

# Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas

Ultrasound wave propagation on some wood species growing in Chile,  
and its relation with physical properties

C.D.O.: 812.1, 811.1

PETER NIEMZ\*, ALFREDO AGUILERA, ALDO ROLLERI

Universidad Austral de Chile, Facultad de Cs. Forestales, Instituto de Tecnología de Productos Forestales,  
Casilla 567, Valdivia, Chile.

## SUMMARY

Ultrasound wave propagation on some wood species growing in Chile, and its relation with some physical properties. In eleven forest species from Chile, the ultrasound speed propagation and its relation with some physical and mechanical properties were determined. The relation between ultrasound speed elasticity module (MOE), density, and wood structure (fiberlength, knots) were studied. The highest propagation speeds were determined with *Pinus radiata* and *Pseudotsuga menziesii*, the lowest with *Fitzroya cupressoides*.

## RESUMEN

Se determinó la velocidad de propagación del sonido y su correlación con algunas propiedades físico-mecánicas en once especies de importancia forestal creciendo en Chile. Se estudia la relación existente entre velocidad del sonido y módulo de elasticidad, densidad y la estructura de las maderas (largo de fibras, nudos). Velocidades de propagación altas se determinaron entre otros en *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii*; las más bajas se registraron en *Fitzroya cupressoides*.

## 1. INTRODUCCION

En la actualidad existen pocos trabajos publicados que traten la velocidad del sonido en la madera. La mayoría de ellos se refieren a especies europeas. Es así como para una gran cantidad de especies, especialmente en el caso de Latinoamérica, no existen antecedentes al respecto.

Burmester (1965) estudió la relación existente entre estructura anatómica y velocidad de propagación del sonido, contemplando las especies *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris* y *Picea exelsa*. De acuerdo con estos resultados, existe una influencia importante de la densidad de madera temprana y tardía, el largo de las fibras y la dirección en que se propague la onda. Los estudios en ma-

dera temprana y tardía indican que la velocidad del sonido es determinada por la zona más densa. De acuerdo con estos resultados, el módulo de elasticidad en flexión dinámica no podría ser calculado directamente con la ecuación siguiente ya que ella es válida sólo para el movimiento de onda longitudinal en probetas con características homogéneas en cuanto a su composición; en cambio, en el caso de la madera, éste es un material no homogéneo, donde se presentan grandes variaciones internas debidas a cambios de densidad, largos de fibras y anillos de crecimiento, entre otros.

$$\text{Ecuación 1: } v = \sqrt{E/d}$$

donde:

v: velocidad del sonido  
d: densidad  
E: módulo de elasticidad

\* Profesor huésped.

Los valores de elasticidad calculados de esta forma son aproximadamente hasta un 35% más altos que los obtenidos por el método destructivo normalizado, DIN, en probetas pequeñas libres de defectos. Los análisis estadísticos no dieron valores de correlación aceptables entre ambas propiedades. Los nudos tienen una influencia pequeña pero fácil de determinar, más importante es su efecto por debilitar la señal (Burmester, 1965).

Burmester (1965) realizó determinaciones en distintas especies con diferentes densidades y determinó que existe una relación no lineal de la velocidad del sonido con la densidad.

Sandoz (1989) llevó a cabo investigaciones para intentar la clasificación de madera aserrada por medio del sonido, basándose en una correlación empírica entre velocidad del sonido y elasticidad (el coeficiente de correlación fue 0.8). Sandoz (1993) determinó que los factores de mayor influencia son el contenido de humedad y la temperatura.

En el caso de los nudos existe una influencia marcada del tipo de nudo y del diámetro. Waubke y Merkel (1982) investigaron la posibilidad de emplear ultrasonido como clasificador por resistencia de madera estructural. Los coeficientes de correlación encontrados por estos autores, para ultrasonido versus módulo de elasticidad y versus resistencia a la flexión, fueron 0.64 y 0.33 respectivamente. Los índices de correlación encontrados disminuían al aumentar el contenido de humedad de la madera.

Verkasalo *et al.* (1993) en ensayos de secado determinaron que el ataque por hongos y el contenido de humedad tienen un efecto importante sobre la velocidad de propagación del sonido.

Bernacki y Beall (1993) estudian la posibilidad de determinar por medio del ultrasonido la constante elástica de la madera y detectar fallas de encolado. En este estudio se demuestra que ambas determinaciones son posibles pero que la orientación de los anillos de crecimiento juega un papel importante. Esta variable dificulta la interpretación de los resultados y por lo tanto su posible aplicación práctica.

Snackenberger (1991) determinó que al aumentar el ángulo de las fibras con respecto al eje de la probeta disminuye la velocidad del sonido. El efecto del ángulo de las fibras puede ser calculado por la fórmula de Hankinson. Para esta forma de cálculo Snackenberger da un "n" de 1.7 (Niemz, 1993).

## 2. MATERIAL Y METODO

2.1. *Material.* Para el desarrollo del trabajo se emplearon:

Coníferas

Pino Insigne (*Pinus radiata* D. Don)

Alerce (*Fitzroya cupressoides* (Mol) Johnst.)

Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco)

Sequoia (*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.)

Mañío (*Podocarpus nubigena* Lindl.)

Latifoliadas

Tepa (*Laurelia philippiana* Looser)

Laurel (*Laurelia sempervirens* (R. et Pav.) Tul.)

Lingue (*Persea lingue* (R. et Pav.) Nees.)

Raulí (*Nothofagus obliqua* (Mirbel) Oerst)

Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill)

De las maderas mencionadas se prepararon probetas teniendo en consideración condiciones estipuladas por DIN 52 186. El número de probetas fue de 50 por variable y por especie. Las variables y dimensiones de las probetas fueron las siguientes:

- Propagación en sentido de las fibras: probetas de 20x20x400 mm (eje paralelo al sentido de las fibras).
- Propagación en el sentido perpendicular a las fibras: probetas de 20x20x200 mm.

La figura 1 muestra las características de las probetas tanto para propagación del sonido en el sentido de las fibras como para perpendicular al sentido de las fibras.

A todas las probetas se les determinó la densidad, el contenido de humedad y el módulo de elasticidad en flexión, según normas DIN.

2.2. *Método.* Se correlaciona la velocidad del sonido medida con el equipo Silvatest, y el módulo de elasticidad y de ruptura, ambos determinados según Norma DIN.

Todas las probetas se climatizaron según DIN 50014.

Las propiedades módulo de rotura y elasticidad en flexión y la densidad se determinaron de acuerdo con las normas DIN.

La velocidad del sonido se determinó por medio de un equipo marca Silvatest fabricado por Sandes S.A., Suiza. El tipo de señal utilizado corresponde a 16 KHz en la dirección de las fibras de la madera.

Los cabezales de emisión y recepción de la se-

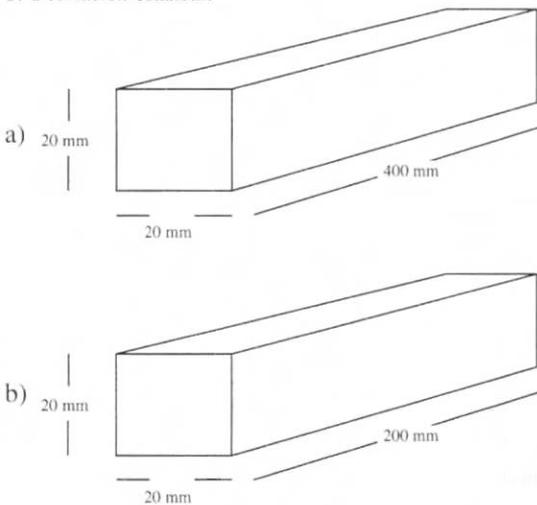
CUADRO 1

Velocidad de propagación del sonido y propiedades elastomecánicas para coníferas.  
Ultrasound speed propagation and elastomechanic properties in softwoods.

		Densidad	Flexión	Elasticidad		Velocidad	Largo	Humedad
		kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	real N/mm <sup>2</sup>	calculada N/mm <sup>2</sup>	ultrasonido m/s	fibra mm	%
<i>Pinus radiata</i>	X	470	77.5	7673	11919	5036	1.85	8.8
	S	20	12.7	2215		402	0.59	
<i>Fitzroya cupressoides</i>	X	460	55.9	3841	6338	3712	1.92	12.2
	S	30	6.3	680		120	0.54	
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	X	510	63.3	6259	11294	4706	2.60	13.6
	S	40	22.2	1536		351		
<i>Sequoia sempervirens</i>	X	350	51.2	6432	9474	5203	2.11	11.5
	S	20	11.8	1112		403	0.66	
<i>Podocarpus nubigena</i>	X	560	105.2	8668	13782	4961	2.18	10.2
	S	20	14.5	989		359	0.68	

X: Media.

S: Desviación estándar.



**Figura 1.** a) Tamaño de probeta para propagación del sonido en sentido de las fibras.

Size of beaker for ultrasound propagation in the same direction of the fiber.

b) Tamaño de probeta para propagación del sonido en sentido perpendicular a las fibras.

Size of beaker for ultrasound propagation in perpendicular direction of the fiber.

ñal se acoplaron introduciéndolos en perforaciones de 1 cm de profundidad, previamente preparadas en las probetas.

Para determinar la influencia de la estructura de la madera sobre la propagación de la onda se determinó el largo de las fibras de las diferentes especies por medio de maceración.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Influencia de la especie y de la estructura.

Los cuadros 1 y 2 presentan los resultados de velocidad de propagación del sonido y las propiedades elastomecánicas. En el cuadro 3 se entregan los resultados de velocidad de propagación en el sentido paralelo y perpendicular a las fibras. Según lo señalado en la revisión bibliográfica, la velocidad del sonido es determinada (ver Ecuación 1) principalmente por la relación  $\sqrt{E/d}$  y también por la estructura anatómica de la madera. De los resultados obtenidos llaman la atención los bajos valores de velocidad del sonido en Alerce, que presentaba anillos de crecimiento muy finos entre 1 y 2 mm, y la alta velocidad alcanzada con especies de rápido crecimiento y anillos anchos, Pino Insigne (1-1.5 cm), Pino Oregón (aprox. 1 cm) y Sequoia (0.8 cm). Por otra parte, se registraron valores relativamente altos en Mañío (4961 m/s) pese a tener anillos de crecimiento estrechos. Debe tenerse presente que en este caso la madera de Mañío presenta una densidad significativamente más alta que la de Alerce, 560 kg/m<sup>3</sup> y 460 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Si se tiene presente que en el caso de Pino oregón se presenta una diferencia extrema en las densidades de madera temprana y tardía (para el caso de Chile se calcula una densidad de madera tardía de 1.000 a 1.100 kg/m<sup>3</sup>)\*, los resultados

\* R. Cuevas, com. pers.

CUADRO 2

Velocidad de propagación del sonido y propiedades elastomecánicas para latifoliadas.  
 Ultrasound speed propagation and elastomechanic properties in hardwoods.

			Densidad	Flexión	Elasticidad		Velocidad	Largo	Humedad
			kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	real N/mm <sup>2</sup>	calculada N/mm <sup>2</sup>	ultrasonido m/s	fibra mm	%
<i>Laureila philippiana</i>	X	480	70.93	6014	10680	4717	0.80	10.1	
	S	30	11.00	961		300			
<i>Laureila sempervirens</i>	X	530	86.45	7403	21330	6344	1.53	9.2	
	s	40	27.97	1833		1324	0.52		
<i>Persea lingue</i>	X	670	100.60	7669	13423	4476	1.18	10.0	
	s	20	8.68	796		489	0.44		
<i>Nothofagus alpina</i>	X	570	98.04	10665	14530	5049	1.21	14.2	
	s	20	10.66	2788		229	0.35		
<i>Nothofagus obliqua</i>	X	690	125.66	11025	15112	4680	1.22	9.5	
	s	30	11.90	1867		128	0.40		
<i>Eucalyptus globulus</i>	X	900	121.40	12080	20306	4750	1.41	15.6	
	s	50	24.27	4395		961	0.50		

X: Media.  
 S: Desviación estándar.

CUADRO 3

Velocidad de propagación del sonido en el sentido paralelo y perpendicular de las fibras.  
 Ultrasound speed propagation in the parallel and perpendicular direction of the fiber.

		Densidad kg/m <sup>3</sup>	Velocidad ultrasonido		Paral/ Perpend
			paralelo	perpendicular	
<i>Nothofagus alpina</i>	X	570	5049	1433	3.5
	S	24	230	34	6.5
<i>Nothofagus obliqua</i>	X	690	4680	1314	3.6
	S	30	128	29	4.4
<i>Pinus radiata</i>	X	470	5036	1654	3.0
	S	24	403	34	11.9
<i>Fitzroya cupressoides</i>	X	460	3712	1407	2.6
	S	26	120	56	2.1

obtenidos contradicen en parte los resultados de Burmester (1965), en el sentido de no tener un efecto tan importante.

Se encontraron resultados similares para Pino Oregón y Sequoia, a pesar de la densidad de la madera tardía muy baja en esta última.

Tomando como base los valores de las latifoliadas y de las coníferas por separado se calcularon regresiones para la relación entre  $\sqrt{E/d}$  y velocidad del sonido, obteniéndose los siguientes resultados:

Coníferas

Ecuación 2:  $V = 1457 + 355 E/d$   
 $r = 0.74$

Latifoliadas

Ecuación 3:  $V = 1801 + 512 E/d$   
 $r = 0.56$

Donde:

V = Velocidad de propagación del sonido en m/s.  
 E = Módulo de elasticidad en flexión en N/mm<sup>2</sup>.  
 d = Densidad en kg/m<sup>3</sup>.

La relación existente entre el largo promedio de las fibras y la velocidad del sonido se analizó por medio de correlaciones.

Coníferas

Ecuación 4:  $V = 1381 + 1663 l$   
 $r = 0.39$

Latifoliadas

Ecuación 5:  $V = 2995 + 1639 l$   
 $r = 0.60$

Donde:

V = Velocidad de propagación del sonido en m/s.  
 l = largo de las fibras en mm.

En la figura 2 se presentan las correlaciones, calculadas con los promedios de largo de fibra y la velocidad de propagación del sonido de cada especie. Sobre esta relación ya había informado Burmester (1965). Si se efectuara este análisis en

cada una de las especies y muestras, se encontraría un índice de correlación similar a los de los promedios por especie.

Al aumentar la densidad se produce un aumento de la velocidad del sonido. Como ejemplo de este efecto se presenta en la figura 3 el caso del Pino Insigne. El análisis de las diferentes especies muestra una variación amplia del coeficiente de correlación. Al incorporar en el análisis la relación  $\sqrt{E/d}$  mejora este parámetro.

El cálculo del módulo de elasticidad a partir de la velocidad del sonido según la Ecuación 1 registró, tal como lo informara Burmester (1965), valores altos.

Las determinaciones perpendiculares a la dirección de las fibras dan velocidades de la onda

significativamente inferiores a las tomadas en sentido paralelo (cuadro 3). La relación entre paralela y perpendicular se encuentra entre 2.6 (Alerce) y 3.6 (Roble).

3.2. *Correlaciones entre velocidad del sonido y el módulo de elasticidad/resistencia a la flexión.* En el cuadro 4 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos para regresiones lineales. Se presentan diferencias entre los niveles de correlación encontrados para latifoliadas y coníferas, siendo notoriamente mayores en coníferas. Una excepción la constituye la madera de Alerce, con valores extremadamente bajos.

Las correlaciones entre velocidad del sonido y resistencia a la flexión son en promedio algo más bajas que las obtenidas para velocidad del sonido y módulo de elasticidad. Un aumento del número de muestras debería permitir mejorar los niveles encontrados. En la figura 4 se presenta el caso del Pino Insigne.

CUADRO 4

Coefficiente de correlación, para regresiones lineales, entre velocidad del sonido y algunas propiedades elastomecánicas.

Correlation coefficient for lineal regression between ultrasound speed and elastomechanic properties.

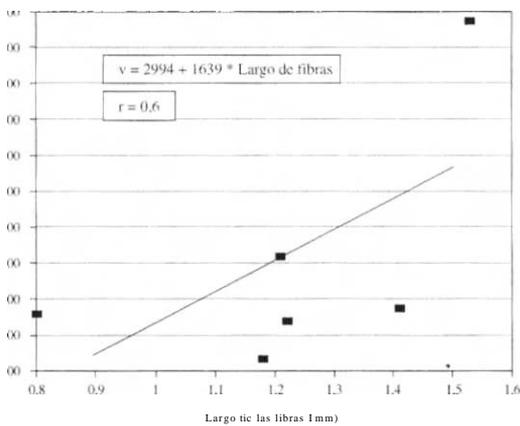


Figura 2. Correlación entre velocidad del sonido y el largo de las fibras en latifoliadas.

Correlation between ultrasound speed and the fibrlength in hardwood.

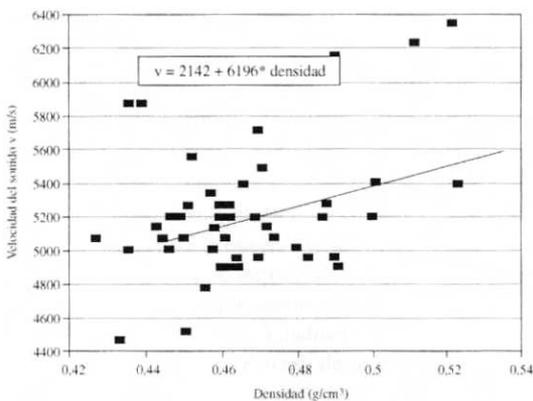


Figura 3. Correlación entre velocidad del sonido y la densidad en *Pinus radiata*.

Correlation between ultrasound speed and density for *Pinus radiata*.

	$E = f(V)$	$\sqrt{E} = f(\sqrt{V})$	$E = f(\sqrt{V})$
<b>Coníferas</b>			
<i>Pinus radiata</i>	0.66	0.33	0.57
<i>Fitzroya cupressoides</i>	0.16	0.87	—
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.81	0.55	0.71
<i>Sequoia sempervirens</i>	0.81	0.62	0.73
<i>Podocarpus nubigena</i>	0.51	0.20	0.42
<b>Latifoliadas</b>			
<i>Laurelia philippiana</i>	0.37	0.53	0.77
<i>Laurelia sempervirens</i>	0.12	0.12	0.95
<i>Persea tingue</i>	0.22	0.10	0.44
<i>Nothofagus alpina</i>	0.30	0.62	0.73
<i>Nothofagus obliqua</i>	0.25	0.10	—
<i>Eucalyptus globulus</i>	0.51	0.48	0.97

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer el apoyo prestado por la Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) en la forma de equipos donados para los análisis).

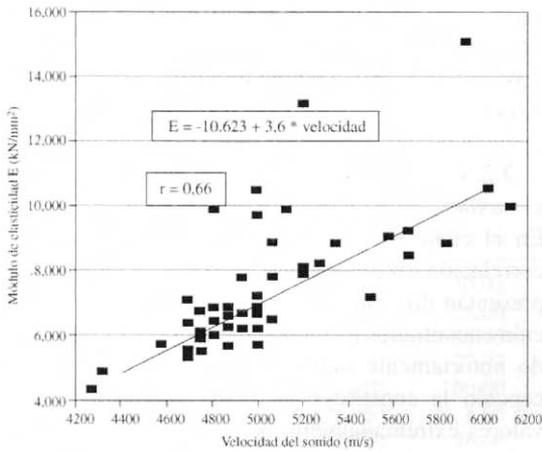


Figura 4. Correlación entre módulo de elasticidad y velocidad del sonido en *Pinus radiata*.

Correlation between elasticity module and ultrasound speed in *Pinus radiata*.

#### BIBLIOGRAFIA

BERNACKI, J.M., F. BEALL. 1993. "Development of an acousto-ultrasonic scanning system for nondestructive evaluation of wood and wood laminates", *Wood and Fiber Science* 26: 289-297.

BURMESTER, A. 1965. Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen

und anatomischen Eigenschaften von Holz. *Holz, als Roh- und Werkstoff*, Berlin, 23: 227-236.

BURMESTER, A. 1967. Nachweis von Ästen mit Ultraschall. *Holz, als Roh- und Werkstoff*, Berlin, 23: 157-163.

BURMESTER, A. 1968. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte, Querzug - sowie Biegefestigkeit von Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, 26: 113-192.

NIEMZ, P. 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Leinfelden Echterdingen, DRW -Verlag.

RECKNAGEL, A. 1956. *Physik. Bd. Schwingungen. Wellen. Wärmelehre*. Berlin, Verlag der Technik.

ROSS, J.R., R. PELLERIN. 1991. "NDE of green material with stress waves. Preliminary results using dimension lumber", *Forest Products Journal*, Madison 41: 57-108.

SANDOZ, J.L. 1989. "Grading of construction timber by ultrasound", *Wood Science and Technology*, Berlin, 23, pp. 95-108.

SANDOZ, J.L. 1993. "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading", *Wood Science and Technology*, Berlin, 23: 95-108.

SNACKENBERGER, J.E. 1991. "Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle", *Wood Fiber Sci.*, Madison 23: 32-4.3.

TAYLOR, J.M., B. NORTON, L. LAVERY. 1992. Challenges presented by use pulses to determine changes in moisture content of sitka spruce by undergoing drying. Proceedings, 3th. International Wood Drying Conference, Vienna.

UGOLEV, B.N. 1986. *Holzkunde und Grundlagen der Holzwarenkunde*. Moskau, Lesnaja Prom.

VERKASALO, E. 1993. Properties related to drying defects in red oak wetwood. Research Paper FPL-RP-516, Forest Products Laboratory, Madison.

WAUBKE, N.V., J. MÄRKLE. 1985. Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung von Bauhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, 40: 189-192.