



**Universidad Austral de Chile**  
*Facultad de Ciencias Forestales*

**Efecto del maquinado de albura y duramen de  
Acacia melanoxylon R. Br. en la emisión acústica,  
emisión de sonido y rugosidad superficial.**

Profesor Guía: Sr. Alfredo Aguilera

Tesis presentada como parte de los  
requisitos para optar al Grado de  
**Magíster en Ciencias, Mención  
Recursos Forestales.**

**RENÉ ARTURO ZAMORA CRISTALES**

VALDIVIA  
2006

Sr. Alfredo Aguilera

---

Sr. Aldo Rolleri

---

Sr. José Barros

Programa de Magíster en Ciencias  
Mención Recursos Forestales

Fecha del Examen de Grado: Septiembre 27, 2006  
Facultad de Ciencias Forestales.

## **Agradecimientos**

Quiero dedicar este trabajo a Gustavo René y Madelin Araceli, mis padres, por la educación y ejemplo en la vida que me han brindado. También a mis hermanas Karina y Rocio.

A Ingrid, una entre diez mil millones, por su apoyo incondicional y ayuda en la redacción del presente documento. Esclavos de un sueño pero libres en nuestros pasos.

También a los heises (el orden de los factores no altera el producto, Ivo, Alvaro, David) por su apoyo en la distancia. A Ruben por sus consejos del pasado presente y futuro.

A la Organización de Estados Americanos por permitirme la posibilidad de realizar estudios de postgrado.

Finalmente quiero terminar con una frase de Albert Einstein: Existe una fuerza motriz más poderosa que el vapor la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

## **DECLARACIÓN DE PATERNIDAD**

Yo René Arturo Zamora Cristales declaro que soy autor del presente trabajo, que lo he realizado en su integridad y no le he publicado para obtener otros grados o títulos o en revistas especializadas.



## ÍNDICE DE MATERIAS

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1.	DESCRIPCIÓN DE ACACIA MELANOXYLON	5
2.1.2	<i>Propiedades de la madera de Acacia melanoxylon</i>	6
2.1.3	<i>Acacia melanoxylon en Chile</i>	8
2.2	MAQUINADO DE MADERA	9
2.2.1	<i>Corte ortogonal</i>	9
2.2.2	<i>Tipos de corte ortogonal</i>	10
2.2.3	<i>Tipo y formación de viruta paralelo al grano: Corte 90-0°</i>	11
2.2.4	<i>Espesor de viruta</i>	14
2.2.5	<i>Determinación del espesor de viruta</i>	15
2.2.7	<i>Herramienta de corte</i>	16
2.3	EMISIÓN ACÚSTICA	17
2.3.1	<i>Parámetros de emisión acústica</i>	19
2.3.2	<i>Emisión acústica en monitoreo del maquinado de madera</i>	20
2.4	EMISIÓN DE SONIDO EN EL MAQUINADO DE MADERA	22
2.5	RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN MADERA DIMENSIONADA	23
2.4.1	<i>Perfiles de rugosidad</i>	24
2.3.1	<i>Parámetros de rugosidad Rz</i>	26
<b>3.</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODO</b>	<b>27</b>
3.1.	MATERIALES Y EQUIPOS	27
3.1.1.	<i>Madera</i>	27
3.1.2	<i>Portaprobetas</i>	29
3.1.3	<i>La máquina</i>	29
3.1.4	<i>Herramienta de corte</i>	30
3.1.5	<i>Medición de emisión acústica</i>	31
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	34
3.2.1	<i>Condiciones de corte, emisión acústica, emisión de sonido y rugosidad superficial</i>	34
3.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	40
<b>4.</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>42</b>
4.1	DENSIDAD DE ALBURA Y DURAMEN DE ACACIA MELANOXYLON	42
4.2	EMISIÓN ACÚSTICA	43
4.2.1	<i>Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	43
4.2.2	<i>Relación entre la emisión acústica y los esfuerzos de corte para albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	47
4.2.3	<i>Relación entre la potencia de corte y la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	49
4.2.4	<i>Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	51
4.2.5	<i>Efecto de la velocidad de rotación en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	53
4.2.4	<i>Efecto de la densidad de la viruta en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	54
4.3	EMISIÓN DE SONIDO	57
4.3.1	<i>Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión de sonido para madera albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	57
4.3.2	<i>Análisis espectral de la señal de emisión de sonido</i>	61

4.4 RUGOSIDAD SUPERFICIAL	65
4.4.1 <i>Efecto del espesor de viruta en la rugosidad superficial para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	65
4.4.2 <i>Efecto de la velocidad de alimentación en la rugosidad superficial Rz para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	66
4.4.3 <i>Efecto de la velocidad de rotación en la rugosidad superficial Rz para albura y duramen de Acacia melanoxylon</i>	68
4.4 RELACIÓN ENTRE LA EMISIÓN ACÚSTICA Y LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL PARA MADERA DE ALBURA Y DURAMEN DE ACACIA MELANOXYLON	71
4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	73
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>76</b>
<b>6. RESUMEN</b>	<b>78</b>
<b>7. SUMMARY</b>	<b>79</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>80</b>
<b>9. APÉNDICE</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Condiciones de corte	34
Cuadro 2. Condiciones de medición de emisión acústica	35
Cuadro 3. Condiciones de medición de emisión de sonido	35
Cuadro 4. Condiciones de medición de la rugosidad	35
Cuadro 5. Diseño Experimental para albura en la medición de EA y rugosidad	38
Cuadro 6. Diseño experimental para duramen en la medición de EA y rugosidad	38
Cuadro 7. Diseño experimental para albura y duramen en la medición de la emisión de sonido	39
Cuadro 8. Densidad de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> Br.	42
Cuadro 9. Resumen de EA promedio generada a distintos espesores de viruta	43
Cuadro 10. Valores promedio de emisión de sonido RMS a diferentes velocidades de alimentación	57
Cuadro 11. Alturas de la frecuencia fundamental y frecuencia armónica encontradas bajo las condiciones de maquinado de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> .	64
Cuadro 12. Estadística descriptiva de rugosidad superficial para los espesores de viruta estudiados.	65
Cuadro 13. Diseño de análisis de Varianza con dos factores (variables independientes y dos respuestas (Variable dependientes), albura.	74
Cuadro 14. Resultados del análisis de varianza los grados de significancia son expresados en función de la probabilidad $< 0.05$ da valores significativos para albura.	74
Cuadro 15. Diseño de análisis de varianza con dos factores (variables independientes y dos respuestas (variables dependientes), duramen.	75
Cuadro 16. Resultados del análisis de varianza los grados de significancia son expresados en función de la probabilidad $< 0.05$ da valores significativos para duramen.	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hojas y flores de <i>Acacia melanoxylon</i> (Nicholas, Brown, 2002). .....	5
Figura 2. Trozas de Aromo australiano en Nueva Zelanda. Obsérvese el cambio de coloración entre albura y duramen (Nicholas, Brown, 2002). .....	7
Figura 3 . Dirección de los tres tipos corte más relevantes. ....	11
Figura 4. Tipo de viruta 1, obsérvese las fallas y desagregamiento. En la izquierda a favor de las fibras y en la derecha en contra (Vega, 2004) .....	12
Figura 5. Tipo de viruta 2, es la que brinda la mejor calidad en la pieza (Vega, 2004).....	12
Figura 6. Tipo de viruta 3. en ella existe una combinación entre rajaduras y compresiones (Vega, 2004). .....	14
Figura 7. Esquema de la formación de viruta en el corte rotacional. D es el diámetro y r el radio del círculo de corte, v es la velocidad de corte, u la velocidad de alimentación, e paso por diente o cuchillo, h es la profundidad de corte, l la longitud del chip y $\epsilon$ es el ángulo al centro correspondiente al promedio del espesor de viruta (Kivimaa, 1950). .....	15
Figura 8.. Terminología de la periferia de un cabezal con dos cuchillos (Koch, 1972).....	17
Figura 9. Parámetro Rz, mostrando las 5 cumbres y los 5 valles en secciones, $\ell$ representa la longitud de evaluación. ....	26
Figura 10. Aromo australiano a la entrada del secador.....	27
Figura 11. Sección transversal de troza de aromo australiano La letra A identifica a la albura y la parte oscura al duramen. ....	28
Figura 12. Dimensiones de probetas utilizadas en maquinado .....	28
Figura 13. Porta probetas con sensor piezoeléctrico en el centro .....	29
Figura 14. La máquina tupí .....	30
Figura 15. Carro de avance .....	30
Figura 16. Cabezal hidrocentrante de 6 cuchillos Z=6 .....	30
Figura 17. Sensor piezoeléctrico vista inferior .....	31
Figura 18. Vista superior .....	31
Figura 19. Preamplificador .....	31
Figura 20. Esquema del proceso de toma de datos de emisión de sonido.....	32
Figura 21. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 .....	33
Figura 22. Efecto del espesor de viruta (mm) en los Voltajes RMS de las señales de EA para madera de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	44
Figura 23. Efecto del espesor de viruta (mm) en los valores de emisión acústica para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> .. Valores agrupados por velocidad de rotación. ....	45
Figura 24. Efecto del espesor de viruta (mm) en la emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . Valores agrupados por velocidad de rotación. ....	46
Figura 25. Efecto del espesor de viruta (mm) en los esfuerzos de corte (N) y la emisión acústica RMS (V) en madera albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	47
Figura 26. Efecto del espesor de viruta (mm) en los esfuerzos de corte (N) y la emisión acústica RMS (V) en madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	48
Figura 27. Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica RMS (V) y la potencia de corte (KW) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> .....	49
Figura 28. Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica RMS (V) y la potencia de corte (KW) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	50
Figura 29. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	51
Figura 30. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	52
Figura 31. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	53
Figura 32. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . ....	54

Figura 33. Efecto de la densidad de viruta ( $\text{Kg/m}^3$ ) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	55
Figura 34. Efecto de la densidad de viruta ( $\text{Kg/m}^3$ ) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	55
Figura 35. Comportamiento de los valores RMS promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 4m/min) para madera de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	58
Figura 36. Comportamiento de los valores RMS (V) promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 8m/min) para madera de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	59
Figura 37. Comportamiento de los valores RMS (V) promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 11m/min) para madera de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	61
Figura 38. Vista de la señal de sonido emitida durante el corte con una duración de 3 segundos (mono 16 bit 44100Hz) Samplitude master 6.0 .....	62
Figura 39. Representación del espectro de la emisión de sonido, durante el maquinado de <i>Acacia melanoxylon</i> a 4200 RPM. ....	63
Figura 40. Efecto del espesor de viruta (mm) en la rugosidad superficial parámetro Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura y duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	65
Figura 41. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> .....	66
Figura 42. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> .....	67
Figura 43. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	68
Figura 44. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de duramen de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	69
Figura 45. Relación entre las variables emisión acústica y rugosidad superficial para madera de albura de <i>Acacia melanoxylon</i> . .....	71
Figura 46. Relación entre la emisión acústica y la rugosidad superficial. ....	72

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile se han plantado varias especies del género *Acacia*, las cuales se han adaptado adecuadamente a las condiciones edáficas y climáticas, exhibiendo un rápido crecimiento (Pinilla et al 2002). En particular *Acacia melanoxylon*, aramo australiano (Blackwood), posee características interesantes en cuanto a la calidad de su madera y el alto valor comercial de sus productos en mercados internacionales perteneciendo al grupo élite de especies como teca y caoba (Nicholas Brown, 2002). Dadas sus características, inherentes a la especie, se utiliza mayormente en la fabricación de muebles en donde sus parámetros de maquinado son determinantes para la obtención del producto final.

El tipo del maquinado determina la calidad del acabado final lo que influencia directamente los costos. El principal indicador de calidad en maquinado es la rugosidad superficial (Gurau *et al.* 2003).

La automatización y optimización de los procesos de maquinado de madera esta limitada severamente a la falta de información acerca del efecto que tienen los parámetros de corte en la rugosidad superficial.

La medición de rugosidad superficial depende del proceso de maquinado el cual consiste en el corte de las células de la madera por la herramienta, lo que deja varias cavidades celulares expuestas. El tamaño de estas cavidades varía entre especies y dentro de las especies, y por el tipo de células. Según Díaz-Vaz (2003) las características anatómicas entre albura y duramen también ocasionan variaciones en la superficie anatómica, debido a que la duramización puede influir en la permeabilidad, estabilidad dimensional, color de la madera y tilosis de los vasos.

La optimización del maquinado puede medirse a través de sensores de emisión acústica (EA) y emisión de sonido. Varios trabajos indican el uso de EA en el monitoreo de herramientas de corte y procesos de maquinado. Los procesos de maquinado producen ondas de estrés que se propagan a través de la pieza de trabajo y la máquina. Estas ondas producen señales acústicas que dependen de parámetros inherentes a la herramienta, deformación plástica en la zona del corte, formación de viruta y el impacto de la viruta en la pieza (Lemaster, 2000).

Dornfeld y Lemaster, (1982) demostraron la sensibilidad de las señales de EA a los cambios en los parámetros de corte (i.e. profundidad de corte, velocidad de alimentación, velocidad de corte).

La mayor desventaja en la utilización de EA, se debe a que depende de sensores de contacto, y su colocación, debe realizarse lo más cerca posible, de las zona de corte, lo cual en la práctica, resulta difícil. La emisión de sonido ofrece una solución a este problema por tratarse de un método que basado en el uso de micrófonos direccionales que recogen el sonido sin establecer contacto con la pieza ni con la zona de corte. Tanaka *et. al* (1989) utilizaron micrófonos para el control del maquinado en el corte con sierras circulares. Nagatomi *et al.* (1993) utilizo técnicas de sonido para el monitoreo de las condiciones de corte.

En cuanto a la rugosidad superficial, una técnica común en su medición es el método de contacto.

El principal objetivo de este estudio es determinar el efecto del maquinado del duramen y la albura de *Acacia melanoxylon* (*aromo australiano*), en la calidad superficial, la emisión acústica y la emisión de sonido. Además, de esto dentro del marco de trabajo se agregan los siguientes objetivos:

- Comparar, el efecto del cambio en las condiciones de maquinado (velocidad alimentación y velocidad de rotación), de aromo australiano, en la rugosidad superficial y la emisión acústica.

- Determinar el efecto de la densidad de la albura y el duramen en la emisión acústica y la rugosidad superficial.
- Establecer la relación entre el espesor de viruta, la emisión acústica y rugosidad superficial para albura y duramen de aramo australiano.
- Determinar los efectos del maquinado de albura y duramen, a una velocidad de rotación de 4200 RPM, en la emisión de sonido.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este apartado se hace referencia de las variables que se analizaron en este estudio y que tienen que ver con algunas de los conceptos más importantes relacionados con *Acacia melanoxyton*, el corte de madera, la rugosidad superficial y la emisión acústica y emisión de sonido.

### 2.1. Descripción de *Acacia melanoxyton*

El Aromo Australiano (*Acacia melanoxyton*), o Blackwood de Tasmania, es una especie nativa de Australia. Pertenece a la Familia de las leguminosas específicamente Mimosaceae (ver Figura 1). Ha sido plantado en numerosos países del mundo siendo los mas relevantes Nueva Zelanda, Sudáfrica, China, India, Sri Lanka y Chile (Nicholas, Brown, 2002).



**Figura 1.** Hojas y flores de *Acacia melanoxyton* (Nicholas, Brown, 2002).

### **2.1.2 Propiedades de la madera de Acacia melanoxylon**

Por cerca de 100 años el aroma australiano ha sido aceptado internacionalmente como una de las maderas decorativas de mayor importancia. El aroma australiano es ampliamente utilizado en la industria de muebles en especial en Nueva Zelanda. La madera es de peso medio con trabajabilidad buena y generalmente de un grano recto (Nicholas, Brown, 2002).

El color del duramen generalmente es café dorado con bandas rojizas u oscuras. La albura es pálida con tonalidades blancas. Las variaciones en color se deben básicamente a la genética, y la calidad del sitio (estudios en Sudáfrica indican que en suelos orgánicos profundos dan tonalidades más oscuras asociadas a una mayor proporción de duramen respecto de la albura). En la figura 2 se muestran las diferencias de albura y duramen en trozas en Nueva Zelanda (Nicholas, Brown, 2002).

La densidad de la madera varía ampliamente entre los árboles de aroma australiano. Se ha encontrado un rango de densidad básica que va desde  $465\text{kg/m}^3$  hasta  $670\text{Kg/m}^3$ . La densidad básica varía muy poco a lo largo de la altura, sin embargo, existen variaciones significativas en el perfil radial, incrementándose desde el centro hacia el extremo (Nicholas, Brown, 2002).



**Figura 2.** Trozas de Aromo australiano en Nueva Zelanda. Obsérvese el cambio de coloración entre albura y duramen (Nicholas, Brown, 2002).

Se ha encontrado una contracción volumétrica desde el punto de saturación de las fibras hasta el 12% de 3.6% tangencial y 1.8% radial. Por otro lado, el aromo australiano es menos impermeable que maderas blandas como *Pinus radiata*, brindando una estabilidad superior en el corto plazo (Nicholas, Brown, 2002).

El porcentaje de duramen varía ampliamente. De acuerdo a un estudio en Nueva Zelanda la variación encontrada en un rodal de 10 años fue de 0% a 74% de presencia. El porcentaje de duramen no está relacionado al lugar de procedencia de las semillas, ya que varían tanto en individuos estudiados provenientes de Australia como de Nueva Zelanda.

Estudios en Sudáfrica muestran que existe un mayor porcentaje de duramen en suelos orgánicos bien drenados (Nicholas, Brown, 2002).

### **2.1.3 Acacia melanoxylon en Chile**

En Chile, se han establecido cerca de 1000 ha de aramo australiano desde la década de los 80's. Su uso es limitado y existe poca información sobre su crecimiento, productividad y potencial industrial. Existen incertezas en cuando a la proyección de futuras plantaciones (Pinilla *et al.*, 2002).

El Instituto Forestal de Chile (INFOR) ha llevado a cabo diversos estudios desde 1990 para obtener información del género *Acacia*. Estas investigaciones se han basado principalmente en la búsqueda de mejoramiento genético y prácticas silviculturales (Pinilla *et al.*, 2002).

En el sur de Chile las plantaciones de aramo australiano van desde los 16 hasta los 20 años con una densidad de 1000 a 1600 árboles/ha. El diámetro a la altura de pecho (DAP), promedio es de 24cm y una altura entre 20-25 m con un volumen de 600-800 m<sup>3</sup>/ha (Pinilla *et al.*, 2002).

Pinilla (2002) encontró que las mediciones llevadas a cabo desde Cautín hasta Valdivia por Cerda (1994), y Salinas (1995), muestran que en un rodal de 30 años con una densidad de 1000 arb/ha se puede

esperar un DAP de 30.9 cm y una altura de 29.6 m, un volumen total de 1103 m<sup>3</sup>/ha y un incremento medio anual de 36.8m<sup>3</sup>ha/año.

## **2.2 Maquinado de madera**

A lo largo de los años el maquinado se ha enfocado más en las herramientas que en la tecnología del corte. Debido a los elevados costos de materia prima e insumos para la producción, se han desarrollado numerosos estudios en maquinado de madera con el fin de determinar las características que permitan un corte más exacto y al menor costo, así como un monitoreo relevante de la calidad de los procesos de corte.

### **2.2.1 Corte ortogonal**

La madera es maquinada producto de la remoción de viruta ya sea en forma de aserrín o viruta para pulpa larga. Existen dos procesos de maquinado básicos, el primero conocido como corte ortogonal en el cual la arista de corte es perpendicular a la dirección de movimiento de la herramienta y la pieza. La superficie generada es plana paralela a la superficie original. Un carpintero produce a mano cortes ortogonales al igual que una sierra de banda. El debobinado se aproxima a un corte ortogonal.

El otro tipo de corte es el periférico en el cual se forma y remueve la viruta por el paso intermitente de los cuchillos colocados en la periferia de un cabezal.

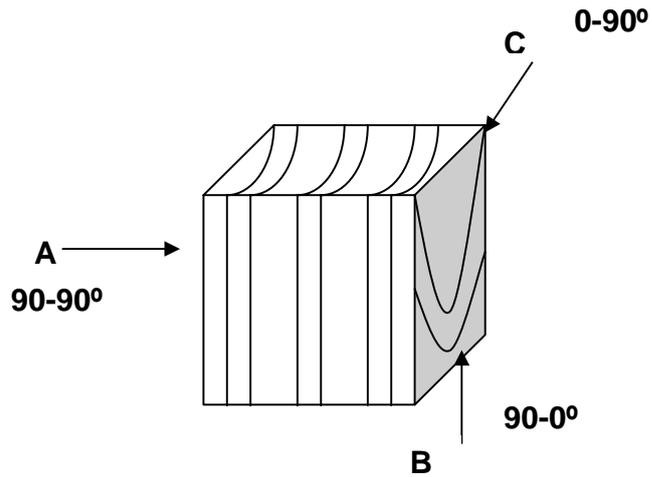
Para separar la viruta de una pieza de madera primero es necesario causar una falla estructural en la unión entre la viruta y la pieza a trabajar. Teniendo en cuenta que la resistencia de la madera varia con la dirección de la fibra, configuración de la viruta, potencia de corte y la calidad superficial, es importante estudiar lo referente a la dirección de corte que afecta a todas las anteriores variables.

### **2.2.2 Tipos de corte ortogonal**

A: Se produce cuando la superficie y la cuchilla se mueven paralelas al grano ( $90-90^\circ$ ). Despuntado.

B: Se produce cuando la superficie a cortar es perpendicular al grano. ( $90-0^\circ$ ). Aserrío, cepillado.

C: La dirección de corte C se produce cuando la superficie es paralela al grano pero la cuchilla se mueve perpendicular. ( $0-90^\circ$ ), debobinado. (Ver figura 3).

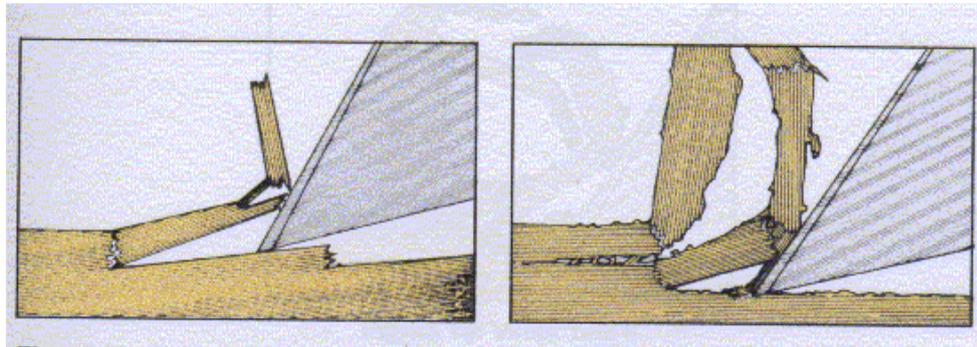


**Figura 3** . Dirección de los tres tipos corte más relevantes.

### 2.2.3 Tipo y formación de viruta paralelo al grano: Corte 90-0°

Koch (1972), describe tres tipos diferentes de viruta, para pino del sur de los Estados Unidos. La viruta tipo I consiste en segmentos quebrados formados por la ruptura de fibras a lo largo del grano. La viruta tipo II, tiende a ser una serie espiralada. La viruta tipo III se encuentra comprimida en dirección paralela al grano y no posee forma. La tipo II es la que deja la mejor calidad en la pieza.

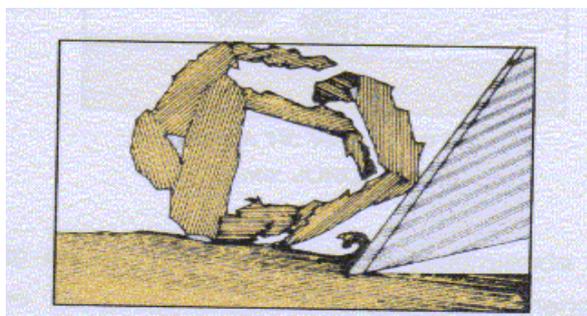
La viruta tipo I (Figura 4), deja una superficie con grano astillado. El grado de rugosidad depende de la profundidad bajo la cual se corta la madera. En este caso, el consumo de potencia es bajo debido a que la madera falla relativamente fácil, en tensión perpendicular al grano. Además, la cuchilla corta pocas fibras, por ello se desafila lentamente.



**Figura 4.** Tipo de viruta 1, obsérvese las fallas y desagregamiento. En la izquierda a favor de las fibras y en la derecha en contra (Vega, 2004)

Ángulos de ataque entre  $25-35^\circ$  causan este tipo de viruta, debido a que la fuerza normal de corte es negativa a todas las profundidades de corte, para todos los contenidos de humedad.

La viruta tipo II (figura 5), ocurre bajo condiciones limitadas que inducen fallas continuas. El movimiento de la herramienta produce una compresión paralela al grano y causa estreses diagonales. Al fallar continuamente la madera produce viruta espiral. El radio de la espiral se incrementa a medida que el espesor de viruta aumenta.

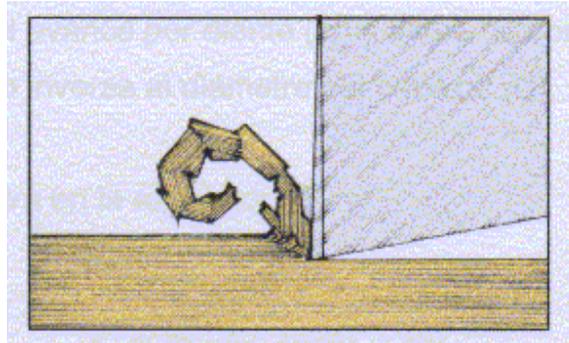


**Figura 5.** Tipo de viruta 2, es la que brinda la mejor calidad en la pieza (Vega, 2004).

La viruta tipo III (figura 6), tiene una tendencia de formación cíclica. La madera delante de la herramienta es comprimida paralelamente a la fibra y se producen rupturas paralelas al grano. La viruta no escapa en un 100% de la herramienta y lo que no logra escapar se compacta en contra de la cara de la herramienta. Cuando la acumulación de material comprimido se convierte en crítica, ésta se retuerce y escapa hacia arriba y el ciclo comienza de nuevo. Factores favorables a la formación de viruta tipo III incluyen:

- Ángulos de ataque pequeños o negativos
- Altos coeficientes de fricción entre la cara de la herramienta y la viruta

Cuando se produce este tipo de viruta se producen cortes parciales de las fibras, quedando una superficie con numerosos elementos fibrosos “suelos”. A este defecto se le conoce como grano cruzado. En este tipo de viruta, la potencia requerida es grande y el desafilado se produce rápidamente.

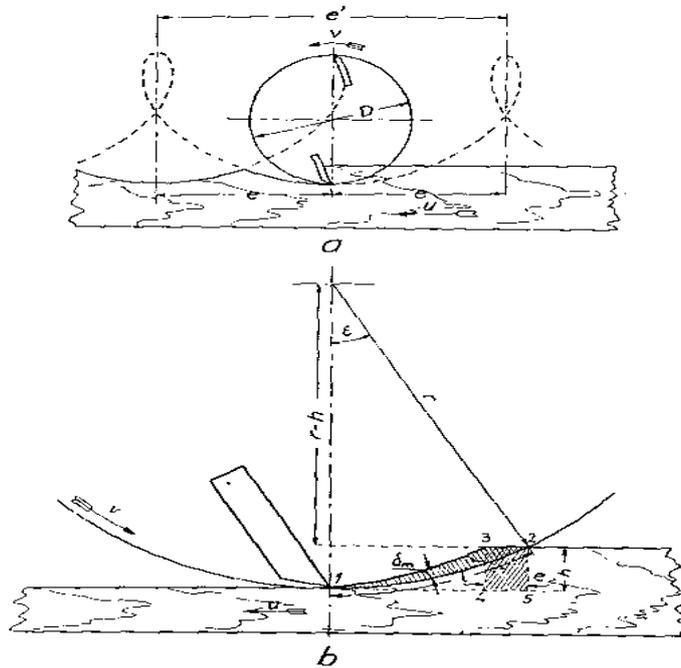


**Figura 6.** Tipo de viruta 3. en ella existe una combinación entre rajaduras y compresiones (Vega, 2004).

#### **2.2.4 Espesor de viruta**

El espesor de viruta puede ser determinado cuando se obtiene chip de espesor uniforme, por ejemplo en el cepillado a mano. Sin embargo, si las cuchillas están montadas en movimiento rotacional se produce una viruta que varía en espesor. En este caso es propicio hablar de un espesor promedio de viruta como se observa en la figura 7 donde se produce una trayectoria cicloidal y por ende la obtención de una superficie cilíndrica.

Las sierras circulares producen chips no uniformes como ya se ha mencionado. La siguiente figura muestra la ley Sinus para la velocidad del diente y el tipo de alimentación para determinar el espesor de viruta.



**Figura 7.** Esquema de la formación de viruta en el corte rotacional. D es el diámetro y r el radio del círculo de corte, v es la velocidad de corte, u la velocidad de alimentación, e paso por diente o cuchillo, h es la profundidad de corte, l la longitud del chip y  $\epsilon$  es el ángulo al centro correspondiente al promedio del espesor de viruta (Kivimaa, 1950).

### 2.2.5 Determinación del espesor de viruta

Según Kivimaa, (1950), el espesor de viruta promedio ( $e_c$ ) se relaciona en forma directamente proporcional con el avance por diente ( $f_z$ ) y altura de corte (profundidad de corte) ( $a_p$ ), pero inversa al diámetro del cabezal (D). Como sigue

$$e_c = \left( \frac{Vf}{Z * N} \right) * \sqrt{A_p / D} \quad (1)$$

Donde:

Vf Velocidad de alimentación (mm/min)

Z Número de cuchillos

N Velocidad de rotación (RPM)

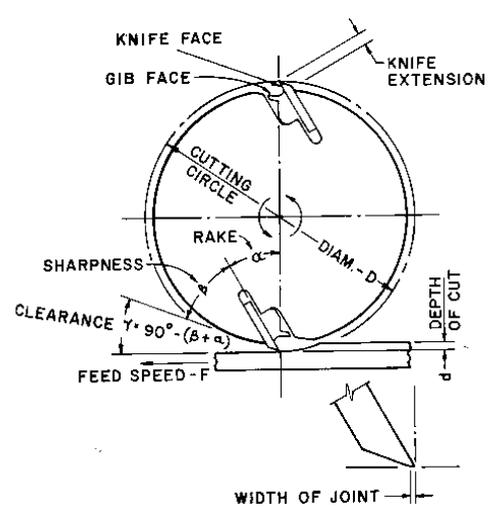
Ap Profundidad de corte (mm)

D Diámetro del cabezal (mm).

### **2.2.7 Herramienta de corte**

La geometría de la herramienta de corte particularmente de la arista, determina la forma en que la energía es distribuida y aplicada en la pieza de corte.

En cepillado, el corte se produce mediante un movimiento rotacional de la herramienta combinado con un movimiento lineal traslacional. Las aristas de corte de cada cuchillo relativas a la superficie de la madera permiten el corte debido a una inclinación específica de sus ángulos de ataque, perfil e incidencia. Las herramientas utilizadas en dicho corte se conocen como cabezales dentro de los cuales están colocadas los cuchillos que generan el corte. La terminología básica de un cabezal porta cuchillos se muestra a continuación en la figura 8:



**Figura 8..** Terminología de la periferia de un cabezal con dos cuchillos (Koch, 1972).

Donde:

- $\alpha$  ángulo de ataque
- $\beta$  ángulo de incidencia
- $\gamma$  ángulo de incidencia
- $d$  Profundidad de corte
- $D$  Diámetro desde el centro hasta la punta del cuchillo
- $F$  Velocidad de alimentación

### 2.3 Emisión acústica

La emisión acústica (EA) puede ser definida como ondas de estrés y presión generadas durante un proceso dinámico en los materiales. El sonido generado antes de la ruptura de una rama de un árbol sometida a una carga es un ejemplo de EA.

La EA es usualmente medida mediante la utilización de sensores (transductores) los cuales al recibir los estímulos de las ondas de estrés, transforman los efectos mecánicos en señales las cuales son amplificadas y transmitidas a un osciloscopio, contador, o software especializado dependiendo del análisis.

El gran inconveniente de la aplicación de EA en procesos de control, es el análisis y la interpretación de las señales, debido a que estas no son periódicas y contienen muchas frecuencias que no pueden ser descritas por un modelo matemático específico. Debido a esto se utilizan herramientas de análisis estadístico para caracterizar las señales. El transductor más común es un sensor piezoeléctrico.

Una manera fácil de medición de las señales es a través de un voltímetro RMS (raíz media cuadrática). Se asume que el voltaje proveniente del transductor es proporcional a la raíz media cuadrática de la energía emitida durante el proceso de deformación, por lo tanto, el voltaje de salida de la cara de un sensor piezoeléctrico es proporcional al estrés en la cara del sensor y por ello la densidad de energía de una onda de estrés es proporcional al cuadrado del estrés (Lemaster *et al*, 1982).

El voltaje RMS de una señal continua de EA puede ser utilizado para medir la energía de la señal de EA. El valor RMS de una señal de EA que pasa a través de un circuito por un tiempo determinado, es equivalente a la energía de señal de EA, analíticamente esto puede ser definido como:

$$\left(1/\Delta T \int V^2(t)dt\right)^{1/2} \quad (2)$$

Donde

$V(t)$  representa la función de la señal con respecto del tiempo.

$\Delta T$  representa el período de tiempo

### **2.3.1 Parámetros de emisión acústica**

Las señales de EA poseen parámetros que permiten rescatar información útil sobre los eventos que se están evaluando, tal y como expone kawamoto . (1998):

- Umbral: Es el nivel de energía (en Volts) prefijado con el objeto de eliminar las señales contaminadas indeseables
- Duración de la señal de EA: Es el tiempo transcurrido entre la primera y la última señal sobre el nivel de detección prefijado (umbral).

- Energía: El área encerrada bajo la curva en el eje positivo es la energía producida por un evento de EA. Esta es proporcional a la energía real de la onda de EA y a la vez, es representativo de la intensidad y la duración de esta señal. Este parámetro se mide en voltios.
- Amplitud del evento de EA: Se define como el máximo valor alcanzado durante un evento de EA. La amplitud es medida en voltios.
- Tiempo a la máxima amplitud: Es el intervalo de tiempo transcurrido entre la primera señal, que sobrepasa el nivel de tensión determinado por el umbral y la señal máxima de amplitud.

### **2.3.2 Emisión acústica en monitoreo del maquinado de madera**

Recientemente se han desarrollado varios trabajos en lo que se refiere al uso de la EA en el maquinado de madera. El uso de EA en el monitoreo del maquinado de madera ha probado ser de utilidad en monitorear e identificar el efecto que provocan los cambios en las operaciones de corte.

Los procesos de corte de madera en general toman lugar en un sistema máquina-pieza de corte-herramienta. Cuando se emite energía en este sistema se produce la EA. Existen cuatro fuentes potenciales de EA:

1. La deformación plástica en la zona de contacto pieza-herramienta,
2. Viruta en contacto con la cara de la herramienta,
3. Fractura de la viruta (como elementos discontinuos),
4. Pieza de corte friccionando con la herramienta.

Lemaster *et al.*, (1982) determinó los efectos sobre la emisión acústica en el corte a baja velocidad. A través de sus resultados pudo concluir que la EA esta íntimamente relacionada a la deformación en la pieza de trabajo inducida en la parte cercana a la arista de corte, fenómeno evidenciado por el esfuerzo de corte vertical.

Cyra, Tanaka (2000) determinaron los efectos en la EA ante el cambio en el ángulo de inclinación de las fibras. Se encontró que al reducir el ángulo de inclinación se obtienen valores más bajos de EA.

Murase (1994), estudió, el efecto del peso específico, ángulo de corte, y contenido de humedad en la emisión acústica. Sus datos muestran que a medida que aumenta el peso específico de la madera se obtienen

valores mas altos de voltaje RMS, de igual manera al disminuir la humedad se obtiene un aumento en el Voltaje RMS.

#### **2.4 Emisión de sonido en el maquinado de madera**

El monitoreo de la emisión de sonido en maquinado es una técnica que no se investigado extensamente. Existen algunos trabajos enfocados a la utilización de la emisión sonido como alternativa del uso de EA en maquinado de madera. Tanaka *et al.* (1988) propuso la medición de señales acústicas a través de la utilización de un micrófono. Los resultados de este trabajo indican que el uso de este método en sistemas de control a base de sierras circulares y alimentación automática, permite estimar la rugosidad superficial.

Tanaka (2005), realizó un análisis comparativo entre diferentes métodos de medición de las señales acústicas para la evaluación de la rugosidad superficial en corte periférico. Entre dichos métodos utilizó la intensidad de sonido. Banshoya *et al.* (1994) determinó la relación entre el sonido producido por el corte y el desgaste de la herramienta en el maquinado de madera y tableros.

La dificultad en la utilización de este método se debe a que el sonido de los procesos de corte debe ser aislado de otras señales de audio.

Debido a que los ambientes donde se produce la transformación de la madera cuentan con numerosas máquinas cercanas entre si, el problema del aislamiento de las señales de corte se agudiza.

Kannatey-Asibu y Lu (1999), realizaron un análisis espectral para determinar el efecto de la emisión de sonido en los procesos de desgaste de la herramienta de corte. Además crearon un modelo matemático para explicar la interacción entre el desgaste y la emisión de sonido. El análisis espectral consiste en observar las diferencias de frecuencia de la señal al cambiar los parámetros de corte o las condiciones del material.

## **2.5 Rugosidad superficial en madera dimensionada**

La superficie de la madera es muy difícil de determinar debido a su heterogeneidad basada en una estructura anatómica específica independiente a cualquier procesamiento. También, al tratarse de un material anisotrópico existen variaciones significativas dependiendo del eje al cual se le evalúe la superficie.

Para analizar la rugosidad se deben determinar los conceptos generales referentes a superficie. Una superficie es un límite que divide

una capa o sustancia de otra, este se conoce como rugosidad nominal que no incluye la rugosidad en la superficie. La superficie real es el resultado de la remoción de la superficie nominal producto de un proceso químico o físico. Esta remoción produce cambios en la forma, la ondulación y la rugosidad.

La ondulación incluye desviaciones en la longitud de onda de la superficie real, producto de la remoción de la superficie nominal. La rugosidad se define como una irregularidad de la superficie producida por las longitudes de onda más pequeñas en ella. La rugosidad superficial resulta de un proceso particular o producto de las características del material (PDI, 1998).

#### **2.4.1 Perfiles de rugosidad**

Un perfil es, matemáticamente, la línea de intersección de la superficie con el plano, que es perpendicular a la superficie. Los perfiles de rugosidad incluyen solo las desviaciones en las ondas con longitudes cortas. Al medir la rugosidad se filtra la medición mediante la eliminación de ondas de longitud larga asociadas a la ondulación. También se filtran ondas muy pequeñas asociadas a ruido.

La rugosidad es importante debido a que determina la fricción con otra superficie. La rugosidad superficial determina la apariencia y su comportamiento con otros compuestos como pinturas, barnices selladores etc.

De acuerdo con Precision devices Inc. (1998), la altura de un perfil en un punto en particular es la distancia desde el perfil hasta su línea media. La altura de un perfil es positiva si se encuentra sobre la línea media y negativa si esta debajo de ella. La línea media es una línea de referencia desde la cual las desviaciones en un perfil son medidas. Es el punto cero del perfil total.

El punto más alto, cumbre, de un perfil es una región que se encuentra sobre la línea media e intersecta esta misma en cada final. La altura de una cumbre es definida como el punto de máxima altura en una región (PDI, 1998).

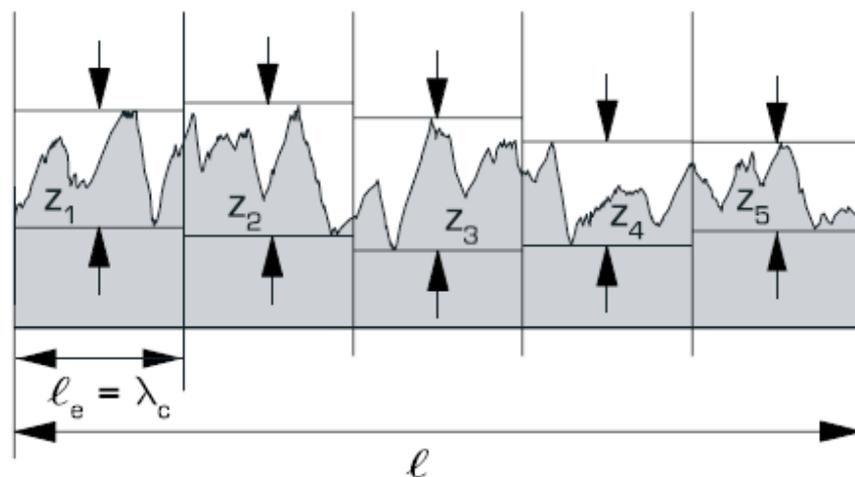
El valle de un perfil es análogo a una cumbre, región que reside bajo la línea media y la intersecta en cada final. La profundidad de un valle es el punto menor dentro de ese valle (PDI, 1998)

El sistema de coordenadas de un perfil superficial es tridimensional. Consta de un plano horizontal X, un plano vertical conformado por los

valles y cumbres, y un eje Z que es perpendicular a la superficie y se asocia con los desplazamientos.

### 2.3.1 Parámetros de rugosidad Rz

La medición de rugosidad superficial se basa en parámetros estadísticos y matemáticos para su implementación. Uno de estos parámetros es Rz que es el promedio de la altura de las cinco cumbres más altas, más los cinco valles más profundos en la longitud de evaluación, tal como se muestra en la figura 9. Las normas Din 4768, ISO 13563 y JISB0601-2001 sugieren el uso de este parámetro para la evaluación de la rugosidad en la superficie de materiales.



**Figura 9.** Parámetro Rz, mostrando las 5 cumbres y los 5 valles en secciones,  $l$  representa la longitud de evaluación.

### 3. MATERIAL Y MÉTODO

En este apartado se hace referencia al material y metodología utilizada para alcanzar los objetivos del estudio con el fin de entender de una mejor forma todo el proceso que implicó este estudio.

#### 3.1. Materiales y equipos

##### 3.1.1. Madera

Durante la realización del estudio se obtuvo madera de Acacia melanoxylon para la obtención de las probetas de trabajo. En la primera fase la madera fue secada al horno hasta obtener un contenido de humedad promedio de 10% (ver figura 10). Además se calculó la densidad básica tanto de albura como de duramen.



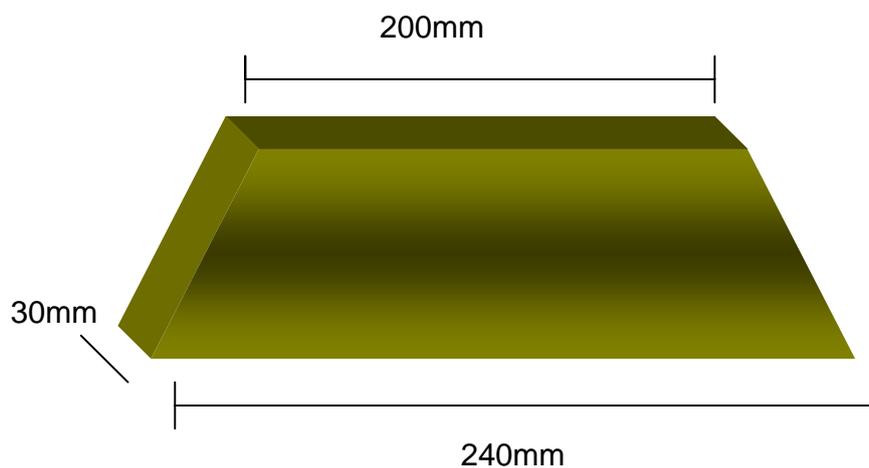
**Figura 10.** Aromo australiano a la entrada del secador

Después se procedió a efectuar una selección de madera libre de bolsas de resina, pudriciones etc. Luego se seleccionó la madera de duramen y la madera de albura de acuerdo a la coloración de la madera (ver figura 11).



**Figura 11.** Sección transversal de troza de aramo australiano La letra A identifica a la albura y la parte oscura al duramen.

Las probetas de medición de EA y rugosidad tuvieron la forma y dimensiones expuestas en la figura 12. Su forma se debe al mecanismo de sujetamiento de la pieza en el portaprobeta.



**Figura 12.** Dimensiones de probetas utilizadas en maquinado

### 3.1.2 Portaprobetas

El portaprobetas, además de permitir la fijación de la probeta contiene el sensor piezoeléctrico y el amplificador (Figura 13). En su parte superior posee una superficie áspera para facilitar la adherencia de los rodillos del carro de alimentación al portaprobetas.



**Figura 13.** Porta probetas con sensor piezoeléctrico en el centro

### 3.1.3 La máquina

Para el maquinado se utilizó una fresadora tipo tupí marca “Griggio” que posee una potencia de motor de 4 kW y una velocidad de rotación variable de 3200 a 8000 RPM, nominales. Posee un elemento adicional que permite el avance automático (carro de avance) de la pieza con velocidad regulable de 4 a 22 m/min teóricos (Figura 14,15).



**Figura 14.** La máquina tupí



**Figura 15.** Carro de avance

### 3.1.4 Herramienta de corte

Los elementos de corte son cuchillos de acero de alta velocidad (HSS<sup>1</sup>), los cuales se montaron sobre el cabezal porta cuchillos, con capacidad para fijar seis cuchillos. Además, el cabezal es de tipo hidrocentrante que mejora el ajuste al eje rotor de la maquina, reduciendo las vibraciones del sistema cabezal-eje (ver figura 16).



**Figura 16.** Cabezal hidrocentrante de 6 cuchillos Z=6

---

<sup>1</sup> High Speed Steel

### 3.1.5 Medición de emisión acústica

Para la medición de emisión acústica se empleó un sensor piezoeléctrico (Figuras 17 y 18) el cual entra en contacto directo con la probeta, la cual considera frecuencias superiores a 1 MHz. Las emisiones son recogidas por una tarjeta SEK 3243 que son interpretadas por un programa compatible con PC escrito en lenguaje C (Borland C).



**Figura 17.** Sensor piezoeléctrico vista inferior



**Figura 18.** Vista superior

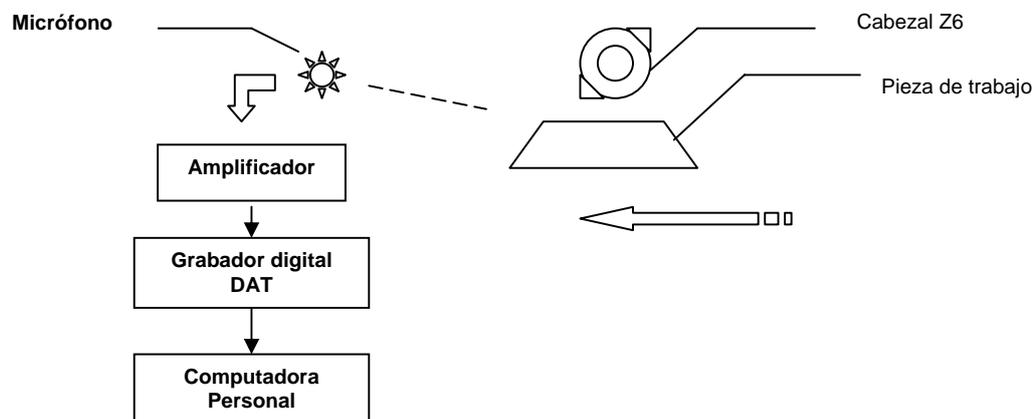
El preamplificador (Figura 19) se empleó a un nivel de 0 db, de acuerdo con la metodología desarrollada por Vega (2004).



**Figura 19.** Preamplificador

### 3.1.6 Medición de la Emisión de sonido

La emisión de sonido se midió con un micrófono separado en 0.3 m de la zona de corte. Las señales fueron registradas en un grabador DAT y posteriormente transferidas a una PC para su posterior procesamiento con la ayuda del software samplitude®. Seguidamente, la información fue procesada utilizando la plataforma MATLAB® 6.0 para realizar un programa específico que permite obtener el espectro y la variación temporal de los valores RMS de la señal.



**Figura 20.** Esquema del proceso de toma de datos de emisión de sonido.

### 3.1.7 Medición de rugosidad superficial

La rugosidad superficial se midió con un rugosímetro del tipo “stylus”, marca Mitutoyo, modelo SJ-201, (Figura 20) con un diámetro de cabezal de diamante de 5 $\mu$ m. Las mediciones se realizaron perpendicularmente a las marcas producidas por los cuchillos durante el corte, con un recorrido de 25mm, siguiendo la norma JIS<sup>2</sup>.



**Figura 21.** Rugosímetro Mitutoyo SJ-201

Las mediciones fueron hechas utilizando el parámetro Rz basados en las normas Din 4768, ISO 13563 y JISB0601-2001, que lo indican como uno de los valores más adecuados para la estimación de la rugosidad superficial en materiales sólidos.

---

<sup>2</sup> Japanese Industrial Standard

## 3.2 Diseño experimental

### 3.2.1 Condiciones de corte, emisión acústica, emisión de sonido y rugosidad superficial

Se procesaron las probetas de duramen y albura para la medición de EA y rugosidad superficial a favor de la fibra, según las condiciones descritas en los cuadros 1,2, 3 y 4.

**Cuadro 1.** Condiciones de corte

Factor	Condiciones
Velocidad de avance (Vf) en m/min	4 – 8- 11
Velocidad de rotación (Vc) en RPM	3200 – 4200 - 6000
Diámetro del cabezal con Z=6 (D) en (mm)	162
Numero de cuchillos (Z)	6
Angulo de ataque	25°
Ancho de corte (ae) en mm	30
Probeta	<i>Acacia melanoxylon</i> Br.
Estructura anatómica de la madera	Albura y Duramen
Densidad básica albura Kg/m <sup>3</sup>	538.0
Densidad básica duramen Kg/m <sup>3</sup>	648.6
Ángulo de inclinación de fibras	0°
Contenido de humedad	10%

**Cuadro 2.** Condiciones de medición de emisión acústica

<b>Factor</b>	<b>Condición</b>
Método de medición (V)	RMS
Umbral (mV)	55
Amplificador (dB)	0

**Cuadro 3.** Condiciones de medición de emisión de sonido

<b>Factor</b>	<b>Condición/unidad de medición</b>
Método de medición (V)	RMS
Análisis espectral	Hertz

**Cuadro 4.** Condiciones de medición de la rugosidad

<b>Factor</b>	<b>Condición</b>
Método de medición	Rugosímetro de contacto
Parámetro de rugosidad superficial	Rz según JIS
Largo de la evaluación (mm)	25
Puntos de evaluación	10

Las constantes del proceso son:

- Ángulo de ataque e incidencia.
- Número de anillos
- Diámetro de corte
- Profundidad de corte
- Material de corte (HSS)
- Ancho de corte
- Contenido de humedad
- Umbral y amplificador en la medición de EA
- El método de medición de la rugosidad superficial, así como el largo y frecuencia de los puntos evaluados

Las variables del proceso son:

- Velocidad de avance
- Velocidad de rotación
- Estructura anatómica de la madera, (albura y duramen)

Antes del maquinado la madera fue secada al horno de acuerdo a un programa de secado elaborado para evitar rajaduras, curvaturas y otros tipos de defectos asociados al secado. Después se procedió a la elaboración de las probetas de albura y duramen mediante selección visual de acuerdo a la coloración. La altura a la cual se extrajeron las

muestras fue de 2.50 metros desde la base inferior de la troza. Seguidamente se determinó su contenido de humedad y su densidad básica. Después se procedió al maquinado de las piezas de albura y duramen midiendo simultáneamente la emisión acústica. Antes y después de efectuar cada corte se determinó el peso y el volumen de cada pieza para determinar la densidad de madera extraída y compararla con los valores de emisión acústica y rugosidad.

Para la determinación de EA y rugosidad, las probetas fueron maquinadas a velocidades de rotación de 3200, 4200 y 6000 RPM y tres velocidades de avance 4, 8 y 11m/min. Tanto para albura como para duramen, se realizaron cuatro cortes por probeta (Cuatro repeticiones), y se utilizaron dos probetas para cada combinación de condición tal como se muestra en el cuadro 5 y 6.

Las probetas de duramen y albura, fueron maquinadas en oposición con una profundidad de corte de 2mm (ap). La selección de la profundidad se obtuvo considerando estudios previos de optimización desarrollada por Aguilera (2000).

**Cuadro 5.** Diseño Experimental para albura en la medición de EA y rugosidad

V. Alimentación (m/min)	V. Rotación RPM	Z	D (mm)	ec <sup>3</sup> (mm)	Probetas	Repeticiones P/probeta
4	3200	6	162	0.024	2	4
8	3200	6	162	0.047	2	4
11	3200	6	162	0.065	2	4
4	4200	6	162	0.018	2	4
8	4200	6	162	0.037	2	4
11	4200	6	162	0.051	2	4
4	6000	6	162	0.013	2	4
8	6000	6	162	0.025	2	4
11	6000	6	162	0.035	2	4

**Cuadro 6.** Diseño experimental para duramen en la medición de EA y rugosidad

V. Alimentación (m/min)	V. Rotación RPM	Z	D (mm)	ec (mm)	Probetas	Repeticiones P/probeta
4	3200	6	162	0.024	2	4
8	3200	6	162	0.047	2	4
11	3200	6	162	0.065	2	4
4	4200	6	162	0.018	2	4
8	4200	6	162	0.037	2	4
11	4200	6	162	0.051	2	4
4	6000	6	162	0.013	2	4
8	6000	6	162	0.025	2	4
11	6000	6	162	0.035	2	4

Los datos de emisión acústica, obtenidos a través de la tarjeta SEK 3243 fueron filtrados de tal forma que se trabajó con el 50% de los datos al eliminar el 25% de cada extremo. El método de medición RMS fue utilizado debido a que rectifica el promedio del tiempo de la señal de EA, medida sobre una escala lineal y expresada en Volts.

<sup>3</sup> Espesor de viruta calculado según formula 1.

La emisión de sonido fue medida a una velocidad de rotación fija de 4200 RPM siguiendo diseño experimental como se muestra en el cuadro 7. Se realizó un análisis en base a la energía emitida por la señal, tomando como valor el voltaje RMS. Además se realizó un análisis espectral de la señal, en que se midieron los datos obtenidos de la frecuencia fundamental y la armónica. Se midieron las diferencias de altura entre la frecuencia fundamental y la armónica para aplicar el mismo tratamiento a todos los datos.

**Cuadro 7.** Diseño experimental para albura y duramen en la medición de la emisión de sonido

V. Alimentación (m/min)	V. Rotación RPM	Z	D (mm)	ec (mm)	Probetas	Repeticiones P/probeta
4	4200	6	162	0.018	2	3
8	4200	6	162	0.037	2	3
11	4200	6	162	0.051	2	3

La rugosidad superficial fue medida a través del parámetro Rz definido por las normas, Din 4768, ISO 13563 y JISB0601-2001. Se tomaron 10 mediciones distribuidas en pares desde el extremo derecho hasta el izquierdo.

### **3.3 Análisis estadístico**

Los datos de emisión acústica en RMS (V), emisión de sonido RMS (V) y rugosidad superficial (Rz) para albura y duramen, fueron analizados en el paquete estadístico SPSS® 11.0.

Al inicio se determinó si los datos cumplían las condiciones de Independencia de los errores, normalidad y homocedasticidad. El muestreo aleatorio de los datos permitió cumplir la condición de independencia de los errores. Posteriormente se realizó un test de normalidad de kolmogov-smirnov para determinar la distribución normal de los errores. A continuación se efectuó el test de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas, utilizando el modelo conocido como Barlett-Box.

Con el cumplimiento de las tres condiciones se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías con un nivel de confianza del 95% para la EA y rugosidad superficial, respecto de la velocidad de corte y la velocidad de alimentación. Paralelamente se realizó una prueba de Tukey a los factores independientes como velocidad de corte y velocidad de alimentación. Ambas pruebas fueron realizadas en albura y duramen.

Debido a que los datos de emisión sonido fueron realizados a una única velocidad de rotación, se efectuó un ANDEVA simple para determinar la existencia de diferencias significativas entre albura y duramen.

Se realizaron modelos de regresión simples entre los espesores de viruta promedio la EA y la rugosidad superficial.

#### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Densidad de albura y duramen de Acacia melanoxylon

En el Cuadro 8 se presentan los valores de densidad obtenidos a través del método de desplazamiento de fluidos. Se puede observar la diferencia entre las densidades de albura con respecto de duramen siendo mayor en esta última.

**Cuadro 8.** Densidad de albura y duramen de Acacia melanoxylon Br.

<u>Densidad</u>	<u>Albura kg/m<sup>3</sup></u>	<u>Duramen Kg/m<sup>3</sup></u>	<u>Promedio</u>
Basica	538.0	648.6	593.3
Anhidra	676.6	750.0	713.3
Verde	992.0	1061.4	1026.7

Los datos obtenidos de densidad se asemejaron con lo establecido por Nicholas et al. (1994) que encontró una densidad básica de 471 kg/m<sup>3</sup> y una densidad verde de 972 kg/m<sup>3</sup>, y Haslett (1989) que encontró una densidad básica de 593 kg/m<sup>3</sup> y una verde de 1040 kg/m<sup>3</sup>. No se encontraron valores comparativos para duramen y albura específicamente.

## 4.2 Emisión Acústica

### 4.2.1 Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon

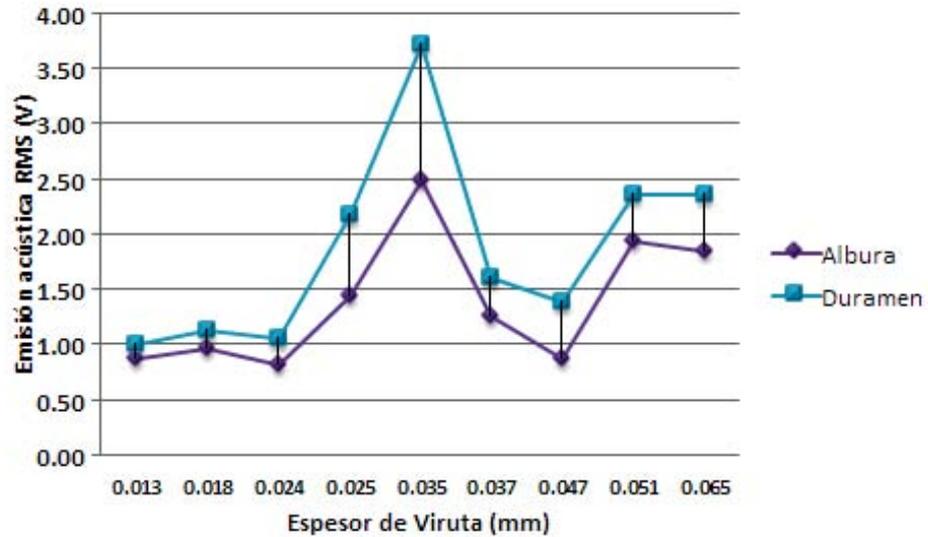
El cuadro 9 muestra los valores de emisión acústica alcanzados en RMS (V), para madera de duramen y albura, a diferentes espesores de viruta. Los datos obtenidos en este cuadro exponen la estadística descriptiva para todos los espesores de viruta estudiados.

**Cuadro 9.** Resumen de EA promedio generada a distintos espesores de viruta

	<b>RMS (V)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Albura</b>	1.40025	0.58859	0.81936	2.49782
<b>Duramen</b>	1.87292	0.88733	1.00938	3.73160

Como se puede observar, existen valores mayores de EA para duramen debido a su mayor densidad. Similares resultados obtuvo Murase (1994) al encontrar que un aumento en la densidad de la madera incrementa la EA.

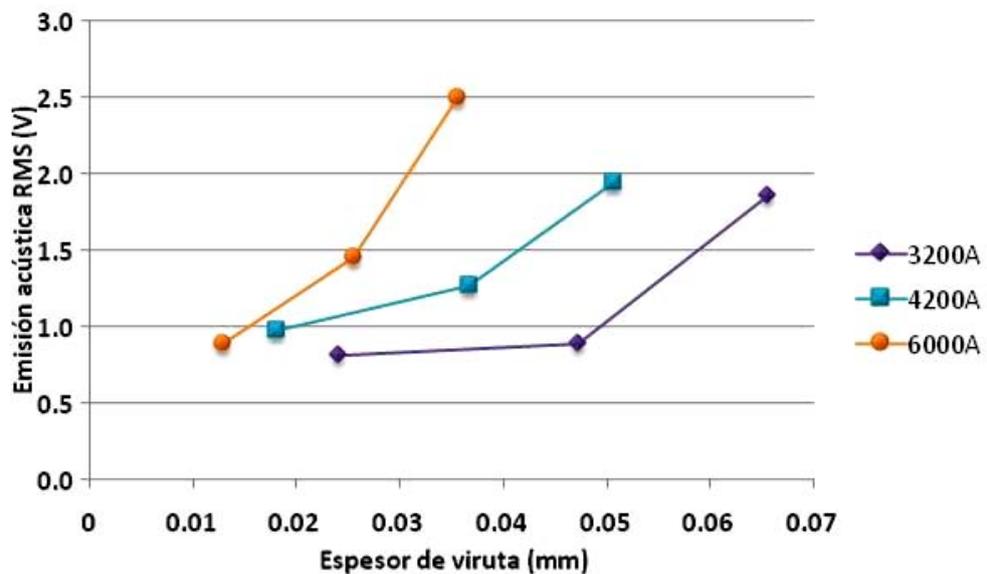
Los cambios de EA en función del espesor de viruta se observan en la figura 22. A medida que aumenta el espesor de viruta se incrementa la EA. Sin embargo se experimentaron elevaciones anormales en la zona de 0.025-0.035.



**Figura 22.** Efecto del espesor de viruta (mm) en los Voltajes RMS de las señales de EA para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

No se pudo establecer la causa de la obtención de valores más altos de lo esperado en esta zona, pero si se pudo establecer que su origen fue producto del maquinado a una velocidad de rotación de 6000 RPM para albura y duramen.

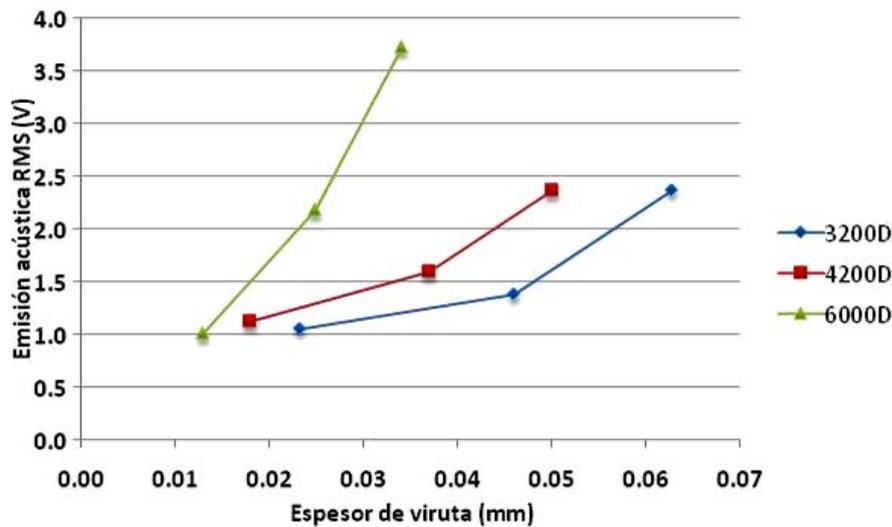
Se elaboraron gráficas separadas del comportamiento de la EA con respecto a los espesores de viruta, de acuerdo a cada una de las velocidades de rotación en estudio, para lo cual se obtuvieron las figuras 23 para albura y 24 para duramen.



**Figura 23.** Efecto del espesor de viruta (mm) en los valores de emisión acústica para madera de albura de *Acacia melanoxylon*.. Valores agrupados por velocidad de rotación.

Los resultados son similares a los encontrados por Lemaster (2000). Los coeficientes de correlación para albura son: 0.75 para 3200RPM; 0.91 para 4200RPM y 0.95 para 6000 RPM. Todos significativos al 0.05.

En el caso de duramen se experimenta la misma tendencia al aumento de la EA respecto del espesor de viruta para cada una de las velocidades de corte. Para duramen los coeficientes de correlación son: 0.87 a 3200 RPM; 0.94 a 4200RPM y 0.97 a 6000 RPM.



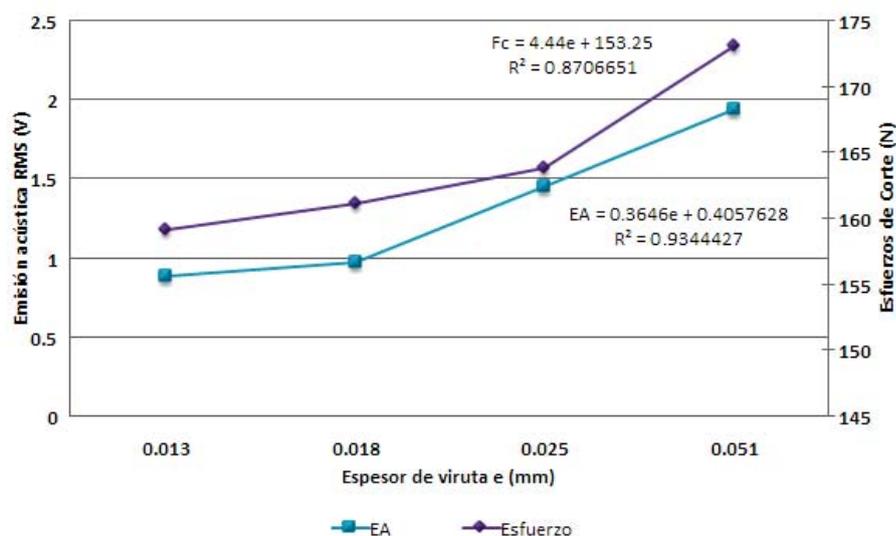
**Figura 24.** Efecto del espesor de viruta (mm) en la emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*. Valores agrupados por velocidad de rotación.

Los valores de emisión acústica varían de albura a duramen debido a las características anatómicas de cada uno. Se establecieron dos fenómenos como fuente de variación. Una de las causas se debió a las diferencias en el contenido de humedad entre albura y duramen. Debido a que la EA disminuye al aumentar el contenido de humedad (Murase 1994), se obtienen mayores valores en el duramen en comparación con la albura. El duramen posee un menor contenido de humedad porque sus células se encuentran oclusionadas, producto de las tñides, limitando el intercambio de fluidos. La otra causa se produjo en relación a la densidad de la madera. A medida que se aumenta la densidad se produce una liberación más rápida y periódica de ondas de tensión

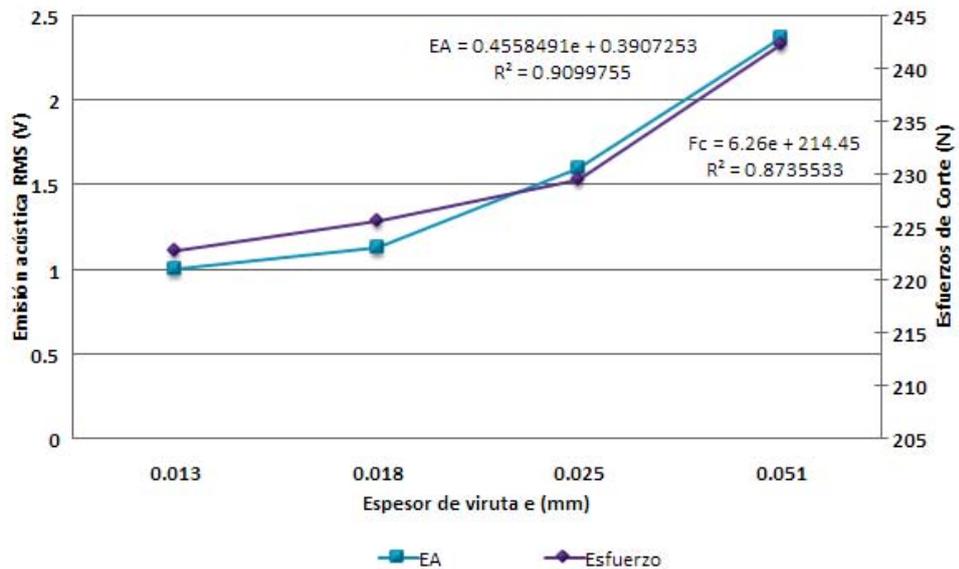
elásticas durante el corte lo que resulta en un aumento en la EA (Barry, Byrne 2001). Similares resultados obtuvo Lemaster y Gasik (1988) al medir los perfiles de densidad en tableros aglomerados de madera utilizando emisión acústica. En este estudio se encontró que en zonas con mayores densidades se obtienen valores de EA más altos en contraste con las zonas de baja densidad.

#### 4.2.2 Relación entre la emisión acústica y los esfuerzos de corte para albura y duramen de Acacia melanoxylon

Con la utilización de un software especializado elaborado por Aguilera (2005), se determinaron los esfuerzos de corte de acuerdo a la densidad de la albura y duramen y las condiciones de corte establecidas. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 25 y 26.



**Figura 25.** Efecto del espesor de viruta (mm) en los esfuerzos de corte (N) y la emisión acústica RMS (V) en madera albura de Acacia melanoxylon.



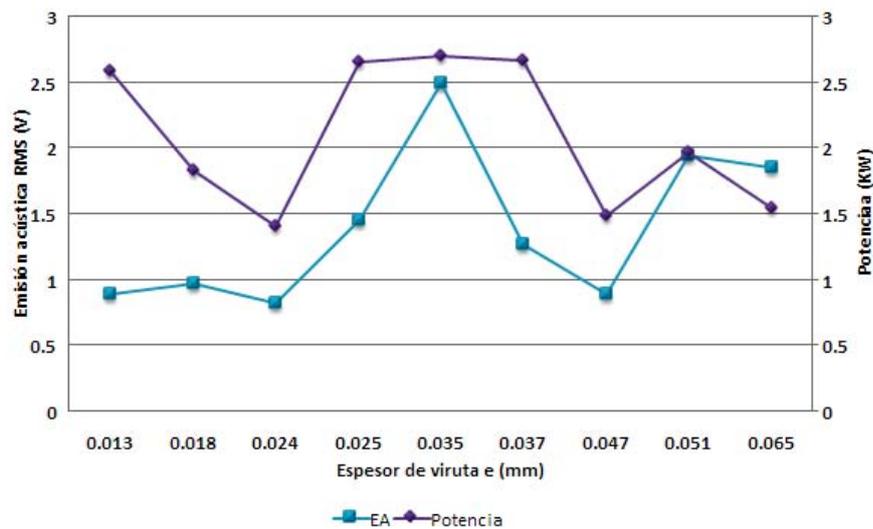
**Figura 26.** Efecto del espesor de viruta (mm) en los esfuerzos de corte (N) y la emisión acústica RMS (V) en madera de duramen de *Acacia melanoxylon*.

A medida que aumenta la EA los esfuerzos de corte son mayores. Esto está asociado al aumento en el espesor de la viruta, y se respalda con resultados obtenidos por Kivimaa (1950), quien determinó el efecto del espesor de viruta en los esfuerzos de corte. Esta relación resulta de gran utilidad porque abre una posibilidad a la estimación de los esfuerzos de corte a través de técnicas de emisión acústica bajo esta metodología.

Se obtuvieron mayores valores en duramen debido al aumento en la densidad. Mayores densidades oponen mayor resistencia a la herramienta de corte aumentando los esfuerzos.

#### 4.2.3 Relación entre la potencia de corte y la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon

La potencia de corte también fue estimada con ayuda del software especializado desarrollado por Aguilera (2005), tomando como base las condiciones de corte. Los resultados obtenidos para albura y duramen se muestran a continuación en las figuras 27 y 28.

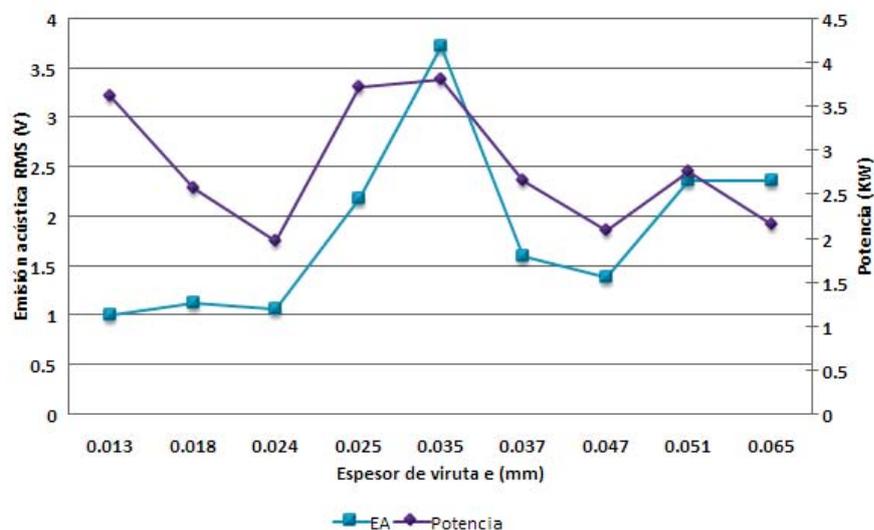


**Figura 27.** Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica RMS (V) y la potencia de corte (KW) para madera de albura de Acacia melanoxylon.

Los datos para albura y duramen muestran un comportamiento similar de las variables (EA y potencia de corte). El aumento anormal de la gráfica de EA en la región desde 0.025 a 0.037mm de espesor de viruta puede deberse a un aumento en la potencia de corte, sin embargo al no

haberse medido experimentalmente la potencia no se pueden tener datos concluyentes.

Vega (2004), estudió el efecto de la potencia de corte sobre la EA encontrando poca correlación con la potencia de corte, sin embargo sus resultados se asocian a la utilización de equipo que tuvo una frecuencia de captura de datos de 1 segundo siendo insuficiente para registrar fehacientemente el consumo energético bajo las distintas condiciones de corte. Sin embargo con un adecuado equipo se puede determinar la verdadera correlación entre la EA y la potencia de corte.

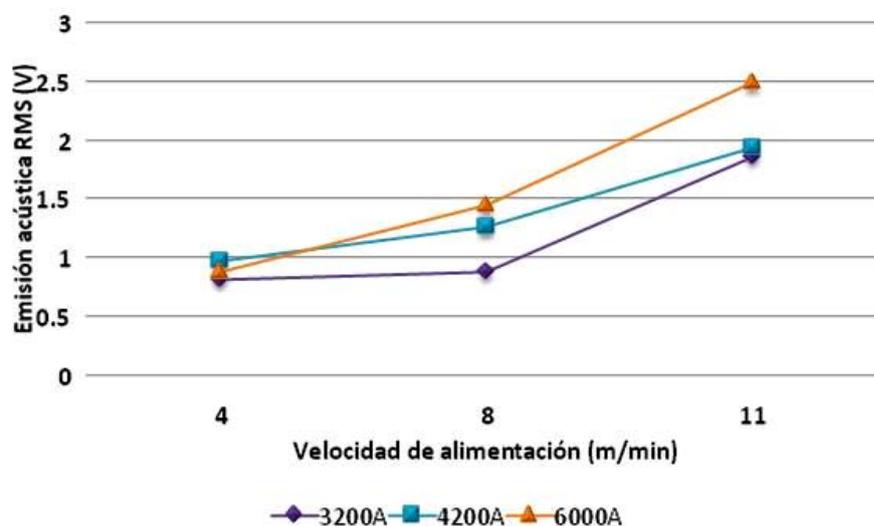


**Figura 28.** Efecto del espesor de viruta en la emisión acústica RMS (V) y la potencia de corte (KW) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*.

La potencia de corte es mayor en duramen que en albura debido a los cambios en densidad. Esto tiene íntima relación con la emisión acústica y los esfuerzos de corte.

#### 4.2.4 Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon

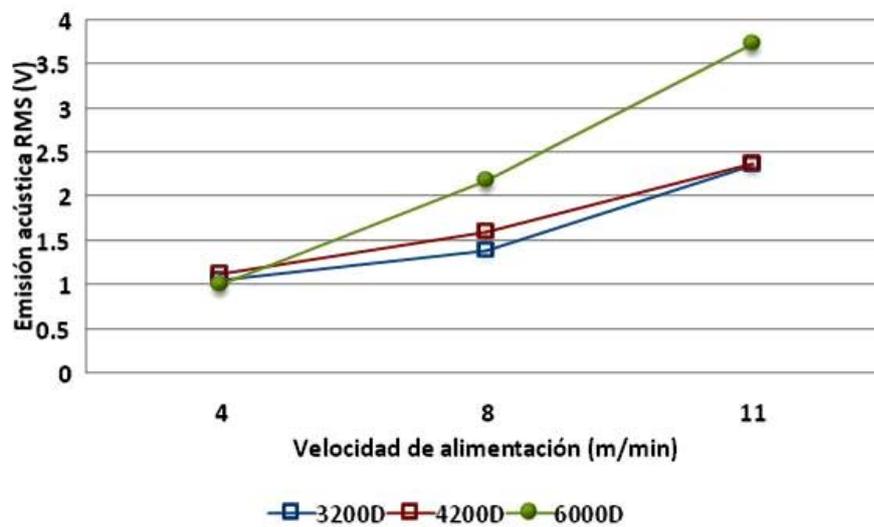
En la figura 29 se muestra el efecto de la velocidad de alimentación en la emisión acústica para albura a diferentes velocidades de corte. Se observa la tendencia ascendente de la emisión acústica con respecto al aumento en la velocidad de alimentación.



**Figura 29.** Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de Acacia melanoxylon.

Ante un aumento de la velocidad de alimentación se tienen mayores espesores de viruta por lo que la EA aumenta.

En la figura 30 se muestra el efecto de la velocidad de alimentación en la EA para duramen.

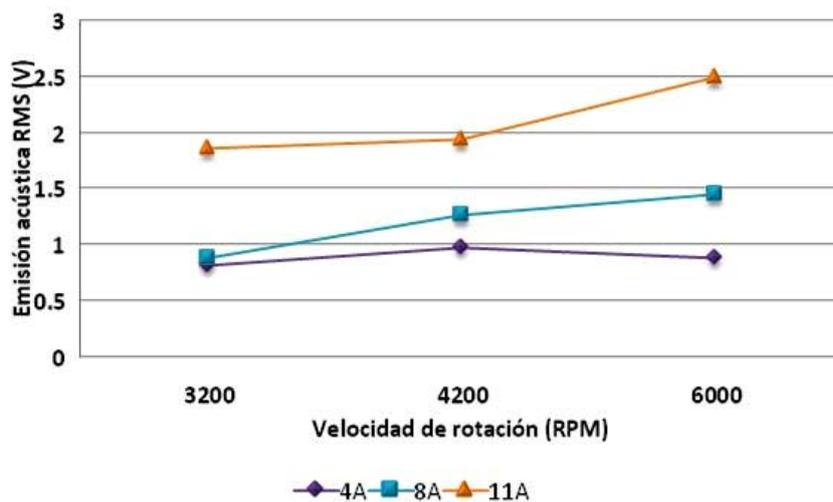


**Figura 30.** Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de *Acacia melanoxylon*.

Similares resultados obtuvo Lemaster (2000) al estudiar el efecto de la velocidad de alimentación en la EA, encontrando que al elevar la velocidad de alimentación se tienen mayores valores de EA.

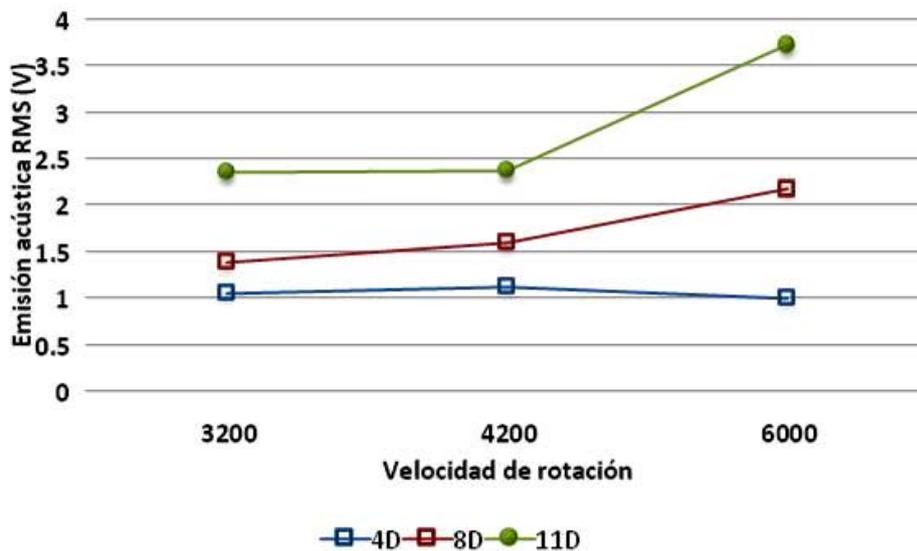
#### 4.2.5 Efecto de la velocidad de rotación en la emisión acústica para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon

El efecto de la velocidad de rotación sobre la emisión acústica, en albura, se muestra en la figura 31. La tendencia es al aumento, con excepción de los casos donde la velocidad de alimentación fue de 4 m/min debido a las escasas diferencias entre los espesores de viruta.



**Figura 31.** Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de Acacia melanoxylon.

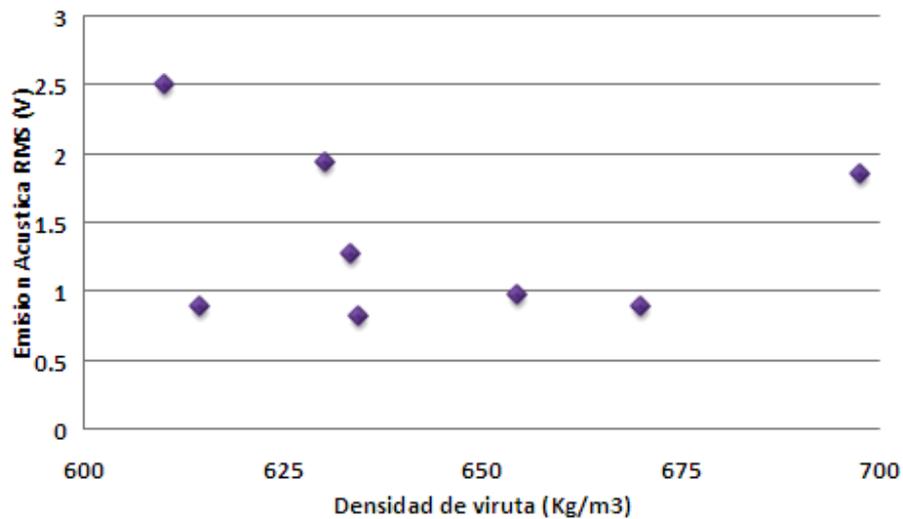
Para madera de duramen, la figura 32 muestra el efecto de la velocidad de rotación sobre la EA. Se repite la tendencia al ascenso al igual que en madera de duramen



**Figura 32.** Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*.

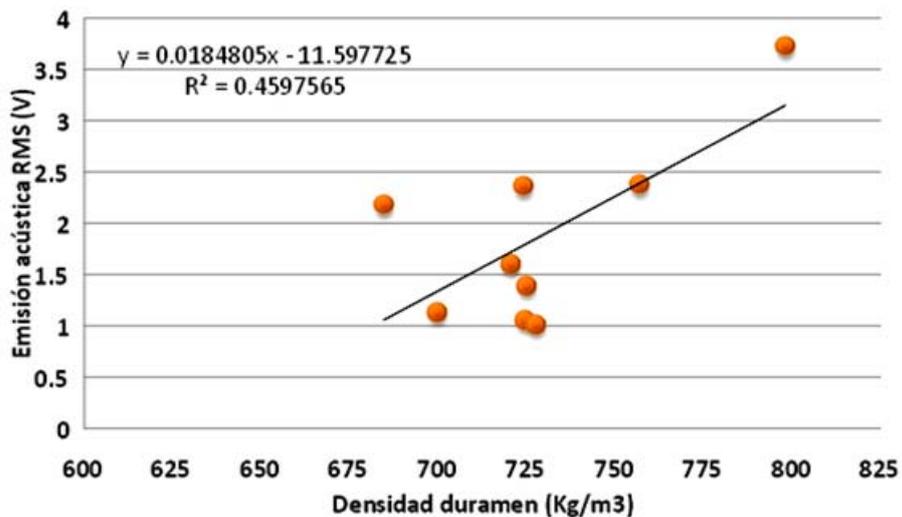
#### 4.2.4 Efecto de la densidad de la viruta en la emisión acústica para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*

Tal y como se expresó en la metodología, se midió la densidad de madera extraída en cada corte para albura y duramen. Los datos comparativos entre la densidad de la viruta y la emisión acústica se muestran en la figura 33 y 34 respectivamente.



**Figura 33.** Efecto de la densidad de viruta ( $\text{Kg/m}^3$ ) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de albura de *Acacia melanoxylon*.

En el caso de albura no se obtuvo ninguna correlación entre las variables mencionadas.



**Figura 34.** Efecto de la densidad de viruta ( $\text{Kg/m}^3$ ) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*.

En el caso de la madera de duramen existe una leve tendencia al aumento al elevarse la densidad de la viruta extraída durante el corte, sin embargo la correlación entre las variables no es significativa ( $p>0.05$ ). Este efecto se atribuye a que en la sensibilidad de emisión acústica priman otros factores por sobre la densidad de viruta, tales como la velocidad de corte y la velocidad de alimentación. Por otro lado existen otros factores externos que afectan la EA que no fueron determinados bajo la actual metodología (i.e. posición del sensor).

### 4.3 Emisión de sonido

#### 4.3.1 Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión de sonido para madera albura y duramen de Acacia melanoxylon

Los valores de emisión de sonido RMS promedio obtenidos durante el corte se muestran en el cuadro 10. Como se mencionó en la metodología todos los ensayos fueron realizados a una velocidad de rotación 4200 RPM.

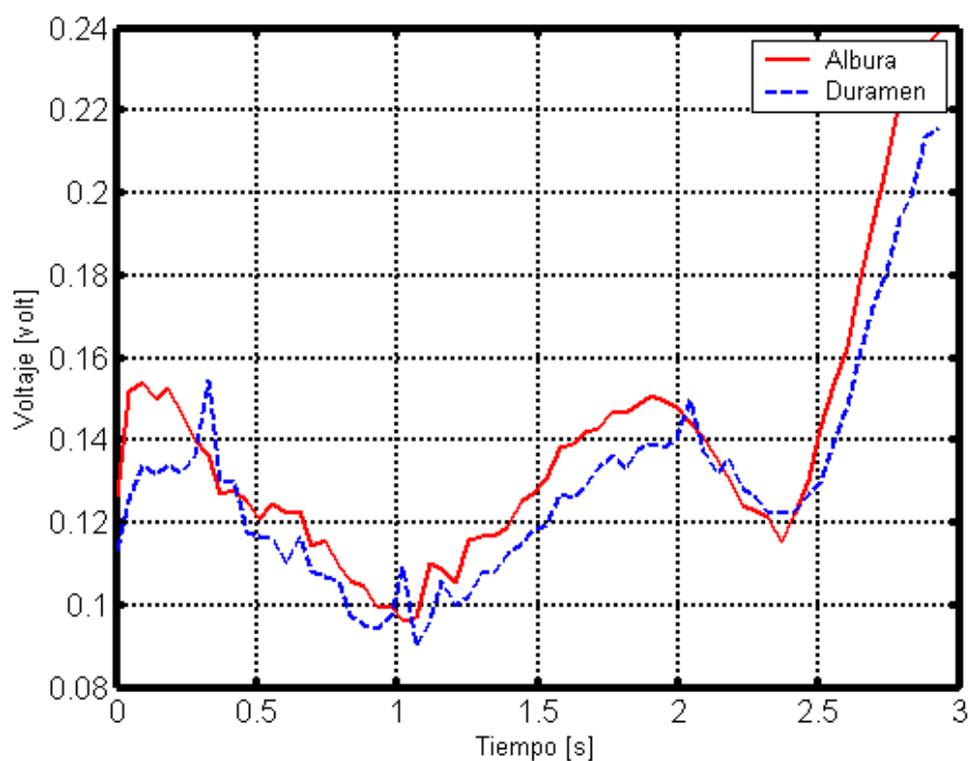
**Cuadro 10.** Valores promedio de emisión de sonido RMS a diferentes velocidades de alimentación

Velocidad de alimentación (m/min)	Emisión de sonido RMS (V) Albura	Emisión de sonido RMS (V) Duramen
4	0.143	0.138
8	0.146	0.154
11	0.155	0.149

No se encontró diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre los valores promedio de emisión de sonido RMS (V) obtenidos para madera de albura y duramen. Esto se debe principalmente a que se necesitó tomar más datos para determinar el efecto real de la variación de la velocidad de alimentación en la emisión de sonido, además las características de diseño del micrófono no permitieron un acercamiento

mayor a la zona de corte para recoger con mayor intensidad las señales sonoras provenientes del corte.

Los valores de emisión de sonido RMS obtenidos durante el tiempo de corte a una velocidad de alimentación de 4m/min para madera de albura y duramen se muestran en la figura 35.

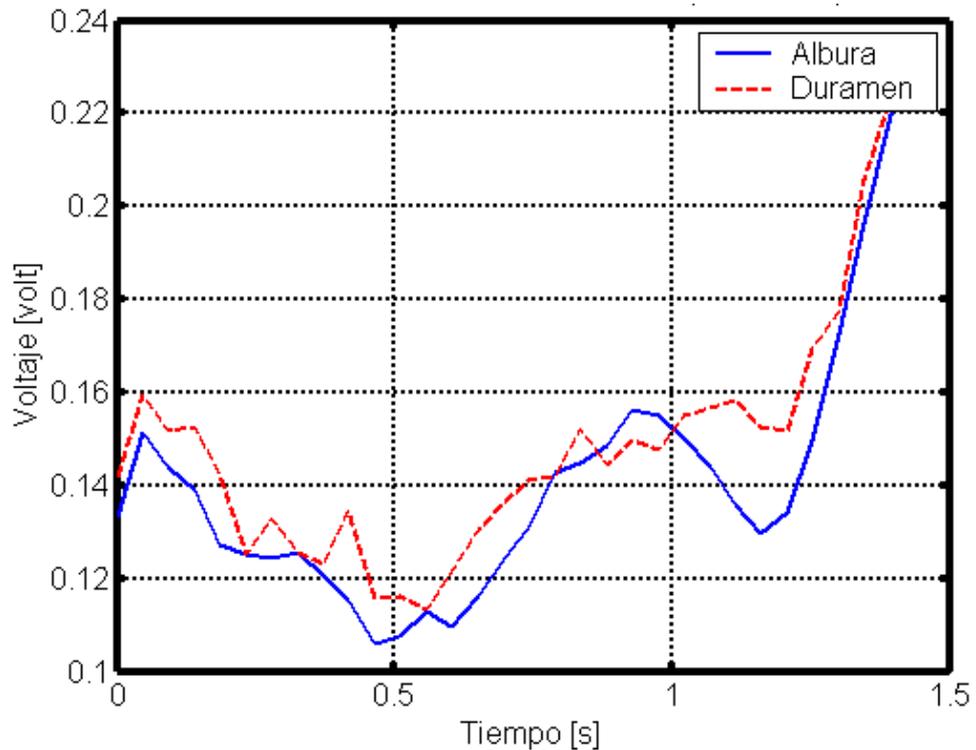


**Figura 35.** Comportamiento de los valores RMS promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 4m/min) para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

Los datos de albura resultan ser menores a lo largo del trayecto de la pieza durante el corte con excepción de algunos tramos, sin embargo, no se encontró una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ), entre los valores

promedio de emisión de sonido RMS entre madera albura y duramen para una velocidad de alimentación de 4m/min.

La figura 36 muestra los valores de emisión de sonido RMS obtenidos durante el tiempo de corte a una velocidad de alimentación de 8m/min para albura y duramen.

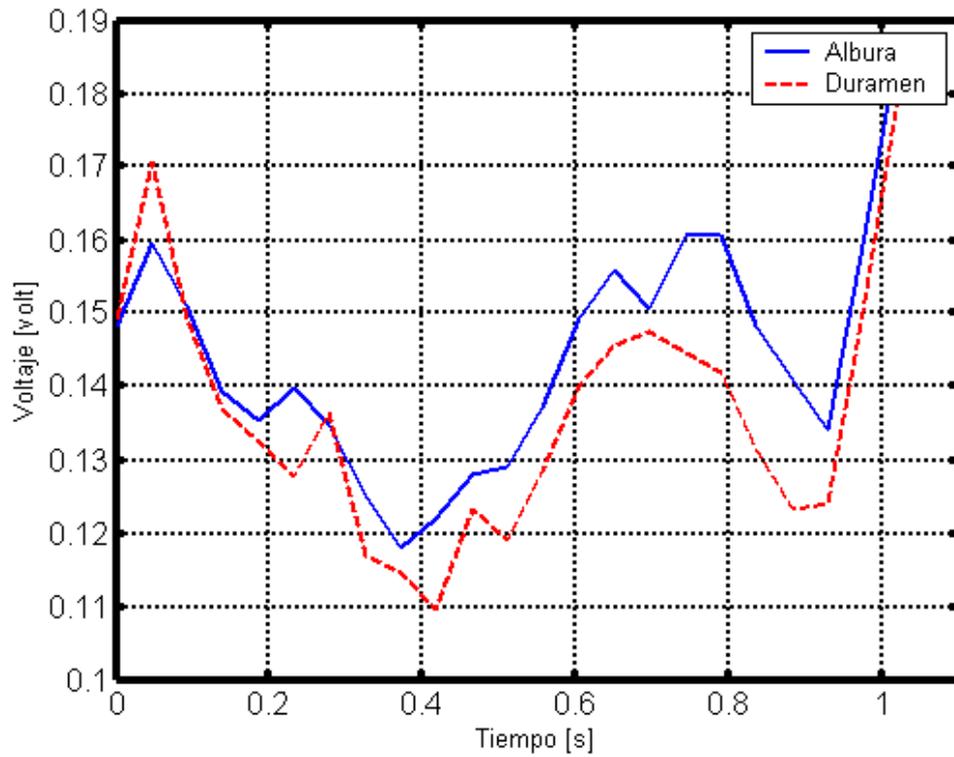


**Figura 36.** Comportamiento de los valores RMS (V) promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 8m/min) para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

Los valores obtenidos en la figura 36 muestran una tendencia contraria a la encontrada en los análisis efectuados con EA. Existen mayores valores promedio para albura que para duramen.

Aunque no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos de emisión de sonido en madera de albura y duramen, resulta interesante observar que la trayectoria de la emisión de sonido durante el tiempo de corte es muy similar a la encontrada en la figura 36. Se inicia con un elevamiento de la emisión de sonido para después proceder a un descenso hasta el punto medio (0.4s), después del cual aumenta hasta la terminación del corte (1s) donde muestra su valor más alto.

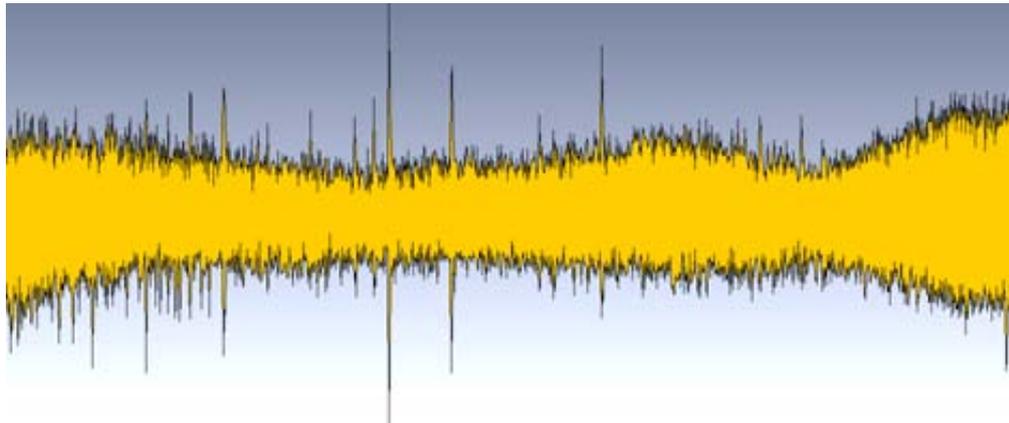
La trayectoria de la emisión de sonido a una velocidad de alimentación de 11m/min (figura 37) durante el tiempo que dura el corte se asemeja a las obtenidas anteriormente (para 4m/min y 8m/min), con la diferencia de que este tiempo de corte se reduce debido al aumento en la velocidad de avance. Por otro lado se tiene una mayor emisión de sonido en la mayoría de la trayectoria de corte para albura con respecto de la madera de duramen.



**Figura 37.** Comportamiento de los valores RMS (V) promedio de emisión de sonido durante el tiempo de duración del corte (velocidad de alimentación de 11m/min) para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

### 4.3.2 Análisis espectral de la señal de emisión de sonido

Antes de la realización del análisis espectral se obtuvo una gráfica sobre el comportamiento de las señales de sonido emitidas durante el corte. Los datos se pueden observar en la figura 38.



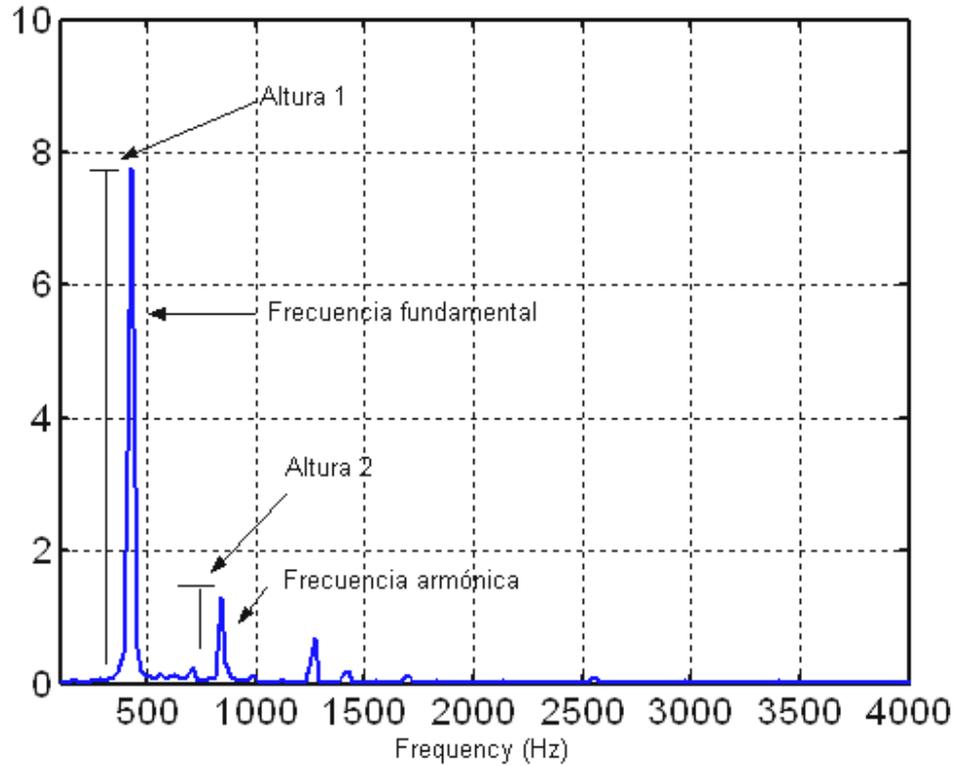
**Figura 38. Vista de la señal de sonido emitida durante el corte con una duración de 3 segundos (mono 16 bit 44100Hz) Samplitude master 6.0**

Después se realizó un análisis del espectro de la señal. El espectro de una señal periódica consiste en una componente de frecuencia fundamental, cuyo valor de frecuencia corresponde al recíproco del período y una serie de armónicos de esa frecuencia. En este caso la frecuencia está asociada al período de la herramienta de corte (4200 RPM). La frecuencia fundamental de cualquier elemento giratorio ya sea una hélice de un avión o una herramienta de corte circular se mide en función de la velocidad de rotación así como el número de aspas o cuchillos que posea.

La frecuencia fundamental calculada teóricamente se expone a continuación:

$$\text{Frecuencia fundamental} = \frac{4200\text{RPM}}{60} \times 6 = 420\text{Hz}$$

Los datos obtenidos experimentalmente se muestran en la figura



**Figura 39.** Representación del espectro de la emisión de sonido, durante el maquinado de *Acacia melanoxylon* a 4200 RPM.

El valor de frecuencia fundamental obtenido teóricamente se asemeja a lo encontrado en el espectro de la figura 39. La frecuencia fundamental encontrada fue de 430 Hz (4300 RPM). Esta frecuencia es la velocidad de rotación real del cabezal.

Esto resulta de utilidad para medir los espesores reales de viruta a una velocidad real de rotación definida. En futuros estudios puede incorporarse este valor como parámetro de corrección de los valores nominales

Las alturas de la frecuencia fundamental y armónica promedio alcanzadas para cada una de las velocidades de alimentación en estudio se muestran en el cuadro 11.

**Cuadro 11.** Alturas de la frecuencia fundamental y frecuencia armónica encontradas bajo las condiciones de maquinado de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

V. Alimentación	Frecuencia fundamental Altura 1		Frecuencia armónica Altura 2	
	<i>Albura</i>	<i>Duramen</i>	<i>Albura</i>	<i>Duramen</i>
<b>4</b>	8.8	8	2	1
<b>8</b>	8	9	1.5	1.6
<b>11</b>	8	6.7	1.8	1.4

No se encontraron diferencias significativas entre la frecuencia fundamental encontrada entre albura y duramen. Tampoco existen diferencias entre las diferentes velocidades de alimentación estudiadas.

## 4.4 Rugosidad superficial

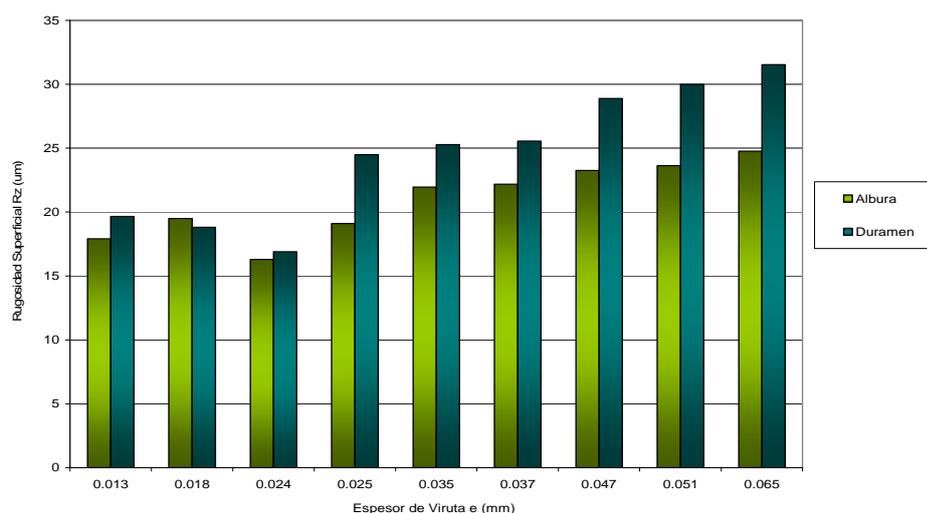
### 4.4.1 Efecto del espesor de viruta en la rugosidad superficial para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*

En el cuadro 12 se muestra un resumen general de los valores obtenidos de rugosidad superficial, parámetro Rz, para los espesores de viruta medios.

**Cuadro 12.** Estadística descriptiva de rugosidad superficial para los espesores de viruta estudiados.

	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
<b>Albura</b>	20.9727	5.4667	13.3822	34.9920
<b>Duramen</b>	22.6363	4.6898	14.2470	50.0000

Las diferencias entre la rugosidad superficial entre albura y duramen se presentan en la figura 40.



**Figura 40.** Efecto del espesor de viruta (mm) en la rugosidad superficial parámetro Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

Para duramen se encontró una rugosidad superficial mayor que en albura para todos los espesores de viruta excepto la condición de corte 4 m/min 4200 RPM de velocidad de corte, (espesor de viruta 0.018). El coeficiente de correlación entre las variables rugosidad y espesor de viruta para madera de albura y duramen son de 0.80 y 0.84 respectivamente.

#### 4.4.2 Efecto de la velocidad de alimentación en la rugosidad superficial Rz para madera de albura y duramen de Acacia melanoxyton

La rugosidad superficial es ascendente a medida que se aumenta la velocidad de alimentación. En la figura 41 se muestra la tendencia de la rugosidad superficial a 4, 8 y 11 m/min para albura.

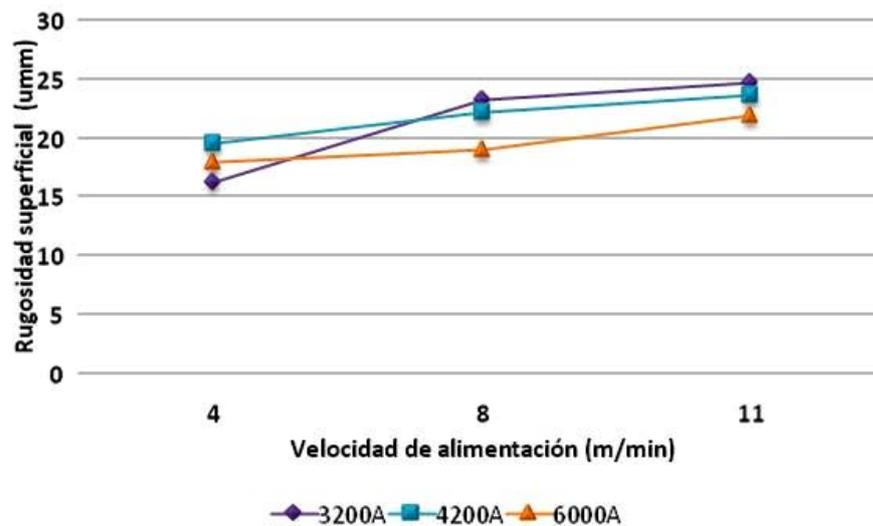
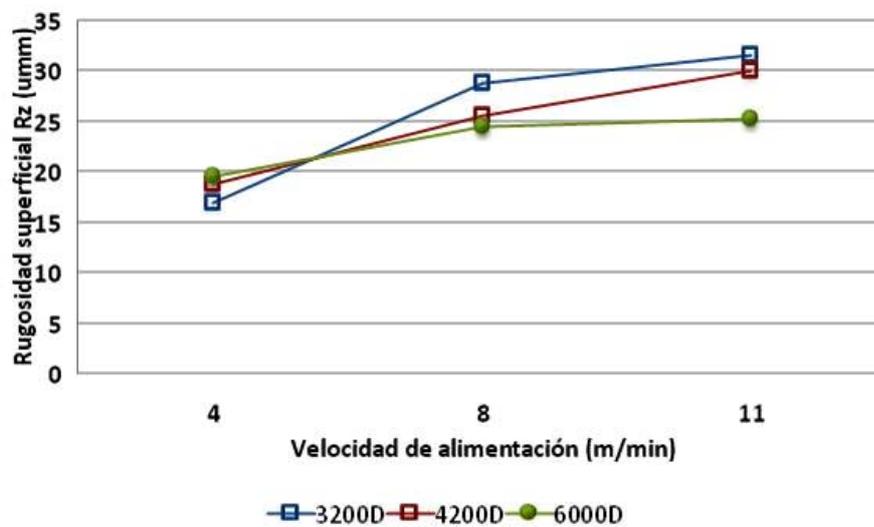


Figura 41. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura de Acacia melanoxyton

El efecto de la velocidad de alimentación para madera duramen se muestra en la figura 42. La tendencia es ascendente al igual que en madera de albura con la diferencia que se tienen valores mayores de rugosidad superficial.



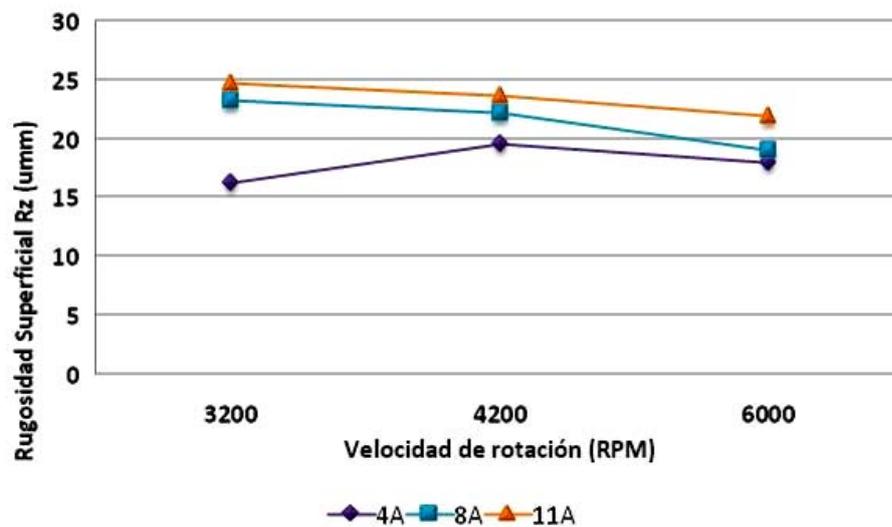
**Figura 42.** Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*

Los resultados obtenidos concuerdan con Rehn (1960) que determinó el efecto de la velocidad de alimentación en la rugosidad superficial en cepillado, a mayor velocidad de alimentación mayor rugosidad superficial. Al aumentar la velocidad de alimentación, disminuye el tiempo de contacto entre la pieza y herramienta de corte produciendo una superficie de menor calidad.

#### 4.4.3 Efecto de la velocidad de rotación en la rugosidad

##### superficial Rz para albura y duramen de Acacia melanoxylon

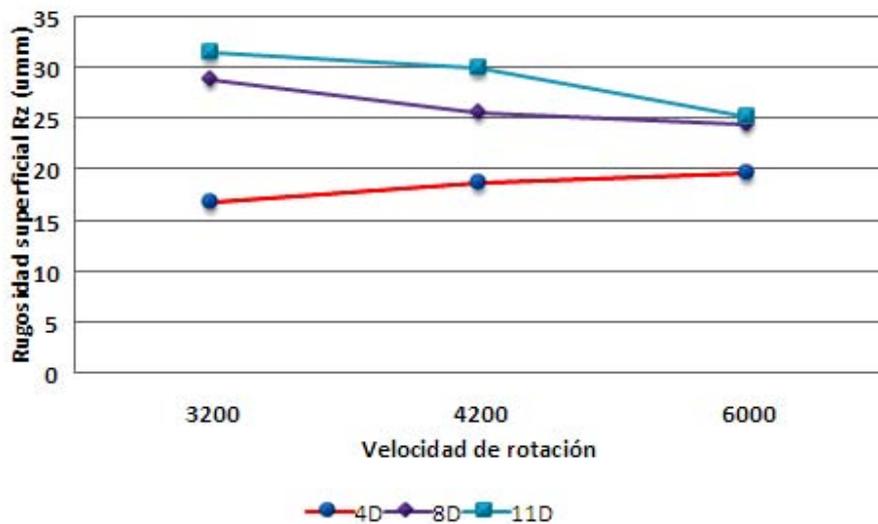
Al variar la velocidad de rotación se obtiene una menor rugosidad superficial como se aprecia en la figura 43. La curva 4A es la única que posee un aumento a 4200 RPM.



**Figura 43.** Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de albura de Acacia melanoxylon.

La disminución de la rugosidad superficial se debe a que decrece la amplitud de las ondas dejadas por el corte producto de un incremento en la velocidad rotacional.

La figura 44 muestra los efectos de la velocidad de corte en la rugosidad superficial para madera de duramen.



**Figura 44.** Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ ) para madera de duramen de *Acacia melanoxylon*.

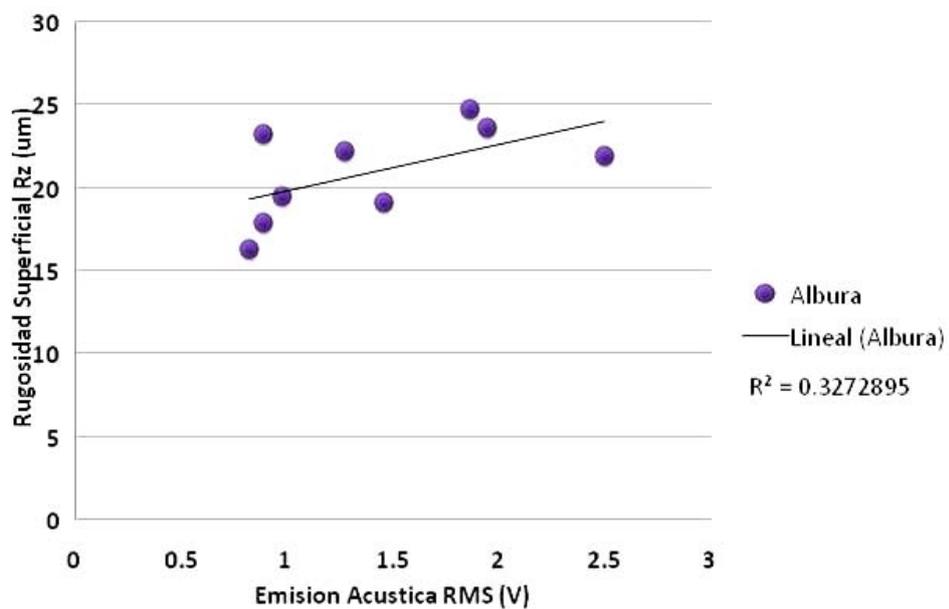
Tanto para albura y duramen las diferencias que se producen en las curvas 4A y 4D con respecto a las otras se debe principalmente a que no existen diferencias significativas al variar la velocidad en 3200, 4200 y 6000 (RPM).

Se encontró mayor rugosidad superficial en la madera de duramen con respecto de la madera albura. La causa se puede encontrar en la anatomía del duramen y la albura de *Acacia melanoxylon*, sin embargo este parámetro no fue medido en este estudio. Por otro lado la utilización del método de contacto en madera es extremadamente variable debido a las numerosas variaciones que se pueden encontrar en una pieza (i.e. madera temprana y tardía, madera de compresión

etc.). Se sugiere en futuros estudio probar métodos alternativos para la medición de la rugosidad.

#### 4.5 Relación entre la emisión acústica y la rugosidad superficial para madera de albura y duramen de Acacia melanoxylon

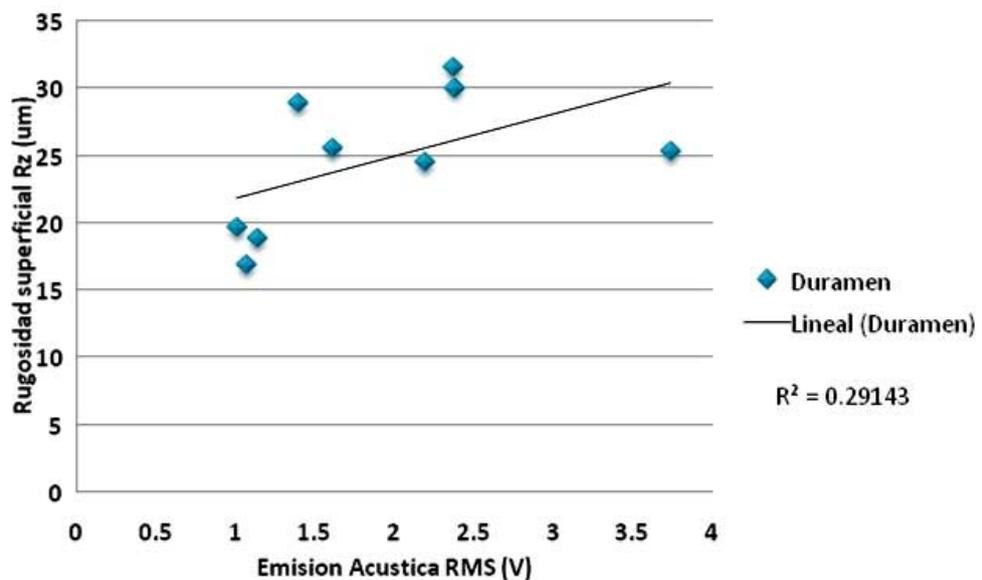
Para establecer el efecto de la emisión acústica en la rugosidad superficial se determinó la correlación entre ambas variables. La figura 45 muestra esta relación.



**Figura 45.** Relación entre las variables emisión acústica y rugosidad superficial para madera de albura de Acacia melanoxylon.

Existe poca correlación entre las variables rugosidad superficial y emisión acústica para albura, sin embargo se aprecia un deterioro de la superficie asociado a un aumento en la EA.

La figura 46 muestra la relación entre rugosidad superficial y emisión acústica para duramen. Nuevamente se encontró poca relación entre las dos variables. Aunque se observa una leve tendencia ascendente, los coeficientes de correlación resultan bajos y no son significativos ( $p > 0.05$ ).



**Figura 46.** Relación entre la emisión acústica y la rugosidad superficial.

La baja correlación entre estas variables contrasta con lo encontrado en la literatura. Esto se produce debido a la falta de mayor cantidad de datos en rugosidad superficial. En futuros estudios se deben tomar una mayor cantidad de muestras en la superficie de corte.

#### **4.6 Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico se realizó un análisis multivariante de dos factores con dos variables respuesta. Simultáneamente se realizó un test de homogeneidad de las varianzas y un test de tukey y de Bonferroni para la homogeneidad de los grupos y ver las diferencias entre las variables independientes.

El diseño del análisis de varianza para determinar los efectos de las variables de velocidad de corte y velocidad de alimentación sobre la rugosidad superficial y emisión acústica se observan en el cuadro 13.

##### Variables Independientes

- Velocidad de alimentación (m/min)
- Velocidad de corte (RPM)

##### Variables Dependientes

- Emisión acústica RMS (V)
- Rugosidad superficial Rz ( $\mu\text{m}$ )

**Cuadro 13.** Diseño de análisis de Varianza con dos factores (variables independientes y dos respuestas (Variable dependientes), albura.

Independiente		Dependiente	
V. Alimenta (m/min)	V. Corte RPM	RMS (V)	Rugosidad Rz (um)
4	3200	0.8194	16.2975
8	3200	0.8875	23.2595
11	3200	1.8591	24.7630
4	4200	0.9788	19.5065
8	4200	1.2693	22.1895
11	4200	1.9446	23.6347
4	6000	0.8886	17.9104
8	6000	1.4571	19.0961
11	6000	2.4978	21.9663

Los valores expuestos en el cuadro 13 corresponden a valores promedio para cada una de las condiciones de corte. El cuadro 14 muestra la probabilidad estadística de los F obtenidos a través del ANDEVA.

**Cuadro 14.** Resultados del análisis de varianza los grados de significancia son expresados en función de la probabilidad < 0.05 da valores significativos para albura.

Respuesta de variables dependientes	Variables Independientes	
	V. Corte	V. Alimentación
<i>EA RMS (V)</i>	0.026	0.0001
<i>Calidad Rz</i>	0.002	0.0003

Se obtuvieron diferencias significativas entre el efecto producido por cada una de las variables independientes sobre las dependientes. Esto permitió hacer análisis individuales de correlación.

El diseño del análisis de varianza para madera de duramen se observa en el cuadro 15.

**Cuadro 15.** Diseño de análisis de varianza con dos factores (variables independientes y dos respuestas (variables dependientes), duramen.

Independiente		Dependiente	
V. Alimentación (m/min)	V. Rotación RPM	RMS (V) promedio	Rugosidad
4	3200	1.0623	16.8980
8	3200	1.3893	28.8941
11	3200	2.3693	31.5496
4	4200	1.1344	18.8043
8	4200	1.6059	25.5472
11	4200	2.3717	29.9929
4	6000	1.0094	19.6531
8	6000	2.1823	24.4894
11	6000	3.7316	25.2863

Se encontró diferencias significativas (cuadro 16), entre el efecto de cada una de las variables velocidad de corte y velocidad de alimentación. Al igual que en albura, esto permitió establecer correlaciones entre variables independientes y dependientes.

**Cuadro 16.** Resultados del análisis de varianza los grados de significancia son expresados en función de la probabilidad  $< 0.05$  da valores significativos para duramen.

	V. Rotación	V. Alimentación
<b>Respuesta de variables dependientes</b>		
<i>EA RMS (V)</i>	0.039	0.0021
<i>Calidad Rz</i>	0.001	0.0002

## 5. Conclusiones

### Emisión acústica

- Se obtuvieron mayores valores de emisión acústica para duramen con respecto de albura para todas las condiciones de corte, debido su mayor densidad, y menor contenido de humedad.
- Existe correlación significativa entre el espesor de viruta y la emisión acústica para 3200 y 4200 a las velocidades de corte estudiadas.
- Se encontró un mayor efecto de la velocidad de alimentación en la EA respecto de la velocidad de corte para albura y duramen aunque ambos resultaron ser significativos.
- No se obtuvo una correlación significativa entre densidad de la viruta y la EA.

### Emisión de sonido

- No se encontraron diferencias significativas en las señales de emisión de sonido provenientes de albura con respecto de duramen.

- El análisis espectral de las señales de emisión de sonido no evidenció diferencias en el corte de madera de duramen con respecto de la madera de albura

### Rugosidad Superficial

- La velocidad de alimentación y de corte tienen una influencia significativa sobre la rugosidad superficial en madera de albura y duramen.
- La rugosidad superficial aumenta al incrementar el espesor de viruta para albura y duramen de aramo australiano.
- La rugosidad superficial es mayor en madera de duramen que en madera de albura.
- No se encontró correlación entre las variables de rugosidad superficial y emisión acústica para albura y duramen aunque existe una leve tendencia al aumento de la EA al elevarse la rugosidad superficial

## 6. *Resumen*

La industria forestal - maderera mundial basa su producción en bosques de coníferas de relativamente rápido crecimiento lo que la hace una industria sustentable. En el caso chileno, la producción industrial se apoya desde largo tiempo en plantaciones coetáneas de pino radiata, eucalipto y en menor magnitud pino oregón y álamo. Sin embargo, es necesario tomar medidas para diversificar la oferta de madera, orientando los productos hacia la calidad con mayor valor agregado y hacia los mercados emergentes cada vez más exigentes.

Una especie promisoría que ha sido objeto de numerosos estudios a nivel nacional es el aroma australiano (Blackwood), el cual posee características muy interesantes en cuanto a la calidad de su madera, velocidad de crecimiento, alto valor comercial de sus productos y mercados internacionales con alta demanda. Por otro lado las características anatómicas del aroma hacen que posea una gran diferencia entre su duramen caracterizado por una coloración café oscuro, y su albura. Estas diferencias son importantes al momento del maquinado.

Los estudios realizados en Chile, Nueva Zelanda y Australia tienden a calificar algunas propiedades de la madera y de algunos procesos de conversión, sin embargo, resta aún mucho por investigar ya que existe un desconocimiento severo en cuanto a cómo debe procesarse esta madera para obtener un producto terminado con una calidad de terminación aceptable y un nivel de energía de corte que se encuentre en un rango óptimo.

Por lo anterior, el propósito de este estudio es investigar cuál es el efecto del maquinado en el corte periférico ( $90 - 0^\circ$ ) para aroma australiano en madera de duramen y albura, en la emisión acústica y de sonido, y la rugosidad superficial. La energía de corte fue medida con la EA y la ES. La rugosidad superficial se midió por el método de contacto utilizando el perfil Rz para su medición cuantitativa.

Entre los principales resultados se obtuvo una mayor EA al aumentar el espesor de viruta; la rugosidad superficial fue mayor a medida que se aumentó la velocidad de alimentación, contrario el caso en la velocidad de corte. Las diferencias entre duramen y albura indican un mayor valor de voltaje RMS para duramen. No se encontraron diferencias significativas entre la emisión de sonido encontrada en albura y duramen. En lo referente a la rugosidad superficial se experimentaron mayores valores de Rugosidad Rz en comparación con los encontrados en albura.

Palabras clave: aroma australiano, emisión acústica, emisión de sonido, maquinado, calidad superficial duramen, albura.

## 7. Summary

The world forest industry had based its production, on coniferous forest of high rate of grown, making a sustainable industry. In the Chilean case, the world production is based in monoespecific forest plantations of *Pinus radiata*. In this context, it is necessary to take initiatives to diversify the offer of wood products, producing an improvement on the quality and giving more added value toward the search for new markets.

A new promising specie that has many studies in Chile is the blackwood that has special wood properties in terms of quality an a high rate of grown. Also, this specie has a high price in the World international markets with a high demand of his products. This specie has the special anatomical characteristic of a high variation between heartwood and sapwood. Also Heartwood and sapwood are indoubtedly one of the most important raw material variables in wood products manufacturing.

Many studies in Chile, Australia and New Zealand reveal some properties of the blackwood but very few studies indicates its behavior in wood machining process. There are many unknown concepts associate to the wood cutting process, optimal range of cutting energy and a good quality product.

The main objective of this study is the evaluation of the effect of the machining periferical cutting (0-90°), of sapwood and heartwood of blackwood in acoustical emission, sound emission and surface roughness. The energy of cutting was measure with acoustic and sound emission and the surface quality with the contact method (Profile parameter Rz).

The experimental results reveal a greater value of AE in heartwood than in sapwood, because the difference in density between them principally. The surface roughness also chance, being high in Heartwood that in sapwood. The increase of the feed speed gives high values of Rz profile, and the AE as well. The increase of the cutting velocity diminished, the surface roughness, and raises the AE. In both variables (roughness and AE), the increase of chip thickness, gives higher values.

Key words: Blackwood, acoustic emission (AE), sound emission (SE) wood machining, surface roughness, heartwood and sapwood.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera A., Vega M. 2004. Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial de *Pinus radiata* Don. *Bosque (Chile)* 25 (3): 25-32.
- Aguilera A., Vega M. 2005. Caracterización de la rugosidad superficial y la emisión acústica en maquinado de *Pinus radiata* Don.. *Bosque (Chile)* 26 (1): 101-108.
- Aguilera A., . Meausoone P., Martin P. 2000. Optimización de las condiciones de corte en el maquinado de madera. Estimación del desgaste del elemento de corte en fresado. *Bosque (Chile)*, 2000, 21 (2) 127-135.
- Aguilera A., . Meausoone P., Martin P. 2000. Wood material influence in routing operations: the MDF case. *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 58, Nº 4, p. 278-283.
- Ayrilmis N., Korkut S., Tanritanir E., Wynandy J. Hiziroglu S. 2006. Effects of various fire retardants on surface roughness of plywood. *Building and environment* 41 (2006) 887-892.
- Akbulut T., Ayrilmis N. 2006. Effect of compression wood on surface roughness and surface absorption of medium density fiberboard. *The finnish society of forest silva fenica* 40 (1): 161-167.
- Cyra G., Tanaka C. 2000. The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routing. *Wood science and Technology* 34(2000) 237-252.
- Barry J., Byrne G. 2001. Study on acoustic emission in machining hardened steels, part 1: acoustic emission during saw-tooth chip formation. *Irish state agency for science and technology*. 1549-1559
- Diaz-vaz O, J.E. 2003. Anatomía de Maderas. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 151 p.

- Gurau L., Mansfield-Williams H., Irle M. 2003. Processing roughness of sanded wood surfaces. Accepted for publication in Holz als Roh und Werkstoff. Issue 5 (2004).
- Haslett A. 1983. Drying properties of New Zealand grown *Acacia melanoxylon*. *New Zealand Journal of forestry Science* 13 (2): 130-138.
- Huang C. Tanaka C., Ohtani T., Okai R.,. 2005. An improved automatic control of natural wood routing using ellipse analysis technology to mesasure grain direction *Forest products Journal* 55 (4): 46-51.
- Iskra P., Tanaka C. 2005. A comparison of selected acoustic signal analysis techniques to evaluate wood surface roughness produced during routing. *Wood science and technology* 40 (2006): 247-259.
- Kannatey-Asibu Lu M. 1999. Analysis of Sound Signal Characteristics Associated with Adhesive Wear in Machining. Dept. of Mechanical Engineering and Applied Mechanical Engineering and Applied Mechanics University of Michigan 6p.
- Kawamoto S., Williams S. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood composites a review. Forest Products laboratory. General technical report 134.
- Kivimaa E. 1950. Cutting force in wood working. The state institute for technical research, Finland. Helsinki 102 p.
- Kollmann 1984. Principles of wood science and technology Vol. 1. 2da Edicion Berlin, Heidelberg; New York; Tokyo; Springer, Berlin 592p. .
- Lemaster R., Klamecki B., Dornfeld D. 1982. Analysis of acoustic Emission in slow wood cutting. *Wood science and technology* 15(2): 150-160.

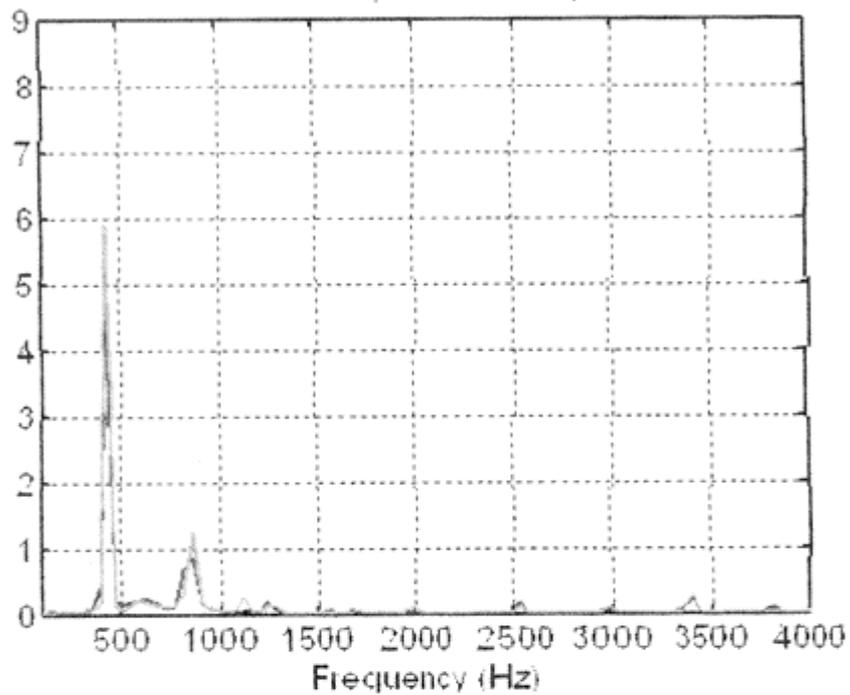
- Lemaster R., Lu L., Jackson S. 2000. The use of process monitoring techniques on CNC wood routers, part 1, sensor selection. *Forest Products journal* 50 (7/8): 31-38.
- Lemaster R., Dornfeld 1990. determining vertical density profiles in wood composites using acoustic emission. *Proceedings of the conference of non destructive testing and evaluation for construction.* Henrique L.M. dos Reis. Ed., Hemisphere publishing corporation august 10-12 1998. 161-175p.
- Mitchell P., Lemaster R. 2001. Investigation of machining parameters on the surface quality in routing soft maple. *Forest products Journal* 52 (6): 85-90.
- Murase Y. 1994. Acoustic emission monitoring in wood machining process. *The 5<sup>TH</sup> International joint seminar on the future of agricultural science in Japan and Korea.* Pp. 73-84.
- Nagatomi K., Yoshida K., Banshoya K., Murase Y. 1993. Recognition of wood cutting conditions through cutting sounds I. Effects of tool system's stiffness and tool wear on the generation of sound in cutting parallel to the grain. *Mokuzai Gakkaishi* 39 (5): 521-528p.
- Ono K. 2004. Current understanding of mechanisms of acoustic emission. *Strain analysis* 40 (1): 1-15.
- Pinilla J., Gutiérrez Molina M. *Acacia melanoxylon*: Its potencial in Chilean forestry. Blackwood management. *Proceedings of an international workshop Rotorua New Zealand 22th November 2002.* 21-29p.
- PDI 1998. Surface Metrology Guide home. Precision devices incorporated. INTERNET:<http://www.predev.com/sdg/> (Mayo 30, 2005).
- Richter K., Feist W., Knaebe M. 1994. The effect of surface roughness on the performance of finishes Part 1. Roughness characterization and stain performance, *Forest Products journal* 45(7/8): 91-97.

- Vega M. R., 2004. Efecto del fresado de *Pinus radiata* en la rugosidad superficial y la emisión acústica. Tesis de Magíster en ciencias mención recursos forestales. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile. 192 p.
- Tanaka C., Nakao T., Takahashi A., 1988. A new technique for adaptive control optimization in circular sawing. *Mokuzai Gakkaishi* 34 (9): 769-771.

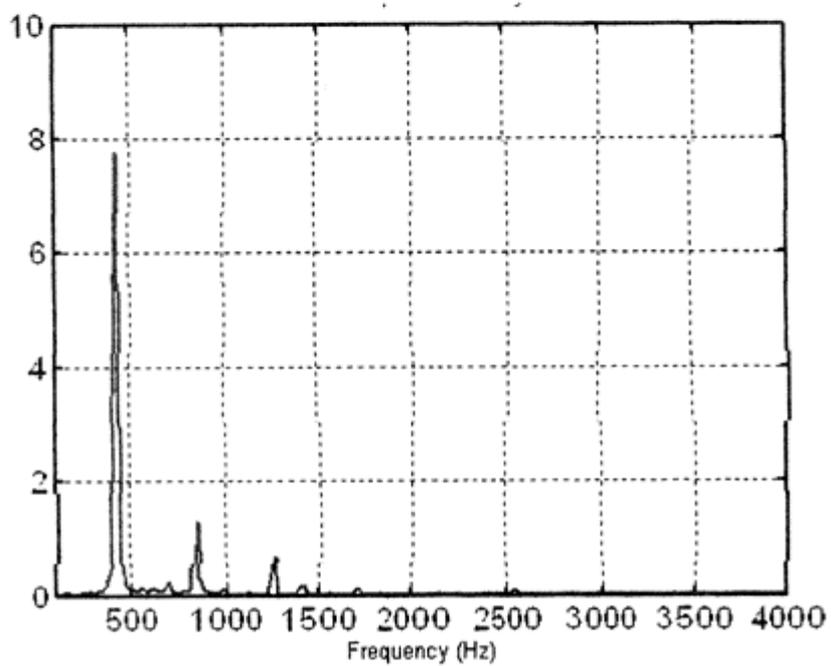
## 9. Apéndice

## Espectros de señales de emisión de sonido

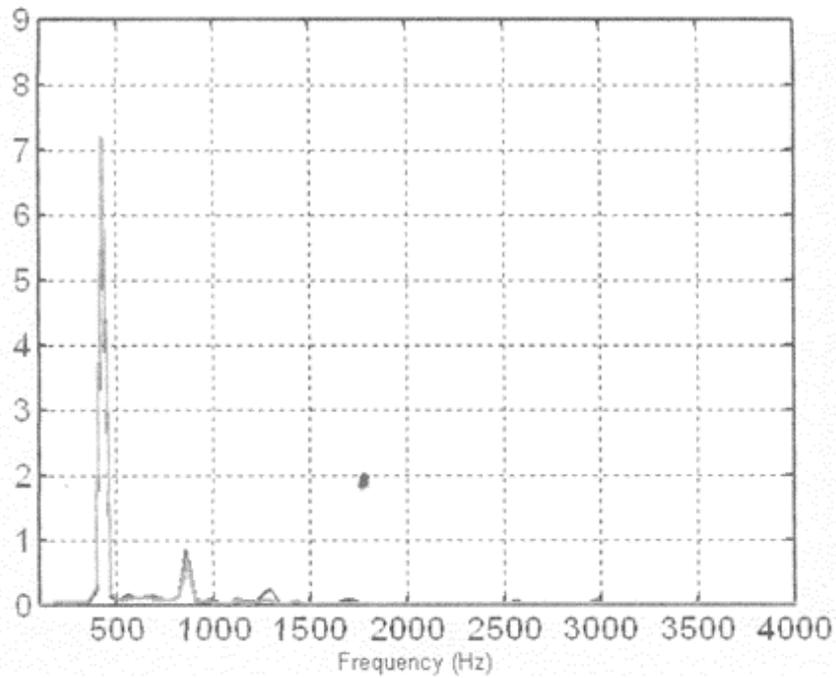
Espectro 4m/min



8m/min

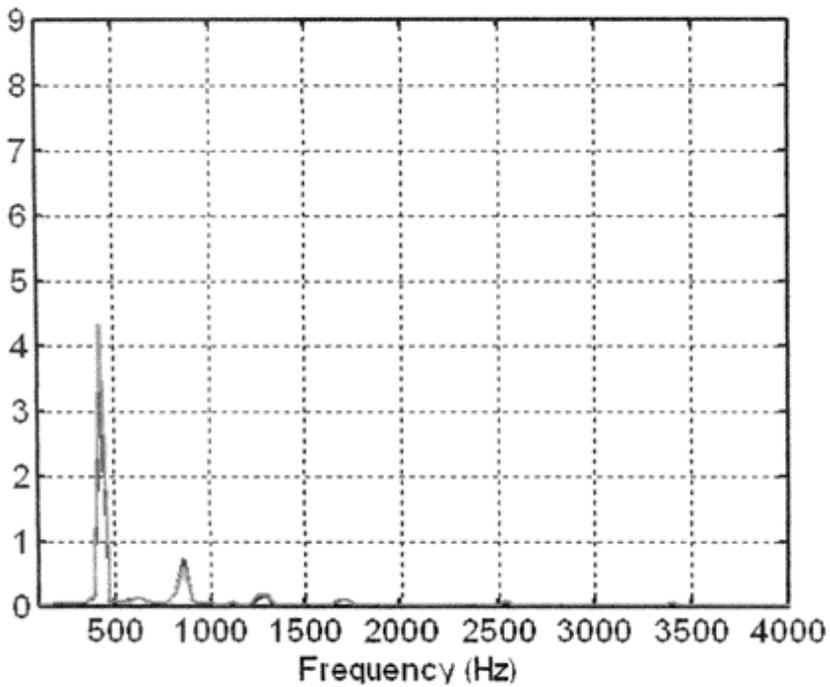


Espectro 11m/min

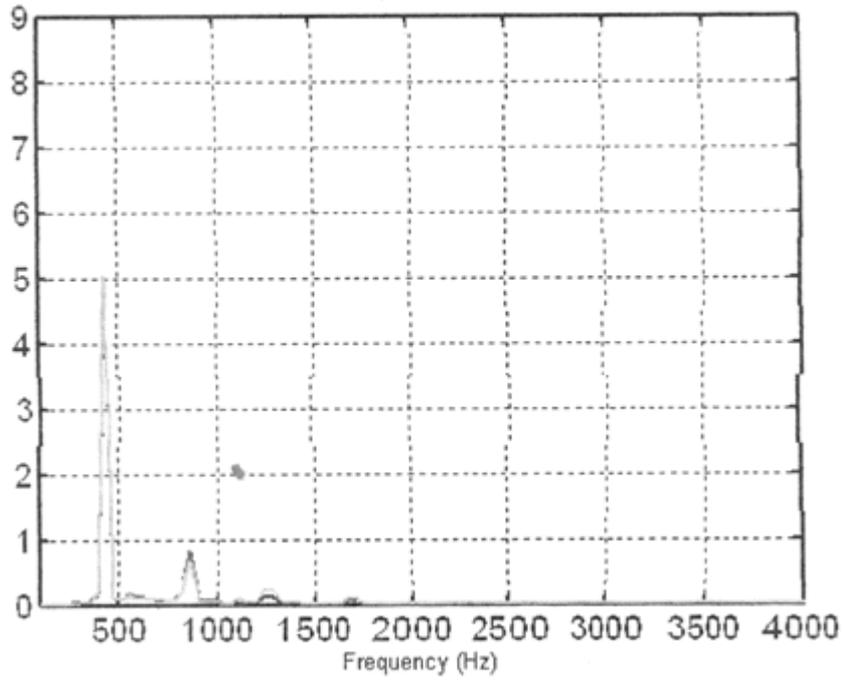


Espectros de las señales de emisión de sonido para madera de duramen

4m/min



8m/min



## Estadística

### Test de Homogeneidad de Varianzas para albura EA

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: EA

F	df1	df2	Sig.
14.633	8	72	.370

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept+VA+VR+VA \* VR

### Test de Homogeneidad de Varianzas para albura EA

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: EAD

F	df1	df2	Sig.
5.601	8	79	.2691

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept+VAD+VRD+VAD \* VRD

### ANDEVA dos vías para albura EA

ANOVA Two ways

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: EA

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	17.529	8	2.191	12.781	.000
Intercept	190.305	1	190.305	1110.099	.000
VA	11.578	2	5.789	33.770	.0001
VR	1.157	2	.579	3.376	.026
VA * VR	4.925	4	1.231	7.183	.000
Error	12.343	72	.171		
Total	219.046	81			
Corrected Total	29.872	80			

a. R Squared = .587 (Adjusted R Squared = .541)

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: EA

	(I) VA	(J) VA	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	4.00	8.00*	-.7857	.11377	.000	-1.0579	-.5134
		11.00*	-.7970	.11168	.000	-1.0643	-.5297
	8.00	4.00*	.7857	.11377	.000	.5134	1.0579
Bonferroni		11.00*	-.0113	.11277	.994	-.2812	.2585
	11.00	4.00*	.7970	.11168	.000	.5297	1.0643
		8.00*	.0113	.11277	.994	-.2585	.2812
	4.00	8.00*	-.7857	.11377	.000	-1.0645	-.5068
		11.00*	-.7970	.11168	.000	-1.0707	-.5233
	8.00	4.00*	.7857	.11377	.000	.5068	1.0645
		11.00*	-.0113	.11277	1.000	-.2877	.2651
	11.00	4.00*	.7970	.11168	.000	.5233	1.0707
		8.00*	.0113	.11277	1.000	-.2651	.2877

Based on observed means.

- The mean difference is significant at the .05 level.

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: EA

	(I) VR	(J) VR	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	3200.00	4200.00*	-.1426	.11269	.419	-.4123	.1271
		6000.00*	-.3121	.11269	.019	-.5818	-.0425
	4200.00	3200.00*	.1426	.11269	.419	-.1271	.4123
		6000.00*	-.1695	.11269	.295	-.4392	.1002
	6000.00	3200.00*	.3121	.11269	.019	.0425	.5818
Bonferroni		4200.00*	.1695	.11269	.295	-.1002	.4392
	3200.00	4200.00*	-.1426	.11269	.629	-.4188	.1336
		6000.00*	-.3121	.11269	.021	-.5884	-.0359
	4200.00	3200.00*	.1426	.11269	.629	-.1336	.4188
		6000.00*	-.1695	.11269	.411	-.4457	.1067
	6000.00	3200.00*	.3121	.11269	.021	.0359	.5884
	4200.00*	.1695	.11269	.411	-.1067	.4457	

Based on observed means.

- \* The mean difference is significant at the .05 level.

## ANDEVA dos vías duramen EA

### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: EAD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared	Noncent. Parameter	Observed Power
Corrected Model	28.496	8	3.562	4.343	.000	.305	34.745	.992
Intercept	240.265	1	240.265	292.952	.000	.788	292.952	1.000
VAD	22.923	2	11.462	13.975	.002	.261	27.950	.998
VRD	3.535	2	1.767	2.155	.039	.052	4.310	.429
VAD * VRD	2.714	4	.678	.827	.512	.040	3.309	.253
Error	64.792	79	.820					
Total	330.865	88						
Corrected Total	93.288	87						

a. Computed using alpha = .05

b. R Squared = .305 (Adjusted R Squared = .235)

### Multiple Comparisons

Dependent Variable: EAD

	(I) VRD	(J) VRD	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	3200.00	4200.00	.1745	.23584	.741	-.3889	.7378
		6000.00*	-.2840	.23584	.454	-.8474	.2793
	4200.00	3200.00*	-.1745	.23584	.741	-.7378	.3889
		6000.00*	-.4585	.23783	.138	-1.0266	.1096
	6000.00	3200.00*	.2840	.23584	.454	-.2793	.8474
		4200.00*	.4585	.23783	.138	-.1096	1.0266
Bonferroni	3200.00	4200.00*	.1745	.23584	1.000	-.4024	.7513
		6000.00*	-.2840	.23584	.696	-.8609	.2928
	4200.00	3200.00*	-.1745	.23584	1.000	-.7513	.4024
		6000.00*	-.4585	.23783	.172	-1.0402	.1232
	6000.00	3200.00*	.2840	.23584	.696	-.2928	.8609
		4200.00*	.4585	.23783	.172	-.1232	1.0402

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: EAD

	(I) VAD	(J) VAD	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	4.00	8.00	-.5005	.23584	.092	-1.0638	.0628
		11.00	-1.2244	.23584	.000	-1.7877	-.6611
	8.00	4.00	.5005	.23584	.092	-.0628	1.0638
		11.00	-.7239	.23783	.009	-1.2920	-.1558
	11.00	4.00	1.2244	.23584	.000	.6611	1.7877
		8.00	.7239	.23783	.009	.1558	1.2920
Bonferroni	4.00	8.00	-.5005	.23584	.111	-1.0774	.0764
		11.00	-1.2244	.23584	.000	-1.8013	-.6475
	8.00	4.00	.5005	.23584	.111	-.0764	1.0774
		11.00	-.7239	.23783	.010	-1.3056	-.1422
	11.00	4.00	1.2244	.23584	.000	.6475	1.8013
		8.00	.7239	.23783	.010	.1422	1.3056

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

## ANDEVA rugosidad superficial Madera de albura

### Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: RUGOSA

F	df1	df2	Sig.
5.273	8	81	.670

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept+VAAA1+VRA1+VAAA1 \* VRA1

### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: RUGOSA

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	1418.232	8	177.279	10.575	.000	.511
Intercept	50856.576	1	50856.576	3033.750	.0001	.974
VAAA1	922.403	2	461.201	27.512	.0003	.405
VRA1	172.339	2	86.169	5.140	.002	.113
VAAA1 * VRA1	323.491	4	80.873	4.824	.002	.192
Error	1357.852	81	16.764			
Total	53632.660	90				
Corrected Total	2776.084	89				

a R Squared = .511 (Adjusted R Squared = .463)

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: RUGOSA

	(I) VRA1	(J) VRA1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	3200.00	4200.00	-1.5680	1.05715	.304	-4.0920	.9560
		6000.00*	1.8185	1.05715	.204	-.7055	4.3425
	4200.00	3200.00*	1.5680	1.05715	.304	-.9560	4.0920
Bonferroni		6000.00*	3.3865	1.05715	.005	.8625	5.9105
	6000.00	3200.00*	-1.8185	1.05715	.204	-4.3425	.7055
		4200.00*	-3.3865	1.05715	.005	-5.9105	-.8625
	3200.00	4200.00*	-1.5680	1.05715	.426	-4.1524	1.0164
		6000.00*	1.8185	1.05715	.268	-.7659	4.4029
	4200.00	3200.00*	1.5680	1.05715	.426	-1.0164	4.1524
		6000.00*	3.3865	1.05715	.006	.8021	5.9709
	6000.00	3200.00*	-1.8185	1.05715	.268	-4.4029	.7659
		4200.00*	-3.3865	1.05715	.006	-5.9709	-.8021

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: RUGOSA

	(I) VAAA1	(J) VAAA1	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	4.00	8.00*	-5.7091	1.05715	.000	-8.2331	-3.1851
		11.00*	-7.5102	1.05715	.000	-10.0342	-4.9862
	8.00	4.00*	5.7091	1.05715	.000	3.1851	8.2331
Bonferroni		11.00	-1.8011	1.05715	.210	-4.3251	.7229
	11.00	4.00*	7.5102	1.05715	.000	4.9862	10.0342
		8.00	1.8011	1.05715	.210	-.7229	4.3251
	4.00	8.00*	-5.7091	1.05715	.000	-8.2935	-3.1246
		11.00*	-7.5102	1.05715	.000	-10.0946	-4.9257
	8.00	4.00*	5.7091	1.05715	.000	3.1246	8.2935
		11.00	-1.8011	1.05715	.277	-4.3856	.7833
	11.00	4.00*	7.5102	1.05715	.000	4.9257	10.0946
		8.00	1.8011	1.05715	.277	-.7833	4.3856

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

## ANDEVA en rugosidad de duramen

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: RUGOSD

F	df1	df2	Sig.
5.796	8	77	.881

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept+VAA+VRDD+VAA \* VRDD

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: RUGOSD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	1527.752	8	190.969	8.356	.000	.465
Intercept	45321.226	1	45321.226	1983.113	.000	.963
VAA	535.159	2	267.579	11.708	.001	.233
VRDD	379.218	2	189.609	8.297	.0002	.177
VAA * VRDD	561.132	4	140.283	6.138	.000	.242
Error	1759.725	77	22.854			
Total	48561.629	86				
Corrected Total	3287.477	85				

a. R Squared = .465 (Adjusted R Squared = .409)

Multiple Comparisons

Dependent Variable: RUGOSD

	(I) VAA	(J) VAA	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	4.00	8.00	-5.8755	1.27765	.000	-8.9289	-2.8221
		11.00	-5.2253	1.25618	.000	-8.2274	-2.2232
	8.00	4.00	5.8755	1.27765	.000	2.8221	8.9289
		11.00	.6503	1.25618	.863	-2.3518	3.6524
Bonferroni	11.00	4.00	5.2253	1.25618	.000	2.2232	8.2274
		8.00	-.6503	1.25618	.863	-3.6524	2.3518
	4.00	8.00	-5.8755	1.27765	.000	-9.0025	-2.7486
		11.00	-5.2253	1.25618	.000	-8.2996	-2.1509
	8.00	4.00	5.8755	1.27765	.000	2.7486	9.0025
		11.00	.6503	1.25618	1.000	-2.4241	3.7246
	11.00	4.00	5.2253	1.25618	.000	2.1509	8.2996
		8.00	-.6503	1.25618	1.000	-3.7246	2.4241

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

Multiple Comparisons  
Dependent Variable: RUGOSD

	(I) VRDD	(J) VRDD	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	3200.00	4200.00	-4.6460	1.27765	.001	-7.6994	-1.5926
		6000.00	.3079	1.25618	.967	-2.6942	3.3100
	4200.00	3200.00	4.6460	1.27765	.001	1.5926	7.6994
		6000.00	4.9539	1.25618	.001	1.9518	7.9560
Bonferroni	6000.00	3200.00	-.3079	1.25618	.967	-3.3100	2.6942
		4200.00	-4.9539	1.25618	.001	-7.9560	-1.9518
	3200.00	4200.00	-4.6460	1.27765	.001	-7.7730	-1.5191
		6000.00	.3079	1.25618	1.000	-2.7665	3.3823
	4200.00	3200.00	4.6460	1.27765	.001	1.5191	7.7730
		6000.00	4.9539	1.25618	.001	1.8795	8.0283
	6000.00	3200.00	-.3079	1.25618	1.000	-3.3823	2.7665
		4200.00	-4.9539	1.25618	.001	-8.0283	-1.8795

Based on observed means.

\* The mean difference is significant at the .05 level.

### Emisión de sonido

ANOVA  
ESONIDO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.000	1	.000	.028	.875
Within Groups	.000	4	.000		
Total	.000	5			