

INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA ANATÓMICA EN LA PERMEABILIDAD ESPECÍFICA TRANSVERSAL AL GAS DEL PINO RADIATA*

Linette Salvo¹; Rubén Ananías²; Alain Cloutier³

RESUMEN

La permeabilidad específica es una propiedad de la madera que depende fundamentalmente de los espacios disponibles para el flujo del fluido a través de su estructura anatómica. Este trabajo tiene como objetivo interrelacionar los detalles de la estructura anatómica (ancho de los anillos de crecimiento, diámetro de traqueidas, frecuencia de traqueidas, frecuencia de canales resiníferos, espesor de la pared celular, diámetro de la cámara de la punteadura y canal del margo) del pino radiata (*Pinus radiata* D. Don.) con la permeabilidad transversal gaseosa. El diseño experimental considera como factores variables el tipo de madera: juvenil y adulta y la dirección del flujo: radial y tangencial.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, las propiedades anatómicas estiman con un coeficiente de determinación de 97 % o más los valores de permeabilidad específica transversal gaseosa de pino radiata a través de modelos de regresión múltiple. En madera adulta, la permeabilidad específica gaseosa radial y tangencial son correlacionadas linealmente con el diámetro de las traqueidas de la madera temprana ($r=0.68$) y la frecuencia de las traqueidas de madera tardía ($r=0.75$), respectivamente. Diferencias significativas en los valores de la permeabilidad específica tangencial son encontradas entre madera juvenil ($0.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) y adulta ($1.4 \times 10^{-14} \text{ m}^2$).

Palabras claves: permeabilidad específica transversal, anatomía de la madera, pino radiata

ABSTRACT

The specific permeability of wood depends basically on the space available for fluid flow through its microstructure. The objective of this work was to determine the relationships between anatomical features of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) wood (growth rings width; tracheids diameter and frequency, cell wall thickness; resin canals frequency; diameter of the bordered pits chamber and Margo) and the transverse gas permeability. The type of wood (juvenile and mature wood) and the direction of flow (radial and tangential) were considered as the variables in the experimental design.

The results obtained show that the features studied result in multiple regression equations of transverse specific gas permeability of radiata pine with coefficients of determination of 97% and higher. For mature wood, the radial and tangential specific gas permeabilities are linearly correlated to earlywood tracheids diameter ($r=0.68$) and latewood tracheids frequency ($r=0.75$). Significant differences were found between tangential gas specific permeability measured in juvenile ($0.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) and mature wood ($1.4 \times 10^{-14} \text{ m}^2$).

Keywords: transverse specific permeability, wood anatomy, radiata pine

*Recibido 16.06.2004. Aceptado: 20.09.2004. Maderas: Ciencia y Tecnología 6(1):33-44.

¹Magister en Ciencias y Tecnología de la Madera. Ingeniero Civil en Industrias Forestales. lsalvo@ubiobio.cl

²Profesor Asociado. Departamento Ingeniería en Maderas. Universidad del Bío-Bío. Chile. ananias@ubiobio.cl

³Profesor Titular. Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval. Canadá. alain.cloutier@sbf.ulaval.ca

INTRODUCCIÓN

La madera es un material poroso, heterogéneo, anisotrópico y biodegradable. Su carácter poroso es debido principalmente a los lúmenes de las células y a los espacios intercelulares. La heterogeneidad de la madera es producto de su constitución anatómica ya que las células que la integran pueden ser de naturaleza, orientación, forma y composición química variable. La anisotropía se origina por las diferencias que presentan las células en los tres planos de la madera. De esto se deduce, que las diferencias estructurales de las maderas deben reflejarse en su comportamiento al proceso de transporte de fluidos: flujo hidrodinámico (permeabilidad) y difusional entre en estos tres planos.

De acuerdo a la ley de Darcy la permeabilidad específica al gas se representa como:

$$k = \frac{QL}{A\Delta P} \times \frac{1}{\eta} \times \frac{P}{\bar{P}}$$

donde: k : permeabilidad específica al gas con flujo deslizante (m^2); Q : flujo volumétrico (m^3/s); A : superficie (m^2); ΔP : diferencia de presión (Pa); L : longitud (m); P : presión a la que se mide el flujo (Pa); η : viscosidad ($Pa \cdot s$); \bar{P} : presión promedio (Pa).

Cuando el flujo permea a través de capilares cuyo diámetro es del mismo orden de magnitud que el camino libre medio entre las moléculas del gas, el flujo deslizante se manifiesta y se vuelve significativo. Así sus efectos en las medidas de permeabilidad deben ser considerados. La permeabilidad al gas corregida por flujo deslizante puede ser obtenida de la ecuación de Klinkenberg (Siau 1971, 1984).

Tal como informado en numerosa literatura, el comportamiento de la permeabilidad específica de la madera esta ligado fundamentalmente a las características anatómicas de la madera, en particular la proporción de albura/duramen, madera temprana/tardía o madera juvenil/adulta (Bailey 1964; Banks 1968; Comstock 1965, 1967; Kollman y Côté 1968; Tesoro *et al.* 1966; Thomas y Nicholas 1966; Comstock y Côté 1968; Siau 1971; Rius y Valenzuela 1981; Flynn 1995; Milota *et al.* 1995; Rice y D'Ofrio 1996; Chen *et al.* 1998)

Así, diversos autores han relacionado la estructura microscópica de la madera con el flujo a través de las coníferas. Wardrop y Davies (1961), trabajando con *Pinus radiata*, determinan que las traqueidas longitudinales son las responsables del flujo (citado por Siau 1971 y 1984). Behr *et al.* (1969), indican que las principales responsables de la conducción del fluido, son los lúmenes de las traqueidas longitudinales, las interconexiones entre pares de puntuaciones bordeadas, las radio traqueidas y las células parenquimáticas del radio (citado por Siau, 1971). Comstock y Côté en 1968 y Meyer en 1970, sostienen que las puntuaciones de la madera, son los conductos de flujo más importantes en las especies coníferas, su número, tamaño y grado de obstrucción determinan el rango de permeabilidad.

DeGroot *et al.* (1986), indican que las células de los radios, incluyendo las radio traqueidas y las membranas de las puntuaciones del campo de cruce, tienen más facilidad para ser tratadas con preservantes, que las traqueidas longitudinales (citado por Flynn, 1995). Similar comportamiento es reportado por Usta y Hale en 2003.

Además, los canales resiníferos verticales tienen una contribución importante en el transporte de fluidos a través de la madera, éste depende del tamaño, número, distribución y continuidad de los canales resiníferos. Matsumura *et al.* (1998), muestran mediante técnicas de tinción el aporte de los canales resiníferos y de las traqueidas que rodean estos canales. Igualmente Booker en 1990, señala que los canales resiníferos son las vías primarias de flujo en la albura de *Pinus radiata*.

Por otra parte, según Kininmonth y Whitehouse (1991), la permeabilidad tangencial es mayor a la radial pero no significativamente, debido a que la mayoría de las traqueidas se encuentran unidas a pares de puntuaciones por sus caras radiales, contribuyendo de esta forma al flujo tangencial. Así mismo, Zimmermann en (1983), señala que el flujo tangencial es superior al flujo radial, debido a que las traqueidas se encuentran conectadas en la mayoría de los casos, por sus paredes radiales a pares de puntuaciones areoladas, lo que implica que el flujo difunda fácilmente dentro del anillo de crecimiento en la dirección tangencial. Mientras que Milota *et al.* (1994), en *Pinus taeda*, muestran que la permeabilidad específica en el sentido radial, es significativamente más alta que en el sentido tangencial como consecuencia de un flujo predominantemente a través de la estructura de los radios. En albura pino radiata según Kininmonth y Whitehouse (1991), la madera temprana es más permeable que la madera tardía, en cambio el duramen de pino radiata tiene una baja permeabilidad.

En tal contexto, el objetivo de este estudio es medir la permeabilidad específica al gas de la madera de *Pinus radiata*, en las direcciones tangencial y radial y relacionarla con características anatómicas de la madera como el ancho de los anillos de crecimiento, diámetro de las traqueidas, frecuencia de las traqueidas, espesor de la pared celular y geometría de las puntuaciones, entre otras.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se utiliza madera proveniente de diez árboles de *Pinus radiata* D. Don de 26 años, creciendo en el sector "Patagual" ubicado a 20 Km. al este de Concepción, Chile. Los árboles son recogidos teniendo presente criterios de dominancia, rectitud del fuste y sanidad. De cada árbol, a la altura inmediatamente después al DAP se obtiene una troza, de la que se extraen tablones de 1.20 m de largo y 50 cm de ancho en los laboratorios de silvotecnología de la Universidad de Concepción, Chile. Posteriormente tales tablones son preparados en el Pabellón de Tecnología de la Madera PTM de la Universidad del Bío-Bío, las muestras para la determinación de las propiedades anatómicas y la permeabilidad de la madera.

Determinación de las características anatómicas

Una muestra de la sección transversal de cada troza es utilizada para analizar las características de los anillos de crecimiento. Para realizar las mediciones, las muestras son acondicionadas en cámara de clima a 20 °C y 12 % de contenido de humedad y cortadas a un espesor de 1.7 mm. Luego son transportados en bolsas herméticas, hasta los laboratorios de la Universidad Laval en Canadá para realizar las mediciones pertinentes. Allí, el ancho y densidad de los anillos de crecimiento, proporción y densidad de madera tardía, son determinados mediante un equipo de rayos X y analizados a través del software comercial (Quintek X-Ray Tree Ring Analyser). Este equipo actúa haciendo

un barrido de la superficie (escáner), capturando todas las características de los anillos de crecimiento de una pieza de madera desde médula a corteza. Este procedimiento se emplea además para apoyar la selección del tipo de madera: juvenil y adulta.

Para la determinación de las características anatómicas microscópicas, son preparados cortes microtómicos a partir de cubos de madera de 2x2 cm en cortes tangencial y radial y separados por tipo de madera: juvenil y adulta. Luego son analizados a través de análisis de imágenes con apoyo de un software comercial (Wincell), registrándose las siguientes características anatómicas: espesor de la pared celular, diámetro del lumen, diámetro de la cámara de puntuaciones, diámetro del torus, diámetro del pasaje del margo ("canal del margo"), frecuencia por mm^2 de: traqueidas, puntuaciones y canales resiníferos.

Mediciones experimentales de la permeabilidad

Para la determinación de permeabilidad transversal al gas, la madera verde es acondicionada en cámara de clima a 20 °C hasta 12 % de contenido de humedad. Las muestras son llevadas a discos de 50 mm de diámetro, 8 mm de espesor, sellados sus bordes con silicona y luego transportadas en bolsas herméticas hasta los laboratorios de la Universidad Laval en Canadá para realizar las mediciones de permeabilidad. Doce discos, correspondientes a 6 en corte radial y tangencial, para madera juvenil y adulta son preparados desde cada uno de los diez árboles. La permeabilidad aparente del gas (aire) fue medida a tres niveles de presión, (50 a 350 kPa) y replicada tres veces.

Análisis estadístico

Utilizando los softwares comerciales (Statgraphics y Sas), se realiza un análisis exploratorio de datos para la determinación de puntos atípicos junto con la determinación de los coeficientes de kurtosis y asimetría, para evaluar la distribución de probabilidad de los datos (distribución normal). Se emplea un diseño completamente aleatorio con sub-muestras y se aplica un test de diferencias de medias (test Tukey) para madera juvenil y madera adulta y otro para madera temprana y tardía. Se confecciona con las medias, una matriz de correlación de Pearson, para encontrar la combinación de columnas que están estrechamente relacionadas, esto considerando la existencia de correlaciones lineales entre las propiedades anatómicas y las medidas de permeabilidad. Finalmente se construyen diferentes modelos de regresión simple y múltiple, eligiendo el mejor modelo de acuerdo a los valores de significación (valor p), gráficos de residuos y coeficiente de determinación (R^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación radial del ancho de los anillos de crecimiento y la densidad normal son presentados en la Figura 1. Se observa variabilidad radial del ancho del anillo de crecimiento de madera temprana. Cerca de la médula y hasta el año 3 tiende a aumentar luego descende hasta el anillo 7, entonces presenta un comportamiento intermitente, producto de las podas y raleos hasta el anillo 15, finalmente tiende a disminuir gradualmente. Por otro lado la variabilidad radial del ancho de anillo de crecimiento de madera tardía es relativamente constante. La densidad de la madera

tiende a disminuir desde la médula hasta el anillo 3 desde 440 a 400 kg/m³, entonces comienza a incrementar hasta 520 kg/m³ en el anillo 8, a continuación se mantiene en alrededor de 500 kg/m³ hasta el anillo 16 y luego continua aumentando hasta cerca de 600 kg/m³ en el anillo 26.

En el cuadro 1 se presentan los valores medios de algunas de las características de la estructura anatómica del pino radiata. A través del análisis de normalidad, se prueba que los datos provienen de una distribución normal. Los resultados del test de Tukey que se muestra en la cuadro 1, sobre aproximadamente 3000 células de madera juvenil y adulta, indican que solo las características con (*) presentan diferencias estadísticas significativas entre madera juvenil y adulta. Se aprecia que la madera adulta tiene una mayor magnitud, en la mayor parte de las características pero que no es estadísticamente significativa, excepto en el ancho de anillos de crecimiento, densidad de los anillos y frecuencia de traqueidas de madera temprana.

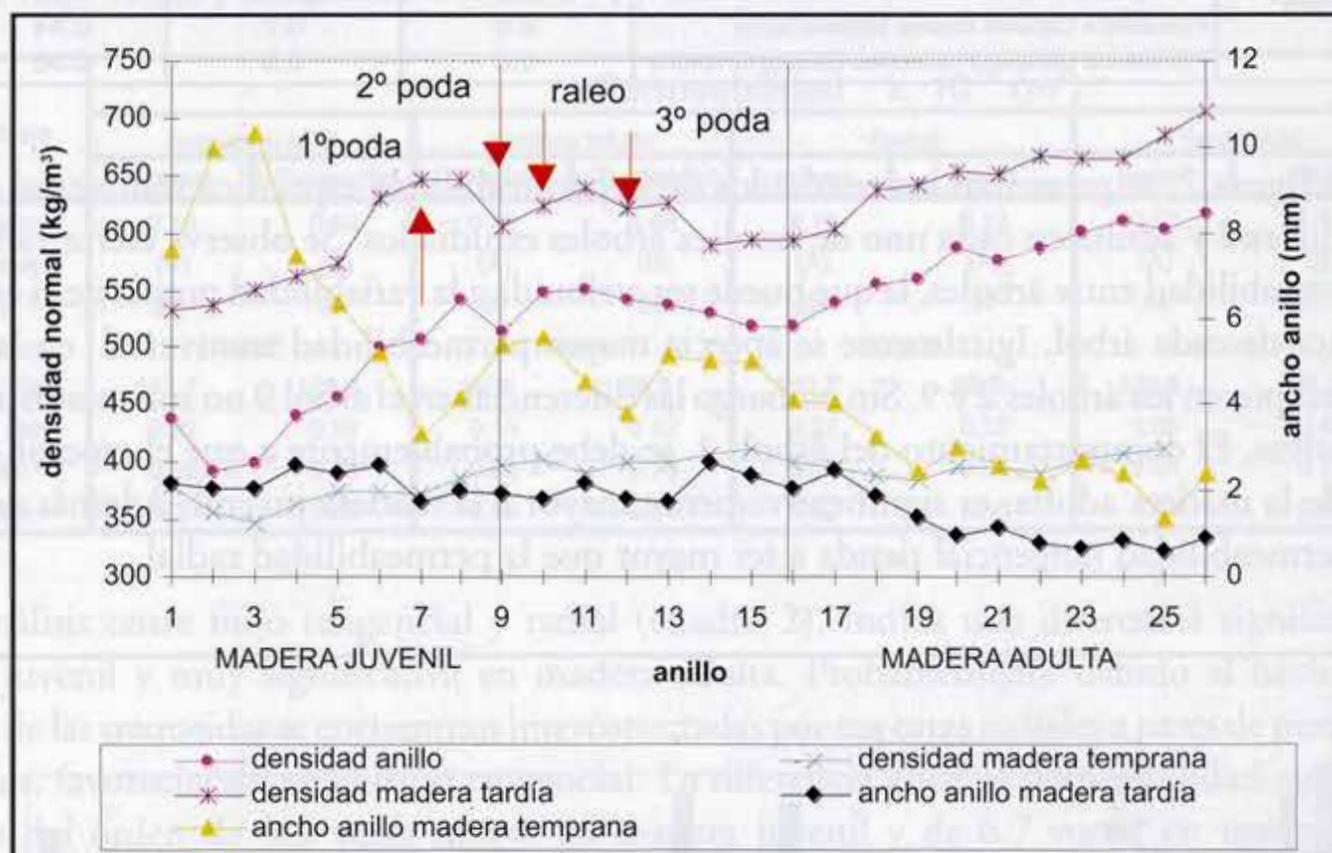


Figura 1: Variación radial promedio del ancho de los anillos de crecimiento y de la densidad normal de pino radiata

Como se ha discutido ampliamente en la literatura (Comstock y Côté, 1968, Meyer, 1970; Siau, 1971, 1984; Ward, 1986; Kininmonth y Whitehouse, 1991) un aspecto de la estructura anatómica que favorece el flujo de un fluido a través de las coníferas son las punteaduras. En este sentido, la peculiar organización de la membrana de la punteadura en torus y margo en la interconexión entre dos traqueidas es medida en este trabajo. En particular el canal del margo, que representa la zona permeable de la membrana de la punteadura varía entre 7.1 y 7.4 mm en madera juvenil y adulta respectivamente. Siau en (1984), reporta valores de hasta 8 mm como apertura efectiva para el flujo en la membrana de punteaduras de coníferas. Probablemente estos valores del canal del margo favorecen la alta permeabilidad del pino radiata. Las otras características de la estructura anatómica medidas en este estudio son además del mismo orden que los reportados por diversos autores en Chile (Salvo 1999; Fernández *et al.* 2000; Concha 2001 y Carter. 2003), en Nueva Zelanda (Kininmonth y Whitehouse 1991) y en Australia (Pawsey y Brown 1970; Nicholls 1984).

Cuadro 1: Valores medios de las características anatómicas de *Pinus radiata* D. Don

unidad	característica anatómica	Madera Juvenil	Madera Adulta	valor p (anova)
mm	Diámetro Traqueida Madera Temprana	0.053	0.056	0.73
	Diámetro Traqueida Madera Tardía	0.044	0.044	0.65
	Diámetro Lumen Madera Temprana	0.045	0.047	0.77
	Diámetro Lumen Madera Tardía	0.031	0.030	0.75
	Espesor Pared Madera Temprana	0.004	0.004	0.54
	Espesor Pared Madera Tardía	0.006	0.008	0.16
	Diámetro Cámara Punteadura radial	0.012	0.013	0.07
	Diámetro Torus	0.005	0.005	0.31
	Canal del margo	0.007	0.007	0.17
	Ancho Anillos	9.7	4.4	0.01 (*)
	(%)	Proporción Madera Tardía	28.3	30.5
kg/m ³	Densidad Anillo Madera Temprana	341.0	402.4	0.0001(*)
	Densidad Anillo Madera Tardía	587.6	648.0	0.0001(*)
/mm ²	Frecuencia Traqueidas Madera Temprana	574.6	508.3	0.04 (*)
	Frecuencia Traqueidas Madera Tardía	863.5	934.2	0.26
	Frecuencia Canales Axiales Madera Tardía	0.6	0.7	0.44
	Frecuencia Canales Fusiformes Madera Temprana	0.6	0.5	0.36

En la figura 2, se presentan los resultados de la permeabilidad específica transversal al gas en madera juvenil y adulta en cada uno de los diez árboles estudiados. Se observa cierta variabilidad en la permeabilidad entre árboles, la que puede ser atribuida a la variabilidad propia de la estructura anatómica de cada árbol. Igualmente se aprecia mayor permeabilidad transversal en la madera adulta excepto en los árboles 2 y 9. Sin embargo las diferencias en el árbol 9 no son estadísticamente significativas. El comportamiento del árbol 2, se debe probablemente a que el espesor de pared celular de la madera adulta, es significativamente mayor a la madera juvenil. Además es notable que la permeabilidad tangencial tienda a ser mayor que la permeabilidad radial.

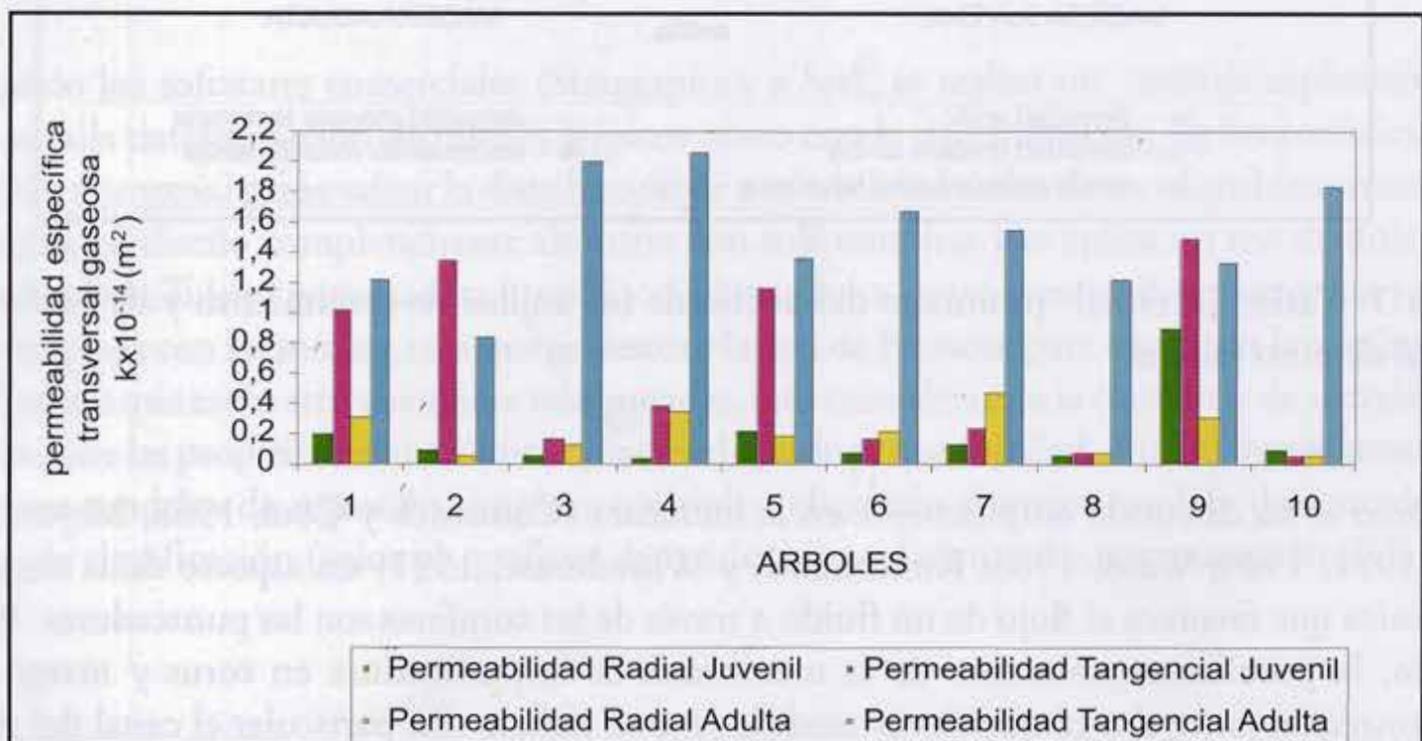


Figura 2: Variación de la permeabilidad específica transversal al gas corregida por el flujo deslizante (k) de la madera de acuerdo al tipo de flujo y zona de crecimiento

El comportamiento de la permeabilidad específica es consistente con los valores promedios de las características de la estructura anatómica presentado en el Cuadro 1. Los espacios por los que el fluido se mueve en el interior de la madera tales como el diámetro de lumen de madera

temprana, la frecuencia de canales axiales, el diámetro de la cámara de la punteadura y del canal del margo son de mayor magnitud en la madera adulta, lo que favorece la permeabilidad transversal al gas en esta madera. Adicionalmente la estructura anatómica de la madera adulta presenta mayor proporción de madera tardía y un espesor de pared celular de traqueidas razonablemente adecuado, que permite inferir mayores dificultades para que se produzca aspiración de las punteaduras. Similar comportamiento es reportado por Milota *et al.* en (1995) para *Pinus tadea*. En adición, la densidad de la madera es significativamente mayor en la madera adulta lo que refuerza la hipótesis anterior, no obstante los cambios en densidad por si mismos contribuyen poco con las diferencias de permeabilidad entre madera adulta y juvenil, tal como reportado para *Pinus tadea* (Milota *et al.* 1995)

Cuadro 2: Análisis de la permeabilidad específica transversal al gas corregida por el flujo deslizante (k) entre flujo radial y tangencial en madera juvenil y adulta (valores medios)

Análisis	Permeabilidad $k \cdot 10^{14} (m^2)$							
	madera juvenil		madera adulta		Radial		Tangencial	
	Radial	Tangencial	Radial	Tangencial	juvenil	adulta	juvenil	adulta
Mean	0.16	0.53	0.22	1.48	0.16	0.22	0.53	1.48
Tukey	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(A)	(A)	(B)
N	29	24	27	25	29	27	24	25
p value	0.023		0.0001		0.2828		0.0001	
c.v (%)	132.7	106.8	69.3	28.3	132.7	69.3	106.8	28.3
std Dev	0.22	0.56	0.15	0.42	0.22	0.15	0.56	0.42
Min	0.02	0.04	0.04	0.75	0.02	0.04	0.04	0.75
Max	1.00	1.55	0.58	2.31	1.00	0.58	1.55	2.31

El análisis entre flujo tangencial y radial (cuadro 2), indica una diferencia significativa en madera juvenil y muy significativa en madera adulta. Probablemente debido al hecho que la mayoría de las traqueidas se encuentran interconectadas por sus caras radiales a pares de punteaduras bordeadas, favoreciendo así el flujo tangencial. La diferencia entre la permeabilidad tangencial y radial es del orden de 3.2 veces mayor en madera juvenil y de 6.7 veces, en madera adulta. Kinninmonth y Whitehouse en (1991), reportan una relación de 1.2 y Comstock en (1969), indica relaciones del orden de 0.17 a 27 veces mayor en el flujo tangencial que el radial. Las correlaciones entre ambas permeabilidades, indican la existencia de una relación fuerte ($r=0.64$) en madera juvenil y débil en madera adulta ($r=0.18$). Por otra parte, se aprecia que no existen diferencias significativas entre la permeabilidad radial, entre madera juvenil y adulta, debido a que los resultados anatómicos indican que la madera juvenil tiene mayor porcentaje de madera temprana, que es más permeable radialmente pero que también es más susceptible a sufrir aspiración de punteaduras lo que compensaría los valores de permeabilidad en comparación a los de la madera adulta. En cambio la permeabilidad tangencial, presenta diferencias altamente significativas entre la madera juvenil y adulta, debido a una menor aspiración de punteaduras como consecuencia a la mayor densidad de la madera tardía en la zona de la madera adulta.

Cuando se trabaja con flujo de gas, éste puede ocurrir después de que el agua libre ha sido removida de ambos lados de la punteadura, implicando que el menisco aire - líquido ha pasado a través de la punteadura con una alta probabilidad de aspiración de torus. Sin embargo, debido al mayor espesor de pared celular de la madera adulta, se limita la probabilidad de la aspiración de las punteaduras de esta madera, favoreciendo su permeabilidad.

Sin embargo, cabe preguntarse ¿qué variables están afectando la gran diferencia en los valores de permeabilidad específica y en particular en el flujo tangencial, si se considera que los resultados dan cuenta de que no todas las variables anatómicas presentan diferencias entre las dos zonas de crecimiento estudiadas? Se intuye de este modo, que tales diferencias en permeabilidad son debidas al: ancho de los anillos, frecuencia de traqueidas y la densidad de los anillos, dado a que son estas las únicas variables que presentan diferencias significativas entre madera juvenil y adulta y por tanto las causantes de la variabilidad de la permeabilidad entre madera juvenil y adulta.

Por otra parte se encontraron pocas relaciones lineales entre las variables anatómicas y las medidas de permeabilidad específica de la madera. El análisis de correlación lineal efectuado, indica que existe correlación entre la permeabilidad radial medida en madera adulta y el diámetro de las traqueidas de la madera temprana ($r=0.68$) y entre la permeabilidad tangencial en madera adulta, con la frecuencia de traqueidas de la madera tardía ($r=0.76$). En el Cuadro 3, la permeabilidad específica de la madera puede ser interrelacionada con las variables anatómicas por 4 modelos de regresión múltiple de acuerdo a la dirección del flujo (radial y tangencial) y a la zona de crecimiento (juvenil y adulta).

Cuadro 3: Interrelacion entre la estructura anatómica y la permeabilidad específica transversal al gas (regresiones múltiples stepwise).

k		MODELO	R ²
radial	juvenil	$-0.02956-0.05786X_1+0.92719X_2-0.00004X_3+3.92753X_4-0.00162X_5-1.32292X_6+3.34878X_7$	99.8
radial	adulta	$0.12256-0.00360X_8-0.39792X_9-1.11569X_{10}-4.92138X_{11}-0.00649X_{12}+0.50059X_{13}-0.000009X_{14}-0.00010X_{15}$	99.9
tangencial	juvenil	$-0.035874-0.000036X_1-1.73074X_6+15.5484X_7+0.00866X_{16}-0.00006X_{17}$	97.5
tangencial	adulta	$-0.39392+0.39006X_9+9.58781X_{11}+0.01357X_{12}-0.41694X_{13}+0.000048X_{14}+0.000255X_{15}+5.79508X_{18}$	99.6

Siendo las características anatómicas involucradas en los modelos anteriores las siguientes:

VARIABLES	CARACTERISTICA	TIPO MADERA	
X ₁	DIÀMETRO TRAQUEIDA	TARDIA	JUVENIL
X ₂	ESPEJOR PARED	TARDIA	JUVENIL
X ₃	FRECUENCIA TRAQUEIDAS	TARDIA	JUVENIL
X ₄	CAMARA PUNTEADURA		JUVENIL
X ₅	ANCHO DE ANILLOS		JUVENIL
X ₆	ESPEJOR PARED	TEMPRANA	JUVENIL
X ₇	CANAL DEL MARGO	JUVENIL	
X ₈	FRECUENCIA CANALES TRANSVERSALES		ADULTA
X ₉	DIAMETRO LUMEN	TARDIA	ADULTA
X ₁₀	ESPEJOR PARED	TARDIA	ADULTA
X ₁₁	CANAL DEL MARGO		ADULTA
X ₁₂	ANCHO ANILLOS		ADULTA
X ₁₃	DIAMETRO TRAQUEIDAS	TARDIA	ADULTA
X ₁₄	FRECUENCIA TRAQUEIDAS	TARDIA	ADULTA
X ₁₅	DENSIDAD ANILLOS	TARDIA	ADULTA
X ₁₆	FRECUENCIA CANALES AXIALES		JUVENIL
X ₁₇	DIAMETRO TRAQUEIDAS	TEMPRANA	JUVENIL
X ₁₈	DIAMETRO CAMARA PUNTUACIONES		ADULTA

Se observa a través del análisis de regresión múltiple, que el aumento del diámetro de las traqueidas y del espesor de pared celular, provoca una disminución en la permeabilidad específica de la madera. Del mismo modo, un menor ancho de los anillos de crecimiento, tiende a aumentar la permeabilidad de la madera. La influencia de la densidad de los anillos es distinta de acuerdo al flujo de que se trate, pues por un lado una menor densidad provoca un aumento en la permeabilidad radial y una disminución en la permeabilidad tangencial. Se observa además que las variables medidas en la madera tardía, en general, son más significativas en la permeabilidad de la madera adulta que en la madera juvenil. No obstante resulta interesante observar que en los resultados de este trabajo, el porcentaje de la madera tardía, no constituye una variable significativa dentro de ninguno de los 4 modelos, a diferencia de lo expresado por Ward, en (1986) y Lihra *et al.*, en (2000); probablemente la homogeneidad de los anillos de crecimiento de la madera tardía del pino radiata (Figura 1) favorece esta hipótesis. En cambio como es señalado por Tesoro *et al.* en (1966); Comstock y Côté en (1968); Flynn (1995); Fujii *et al.* (1997); Bao *et al.* (2001) y Aumann y Ford (2002), se ratifica en este estudio, que la geometría de las puntuaciones representada por la diferencia entre el diámetro de la cámara de la punteadura y el diámetro del torus: "canal del margo", tiene una fuerte incidencia en la variabilidad de la permeabilidad en los 4 modelos.

CONCLUSIONES

De acuerdo con este trabajo, la variabilidad de las medidas de permeabilidad específica transversal al gas es condicionada por las variables anatómicas. La contribución de la anatomía de la madera es diferente dependiendo del tipo de madera y dirección del flujo. La geometría de las punteaduras, en particular el canal del margo, es una variable que condiciona significativa los valores de permeabilidad transversal.

Las propiedades anatómicas estiman en un 97 % aproximadamente los valores de permeabilidad específica transversal al gas de pino radiata a través de modelos de regresión múltiple.

En madera adulta, las variables anatómicas que muestran mayor correlación lineal con la permeabilidad específica transversal al gas de la madera son: el diámetro de las traqueidas de la madera temprana con la permeabilidad específica radial ($r=0.68$) y la frecuencia de las traqueidas de madera tardía con la permeabilidad específica tangencial ($r=0.75$).

La permeabilidad específica transversal al gas en madera juvenil, presenta diferencias estadísticas significativas, entre el flujo radial y tangencial y muy significativas en madera adulta. La permeabilidad tangencial es significativamente mayor en madera adulta ($1.48 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) que en madera juvenil ($0.53 \times 10^{-14} \text{ m}^2$). En cambio la permeabilidad radial de la madera adulta ($0.22 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) no es significativamente mayor a la madera juvenil ($0.15 \times 10^{-14} \text{ m}^2$).

Entre las características principales de la estructura anatómica del pino radiata destacan la frecuencia de traqueidas en madera adulta que varía entre 508 y 934 traqueidas/mm². El espesor de pared celular de las traqueidas de la madera adulta que fluctúa entre 4 a 8 μm . El ancho de los anillos de crecimiento que varía de 4.4 a 9.6 mm en madera juvenil y madera adulta respectivamente. La densidad normal de los anillos de crecimiento, en madera juvenil 340 kg/m³ (madera temprana) y 587 kg/m³ (madera tardía), en madera adulta 402 kg/m³ (madera temprana) y 647 kg/m³ (madera tardía); porcentaje de madera tardía, en madera juvenil es de 28 y 30 % en madera adulta.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento de este trabajo, a la Dirección de Investigación de la Universidad del Bío-Bío a través del proyecto DI 031110 3/R y al Centre de recherche sur le bois de la Université Laval. Agradecemos además, al Laboratorio Silvotecnológico de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción la donación de la madera para los ensayos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- AUMAN, C.; FORD, E. 2002. "Parameterizing a model of douglas fir water flow using a tracheid-level model". *Journal Theoric Biology*. 219:431-462
- BAILEY, P. L. 1964. "Permeability of wood". *Journal Institute Wood Science*. 12(5): 44-45
- BAO, F.; LU, J.; ZHAO, Y. 2001. "Effect of bordered pit torus position on permeability in chinese spruce". *Wood and Fiber Science*: 33 (2): 192-199.
- BANKS, W. 1968. "A technique for measuring the lateral permeability of wood". *Journal Institute Wood Science*. 20:35-41
- BOOKER, R. 1990. "Changes in transverse wood permeability during the drying of *Dacrydium cupressinum* and *Pinus radiata*." *New Zealand Journal of Forestry Science*. 20(2): 231-244
- CARTER, P. 2003. "Relaciones entre el ángulo microfibrilar con la fibra revirada y otros parámetros físicos de la madera de *Pinus radiata* D. Don del secano interior de la VIII región". Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad de Concepción. Concepción-Chile.
- COMSTOCK, G. 1965. "Longitudinal permeability of green eastern hemlock." *Forest Products Journal*. 15 (10): 441-449.
- COMSTOCK, G. 1967. "Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids." *Forest Products Journal*. 17(10): 41-46
- COMSTOCK, G. 1969. "Directional permeability of softwoods." *Wood and Fiber Science*: 1(4): 283-289.
- COMSTOCK, G.; CÔTÉ, W. 1968. "Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous". *Wood Science and Technology*. 2: 279-291.
- CONCHA, T. 2001. "Estudio de la frecuencia de canales resiníferos en árboles de *Pinus radiata* D. Don que crece en la zona arenales, VIII región". Proyecto de título de Ingeniero Civil en Industrias forestales. Universidad del Bio-Bio. Concepción-Chile.
- CHEN, P.; ZHANG, G.; VAN SAMBEEK, J. 1998. "Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species". *Forest Products Journal*: 48(3): 87-90

- FERNÁNDEZ, A.; ZAPATA, C.; NAVARRETE, P.; PACHECO, C.; VARGAS, G.; SAEZ, R.; CONTRERAS, H. 2000. "Variación de la longitud de fibra de *Pinus radiata* D. Don en árboles de 25 años (Arenales Bulnes- Mulchen)". IX Reunión sobre investigación y desarrollo de productos forestales. I Congreso iberoamericano de investigación y desarrollo de productos forestales. CD-Rom 6 p.
- FLYNN, K. 1995. "A review of the permeability, fluid flow, and anatomy of spruce, (*Picea sp.*)". *Wood and Fiber Science*: 27(3): 278–284
- FUJII, T.; SUZUKI, Y.; KURODA, N. 1997: "Bordered pit aspiration in the wood of *Cryptomeria japonica* in relation to air permeability". *IAWA Journal*. 18(1): 69-76
- KINNIMONTH, J.; WHITEHOUSE, L. 1991. "Properties and uses of New Zealand radiata pine. Wood properties". Forest Research Institute. New Zealand.
- KOLLMANN, F.; CÔTÉ, W. 1968. "Principles of wood science and technology". V. I: Solids wood. Springer-Verlag. New York Inc.
- LIHRA, T.; CLOUTIER, A.; ZHANG, S. 2000. "Longitudinal and tranverse permeability of balsam fir wetwood and heartwood". *Wood and Fiber Science*: 32(2): 164–178.
- MATSUMURA, J.; BOOKER, R.; DONALDSON, L.; RIDOUTT, B. 1998. "Impregnation of radiata pine wood by vacuum treatment: identification of flow paths using fluorescent dye and confocal microscopy". *IAWA Journal* . 19(1): 25-33
- MEYER, R. 1970. "Influence of pit aspiration on earlywood permeability of douglas-fir". *Wood and Fiber Science*. 2(4): 328–339.
- MILOTA, M.; TSCHERNITZ, J.; VERRILL, S.; MIASWSKI, T. 1995. "Gas permeability of plantation loblolly pine". *Wood and Fiber Science*: 27(1): 34–40.
- NICHOLLS, J. 1984. "Traqueids cell dimensions and density relationships for normal and abnormal wood of *Pinus radiata* D. Don". *Australian Forest Research*. 14: 85-98
- PAWSEY, C.; BROWN, A. 1970. "Variation in properties of breast height wood samples of trees of *Pinus radiata*". *Australian Forest Research*. 4: 15-25
- RICE, R.; D'OFRIO, M. 1996. "Longitudinal gas permeability measurements from eastern white pine, red spruce, and balsam fir". *Wood and Fiber Science*. 28(3): 301–308
- RIUS, G.; VALENZUELA, L. 1981. "Estudio de permeabilidad de gases y líquidos en madera de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don)". Seminario de Titulación, Ingeniería Ejecución en Maderas. Universidad del Bío-Bío, Concepción-Chile.
- SALVO, L. 1999. "Caracterización de la anatomía macroscópica de la madera de *Pinus radiata* D. Don para la Octava región". Proyecto de título de Ingeniero Civil en Industrias Forestales. Universidad del Bío-Bío. Concepción- Chile.

- SIAU, J. 1971. "Flow in wood". Springer, N. York.
- SIAU, J. 1984. "Transport processes in wood". Springer, N. York.
- TESORO, E.; CHOONG T.; SKAAR, C. 1966. "Transverse air permeability of wood as an indicator of tratability with creosote". *Forest Products Journal*. 16(3): 57-59.
- THOMAS, R.; NICHOLAS D. 1966. "Pit membrane structure in loblolly pine as influenced by solvent exchange drying". *Forest Products Journal*. 16(3): 53-56
- USTA, I.; HALE, M. 2003. "Radial permeability of sitka spruce as affected by wood structure. Permeability of cross- field pits in uniseriate rays". *LAWA Journal*. 24(2): 197-204.
- WARD, J. 1986. "The effect of wetwood on lumber drying times and rates: an exploratory evaluation with longitudinal gas permeability". *Wood and Fiber Science*:18(2): 288-307.
- ZIMMERMANN, M. 1983. "Xylem structure and the ascent of sap". Springer-Verlag: Berlin.