sub-modelos de los sistemas de predicción. El modelo de crecimiento en altura dominante del rodal ya se describió en párrafos anteriores.

Para el modelado de la dinámica del rodal se recomiendan datos de muestreo de parcelas permanentes con mediciones sucesivas. Si el objetivo es incluir el impacto de las prácticas de manejo sobre el crecimiento y rendimiento se requieren los datos de diseño de experimentos con una intensidad variable de manejo (por ejemplo, raleo).

Con la ayuda de los modelos descritos, es posible construir un simple sistema de predicción del crecimiento y rendimiento. El principio de una posible estructura de sistema de predicción a nivel de rodal se describe en la Figura 2. En este ejemplo, la dinámica del rodal se predice con los modelos a nivel de rodal. La estructura de la masa se puede predecir en un momento determinado con la ayuda de modelos de distribución de tamaño (clases) de densidad y alturas de los árboles dentro de cada clase de diámetro. Con base en esa información, se pueden aplicar ecuaciones de volumen del tronco para predecir el volumen de madera comercial por surtidos de madera. 🌱

### Literatura citada

- Burkhardt, H.E. 1992. Tree and stand models in forest inventory. In Nyssönen, A; Poso, P; Rautala, J. (Eds.). Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories (Finland 17-21 August 1992). The Finnish Forest Research Institute. Research Papers no. 444:164-170.
- Pérez, L.D.; Kanninen, M. 2003. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. *Silva Fennica* 37(1):45-54.
- Siiipilehto, J. 2011. Methods and applications for improving parameter prediction models for stand structures in Finland. *Disertaciones Forestales* no. 124.
- Siiipilehto, J; Siitonen, J. 2004. Degree of previous cutting in explaining the differences in diameter distributions between mature managed and natural Norway spruce forests. In *Uneven-aged forest management: alternative forms, practices and constraints*. *Silva Fennica* 38(4): 425-435.