

Patrones de variación axial y radial de densidad y longitud de fibras en *Populus* asociados a la formación de madera juvenil y madura

MONTEOLIVA S¹. Y COBAS AC²

¹Doctora, Investigador Adjunto CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. CC 31 (1900) La Plata, Argentina, smonteoliva@yahoo.com.ar

²Ingeniera Forestal, Becaria CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. CC 31 (1900) La Plata, Argentina, anitacobas@yahoo.com.ar

Resumen

Los objetivos del trabajo fueron determinar los patrones de variación axial y radial de densidad y longitud de fibras en plantaciones comerciales de *Populus* y definir en base a esas características la edad de formación de madera juvenil y madura. Se muestrearon 5 árboles de 17 años de *Populus deltoides* cv. `129-60` de una plantación comercial en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se tomaron muestras de 5 alturas en el fuste y se determinó anualmente la densidad de la madera (IRAM 9544) y la longitud de fibras (maceración y microscopía). Para determinar la edad de transición de madera juvenil a madura, se utilizó el método de regresión segmentada sobre el patrón radial de la propiedad a analizar. Este método supone que en el patrón radial de la misma (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. Los resultados indican que la densidad aumenta significativamente con la altura de muestreo (de 0,368 g/cm³ a 0,413 g/cm³ a los 15,6 m) y con la edad. Para todas las alturas la densidad en los primeros 3 años fue de 0,353g/cm³ a 0,364 g/cm³, entre los 3 a 12 años la densidad varió entre 0,365 g/cm³ a 0,390 g/cm³, mientras que en los últimos 5 años fue de 0,390 g/cm³ a 0,400g/cm³. El patrón general muestra que la densidad aumenta en los primeros 11-12 años, y luego presenta variaciones menores. El patrón de variación anual encontrado para la longitud de fibras consiste en un aumento gradual desde la médula (con longitudes de fibras promedio de 1040 μ m) hacia la corteza estabilizándose en los últimos anillos entre 1526 a 1564 μ m (años 14 a 17). La principal diferencia se encontró entre los primeros anillos (1 y 2) y los últimos (14/17). Este patrón se observó en todas las alturas de muestreo, encontrándose en las alturas superiores mayor homogeneidad de valores entre los grupos de anillos centrales (3 a 14). La longitud de fibras se mantuvo constante con la altura de muestreo. La zona de transición entre la madera juvenil y madura en los álamos analizados, tomando como propiedad a la densidad y la longitud de fibras, varió entre los 7 y 9 años en todas las alturas de muestreo estudiadas.

Palabras clave: variación axial, variación radial, densidad básica, longitud de fibras, madera juvenil

Introducción

La calidad de la madera destinada a proveer de material fibroso a la industria de la pulpa y el papel está determinada por la variabilidad de sus características anatómicas, físicas y químicas (Yanchuk *et al*, 1990; Ting-Feng *et al* 2006). Una de las propiedades más importantes para la determinación de la calidad y uso final de la madera es la densidad (van Buijtenen, 1982; Barnett & Jeronimidis, 2003). Este atributo se asocia con los rendimientos del proceso

industrial, el consumo de reactivos, la resistencia del papel y su opacidad (Villegas *et al*, 2005; Valente *et al*, 1992). La longitud de fibras es también una característica cuya variación está asociada con el logro de diferentes calidades en los papeles en términos de sus resistencias, propiedades ópticas y características superficiales (Igartúa *et al*, 2002).

Los valores de densidad de la madera y de la longitud de fibra están influenciados por la posición dentro del árbol. En este sentido, se han demostrado patrones de variación radial (médula- corteza) y patrones de variación axial (base-ápice) asociados a distintas edades fisiológicas del cambium (Yang, 1994; Zobel & Sprague 1998). Para las latifoliadas de porosidad difusa como los álamos, el patrón general de variación radial para la densidad consiste en un incremento de la médula hacia la corteza (Zobel & Sprague 1998; Matyas & Peszlen, 1996), sin embargo se han reportado patrones de densidad que difieren del general para distintas especies y clones de álamos (Yanchuk *et al* 1990, Matyas & Preszlen 1996). En cambio la longitud de fibras presenta un patrón radial uniforme, incrementando progresivamente en sentido médula-corteza. (Koubaa *et al*, 1998; Monteoliva *et al*, 2005; Debell *et al*, 2002; Yanchuk *et al*, 1990).

Estas variaciones de densidad y longitud de fibras dentro del árbol están asociadas a la formación de madera juvenil y madera madura. El leño juvenil fue definido para las coníferas como la zona más cercana al centro del árbol, que se extiende desde la base hasta el tope y se aplica con algunas variaciones en las angiospermas. El tamaño de este cilindro central puede variar considerablemente aún entre árboles de una misma especie y edad. (Zobel y Jett, 1995). La literatura indica que la madera juvenil está asociada a una edad fisiológica temprana de las células cambiales y presenta menor densidad, elementos fibrosos más cortos y propiedades de resistencia menores en comparación con la madera madura (Yanchuk *et al*, 1990; Zobel & Sprague, 1998 DeBell *et al*, 2002)

El rápido crecimiento de las salicáceas produce árboles que alcanzan un tamaño comercial a edades muy tempranas con turnos de aprovechamiento de entre los 10-12 años. Esta disminución en la edad de rotación incrementa la proporción de leño juvenil, aunque esta proporción no está cuantificada para las plantaciones comerciales de álamo.

El objetivo del trabajo fue determinar los patrones de variación axial y radial de densidad y longitud de fibras en plantaciones comerciales de *Populus deltoides* `Australia 129-60` y definir en base a esas características la edad de formación de madera juvenil y madura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron árboles de una plantación comercial de *Populus deltoides* `Australia 129-60` procedentes de la 4º Sección de Islas del Delta, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Se seleccionaron 5 árboles con buen estado sanitario de 17 años de edad. Se apearon y marcaron en los mismos cinco alturas en el fuste (base, 1,3m, 4,2m, 8,1m, 15,9m), de cada una de ellas se sacó un disco completo de 5 cm. de espesor. De cada disco se sacó una tabla central en la cual se marcaron los anillos de crecimiento, previa preparación de la superficie transversal con sucesivas lijas de diferentes granulometrías (de 80 a 120) hasta la perfecta visualización de los elementos celulares. Para la delimitación de los anillos se utilizó una lupa binocular (10x). Sobre la tabla se cortaron probetas de 8cm³ en cada anillo de crecimiento, en ambos radios. Por lo tanto se obtuvieron 2 muestras por anillo cuyos valores se promediaron. Además de obtuvo una astilla por probeta para medir la longitud de fibras.

La determinación de densidad básica (unidades) se realizó según la norma IRAM 9544. Se registró el volumen saturado por inmersión total de la pieza en agua, y el peso seco en estufa a 102 °C +/- 3 °C, pesado inmediatamente después de que la pieza alcanzara un equilibrio térmico con el ambiente. La densidad se determinó por el cociente entre el peso seco de la muestra y el volumen saturado de la misma.

Para la longitud de fibras (unidades) se midieron 25 fibras por posición radial (anillo de crecimiento) con un microscopio óptico con analizador de imágenes, previa maceración de dichas posiciones según la técnica de maceración de Franklin (1945).

Se realizaron ANOVAS con árbol y posición radial (edad) como fuentes de variación. El contraste de medias se realizó con el test de Tukey. Para determinar la edad de transición de madera juvenil a madura, se utilizó el método de regresión segmentada sobre el patrón radial de la propiedad a analizar. Este método supone que en el patrón radial de la misma (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. El modelo de regresión por segmentos general se presenta en la ecuación 1 y los modelos para las porciones de madera juvenil y madura en las ecuaciones 2 y 3 respectivamente (Meza Juárez *et al*, 2005; Tasissa and Burkhart, 1998).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2(x_i - T) x_2 + e_i \quad (1)$$

Donde:

Y_i = característica de interés en el i -ésimo anillo de crecimiento

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = 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 : $x_2 = 0$ 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 $x_2 = 0$ (madera juvenil):

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2)$$

y cuando $x_2 = 1$ (madera madura)

$$E(Y_i) = \beta_0 - (\beta_2 T) + (\beta_1 + \beta_2) x_i \quad (3)$$

Se aplicó el método Piecewise Linear Regression (Breakpoint Regresión, Statistica v6)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrones de variación radial y axial

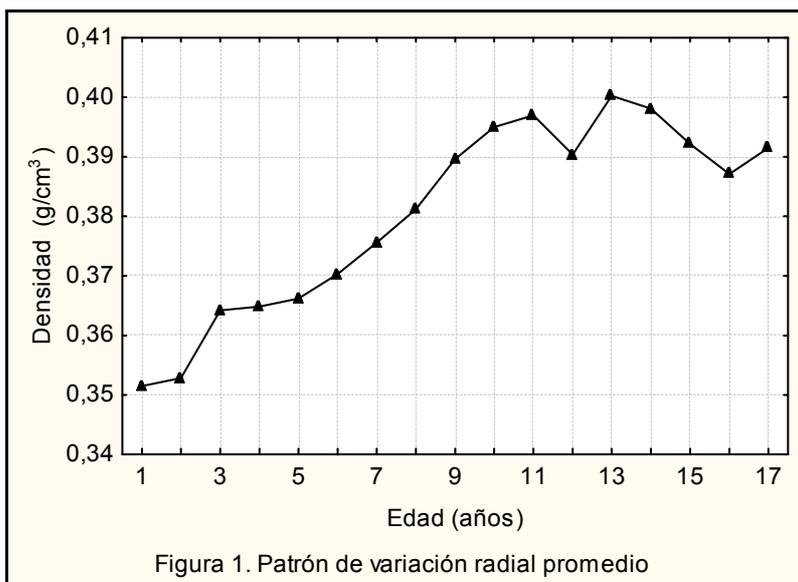
Densidad

Los valores de densidad anual obtenidos a las diferentes alturas de muestreo se expresan en tabla 1.

Tabla 1: valores de densidad promedio por altura (g/cm ³)						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					Promedio
	A (0,3 m)	B (1,3 m)	D (4,2 m)	F (8,1m)	I (15,9 m)	
1	0,336 a *	0,342 a	0,339 a	0,356 a	0,383 a	0,352
2	0,339 a	0,339 a	0,340 a	0,359 a	0,383 a	0,353
3	0,354 abc	0,346 ab	0,347 a	0,370 ab	0,403 ab	0,364
4	0,340 a	0,351 abc	0,358 abc	0,365 ab	0,410 bc	0,365
5	0,350 ab	0,351 abc	0,354 ab	0,372 ab	0,406 b	0,366
6	0,347 ab	0,351 abc	0,358 abc	0,384 ab	0,412 bc	0,370
7	0,353 abc	0,350 abc	0,378 bcd	0,386 bc	0,410 bc	0,376
8	0,352 abc	0,359 abcd	0,379 bcd	0,387 bc	0,428 cd	0,381
9	0,367 abcd	0,367 acbd	0,381 bcd	0,402 bcd	0,430 cd	0,390
10	0,382 cd	0,369 abcd	0,383 cd	0,405 bcd	0,436 d	0,395
11	0,378 bcd	0,364 abcd	0,385 cd	0,417 d	0,441 d	0,397
12	0,384 cd	0,377 bcd	0,390 d	0,411 cd		0,390
13	0,389 d	0,389 d	0,405 d	0,418 d		0,400
14	0,393 d	0,383 cd	0,402 d	0,415 d		0,398
15	0,391d	0,390 d	0,395 d			0,392
16	0,396 d	0,378 bcd				0,387
17	0,391 d					0,392
Promedio	0,367	0,363	0,373	0,389	0,413	

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

Como se observa en la tabla 1 y Figura 1 la densidad presentó un patrón de variación radial anual (promedio de las 5 alturas), en el cual la densidad aumentó desde la médula hacia la corteza hasta que sus valores se estabilizaron (años 10 y 11 aproximadamente) y fluctuaron alrededor de un rango de valores.



La figura 1 sumado al análisis de grupos homogéneos (Tabla 1), permitieron determinar un patrón general que consistió en la diferenciación de tres grupos. Los primeros anillos (años 1 y 2) con densidades promedio de 0,356 a 0,359 g/cm³ y los últimos anillos (años 11 a 17) cuyo rango de densidades promedio varió entre 0,396 a 0,418 g/cm³ Los anillos centrales (años 3 a 10) presentaron una variación constante, pudiéndose considerar un grupo homogéneo cuyos valores se relacionaron tanto con los primeros como los últimos anillos (0,347 a 0,411 g/cm³). Se observó que a medida que aumentamos la altura de nuestro, los valores de densidad se incrementaron. Asimismo, las tendencias de la variación radial, se repitieron en las distintas alturas.

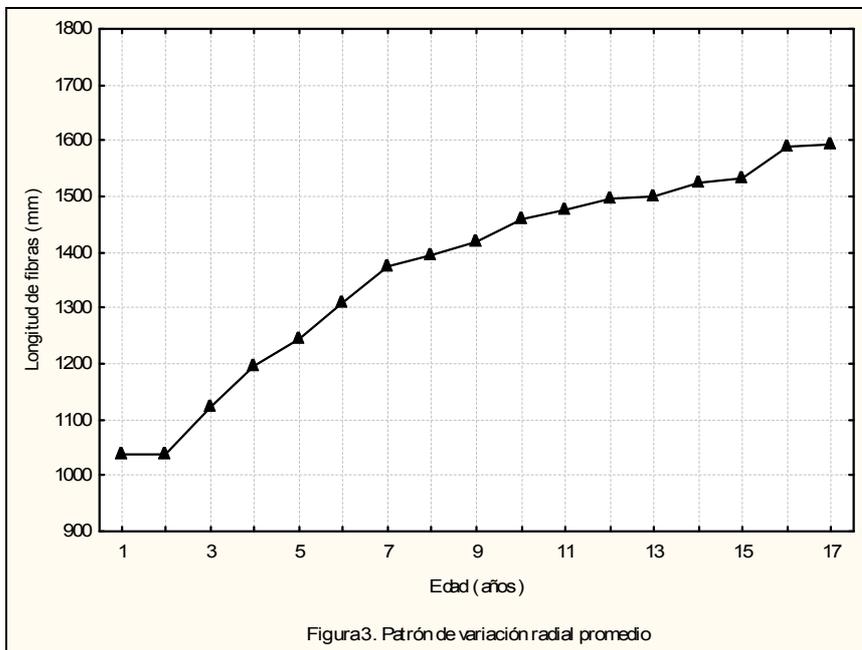
Los análisis de varianza dieron valores significativos de p (0,0000) cuando se analizó la influencia de la edad (posición radial) sobre la densidad. Asimismo, cuando se analizó la influencia de los árboles sobre la densidad se observó que las alturas A, B e I fueron fuentes significativas de variación (p= 0,000) no ocurriendo lo mismo para las alturas D y F (p= 0,854 y p= 0,256 respectivamente).

Longitud de Fibras

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					Promedio
	A (0,3 m)	B (1,3 m)	D(4,2m)	F (8,1m)	I (15,9 m)	
1	988,76 a*	1032,27 a	1058,37 a	1047,16 a	1073,72 a	1040,06
2	988,76 a	1032,27 a	1058,37 a	1047,16 a	1073,72 a	1040,06
3	1126,13 b	1100,98 b	1156,14 b	1112,45 b	1121,49 b	1123,44
4	1154,23 b	1182,34 b	1233,61 c	1201,54 c	1216,64 c	1197,67
5	1178,82 b	1231,58 c	1320,27 d	1263,96 d	1225,13 c	1243,95
6	1245,87 c	1289,49 c	1362,22 de	1342,16 e	1306,04 d	1309,16

7	1323,24 d	1368,09 d	1398,71 ef	1389,10 ef	1397,94 e	1375,42
8	1305,54 d	1396,94 d	1469,42 ghi	1388,56 ef	1416,45 ef	1395,38
9	1370,63 d	1419,92 de	1443,60 fg	1430,14 fg	1437,37 ef	1420,33
10	1441,60 e	1474,39 ef	1463,21 gh	1471,43 gh	1448,62 f	1459,85
11	1440,35 e	1449,97 efg	1475,50 ghi	1502,29 hij	1511,77 g	1475,97
12	1437,94 e	1527,69 gh	1518,70 i	1482,84 hi		1491,79
13	1481,40 e	1472,06 gh	1512,90 hi	1526,36 ij		1498,18
14	1473,44 e	1550,86 efg	1515,04 i	1539,82 j		1519,79
15	1535,84 f	1534,42 hi	1508,36 ghi			1526,21
16	1547,99 f	1580,35hi				1564,17
17	1552,25 f					1552,25
Promedio	1328,99	1352,73	1366,30	1338,93	1293,54	

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey



Como se observa en la tabla 2 y Figura 3 la longitud de fibras presentó un patrón de variación radial anual (promedio de las 5 alturas), en el cual la longitud aumentó desde la médula hacia la corteza.

Se determinó un patrón general que consistió en la diferenciación de 5 grupos. Los primeros anillos (años 1 y 2) con longitudes de fibras promedio de 1040 μm y los últimos anillos (años 15 a 17) cuyo rango de longitudes de fibras promedio varió entre 1526 a 1564 μm son los que presentan mayor diferencia. Dentro de los anillos centrales (años 3 a 14) se pueden observar 3 grupos homogéneos constituidos por: primer grupo, anillos 3 a 6 (1123 a 1300 μm); segundo grupo: anillos 7 a 9 (1337 a 1420) y tercer grupo: anillos 10 a 14 (1459 a 1519). Cabe destacar que a medida que aumentamos la altura de muestreo los anillos centrales comienzan formar grupos homogéneos cuyos valores se relacionan entre sí a partir del anillo 6. Se observó que a medida que aumentamos la altura de muestreo, no hubo un aumento destacado de los valores de longitud de

fibras. Asimismo, las tendencias de la variación radial, se repitieron en las distintas alturas.

Los análisis de varianza dieron valores significativos de p (0,0000), respecto del nivel de 0,05 de probabilidad, cuando se analizó la influencia de la edad (posición radial) y de la altura de muestreo sobre la longitud de fibras.

Edad de transición de madera juvenil a madura

Tomando como propiedad la densidad se obtuvieron las siguientes ecuaciones de regresión al aplicar el modelo de segmentación lineal (Tabla 3).

Tabla 3: Edad de transición entre madera juvenil y madura según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)	Modelo	R^2	
A (0,3m)	9	*	$y=0,3315+0,0027x$	0,85
		**	$y= 0,3634+0,0018x$	
B (1,3 m)	9	*	$y=0,3414+0,0005x$	0,84
		**	$y=0,3570+0,0019x$	
D (4,2 m)	8	*	$y=0,3394+0,0030x$	0,92
		**	$y=0,3689+0,0022x$	
F (8,1 m)	8	*	$y=0,3528+0,0039x$	0,90
		**	$y=0,3787+0,0028x$	
I (15,9 m)	7	*	$y=0,3802+0,0040x$	0,88
		**	$y=0,4054+0,0030x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-maduro

** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-maduro

Como puede apreciarse en la tabla 3 se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R^2 elevados. El peor ajuste se presentó a la altura del pecho (altura B).

Tomando como propiedad la longitud de fibras se obtuvieron las siguientes ecuaciones al aplicar el modelo de segmentación lineal (Tabla 4).

Tabla 4: Edad de transición entre madera juvenil y madura según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)	Modelo	R ²
A (0,3m)	8	*	0,86
		**	
B (1,3 m)	7	*	0,86
		**	
D (4,2 m)	7	*	0,86
		**	
F (8,1 m)	7	*	0,86
		**	
I (15,9 m)	7	*	0,86
		**	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-maduro

** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-maduro

Como puede apreciarse en la tabla 4 se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados.

Se determinó que la zona de transición entre madera juvenil y madura para los álamos analizados, tomando como propiedades la densidad y la longitud de fibras, fue entre los años 7 y 9, dependiendo de la altura en el fuste analizada.

Aplicando el mismo modelo estadístico y teniendo en cuenta la densidad como propiedad, Bendtsen & Senft (1986) determinaron que el punto de demarcación entre madera juvenil y madura en *Populus* de 30 años se encontraba alrededor de los 17 a 18 años. Esta diferencia en la demarcación de la zona de transición entre madera juvenil y madura puede deberse a que los cambios en las propiedades ocurren de manera gradual variando dentro del mismo árbol, sitio, y tratamientos silvícolas (Tasissa y Burkhart, 1998; Yang y Benson, 1997).

Teniendo en cuenta la longitud de fibras como propiedad, los valores obtenidos en este trabajo coinciden con los presentados por Koubaa *et al* (1998) en *Populus x euroamericana* de 9 años de edad y De Bell *et al* (2002) en *Populus sp.* de 9 años de edad. Sin embargo en estos trabajos la determinación del punto de demarcación entre madera juvenil y madura se realizó de manera visual analizando los gráficos obtenidos en las respectivas investigaciones.

CONCLUSIONES

El patrón de variación anual encontrado para la densidad consiste en su aumento gradual, desde la médula hacia la corteza, estabilizándose en la edad

de 10-11 años. La principal diferencia se encontró entre los primeros anillos (1y2) y los últimos (11/ 17). Este patrón se observó en todas la alturas de muestreo. La densidad aumentó con la altura de muestreo, siendo más elevada en las alturas superiores del fuste.

El patrón de variación anual encontrado para la longitud de fibras consiste en un aumento gradual desde la médula hacia la corteza estabilizándose en los últimos anillos (14 a 17). La principal diferencia se encontró entre los primeros anillos (1 y 2) y los últimos (14/17). Este patrón se observó en todas las alturas de muestreo, encontrándose en las alturas superiores mayor homogeneidad de valores entre los grupos de anillos centrales (3 a 14). La longitud de fibras se mantuvo constante con la altura de muestreo.

La zona de transición entre la madera juvenil y madura en los álamos analizados, tomando como propiedad a la densidad y la longitud de fibras, varió entre los 7 y 9 años en todas las alturas de muestreo estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

A Papel Prensa S.A., por facilitar el acceso al establecimiento y financiar el muestreo.

BIBLIOGRAFÍA

- 1- Barnett, J.R. & Jeronimidis G. (2003). Wood Quality and its biological basis. CRC Press, 226pp.
- 2- Bendtsen, B.A. & Senft, J. (1986). Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. Wood and Fiber Science, 18(1), 23-38.
- 3- DeBell, D.S.; Singleton, R.; Harrington, C.A. y Gartner, B.L. (2002). Wood density and fiber length in young *Populus* stem: relation to clone, age, growth rate, and pruning. Wood and Fiber Science, 34(4), 529-539.
- 4- Igartúa, D.V.; Monteoliva, S. E.; Monterrubianesi, M.G.; Villegas, M.S. (2002). Calidad del leño en *Eucalyptus globulus ssp. globulus*. Variación de la densidad básica y la longitud de fibras en Lobería, provincia de Buenos Aires, Argentina. Rev. Fac. Agr. 105 (1), 35-45.
- 5- Koubaa, A; Hernandez RE, Beaudoin M, Poliquin J. (1998). Interclonal, intraclonal and within-tree variation in fiber length of poplar hybrid clones. Wood and Fiber Science 30(1), 40-47.
- 6- Mátyás, C. y Peszlen, I. (1997). Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. Silvae Genetica, 46(2-3), 64-72.
- 7- Meza Juárez, D. J. et al. (2005). Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl. et Cham. Ra Ximhai, Vol.1, N° 2, 305-324.
- 8- Monteoliva, S; Senisterra, G; Marlats, R. (2005). Variation of wood density and fibre length in six willow clones (*Salix spp.*). IAWA Journal 26 (1), 197-202.
- 9- Tasissa, G & Burkhart, H.E. (1998). Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine trees. Wood and Fiber Science, 30 (2), 118-127.

- 10- Ting-Feng, Y. et al. (2006) .Morphological and chemical variations between juvenile wood, mature wood, and compression wood of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Holzforschung*, Vol. 60, 1–8.
- 11- Valente, C.A. et al (1992). Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel : Technological component. *Appita* 45 (6), 403-407.
- 12- Van Buijtenen, J.P (1982). Fiber for the future. *TAPPI* 65 (8), 10-12.
- 13- Villegas, M.S. y Marlats, R. (2005). Altura de extracción de la muestra para la evaluación de densidad básica y blancura en madera de *Salix sp.* *Bosque* 26 (3), 121-132.
- 14- Yanchuk, A.D. & Micko, M.M. (1990). Radial variation of wood density and fibre length in trembling aspen. *IAWA Bull*, 11(2), 211-215.
- 15- Yang, K.C. et al. (1994). Formation and vertical distribution of juvenile and mature wood in a single stem of *Cryptomeria japonica*. *Can. J. For. Res.*, 24, 969-975.
- 16- Yang, K.C. & Benson, C.A. (1997). Formation, distribution and it's criteria for determining the juvenile-mature wood transition zone. En: *Timber management toward wood quality and end-product value. Proceed. CTIA/IUFRO Int. Wood Quality Workshop, Canada.*: IX-7.
- 17- Zobel, B.J. & Jett, J.B. (1995). *Genetics of wood production*. Springer-Verlag, Germany, 337 pp.
- 18- Zobel B J & J R Sprague. (1998). *Juvenile wood in forest trees*. Ed Springer-Verlag, Berlín.