

Ra Ximhai

Revista de Sociedad, Cultura y
Desarrollo Sustentable

Ra Ximhai
Universidad Autónoma Indígena de México
ISSN: 1665-0441
México

2005

DETERMINACIÓN DE LA EDAD DE TRANSICIÓN DE MADERA JUVENIL A MADURA EN *Pinus patula* SCHL. et CHAM.

David Josué Meza Juárez, J. Jesús Vargas Hernández¹, Javier López Upton, Humberto
Vaquera-Huerta y Amparo Borja de la Rosa
Ra Ximhai, mayo-agosto, año/Vol.1, Número 2
Universidad Autónoma Indígena de México
Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 305-324

DETERMINACIÓN DE LA EDAD DE TRANSICIÓN DE MADERA JUVENIL A MADURA EN *Pinus patula* SCHL. et CHAM.

DETERMINING THE TRANSITION AGE FROM JUVENILE TO MATURE WOOD IN *Pinus patula* SCHL. et CHAM.

David Josué Meza-Juárez¹, J. Jesús Vargas-Hernández¹, Javier López-Upton¹, Humberto Vaquera-Huerta² y Amparo Borja de la Rosa³

¹Programa Forestal. IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. Correo electrónico: lupus75a@yahoo.com;vargashj@colpos.mx;uptonj@colpos.mx. Programa de Estadística. ISEI. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. Correo electrónico: hvaquera@colpos.mx. ³División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México. Correo electrónico: aborja@taurus1.chapingo.mx.

RESUMEN

Con el propósito de comparar diferentes criterios para estimar la edad de transición en la formación de madera juvenil a madura en una plantación de 16 años de edad de *Pinus patula*, se identificó el patrón radial de la proporción de madera tardía, de la densidad de la madera y de la longitud de traqueidas en una muestra de 100 árboles. De cada árbol se obtuvo una muestra de madera con un taladro de incremento a 50 cm de altura del tronco. La proporción de madera tardía presentó un aumento gradual hasta los 14 años y después se apreció un aumento más rápido; la densidad de la madera presentó un decremento en los primeros años y posteriormente mostró un incremento gradual, estabilizándose a los 12-14 años de edad. La longitud de traqueidas mostró un patrón más estable, aumentando progresivamente desde el centro hasta estabilizarse a los 8-10 años de edad. Un análisis de regresión segmentada utilizando los valores anuales promedio de la longitud de traqueidas y densidad de la madera mostraron que la edad de transición de madera juvenil a madura ocurrió a los 10 años en esta plantación. El criterio basado en la longitud de traqueidas fue más útil, ya que presentó un cambio de pendiente más evidente. Con base en este criterio se encontró una amplia variación entre árboles en la edad de transición (de 6 a 16 años), que podría estar asociada a efectos genéticos; sin embargo, se requiere un mayor tamaño de muestra para estimar la variación genética en esta característica. **Palabras clave:** Calidad de la madera, densidad de la madera, formación de madera, longitud de traqueidas, patrón radial, proporción de madera tardía, regresión segmentada.

SUMMARY

In order to compare several criteria to estimate the transition age from juvenile to mature wood formation in a 16-year-old *Pinus patula* plantation, radial trends of latewood proportion, wood density and tracheid length were identified in a sample of 100 trees. A wood sample from each tree was taken with an increment borer at 50 cm stem height. Latewood proportion increased gradually from pith to bark, but after 14 years old showed a higher rate of increase; wood density decreased initially and then increased gradually, slowing down after 12-14 years old. Tracheid length showed a steady radial trend, increasing gradually from the pith and stabilizing after 8-10 years old. A piecewise regression analysis, using mean annual values for tracheid length and wood density showed that age of transition from juvenile to mature wood occurred at age 10 in this plantation. The criterion based on tracheid length was more useful than that based on wood density, since its slope change was more evident. Using this criterion, a broad variation in transition age (from 6 to 16 years) was found among trees, which might be related to genetic effects; however, a larger sample size is required to estimate genetic variation in this trait.

Key words: Wood quality, wood density, wood formation, tracheid length, radial trend, latewood proportion, piecewise regression.

Recibido: 5 de noviembre de 2004.

Aceptado: 6 de abril de 2005.

INTRODUCCIÓN

Con el aumento de las restricciones ambientales para realizar aprovechamientos maderables en bosques naturales, las plantaciones forestales se han convertido en la principal fuente de abastecimiento de la industria forestal a corto plazo (Feria y Eguiluz, 1989). Además de la mayor productividad asociada a una mayor tasa de crecimiento de los árboles, las plantaciones ofrecen otras ventajas a la industria forestal, incluyendo mejor calidad y uniformidad de la materia prima y menores costos de producción y procesamiento industrial (Zobel, 1964; Bendtsen, 1978). Sin embargo, la reducción del turno de cosecha como consecuencia de la mayor tasa de crecimiento, ocasiona un aumento en la proporción de madera juvenil de los árboles (Kučera, 1994). McAlister y Clark (1992) estimaron que en las plantaciones forestales la madera juvenil representa entre 30 y 50 % del volumen total, dos a tres veces más que en la madera obtenida de bosques naturales.

La madera juvenil se caracteriza por tener células cortas, paredes celulares delgadas, baja proporción de madera tardía, baja densidad, contenido elevado de hemicelulosa y lignina, bajo contenido de celulosa y ángulos microfibrilares elevados en la capa S_2 en las paredes de las traqueidas (Zobel y van Buijtenen, 1989). La madera juvenil se forma en el centro del tronco y está relacionada con la edad de las células iniciales del cámbium. Debido a sus características negativas que la distinguen de la madera madura, generalmente se considera de menor calidad (Bendtsen, 1978); aunque puede ser útil para la elaboración de ciertos tipos de papel, no es deseable para productos que requieren resistencia y estabilidad dimensional (Zobel y van Buijtenen, 1989).

Una opción para reducir la presencia de madera juvenil en los árboles cosechados es identificar a aquellos que forman madera madura más rápido. Es decir, que la transición en la formación de madera juvenil a madura ocurra a una menor edad. En cualquier punto del tronco es posible identificar un patrón radial asociado a la edad del árbol, en diferentes características de la madera, incluyendo la longitud de las traqueidas, la densidad de la madera, la proporción de madera tardía, el contenido de celulosa, el ángulo de microfibrillas, el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad (Shepard y Shottafer, 1992). Este patrón radial puede utilizarse como criterio para identificar la edad de transición de

madera juvenil a madura (Szymanski y Tauer, 1991). Con base en estos criterios, la edad de transición generalmente se define como el punto en donde la característica de interés alcanza un valor predeterminado o el patrón radial se estabiliza (Clark y Saucier, 1989).

Utilizando este tipo de criterios se ha encontrado que la edad de transición difiere entre especies y que además existe una amplia variación entre árboles de una misma especie (Abdel-Gadir y Kraemer, 1993b; Hon y Bangi, 1996). Por ejemplo, Nicholls y Waring (1977) utilizando el patrón radial de la densidad de la madera en *Pinus radiata* D. Don, estimaron la edad de transición a los 14 años de edad; en cambio Clark y Saucier (1989) encontraron que la edad de transición en *Pinus elliottii* Engelm. varió de 10 a 14 años; y en *P. taeda* L., de 10 a 11 años. Abdel-Gadir y Kraemer (1993a) estimaron la transición de madera juvenil a madura en *Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco a los 26 años. En *Picea abies* (L.) Karst., Kučera (1994) determinó una edad de transición de entre 18-19 años. Meza y Romero (1999) estimaron una edad de transición de 11 años en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr et Golf.

Pinus patula Schl. et Cham. es una de las especies de coníferas con mayor potencial productivo en México, debido a sus altas tasas de crecimiento a corto plazo y a que su manejo silvícola es relativamente simple (Dvorak *et al.*, 2000). Es una especie endémica de México que presenta una amplia variabilidad fenotípica y genética en diversas características de interés económico, incluyendo aquellas relacionadas con la calidad de la madera (Barnes *et al.*, 1994). La madera madura de esta especie es ampliamente utilizada en productos celulósicos o de madera sólida en pisos, puertas, construcción en general, acabados de interiores y exteriores, estructuras, armaduras, madera aserrada, triplay, chapa, postes para servicios públicos, durmientes, vigas, columnas, cajas y empaques (Pérez y Olvera, 1981). Esta especie fue una de las primeras especies de pinos mexicanos en ser plantados en Sudáfrica (Perry, 1991) y actualmente su uso en plantaciones se ha extendido a otros países de varios continentes (Wright *et al.*, 1995; Ishengoma *et al.*, 1995; Dvorak *et al.*, 2000), incluyendo su país de origen (Sáenz *et al.*, 1994; Valencia y Vargas, 2001).

Con base en lo anterior, se realizó el presente trabajo, el cual tuvo los objetivos de: a) identificar el patrón asociado con la edad que presenta la proporción de madera tardía, la densidad de la madera y la longitud de traqueidas en una plantación de *Pinus patula*; b) comparar la efectividad de estas características (proporción de madera tardía, densidad de la madera y longitud de traqueidas) para identificar la edad de transición de madera juvenil a madura en esta especie; y c) comparar la edad de transición de madera juvenil a madura en diferentes familias de medios hermanos de *Pinus patula*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del ensayo y obtención de muestras

El estudio se llevó a cabo con individuos de una prueba de progenie de *P. patula* de 16 años de edad, localizada en un predio del ejido Canalejas de Otates, Municipio de Zacualpan, Veracruz. A la edad de esta plantación es factible que ya exista madera madura, como se ha demostrado en otras especies de *Pinus* de requerimientos ecológicos y hábitos de crecimiento similares, como *Pinus elliottii* (Clark y Saucier, 1989), *P. taeda* (Szymanski y Tauer, 1991) y *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Meza y Romero, 1999). La plantación se localiza en los 23° 25' de latitud Norte, y 98° 23' de longitud Oeste, a una altitud de 2250 m, con una temperatura media anual de 13 °C, con una precipitación promedio anual de 2000 mm y un suelo de textura arcillo-limosa (Sáenz *et al.*, 1994).

El diseño de campo es de 12 bloques completos al azar, con 22 familias de fuente sudafricana y dos parcelas testigo que corresponden a material de origen mexicano sin mejora. Cada parcela consiste de cuatro árboles en hilera a un espaciamiento de 2 x 2 m (Sáenz *et al.*, 1994). Las parcelas se encuentran distribuidas dentro del bloque en tres sub-bloques (estratos) de ocho parcelas cada uno; los sub-bloques están colocados en sentido perpendicular a la pendiente del terreno para homogeneizar las condiciones dentro del estrato.

En los meses de enero y febrero de 2002 se recolectaron muestras de madera de 100 individuos, seleccionados al azar en los ocho bloques que tenían mayor supervivencia. Las muestras se tomaron con un taladro de Pressler, a una altura de 50 cm sobre el suelo, con el propósito de tener representados la mayor cantidad de anillos de crecimiento. La herida causada con el taladro se protegió con taquetes, tratados previamente con formol comercial, y se selló con resanador. Las muestras se identificaron con un lápiz indeleble y se mantuvieron en agua, hasta su procesamiento en laboratorio

Determinación de las características de la madera

Para determinar la proporción de madera tardía se utilizó un microscopio estereoscópico con una escala integrada al ocular; la parte más clara de los anillos se consideró como madera temprana, y la más oscura, como madera tardía, donde el grosor de la pared celular es igual o mayor que el diámetro del lumen de una de estas células. En cada anillo se midió primero la anchura total y posteriormente la anchura de la madera temprana; por diferencia se obtuvo la anchura de la madera tardía y posteriormente el porcentaje que representa ésta en el anillo. Después se separaron los anillos de crecimiento en forma individual para la determinación de la densidad de la madera y la longitud de traqueidas.

La densidad de la madera se estimó mediante el método del máximo contenido de humedad (Smith, 1954) en cada una de las probetas obtenidas al seccionar la viruta en los anillos de crecimiento individuales. Para ello, las probetas se colocaron en agua, hasta que alcanzaron un contenido de humedad saturado y se pesaron en una balanza analítica (marca Ohaus). Después, las muestras se colocaron en una estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ \text{C}$, durante 48 a 72 horas y se obtuvo el peso anhidro con la misma balanza. Con estos datos se calculó la densidad de la madera (DM) mediante la fórmula (Smith, 1954):

$$DM = \frac{1}{\frac{P_S - P_A}{P_A} + \frac{1}{D_{SO}}} \quad (1)$$

donde P_S = peso de la muestra saturada de humedad; P_A = peso anhidro de la muestra; y D_{SO} = densidad de las sustancias de la pared celular (igual a 1.53).

Para determinar la longitud de traqueidas se preparó material disociado de cada anillo de crecimiento de acuerdo con el procedimiento descrito por Huerta (1978). Para ello se cortaron pequeñas astillas de madera tardía de cada anillo, se colocaron en frascos de vidrio y se les agregó una mezcla de ácido acético y peróxido de hidrógeno en partes iguales hasta cubrir las astillas. Los frascos sellados se colocaron en una estufa a $70 \pm 5^\circ$ C durante 24 horas. Del material disociado se eliminaron los residuos de la solución, enjuagando con agua destilada; posteriormente, el material se tiñó con fushina, dejando reposar de 3 a 5 minutos, y se montó en preparaciones temporales.

Las traqueidas se observaron en un microscopio con pantalla de amplificación (marca Carl Zeiss). Con una regla de 20 cm se midieron cinco traqueidas seleccionadas al azar de cada uno de los anillos, considerando sólo aquellas que estaban completas. Las mediciones en centímetros se transformaron a micras (μm), empleando el correspondiente factor de conversión. Con base en un pre-muestreo de veinte traqueidas por anillo de crecimiento se determinó que el tamaño de muestra requerido era de cuatro traqueidas en los primeros siete anillos de crecimiento, y de cinco traqueidas en el resto de los anillos, por lo que se decidió utilizar un tamaño de muestra de cinco traqueidas en todos ellos.

Determinación de la edad de transición

Para determinar la edad de transición de madera juvenil a madura con base en cada una de las características, se utilizó el método de regresión segmentada del patrón radial de cada una de ellas. Este método supone que en el patrón radial de cada característica (asociado con la edad del anillo de crecimiento) existe un cambio notorio en la pendiente de la línea de regresión, y que la edad en que ocurre este cambio de pendiente representa la edad de transición. Este método se ha utilizado con éxito en diferentes especies de coníferas como *Pinus resinosa* Ait. (Shepard y Shottafer, 1992), *Pseudotsuga menziesii* (Abdel-Gadir y Kramer, 1993a y b; Vargas *et al.*, 1994) y *Pinus taeda* (Tasissa y Burkhart, 1998), entre otros.

El modelo de regresión por segmentos se puede expresar como sigue (Neter *et al.*, 1983):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - T) x_2 + e_i \quad (2)$$

donde Y_i = característica de interés en el i -ésimo anillo de crecimiento; β_0 , β_1 , β_2 = coeficientes de regresión; x_i = edad de formación del i -ésimo anillo de crecimiento; T = edad de transición de madera juvenil a madura; x_2 = variable indicadora (“dummy”): $x_2 = 0$ si $x_i \leq T$ (madera juvenil) o $x_2 = 1$ si $x_i > T$ (madera madura); y e_i = error aleatorio asociado al i -ésimo anillo de crecimiento.

De esta manera, cuando $x_2 = 0$ (segmento de madera juvenil):

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (3)$$

Y cuando $x_2 = 1$ (segmento de madera madura):

$$E(Y_i) = \beta_0 - (\beta_2 T) + (\beta_1 + \beta_2) x_i \quad (4)$$

La aplicación del modelo de regresión por segmentos (ecuación 2) supone que se conoce el valor T (edad de transición); sin embargo, en este caso ese es precisamente el valor que se desea determinar. Para ello, se ajustó el modelo a la base de datos de cada característica haciendo variar T desde 1 hasta 16 años. Al final, para cada característica se eligió el modelo con el valor de T que tuvo la menor suma de cuadrados del error. Ese valor de T representó la edad de transición estimada para cada característica de interés.

Con el propósito de comparar la efectividad de los tres criterios considerados (proporción de madera tardía, densidad de la madera y longitud de traqueidas) el modelo de regresión segmentada se ajustó utilizando los valores promedio de cada anillo de crecimiento en todas las muestras ($n = 100$). Los criterios se compararon con base en los valores de R^2 , el cuadrado medio del error y la pendiente de la línea de regresión antes y después de la edad de transición estimada.

Con el propósito de estimar la edad de transición a nivel de familias, los criterios considerados más efectivos se utilizaron en una segunda etapa para ajustar los modelos respectivos utilizando los datos de las características para cada familia por separado. Primero se ajustó el modelo de regresión a los valores promedio por familia para cada anillo de crecimiento. La edad de transición obtenida para cada familia ($ET_{\bar{f}}$) con este procedimiento se comparó con la edad de transición promedio ($\overline{ET_f}$) obtenida a partir de la regresión estimada para cada árbol perteneciente a dichas familias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrón de variación radial en las características de la madera

La proporción de madera tardía fue relativamente baja durante los primeros cuatro años de crecimiento (Figura 1a). Sin embargo, a partir de esa edad se observa un aumento gradual en esta característica, hasta alcanzar valores de 32-33 % a los 13-14 años de edad, lo que implica un aumento promedio de alrededor de 2.4 % por año. En los últimos años es notoria una mayor velocidad de cambio en esta característica, de entre 6-8 % por año para llegar a un valor promedio de 46.3 % a los 16 años de edad. La densidad de la madera presentó un patrón radial distinto al de la característica anterior. En los primeros años, cerca del centro del árbol, se tiene un descenso gradual desde valores de 0.47 gcm^{-3} en el primer año, hasta valores de 0.33 gcm^{-3} a los 4 años de edad (Figura 1b).

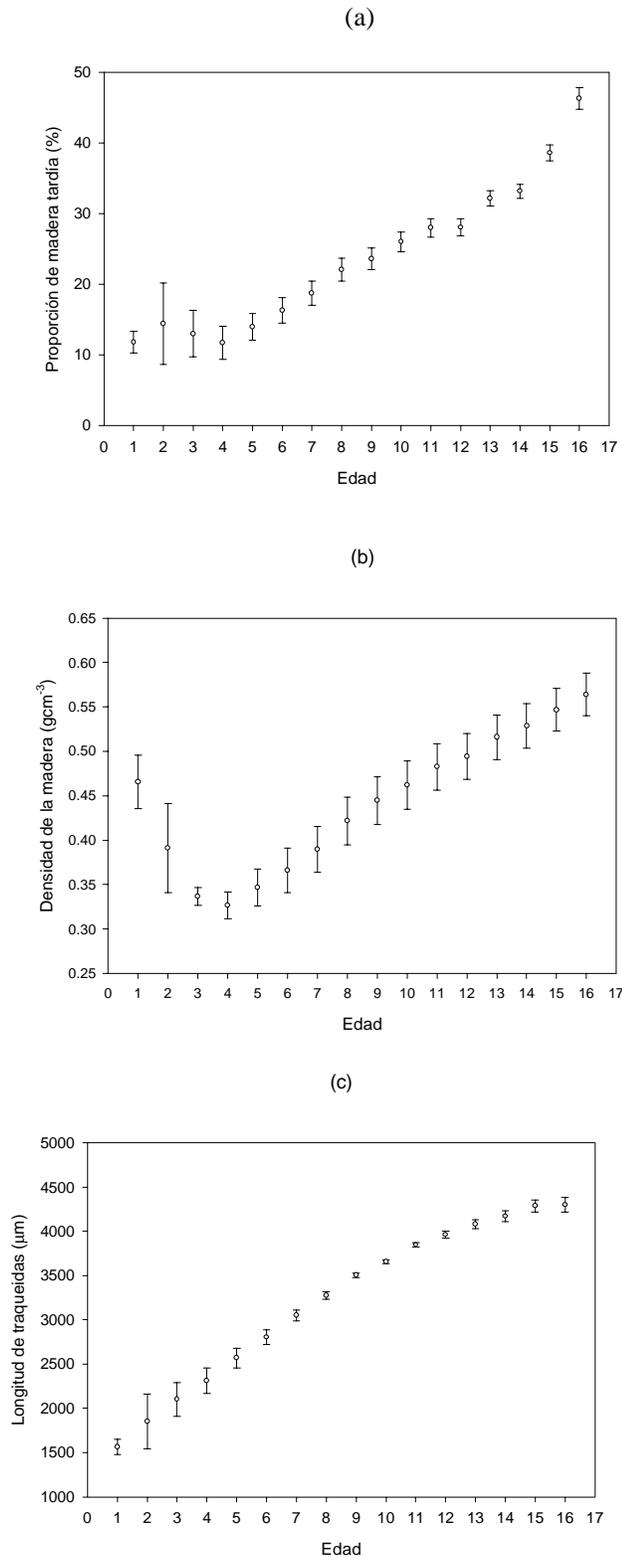


Figura 1. Patrón de variación radial (asociado con la edad) de (a) la proporción de madera tardía, (b) la densidad de la madera y (c) la longitud de traqueidas en una plantación de *Pinus patula* de 16 años de edad.

Con un incremento gradual en los años siguientes, con una estabilización al acercarse a la corteza, después de los 12 años de edad. A los 16 años se observan valores promedio de densidad de la madera de 0.56 gcm^{-3} . La longitud de traqueidas presentó un patrón radial mucho más uniforme que las dos características anteriores (Figura 1c). Inició con valores promedio de $1564 \mu\text{m}$ en el centro del árbol y aumentó progresivamente hasta valores promedios de $4298 \mu\text{m}$ a los 16 años de edad. Sin embargo en los últimos anillos se nota una reducción gradual en la tasa de cambio, con una tendencia a estabilizar el valor promedio.

El patrón radial de la proporción de madera tardía es parecido al descrito en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por Meza y Romero (1999). Burley *et al.* (1972) reportaron un patrón similar en árboles de *Pinus patula* de 30 años en Rhodesia. Sin embargo, Wright y Malan (1991) encontraron un patrón inverso (descenso gradual de la proporción de madera tardía) en una plantación de *Pinus patula* de 10 años en Sudáfrica, parecido a lo que ocurrió en los primeros cuatro años en los árboles de nuestro estudio. El patrón radial de la densidad de la madera también es típico al de algunas especies de coníferas, pero no de la mayoría; Clark y Saucier (1989) reportan en *Pinus elliottii* un descenso en la densidad de la madera en los primeros años, seguido de un aumento gradual hasta estabilizarse en el año 12. Abdel-Gadir y Krahmer (1993a) muestran en *Pseudotsuga menziesii* un descenso en la densidad de la madera en los primeros 10 años y a partir de éste también inicia un aumento gradual. Sin embargo, en la mayoría de las especies de *Pinus*, el patrón radial de la densidad de la madera generalmente no muestra el descenso inicial observado en esta plantación de *Pinus patula* (Zobel y Van Buijtenen, 1989; Loo *et al.*, 1985). El patrón radial de la longitud de traqueidas también es típico al de otras especies de coníferas, como lo muestra Duffield (1964) en *Pseudotsuga menziesii*, Yang *et al.* (1986) en *Larix laricina* Du Roi, Kučera (1994) en *Picea abies* y Lim y Soh (1997) en *Pinus densiflora* y *P. thunbergii*.

Comparación de criterios para estimar la edad de transición

Los tres criterios empleados para definir la edad de transición de madera juvenil a madura tuvieron un ajuste aceptable en los modelos desarrollados, con coeficientes de regresión

significativamente diferentes de 0 y un coeficiente de determinación mayor de 0.95 (Cuadro 1). Esto implica que los diferentes criterios evaluados pudieron distinguir un cambio de pendiente en la tendencia de cada una de las características con respecto a la edad de los árboles (Figura 2).

Cuadro 1. Resumen estadístico de los tres criterios comparados para definir la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula*.

Criterio	Edad de transición (ET)		Modelo	R ²	C.V.
Proporción de madera tardía	14	antes de ET	$y=7.6257+1.7675x$	0.9735	7.66
		después de ET	$y=-62.8311+6.8001x$		
Densidad básica	10	antes de ET	$y=0.229563+0.023479x$	0.9985	0.73
		después de ET	$y=0.299693+0.016466x$		
Longitud de traqueidas	10	antes de ET	$y=1369.1408+236.9349x$	0.9987	1.08
		después de ET	$y=2706.8088+ 103.1681x$		

Desde esta perspectiva, los tres criterios considerados fueron útiles para identificar los patrones radiales en las características de la madera que están asociados al proceso de crecimiento de los árboles. Sin embargo, los tres criterios no fueron igualmente eficientes ni consistentes entre sí para identificar la edad de transición en la formación de madera juvenil a madura. El patrón radial de la longitud de traqueidas y la densidad básica de la madera mostraron un punto de inflexión (reducción de la pendiente) a la edad de 10 años; mientras que el porcentaje de madera tardía presentó el punto de inflexión (aumento de la pendiente) a los 14 años (Figura 2). En los tres casos el cambio de pendiente fue en la dirección esperada, por lo que la edad en que ocurrió puede considerarse como la de transición. La longitud de traqueidas y la densidad de la madera presentaron un mayor coeficiente de determinación y menor coeficiente de variación que la proporción de madera tardía (Cuadro 1), por lo que estos criterios fueron más precisos que el otro para identificar el punto de transición.

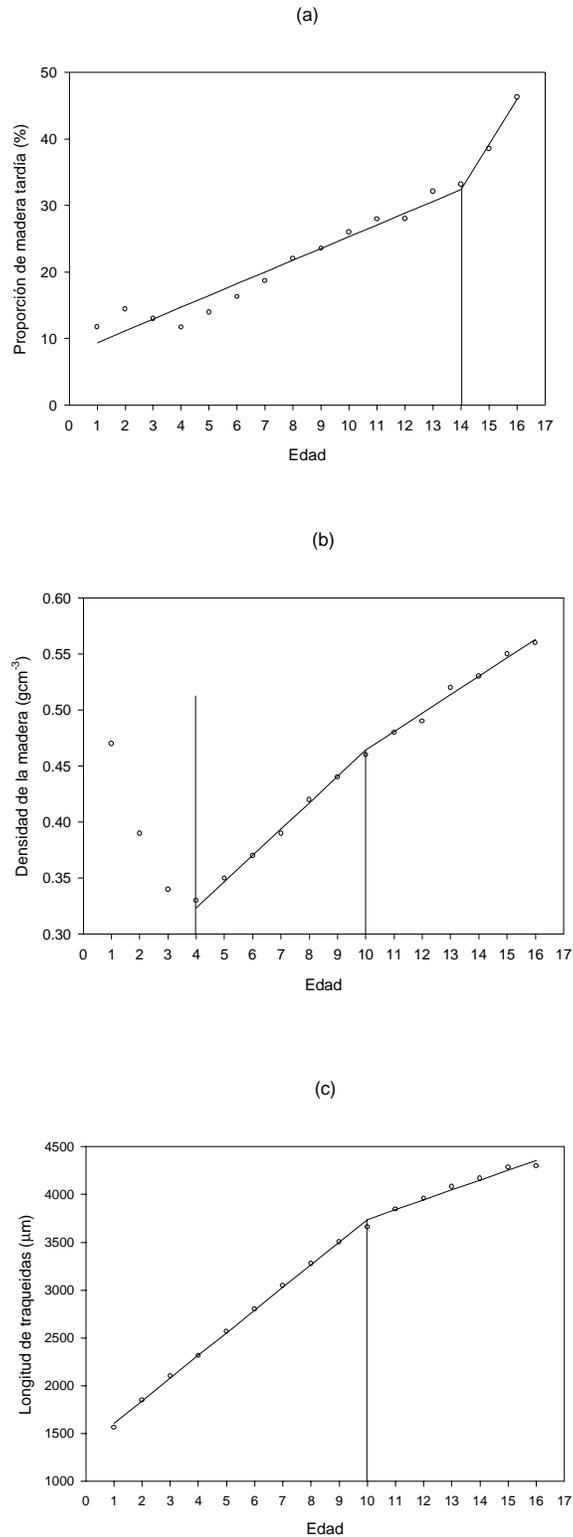


Figura 2. Regresión lineal segmentada mostrando la edad de transición de madera juvenil a madura estimada, con base en (a) proporción de madera tardía, (b) densidad de la madera y (c) longitud de traqueidas en una plantación de *Pinus patula* de 16 años de edad.

Dado que las dos primeras características fueron consistentes entre sí y tuvieron una precisión similar, podrían utilizarse de manera indistinta para determinar la edad de transición a madera madura en esta especie. Sin embargo, la longitud de traqueidas presentó un cambio de pendiente más pronunciado que la densidad de la madera después del punto de inflexión (Cuadro 1 y Figura 2), por lo que se facilita identificar el punto de transición. Además, en el caso de la densidad de la madera fue necesario eliminar los tres primeros anillos del análisis (Figura 2b) para obtener un ajuste adecuado del modelo de acuerdo al patrón radial existente en otras especies de *Pinus*.

Con base en las consideraciones anteriores, la longitud de traqueidas parece ser la característica más útil para determinar la edad de transición en esta especie. En otras especies leñosas se ha demostrado que las traqueidas tienden a estabilizar su tamaño conforme avanza la edad del árbol, debido a que las divisiones periclinales y anticlinales del cámbium llegan a un límite al alcanzarse la madurez fisiológica (Clark y Saucier, 1989; Lim y Soh, 1997). En la práctica sin embargo, es más laborioso, complicado y riesgoso la determinación de la longitud de traqueidas que la densidad de la madera, debido al tiempo requerido para procesar las muestras en el laboratorio y a los reactivos químicos necesarios.

En este trabajo se determinó la densidad de la madera en forma manual, utilizando el método del máximo contenido de humedad que es relativamente preciso en muestras pequeñas de madera (Smith, 1954), pero genera problemas al momento de separar los anillos de crecimiento individuales. La evaluación de la densidad de la madera en forma automatizada con rayos X hace una separación más precisa de los anillos de crecimiento (Abdel-Gadir y Krahmer, 1993a; Vargas *et al.*, 1994), por lo que sería interesante evaluar si dicho procedimiento permite obtener un cambio de pendiente más pronunciado, como se ha demostrado en *Pseudotsuga menziesii* (Abdel-Gadir y Krahmer, 1993a) y en *Pinus taeda* (Tasissa y Burkhart, 1998). La proporción de madera tardía es la característica más fácil y rápida de medir en comparación con las otras dos, pero el patrón de variación asociado con la edad fue el más irregular. En otras especies de *Pinus* se ha encontrado que la proporción de madera tardía es muy sensible a las condiciones ambientales y de cultivo, en especial con la disponibilidad de humedad, causando variación entre y dentro de árboles, mientras

que las características anatómicas de la madera como la longitud de traqueidas, generalmente tienen un mayor control genético y son menos afectadas por el ambiente (Zobel y van Buijtenent, 1989).

Variación entre familias en la edad de transición

La longitud de traqueidas fue más precisa (mayor R^2 y menor coeficiente de variación) que la densidad de la madera para identificar la edad de transición de madera juvenil a madura entre las familias (Cuadro 2). El primer criterio fue más consistente que la densidad de la madera para identificar la edad de transición al utilizar los valores promedio por familia o los valores de árboles individuales de cada familia (Cuadro 2). Esto es, en la mayoría de los casos la edad de transición estimada con la longitud de traqueidas para una familia no difiere en más de 2-3 años al utilizar los valores promedio (ET_f) o los valores de árboles individuales (\overline{ET}_f); en cambio, al utilizar la densidad de la madera como criterio, la edad de transición estimada con los valores promedio difirió en 3-7 años respecto a la edad estimada empleando los valores individuales por árbol (Cuadro 2).

Al estimar la edad de transición para cada familia por separado fue evidente que existe una amplia variación entre ellas en el valor estimado con cualquiera de los dos criterios (Cuadro 2). Por ejemplo, con la longitud de traqueidas se estimó una edad de transición de 6 años en la familia 95, mientras que en la familia 36, la edad de transición estimada fue de 16 años (Cuadro 2). El patrón radial de la longitud de traqueidas de estas familias confirma que existen diferencias notorias entre ellas (Figura 3). Sin embargo, debido al reducido número de muestras incluido para la mayoría de las familias, no fue posible hacer una evaluación estadística más rigurosa de estas diferencias entre familias.

Cuadro 2. Edad de transición de madera juvenil a madura estimada en varias familias de medios hermanos de *Pinus patula* utilizando los valores promedio ($ET_{\bar{f}}$) y los valores individuales por árbol (\overline{ET}_f) de la longitud de traqueidas y la densidad de la madera.

Familia	n	Longitud de traqueidas						Densidad de la madera					
		valores por familia			valores por árbol			valores por familia			valores por árbol		
		$ET_{\bar{f}}^*$	R^2	CV	\overline{ET}_f^+	R^2	CV	$ET_{\bar{f}}^*$	R^2	CV	\overline{ET}_f^+	R^2	CV
0	6	12	0.99	1.52	10.6	0.96	5.46	7	0.87	5.36	11.8	0.73	8.77
22	2	14	0.98	3.61	13.0	0.97	4.88	14	0.95	4.81	14.0	0.85	9.44
23	2	11	0.98	3.61	11.0	0.97	4.45	16	0.96	4.02	16.0	0.91	6.55
24	4	11	0.99	3.12	11.5	0.97	5.04	8	0.96	3.66	14.5	0.82	6.77
25	2	11	0.98	2.96	9.5	0.97	3.82	8	0.88	5.00	9.0	0.85	5.80
26	8	9	0.99	2.25	8.8	0.98	4.11	9	0.97	2.50	10.8	0.79	8.17
27	6	12	0.99	2.12	12.1	0.97	4.43	10	0.95	3.59	12.5	0.76	9.13
28	4	9	0.99	2.68	10.7	0.96	5.41	10	0.94	5.05	10.7	0.90	7.27
29	6	7	0.99	1.10	9.6	0.94	4.58	8	0.96	3.53	11.1	0.81	11.54
30	5	9	0.99	1.95	10.4	0.96	4.62	16	0.91	6.43	15.0	0.78	6.89
31	8	8	0.99	1.73	9.8	0.97	4.25	16	0.96	3.83	15.1	0.80	9.16
32	2	11	0.99	3.98	10.5	0.96	5.40	16	0.72	10.6	16.0	0.62	12.06
33	5	9	0.99	2.44	7.6	0.95	5.22	12	0.95	3.84	14.6	0.77	8.84
34	6	8	0.99	1.20	12.5	0.96	5.16	7	0.97	3.47	14.8	0.82	9.00
35	6	9	0.99	1.10	9.6	0.93	5.71	6	0.95	3.43	13.8	0.74	8.75
36	2	16	0.97	4.08	14.0	0.91	7.49	13	0.90	5.05	14.5	0.69	9.40
38	4	11	0.99	1.71	9.0	0.97	4.23	11	0.98	3.40	12.2	0.89	7.77
39	2	13	0.96	5.37	10.5	0.96	5.55	16	0.77	9.25	16.0	0.74	10.11
40	2	9	0.99	2.27	12.5	0.98	4.54	11	0.89	6.87	13.0	0.85	8.28
92	2	11	0.99	2.68	11.5	0.97	3.66	7	0.94	5.04	13.5	0.87	7.53
93	6	12	0.99	1.33	10.3	0.98	3.55	7	0.97	2.53	14.3	0.72	9.34
94	2	14	0.98	4.58	13.0	0.98	4.98	13	0.95	5.67	16.0	0.86	9.91
95	8	6	0.99	1.55	7.2	0.97	3.87	10	0.95	4.01	11.6	0.81	8.30

* $ET_{\bar{f}}$ = Edad de transición estimada utilizando valores anuales promedio por familia;

+ \overline{ET}_f = Edad de transición promedio de la familia, estimada utilizando valores anuales por árbol.

Loo *et al.* (1985) encontraron que la edad de transición estimada en *Pinus taeda* con base en la densidad de la madera y la longitud de traqueidas, tiene una heredabilidad moderada suficientemente alta para hacer una selección efectiva utilizando la media de las familias o mediante una selección que combine la media por familia y el valor individual de cada árbol. Abdel-Gadir y Kraemer (1993b) encontraron que la edad de transición de madera juvenil a madura, basada en la densidad de la madera, es extremadamente variable en *Pseudotsuga menziesii*, de 22 a 29 años entre procedencias y de 17 a 30 años entre familias.

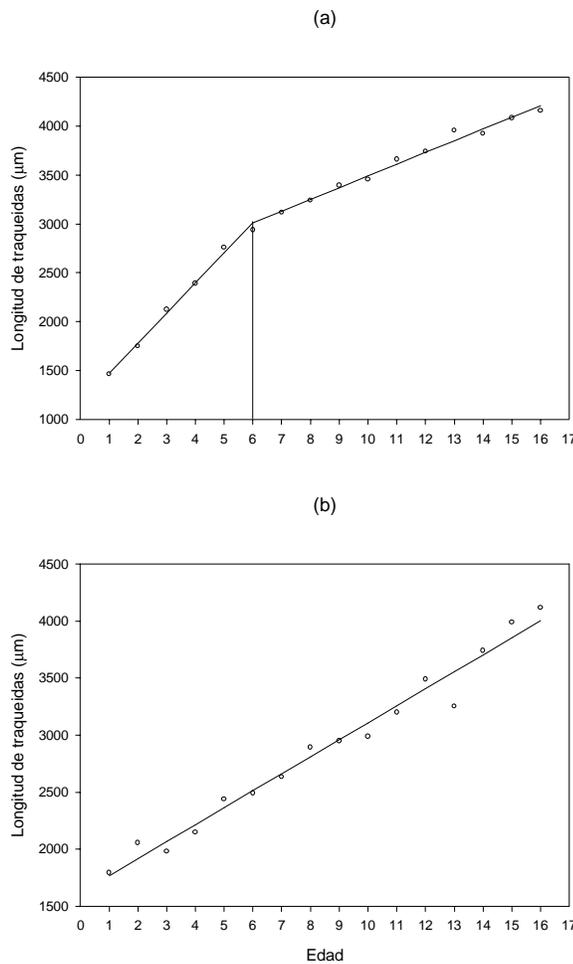


Figura 3. Regresión lineal segmentada mostrando la edad de transición de madera juvenil a madura, estimada con base en la longitud de traqueidas en (a) la familia 95 y (b) la familia 36 en una plantación de *Pinus patula* de 16 años de edad.

La posibilidad de reducir la producción de madera del periodo juvenil por medio de mejoramiento genético, resalta la importancia de hacer un estudio más amplio en *Pinus patula*, en donde se incluya un mayor tamaño de muestras por familia para verificar si las diferencias detectadas entre familias en el presente estudio tienen un origen genético.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que las tres características estudiadas presentan un comportamiento radial típico al de otras especies de coníferas, en particular del género *Pinus*. La longitud de traqueidas fue más efectiva que las otras dos características en la determinación de la edad de transición especialmente a nivel de árboles individuales y de valores promedio por familia. Con base en esta característica y utilizando valores promedio de la población, se estimó una edad de transición de madera juvenil a madura de 10 años. Por otro lado, se encontraron diferencias entre familias en la edad de transición, pero se requiere un mayor número de muestras por familia para verificar si estas diferencias son significativas desde el punto de vista genético.

LITERATURA CITADA

Abdel-Gadir, A. y R. L. Krahmer.

1993a **“Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir”**. Wood and Fiber Sci. 25:242-249.

Abdel-Gadir, A. y R. L. Krahmer.

1993b **“Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood in Douglas-fir”**. Wood and Fiber Sci. 25:384-394.

Barnes, R.D., J.S. Birks, G. Battle and L.J. Mullin.

1994 **“The genetic control of ring width, wood density and tracheid length in the juvenile core of *Pinus patula*”**. S. African For. J. 169:15-20.

Bendtsen, B.A.

1978 **“Properties of wood from improved and intensively managed trees”**. For. Prod. J. 28: 69-72.

Burley, J., W.R. Mills and J.F. Morgan.

- 1972 **“Techniques for measurement of latewood in central African pine timber”**.
Rhod. J. Agric. Res. 10:169-181.

Clark, A. y J. R. Saucier.

- 1989 **“Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pines”**. For. Prod. J. 39:42-48.

Duffield, J.W.

- 1964 **“Tracheid length variation patterns in Douglas-fir and selections of extreme variants”**. Tappi. 47:123-128.

Dvorak, W.S., G.R. Hodge, J.E. Kietzka, F. Malan, L.F. Osorio y T.K. Stanger.

- 2000 **“Pinus patula”**. *In*: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. USA. pp:148-173.

Feria, S. y T. Eguiluz P.

- 1989 **“Variación natural en longitud y dimensiones transversales de las traqueidas en Pinus maximinoi, Pinus oocarpa y Pinus michoacana var. cornuta de la sierra Chatina, Oaxaca”**. *In*: Memoria del I Congreso Forestal Mexicano. Tomo II. Toluca, México. pp: 1030-1061.

Hon, D. y A. Bangui.

- 1996 **“Chemical modification of juvenile wood. Part 1. Juvenility and response of southern pine OSB flakes to acetylation”**. For. Prod. J. 46:73-78.

Huerta, J.

- 1978 Anatomía de la madera de 12 especies de coníferas mexicanas. Bol. Téc. No. 51. INIF, SFF, SARH. México. 36 pp.

Ishengoma, R.C., P.R. Gillah y S. Iddi.

- 1995 **“Basic density, tracheid length and strength properties of juvenile and mature wood of Pinus patula grown in Tanzania”**. S. African For. J. 172:19-23.

Kučera, B.

- 1994 **“A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce”**. Wood and Fiber Sci. 26:152-167.

Lim, D.O. y W.Y. Soh.

1997 **“Cambial development and tracheid length of dwarf pines (*Pinus densiflora* and *P. thunbergii*)”**. IAWA J. 18:301-310

Loo, J.A., C.G. Tauer y R.W. McNew.

1985 **“Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine (*Pinus taeda* L.)”**. *Silvae Gen.* 34:14-19.

Meza, D.J. y A. Romero.

1999 **“Cinco características tecnológicas de la madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr et Golf. de una plantación en la “Sabana”, Oaxaca”**. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 76 p.

McAlister, R. H. y A. Clark.

1992 **“Shrinkage of juvenile and mature wood of loblolly pine from three locations”**. *For. Prod. J.* 42: 25-28.

Neter, J., W. Wasserman y M.H. Kutner

1983 **“Applied Linear Regression Models”**. Richard D. Irwin, Inc. Illinois, U.S.A. 547 p.

Nicholls, J.W. y H.D. Waring.

1977 **“The effect of enviromental factors on wood characteristics”**. *Silvae Gen.* 26:107-111.

Pérez, O.C. y P.C. Olvera.

1981 **“Anatomía de la madera de 16 especies de coníferas”**. Bol. Téc. No. 69. INIF, SFF, SARH. México. 111 p

Perry, P.J.

1991 **“The Pines of Mexico and Central America”**. Timber Press Inc. Portland, Oregon. U.S.A. 231 p.

Sáenz, C., H. Nienstaedt, and J.J. Vargas H.

1994 **“Performance of *Pinus patula* genotypes selected in South Africa and growing in their native Mexican environment”**. *Silvae Gen.* 43: 73-81.

Shepard, R. and J. Shottafer.

1992 **“Specific gravity and mechanical property-age relationship in red pine”**. *For. Prod. J.* 42: 60-66.

Smith, D.M.

1954 **“Maximum moisture content method for determinig specific gravity of small wood samples”**. USDA For. Serv. FPL Rep. 2014. 8 p.

Szymanski, B. y C. Tauer.

1991 Loblolly pine provenance variation in age transition from juvenile to mature wood specific gravity. For. Sci. 37: 160-174.

Tasissa, G. y H.E. Burkhart.

1998 **“Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine”**. Wood and Fiber Sci. 30: 119-127.

Valencia, M., S. y J. J. Vargas H.

2001 **“Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera de *Pinus patula*”**. Agrociencia 35: 109-119

Vargas, H., J., W.T. Adams y R.L. Krahmer.

1994 **“Family variation in age trends of wood density traits in young coastal Douglas-fir”**. Wood and Fiber Sci. 26:229–236

Wright, J.A. y F.S. Malan.

1991 **“Variation in wood and tracheid properties of *Pinus maximinoi*, *P. pseudostrobus* and *P. patula*”**. IAWA Bull. n. s. 12: 467-475.

Wright, J.A, L.F. Osorio y W.S. Dvorak.

1995 **“Recent developments in a tree improvement program with *Pinus patula* in Colombia”**. For. Ecol. and Manag. 72:229-234.

Yang, K.C., C.A. Benson y J.K. Wong.

1986 **“Distribution of juvenile wood in two stems of *Larix laricina*”**. Can. J. For. Res. 16:1041-1049.

Zobel, B.J.

1964 **“Mejora genética en las propiedades de la madera de especies forestales”**. Unasylyva 18:89-103.

Zobel, B.J. and J.P. van Buijtenen.

1989 **“Wood variation. Its causes and control”**. Springer - Verlag, Berlin. 216 p.