



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Elaboración de modelos lineales que relacionan rugosidad superficial con potencia de corte

Patrocinante: Sr. Alfredo Aguilera L.

Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero en Maderas**

HERNÁN CHRISTOPHER MUÑOZ BERNAL

VALDIVIA
2008

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		NOTA
Patrocinante:	Sr. Alfredo Aguilera León	<u>53</u>
Informante:	Sr. Luis Inzunza Diez	<u>54</u>
Informante:	Sr. Héctor Cuevas Doering	<u>58</u>

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Alfredo Aguilera León

A mis padres, Hernán y Ercilia.

Los pilares fundamentales de mi vida.

*Todos mis logros son frutos de su esfuerzo,
permanente preocupación y apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

Durante mis años de universidad he contado con la compañía y apoyo permanente de una gran cantidad de personas de las cuales me siento profundamente agradecido e infinitamente afortunado de tenerlos a mi lado.

Agradezco a mis padres, a mis hermanos, a mis tíos, a mis tías, a mis primas y primos, a mis abuelos y abuelas, a todos muchas gracias por su constante preocupación, permanente apoyo, confianza y amor infinito.

A mis amigos y amigas de mi querido Constitución, en todos estos años nunca me he sentido solo y es en gran parte gracias a cada uno de ellos, gracias por los excelentes momentos que hemos vivido, las enseñanzas recogidas de sus experiencias y anécdotas, a su compañía, paciencia, comprensión, confianza y cariño, muchas gracias por todo.

A mi profesor patrocinante, Dr. Alfredo Aguilera León., por su incalculable aporte al desarrollo de este trabajo, por sus recomendaciones, conocimientos y permanente colaboración en mi formación profesional, muchas gracias.

A mis profesores informantes, Sr. Luis Inzunza Diez por su constante apoyo, disponibilidad, valoración y dedicación en mi aprendizaje y desarrollo profesional, al Sr. Héctor Cuevas Doering, por sus oportunos consejos y valiosas críticas.

Gracias a todo el personal del Instituto de Tecnología de Productos Forestales (TEIM), especialmente a Maria Eugenia y la profesora Alicia, por hacer del instituto un lugar cada día mas acogedor y alegre, por sus consejos, ayuda y gentileza.

A todos mis compañeros de estudio, por los momentos vividos, los favores concedidos, los conocimientos compartidos y la paciencia que me han tenido, gracias.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos específicos	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Cepillado	3
2.1.1 Espesor de viruta	3
2.1.2 Potencia de Corte	4
2.2 Parámetros que afectan la calidad superficial y la energía	6
2.2.1 Densidad	6
2.2.2 Herramienta de corte	7
2.2.3 Variables del proceso	7
2.3 Rugosidad Superficial	8
2.3.1 Medición de la rugosidad superficial	8
3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	9
3.1 Material	9
3.1.1 Controles de densidad y humedad	9
3.2 Equipo e instrumentos	10
3.2.1 La máquina	10
3.2.2 Herramienta de corte	10
3.2.3 Analizador de energía	10
3.2.4 Medición de la rugosidad superficial	11
3.3 Diseño experimental	11
3.3.1 Condiciones de corte, medición de Potencia de corte y Rugosidad superficial	11
3.4 Análisis estadístico	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1 Potencia	14
4.1.1 Relación entre Potencia de corte y Velocidad de avance	14
4.1.2 Relación entre Potencia de corte y Profundidad de corte	16
4.1.3 Relación entre Potencia de corte y Densidad de madera	18
4.1.4 Relación entre Potencia de corte y Espesor de viruta	19
4.2 Rugosidad	21
4.2.1 Relación entre Rugosidad superficial y Velocidad de avance	21
4.2.2 Relación entre la Rugosidad superficial y la Profundidad de corte	23
4.2.3 Relación entre la Rugosidad superficial y Densidad de madera	24
4.2.4 Relación entre la Rugosidad superficial y Espesor de viruta	26
4.3 Relación Rugosidad superficial respecto Potencia de corte	28

5.	CONCLUSIONES	30
6.	BIBLIOGRAFÍA	32
	ANEXOS	33

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1	Controles de humedad y densidad	9
Cuadro 2	Condiciones de corte	12
Cuadro 3	Condiciones de medición de Potencia de corte	12
Cuadro 4	Condiciones de medición de Rugosidad superficial	12
Cuadro 5	Diseño experimental para <i>Acacia melanoxylon R.Br.</i> y <i>Sequoia sempervirens Endl.</i>	12
Cuadro 6	Resumen de Potencia de corte a distintas velocidades de avance	14
Cuadro 7	Resumen de Potencia de corte a distinta profundidad de corte	16
Cuadro 8	Resumen de Potencia de corte a distintas densidades de madera	18
Cuadro 9	Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes velocidades de avance	21
Cuadro 10	Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes profundidades de corte.	23
Cuadro 11	Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes densidades de madera	25

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Relación potencia de corte-rugosidad superficial. (Aguilera y Vega, 2004)	5
Figura 2.	Correlación entre la potencia de corte y el espesor de viruta. (Aguilera y Vega, 2005)	5
Figura 3.	Forma y dimensiones de las probetas para la medición de potencia y rugosidad superficial	9
Figura 4.	Máquina tupí y carro de avance	10
Figura 5.	Cabezal convencional, Z=4	10
Figura 6.	Rugosímetro Mitutoyo SJ-201	11
Figura 7.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> en relación a distintas velocidades de avance, considerando profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.	14
Figura 8.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> en relación a distintas velocidades de avance, considerando profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.	15
Figura 9.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> en relación a distintas profundidades de corte, considerando velocidades de avance de 4, 8 y 11 mm.	16
Figura 10.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> en relación a distintas profundidades de corte, considerando velocidades de avance de 4, 8 y 11mm.	17

Figura 11.	Requerimientos de potencia de corte según densidad de la madera cepillada, a velocidades de avance de 4, 8 y 11 m/min., y profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.	18
Figura 12.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> respecto el espesor de viruta.	19
Figura 13.	Requerimientos de potencia de corte en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> respecto el espesor de viruta.	20
Figura 14.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> frente a diferentes velocidades de avance.	21
Figura 15.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> , frente a diferentes velocidades de avance.	22
Figura 16.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> frente a diferentes profundidades de corte.	23
Figura 17.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> frente a diferentes profundidades de corte.	24
Figura 18.	Resultados de rugosidad superficial frente a diferentes densidades de madera.	25
Figura 19.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i> , frente a diferentes espesores de viruta.	26
Figura 20.	Resultados de rugosidad superficial en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i> , frente a diferentes espesores de viruta.	27
Figura 21.	Relación de Rugosidad superficial respecto la potencia de corte, en <i>Sequoia Sempervirens Endl.</i>	28
Figura 22.	Relación de Rugosidad superficial respecto la potencia de corte, en <i>Acacia melanoxylon R. Br.</i>	29

Resumen

Al contar con un modelo que permita conocer la potencia de corte para condiciones de maquinado y rugosidades superficiales establecidas, se pueden planificar procesos futuros y conocer de antemano los costos energéticos que traerá la fabricación de un nuevo proyecto o producto.

Un motivo importante por el cual conocer y controlar la energía necesaria para el cepillado es identificar anomalías o momentos adecuados para ajustes o renovación de los cuchillos, con la comparación de la energía real y la teórica.

Para el estudio se consideraron dos especies, *Sequoia sempervirens* Endl. y *Acacia melanoxylon* R. Br. se trabajó con dos densidades de cada una, se fijaron tres velocidades de avance (4, 8 y 11 m/min.), un nivel de velocidad de rotación de 4200 rpm y tres profundidades de corte (1, 2 y 3 mm.). La potencia de corte se midió con un analizador de energía conectado a la entrada de energía de la tupí y la rugosidad se determinó según el parámetro Rz, recomendado por la norma JIS, y se realizó la recopilación de datos de potencia con un analizador de energía.

Al medir la potencia de corte durante el cepillado se encontró que a medida que el espesor de viruta se hace mayor, mayores son los requerimientos de energía para producir el corte, es decir, se necesita mayor potencia para cepillar madera a mayores velocidades de avance y, así también, se encontraron relaciones positivas entre la potencia y las profundidades de corte.

En los resultados de rugosidad superficial no se presentó mayor diferencia respecto a diferentes profundidades de corte, si se mostró variaciones más considerables en la velocidad de alimentación y espesor de viruta, además se demostró que la calidad superficial depende claramente de la especie y estructura celular, obteniendo mejores calidades superficiales con especies de densidades altas.

Al correlacionar los resultados de potencia de corte y rugosidades superficiales, se obtuvieron relaciones positivas, es decir, a medida que una aumenta, la otra también lo hace. Se obtuvieron coeficientes de correlación para medir el grado de asociación entre las variables y modelos lineales que resultan ser bastante asertivos, especialmente en relaciones de potencia de corte y rugosidad superficial respecto el parámetro espesor de viruta.

1. INTRODUCCIÓN

Se han realizado diversos estudios sobre el análisis de la potencia de corte y la rugosidad superficial relacionándola con diferentes condiciones de maquinado, entre los que destacan algunos realizados en el propio Instituto de Tecnología de Productos Forestales de la Universidad Austral de Chile, éstos estudios han sido realizados en *Pino radiata D. Don.*, gracias a esto nace la idea de buscar nuevas especies para aumentar los conocimientos y si poder diversificar los productos de nuestras industrias, es así, como nos encontramos con dos especies que llaman fuertemente la atención.

Por un lado, se encuentra la *Sequoia sempervirens Endl.*, especie que de acuerdo a Undurraga (1995) resulta ser muy interesante, por los altos rendimientos que ha demostrado en plantaciones experimentales entre la VII y la X región, lo que ha significado obtener rotaciones entre 30 y 40 años en los mejores sitios.

Las tasas de crecimiento alcanzadas por sequoia sumadas a la gran cantidad de usos que presenta su madera, indican que esta especie podría constituir una alternativa real para la diversificación de las futuras plantaciones. (Undurraga, 1995)

Conjuntamente aparece la *Acacia melanoxylon R. Br.*, que según Espinoza, (2005), presenta buenas posibilidades para ser explotada más intensamente, debido a la gran adaptación que presenta a los suelos y climas nacionales y a la alta calidad que ofrece su madera.

Estas maderas tienen bastantes motivos por los cuales su estudio se hace altamente interesante, pero en este caso, más que en el nombre, el estudio se centra en las propiedades físicas de la madera, buscando dos grupos de densidad muy diferente y tomando una conífera y una latifoliada.

Además de contribuir, por medio del estudio, en el desarrollo de nuevas especies que pueden ser un gran aporte en un mercado competitivo, también se encuentra la necesidad de mejorar el rendimiento de uso de las herramientas de corte por medio de la optimización del uso de la energía, el cual se relaciona muy bien con la calidad superficial resultante. Así nace la idea de conocer las condiciones de cepillado, que mediante el uso de un modelo lineal permita estimar, los resultados en la rugosidad superficial en función del consumo de potencia, para así poder planificar su instalación y producción con una mayor certeza.

1.1 Objetivo general

Generar modelos lineales para cepillado, que permitan estimar la potencia en función de las condiciones de maquinado y a su vez, estimar la rugosidad superficial.

1.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto del cambio en la profundidad de cepillado sobre la potencia de corte y la rugosidad resultante.

Verificar el cambio del avance por diente sobre la potencia de corte y rugosidad superficial.

Estudiar el efecto del cambio de densidad de la madera y el cambio de especie sobre potencia de corte y su efecto sobre la rugosidad superficial.

Establecer los niveles de correlación entre la potencia de corte con la rugosidad superficial y desarrollar un modelo que permita predecir la potencia en función de la rugosidad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cepillado

Consiste en producir cortes en las caras de la madera por medio de cuchillos montados en un cabezal rotatorio, con el fin de obtener una pieza de espesor fijo y caras uniformes.

Diversos estudios han sido realizados en esta área, entre los cuales se encuentran Aguilera y Vega (2004 y 2005), los cuales relacionaron la potencia de corte y la rugosidad superficial respecto a variaciones en el espesor de viruta y evaluando las correlaciones de éstas.

2.1.1 Espesor de viruta

El espesor de viruta es un promedio de los espesores que poseen las partículas separadas de la madera, durante un proceso de corte.

De acuerdo a Kivimaa (1950), citado por Cárdenas C. 2006., 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).

El espesor de viruta promedio se representa con la siguiente fórmula:

$$e_c = \left(\frac{v_f}{Z \cdot N} \right) \cdot \sqrt{A_p / D} \quad (mm)$$

Donde:

V_f = Velocidad de alimentación (mm/min)

Z = Número de cuchillos

N = Velocidad de rotación (RPM)

A_p = Profundidad de corte (mm)

D = Diámetro del cabezal (mm)

Estudios realizados indican que para una condición de corte dada, cuyo resultado genera un espesor de viruta que fluctúa entre determinados rangos, se estará en una zona de bajo consumo de energía, sin embargo, si el espesor de viruta se encuentra fuera de esta zona, es decir, con valores del espesor de viruta muy pequeño o muy grande, los consumos de energía y por tanto los requerimientos de potencia de corte aumentarán de una manera exponencial. (Aguilera y Vega, 2004)

Estos mismos autores afirman que el mejor método para analizar los efectos de las variaciones en las condiciones de maquinado sobre la potencia de corte y rugosidad es el espesor de viruta, ya que integra los principales parámetros que intervienen en el proceso.

2.1.2 Potencia de corte

Es la energía que requiere la herramienta de corte para producir la separación de madera, se calcula en Watts, y esta directamente relacionada con el trabajo específico, el cual es la energía necesaria para transformar un centímetro cúbico de madera, en viruta, durante un minuto.

El método para calcular la potencia de corte es:

$$Pc = W_{sp} \cdot a_p \cdot a_e \cdot V_f \text{ (Watts)}$$

Donde;

W_{sp} = Trabajo específico (W/cm³/min.)

a_p = Profundidad de corte (cm.)

a_e = Ancho de corte (cm.)

V_f = Velocidad de avance (cm. /min.)

Cualquier cambio de estos factores hará variar los resultados de la potencia de corte requerida en la misma relación que el propio factor, ya que todas se encuentran directamente relacionadas.

Una de las principales variables en los resultados del trabajo específico es el espesor de viruta, y la relación entre estos ha sido ampliamente estudiada, según Kivimaa, 1950., "El levantamiento en las curvas es particularmente abrupto cuando "ec" se encuentra en valores por debajo de 0.05 mm (aprox.), por otro lado, se observará que usando espesores de la astilla por encima de 0.2 mm (aprox.) se puede ahorrar una gran cantidad de energía", de la misma forma, y complementando estos datos se encuentran Vignote y Jiménez, 2000., que concluyen en que "Existe un mínimo en espesores comprendidos entre 0.15 y 0.6 mm, espesores menores o mayores necesitan mayores esfuerzos".

Estudios realizados por Aguilera y Vega (2004) en pino radiata, obtuvieron resultados que demuestran que el aumento del espesor de viruta produce un aumento en los requerimientos de potencia de corte, estos autores para su estudio consideraron diferentes espesores de viruta gracias a variaciones en la velocidad de avance y velocidad de rotación, y fijaron anchos de corte de 35 mm. y una profundidad de corte de 2 mm., sus resultados son presentados en la figura 1.

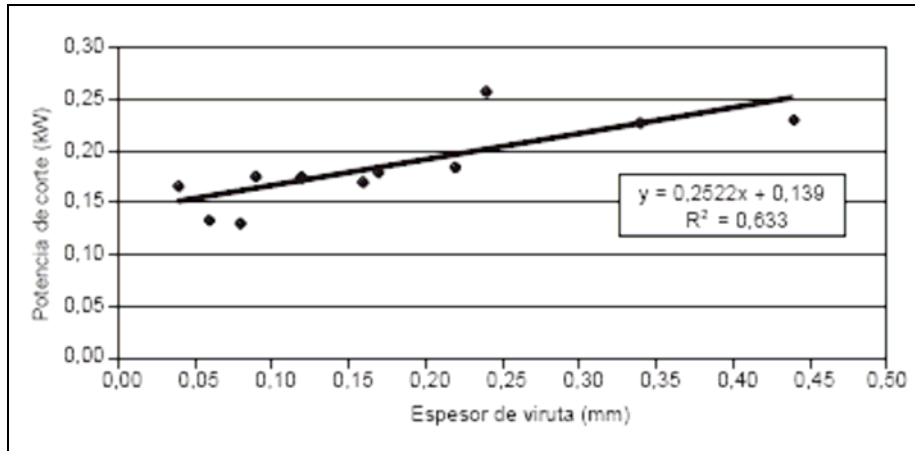


Figura 1 Relación potencia de corte-rugosidad superficial. (Aguilera y Vega, 2004)

Estos autores afirman que es posible estimar la potencia de corte respecto al espesor de viruta, incluso agregan, que se obtienen resultados más precisos en la estimación de la potencia de corte que utilizando la rugosidad superficial.

Otro estudio realizado por Aguilera y Vega (2005), presentó resultados consistentes al anteriormente presentado, esta vez, los autores determinaron los requerimientos de potencia de corte por medio del control de la emisión acústica.

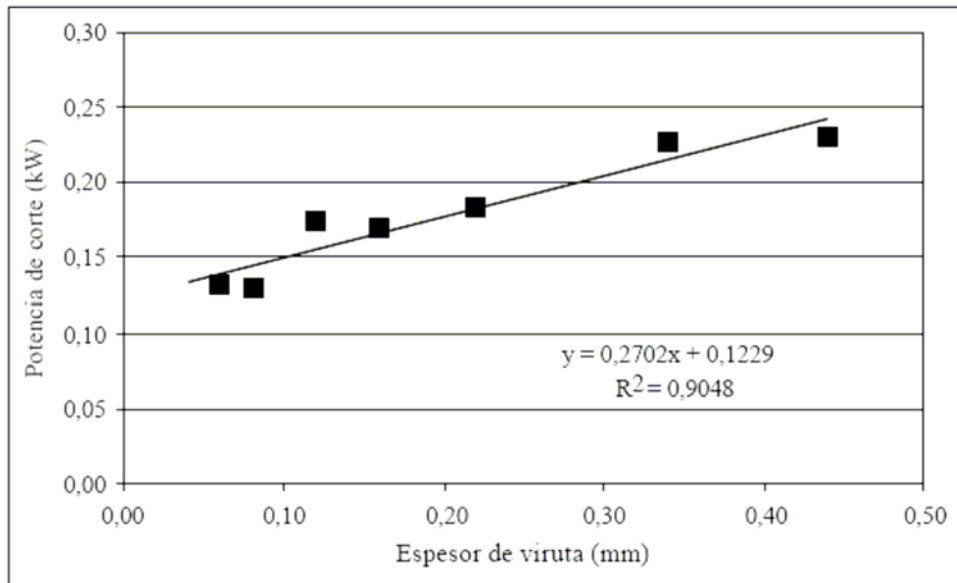


Figura 2 Correlación entre la potencia de corte y el espesor de viruta. (Aguilera y Vega, 2005)

Los resultados de las figuras 1 y 2, presentan diferencias en los niveles de correlación (R^2) entre las variables, lo que llama fuertemente la atención, ya que fueron condiciones de ensayos muy parecidas.

2.2 Parámetros que afectan la calidad superficial y la energía

Existen varios factores influyentes en el resultado final de un proceso de cepillado: los relacionados a la madera, herramienta de corte y los parámetros utilizados en el proceso de cepillado. Estos últimos, tienen especial importancia en los resultados de la calidad superficial y gasto de energía en el proceso, ya que, según Aguilera y Vega (2004), “el ajuste inadecuado de las condiciones de maquinado, ya sea en cepilladora o moldurera, además de generar una calidad superficial inapropiada, desgastará inútilmente las herramientas de corte, con un consumo de energía excesivo”.

Esta calidad superficial inapropiada se presenta en dos extremos, el extremo negativo en el cual la calidad de la superficie es notoriamente deficiente, es decir, con levantamientos de fibras y ondulaciones pronunciadas, y en el otro extremo, una calidad en exceso buena, es decir, una superficie extremadamente pulida con ondulaciones imperceptibles. Esta última condición es la que genera el mayor desgaste de herramientas y el mayor consumo de potencia. (Aguilera y Vega, 2004)

Cabe destacar que a pesar de existir métodos exactos no destructivos para evaluar la calidad superficial, como lo es un rugosímetro o el factor fz (paso por diente o distancia en milímetros entre las marcas dejadas por los cuchillos en el maquinado), estos no son usados normalmente en la práctica, o bien, como en el caso del factor fz que es aplicado de una manera informal, es decir, sin usar métodos matemáticos para su cálculo, sino que simplemente los operadores tratan de contar la cantidad de marcas de los cuchillos que se generan dentro de una pulgada a simple vista.

2.2.1 Densidad

La densidad de la madera consiste en la relación de la masa de la madera con respecto al volumen que esta ocupa, existen distintos tipos de densidades, los que se generan a partir de diferentes condiciones de humedad al momento de los controles para el cálculo.

Los tipos de densidad mas utilizados son la densidad básica y la densidad de referencia. La densidad básica consiste en la masa de la madera anhidra y volumen de la madera saturada con agua, en cambio, la densidad de referencia consiste en la masa y el volumen de la madera a una misma condición de humedad.

Debido a que mientras más densa la madera, estas presentan paredes celulares de mayor espesor, por lo que en una misma área de corte presentan una mayor cantidad de material sólido, la lógica dice que en el proceso de corte, estas especies más densas requerirán de mayores potencias de corte.

2.2.2 Herramienta de corte

El proceso de cepillado se lleva a cabo gracias al corte de un número determinado de cuchillos (Z) insertados en un cabezal que gira sobre si mismo a una cantidad establecida de revoluciones por minuto (N), tal y como se muestra en la figura 2.

El estudio se debe realizar con elementos de corte que optimicen el uso de energía o que estén de acuerdo a recomendaciones de estudios anteriores, como es el caso de Vignote y Jiménez, 2000., que nos afirman que los menores esfuerzos de corte se obtienen con ángulos de ataque entre 30 y 50 grados del elemento de corte.

Además, de acuerdo a los métodos matemáticos presentados en puntos anteriores para el calculo del espesor de viruta y la potencia de corte, queda de manifiesto la gran importancia que tiene la configuración de la herramienta de corte en los resultados de ésta última, ya que el numero de cuchillos y el diámetro que presente la herramienta de corte son factores que influyen en el espesor de viruta promedio y como ha quedado claro con la bibliografía estudiada, este es un factor clave al momento de evaluar los requerimientos de potencia de corte.

2.2.3 Variables del proceso

La velocidad con que avanza la madera (V_f) durante el proceso de cepillado es uno de los factores determinantes en los resultados de la calidad superficial en la madera cepillada, ya que dicha velocidad, es directamente proporcional con el largo de las ondas impresas en la madera, estas ondas, son debido al corte de los cuchillos montados en el cabezal, dichas ondas son llamadas “paso por diente” (f_z), mientras menor sea la separación entre éstas, se considera una mejor calidad superficial.

El paso por diente, además, es inversamente proporcional a variables como el número de cuchillos con que cuente el cabezal de corte (Z) y al número de revoluciones por minuto (N) con que éste trabaje. La relación entre estas variables se expresa de la siguiente forma:

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot N$$

Donde;

- V_f = Velocidad de avance (m/min)
- f_z = Paso por diente (m)
- Z = Numero de cuchillos del cabezal
- N = Revoluciones por minuto (min^{-1})

La profundidad de corte es una variable que afecta los requerimientos de potencia de corte, ya que, es un parámetro que considera el espesor de viruta, además se espera que a mayor profundidad se obtenga una peor calidad superficial, de acuerdo a estudios posteriores realizados por Aguilera y Vega (2004), si bien, en este estudio no se presenta la relación de rugosidad superficial directamente con la profundidad

de corte, sino que por medio del espesor de viruta promedio, en el mismo estudio se asegura que este indicador tiene una buena relación con la rugosidad superficial, por lo tanto los parámetros que lo componen, como la profundidad de corte, también debe serlo.

2.3 Rugosidad Superficial

Es el conjunto de irregularidades en una superficie, las cuales según estudios previos varían de acuerdo a las condiciones de maquinado y características propias de la madera.

La importancia de controlar el estado superficial de la madera lo indica Lemaster y Dornfeld, citados por Aguilera, 2004., señalando que la rugosidad superficial va a estar directamente relacionada con el uso que se le quiera dar a una pieza, además, un control efectivo de la calidad de la superficie permite asegurar un ensamblaje correcto de las piezas y determina la aplicación de adhesivos y productos de terminación.

En estudios anteriores realizados por Aguilera *et. al.* (2000) en maquinado de MDF con especies europeas encontraron una clara relación entre el espesor de viruta y la rugosidad superficial, con buenos niveles de correlación, mostrando relaciones positivas, específicamente, obteniendo mejores calidades con espesores de viruta pequeños, sin embargo con altos consumos de energía.

2.3.1 Medición de la rugosidad superficial

Esta puede ser controlada con un rugosímetro, aparato que realiza un recorrido minucioso en línea recta por la superficie a estudiar, las regularidades en la altura de la superficie son analizadas y registradas por el instrumento. El resultado del rugosímetro es entregado según el parámetro Rz, que consiste en el promedio de la altura de las cinco cumbres más altas, más los cinco valles más profundos en la longitud de evaluación.

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Material

Se utilizó madera de *Sequoia sempervirens* Endl. (Albura y duramen) y dos densidades de *Acacia melanoxylon* R. Br. con forma de ortoedro y sus dimensiones son descritas en la figura 3.

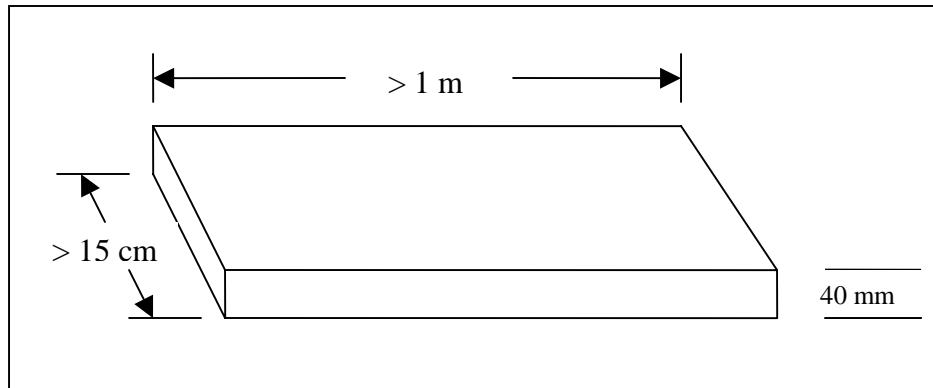


Figura 3 Forma y dimensiones de las probetas para la medición de potencia y rugosidad superficial

3.1.1 Controles de densidad y humedad

A la madera se le controló el contenido de humedad en base a madera seca, densidad de referencia y densidad básica, las muestras se secaron en estufa a 103 +/- 2 °C para obtener peso anhidro y luego dejadas en agua hasta la saturación de la fibra para obtener su volumen verde.

Cuadro 1, Controles de humedad y densidad.

	Seq. Albura	Seq. Duramen	Aromo 1	Aromo 2
Humedad (%)	17,7	17,4	14,1	14,1
Densidad Referencia (Kg/m3)	253	314	591	676
Densidad Básica (Kg/m3)	233	290	501	561

La diferencia de humedad encontrada dentro de cada especie es muy pequeña y no incide mayormente en los resultados obtenidos, en cambio, entre una y otra especie se presenta una diferencia de 3% aproximadamente, lo que de todas formas no es un factor que interfiera o altere los resultados del estudio, ya que, los análisis fueron realizados de forma aislada una especie de la otra en la mayoría de los casos, siendo analizada la posible incidencia en las excepciones.

3.2 Equipo e instrumentos

3.2.1 La máquina

Se utilizó una máquina Tupí Marca “Griggio”, que cuenta con una potencia de motor de 4 kW y una velocidad de rotación variable de 3200 a 8000 RPM, nominales. Además y para lograr un avance constante de la madera, se utiliza un carro de avance automático con velocidad regulable de 4 a 22 m/min (figura 4).



Figura 4 Máquina tupí y carro de avance

3.2.2 Herramienta de corte

La herramienta de corte utilizada fue un cabezal convencional con un diámetro de 124 mm, con cuatro cuchillos de acero rapido (HSS), y ángulo de ataque de 25° (figura 5).

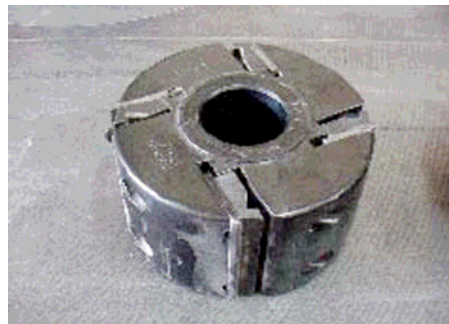


Figura 5 Cabezal convencional, Z=4.

3.2.3 Analizador de energía

Para medir la potencia (kW) que consume la máquina tupí en las diferentes condiciones de maquinado, se utilizó un analizador de energía EXTECH modelo 382065, de tipo candado. El instrumento fue conectado a la entrada de corriente de la máquina tupí, y los datos entregados por el analizador fueron capturados por un computador con un software especial conectado con el instrumento. El analizador captura datos con una frecuencia de un segundo.

3.2.4 Medición de la rugosidad superficial

Para conocer la rugosidad de la madera producto del cepillado, se utilizó un rugosímetro del tipo “stylus”, marca Mitutoyo, modelo SJ-201 (figura 6), con un diámetro de cabezal de 5 μ m. Las mediciones se hicieron en forma perpendicular a las marcas producidas por los cuchillos durante el maquinado, con un recorrido de 25 mm, siguiendo la norma JIS.



Figura 6 Rugosímetro Mitutoyo SJ-201

3.3 Diseño experimental

3.3.1 Condiciones de corte, medición de Potencia de corte y Rugosidad superficial

Consistió en maquinar las probetas de dos especies, y durante el proceso de corte, se midió la potencia necesaria para cepillar la madera, mediante el analizador de potencia conectado a la entrada de corriente de la máquina tupí.

Las variables que intervienen en la medición de la Potencia de corte (P_c), se describen a continuación:

Las constantes del proceso son:

- Número de cuchillos
- Geometría
- Acero de los cuchillos
- Ancho de corte
- Velocidad de rotación del cabezal
- Diámetro del cabezal de corte

Las variables del proceso son:

- Densidad de la madera
- Velocidad de avance
- Profundidad de corte

Las condiciones de corte, medición de la Potencia de corte y Rugosidad superficial son descritas en el Cuadro 2, 3 y 4, respectivamente.

Cuadro 2. Condiciones de corte

Factor	Condiciones
Velocidad de avance (Vf) m/min	4, 8 y 11
Velocidad de rotación (N) en RPM	4200
Diámetro del cabezal con Z=4 en mm	124
Número de cuchillos	4
Ancho de corte (ae) en mm	40
Profundidad de corte (ap) en mm	1, 2 y 3
Probetas	<i>Acacia melanoxylon R.Br.</i> (2 Densidades) <i>Sequoia sempervirens Endl.</i> (Albura y duramen)

Cuadro 3. Condiciones de medición de Potencia de corte

Factor	Condición
Método de medición (kW)	Promedio en zona estabilizada
Frecuencia de toma de datos (s)	1
Numero de repeticiones	3

Cuadro 4. Condiciones de medición de Rugosidad superficial

Factor	Condición
Método de medición	Rugosímetro de contacto
Parámetro de rugosidad superficial	Rz según JIS
Largo de la evaluación (mm)	25
Puntos de evaluación	3

De acuerdo a estas condiciones, el diseño experimental para las probetas de *Acacia melanoxylon R.Br.* y *Sequoia sempervirens Endl.* resultó ser como se observa en el cuadro 5.

Cuadro 5. Diseño experimental para *Acacia melanoxylon R.Br.* y *Sequoia sempervirens Endl.*

RPM	Vf (m/min)	Z	fz (mm)	ap (mm)	ae (mm)	ec (mm)	Repeticiones
4200	4	4	0,24	1	40	0,021	3
4200	4	4	0,24	2	40	0,030	3
4200	4	4	0,24	3	40	0,037	3
4200	8	4	0,48	1	40	0,043	3
4200	8	4	0,48	2	40	0,060	3
4200	8	4	0,48	3	40	0,074	3
4200	11	4	0,65	1	40	0,059	3
4200	11	4	0,65	2	40	0,083	3
4200	11	4	0,65	3	40	0,102	3

3.4 Análisis estadístico

Las diferentes condiciones de maquinado entregan un factorial de 3 (fz) * 3 (ap), 9 variantes por cada tipo de madera (4), con tres repeticiones en la captura de datos de potencia de corte para cada configuración de las variables, a éstos resultados se les realizó un análisis de varianza de dos vías, es decir, se examinaron las relaciones de rugosidad superficial y potencia de corte, respecto a las diferentes condiciones de maquinado. Se realizó un análisis de ANOVA Factorial por tipo de madera, donde por medio de test de Tukey se apreció si las variables de velocidad de avance, profundidad de corte, espesor de viruta y densidad provocaban diferencias estadísticamente significativas en potencia de corte y rugosidad superficial.

Se utilizó el programa Microsoft Excel para la realización de los gráficos de dispersión de resultados, el cual proporciona las líneas de tendencia con su respectiva ecuación y coeficiente de correlación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Potencia

4.1.1 Relación entre Potencia de corte y Velocidad de avance

Según los resultados entregados por el test de Tukey, la variación de la velocidad de avance tiene un efecto estadísticamente significativo para un 95% de confianza, en la potencia de corte de las dos especies, además se cumple la teoría de que a medida que se aumenta la velocidad de avance, el consumo de potencia también lo hace y de forma evidente, en todos los casos estudiados. Los resultados se presentan en las figuras 7 y 8, las cuales cuentan con la dispersión de puntos, líneas de tendencia con su respectiva ecuación y el coeficiente de correlación.

Cuadro 6, Resumen de Potencia de corte a distintas velocidades de avance

Vf (m/min.)	Promedio Potencia (Kw)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
4	0,234	0,063	0,131	0,343
8	0,313	0,100	0,160	0,547
11	0,347	0,091	0,180	0,520

El cuadro 6, presenta el promedio de potencia de corte obtenido en todos los ensayos realizados, en relación a la velocidad de avance, con la desviación estándar y los límites obtenidos.

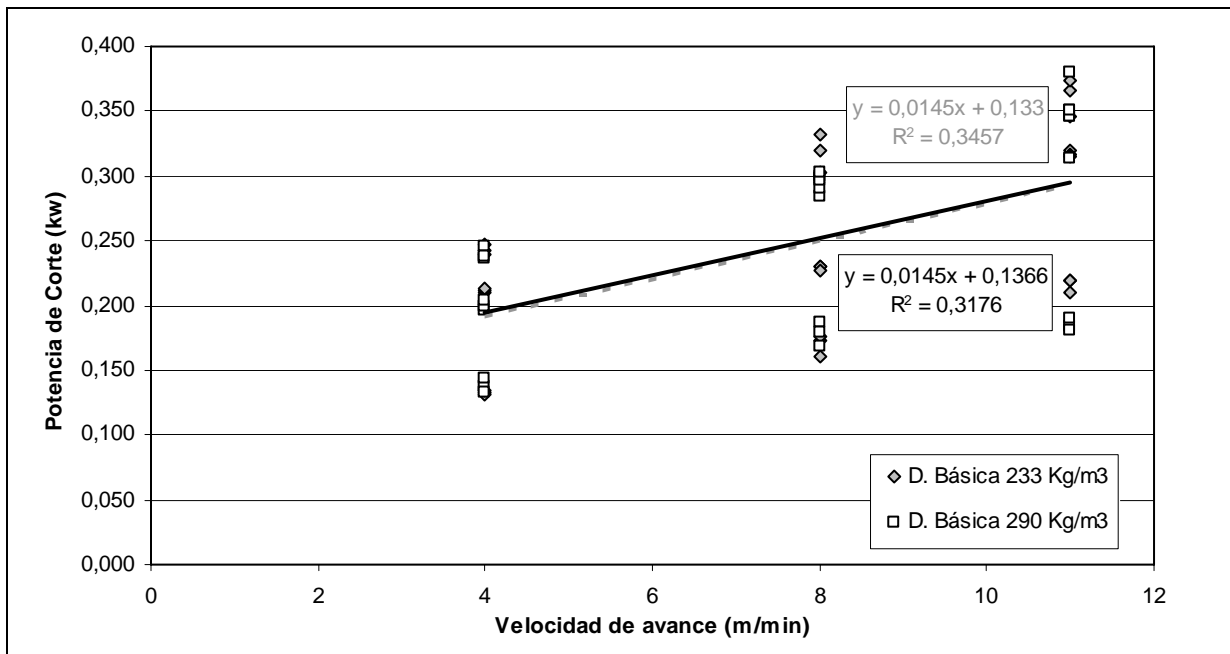


Figura 7, Requerimientos de potencia de corte en *Sequoia Sempervirens* en relación a distintas velocidades de avance, considerando profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.

En Sequoia la diferencia 57 Kg/m³ de densidad básica no se aprecia como un factor de incidencia dentro de los resultados obtenidos, ya que las líneas de tendencia tienen pendientes idénticas y constantes con diferencias insignificantes.

Al analizar esta relación, identificando los puntos pertenecientes a cada profundidad de corte se encuentra que a la velocidad de 4 m/min. se obtiene una distribución esperada, la cual va en aumento de forma pareja a medida que aumenta la profundidad de corte, en cambio en las velocidades de 8 y 11 m/min. se dispara la potencia de corte en puntos correspondientes a 2 mm. de profundidad y se ubican aproximadamente en los mismos niveles de los 3 mm.

Esto último se explica debido a que todas las pruebas realizadas a 8 y 11 m/min., sobrepasan los límites para el espesor de viruta recomendados para el ahorro de energía.

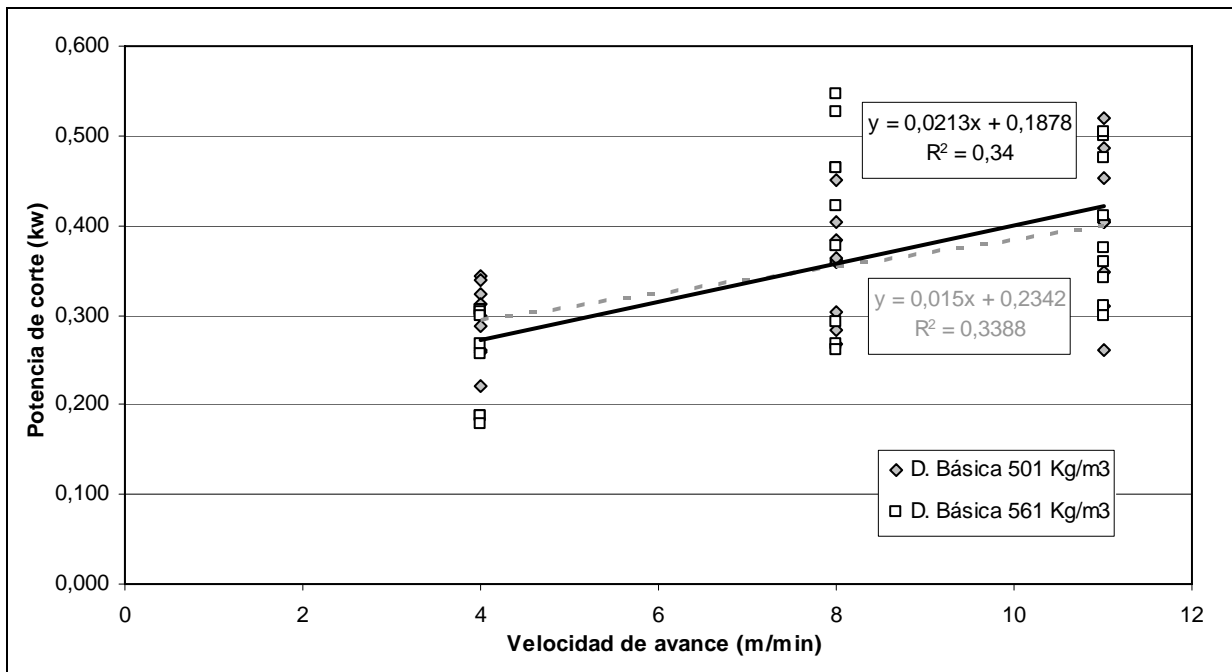


Figura 8, Requerimientos de potencia de corte en *Acacia melanoxylon* en relación a distintas velocidades de avance, considerando profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.

La potencia de corte requerida para el Aromo es claramente mayor a la Sequoia, debido a la gran diferencia de densidad, en cambio, la pequeña variación de densidad entre las muestras de aromo no parece ser un factor considerable para los resultados de potencia, las curvas presentan una diferencia en sus pendientes, pero las líneas de tendencia no son reflejo de un gran cambio.

En el Aromo, al identificar los puntos pertenecientes a cada profundidad de corte no se obtiene una diferencia tan marcada como en la Sequoia, pero si se encuentra mayor cercanía entre los puntos correspondientes a los 2 y 3 mm., en las velocidades de 8 y 11 m/min.

Es notorio el aumento de los requerimientos en la potencia de corte a medida que crece la velocidad de avance, pero sin duda, la velocidad de avance no es un factor confiable al momento de proyectar una potencia, ya que dentro del maquinado los factores inherentes al proceso son muchos más, los cuales se integran de mejor forma en el calculo del espesor de viruta promedio.

4.1.2 Relación entre Potencia de corte y Profundidad de corte

Según los resultados entregados por el test de Tukey, la variación de la profundidad de corte tiene un efecto estadísticamente significativo para un 95% de confianza en la potencia de corte, en las dos especies de madera, además queda de manifiesto que se produce un aumento en los requerimientos de potencia a medida que aumenta la profundidad de corte, como muestra el cuadro 7 y las figuras 9 y 10, confirmando la teoría estudiada previamente.

Cuadro 7, Resumen de Potencia de corte a distinta profundidad de corte

ap (mm)	Promedio Potencia (Kw)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
1	0,297	0,101	0,133	0,527
2	0,305	0,101	0,131	0,547
3	0,293	0,093	0,133	0,505

El cuadro 7, presenta el promedio de potencia de corte obtenido en todos los ensayos realizados, en relación a la profundidad de corte, con la desviación estándar y los límites obtenidos

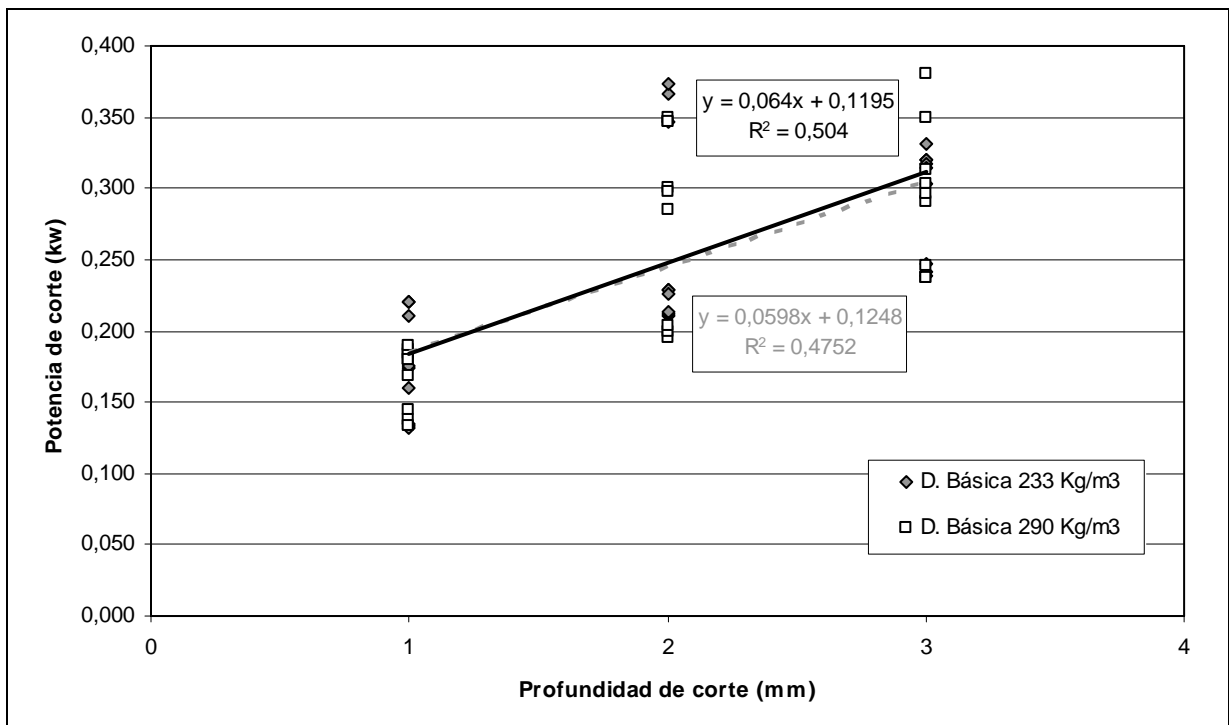


Figura 9, Requerimientos de potencia de corte en *Sequoia Sempervirens* en relación a distintas profundidades de corte, considerando velocidades de avance de 4, 8 y 11 mm.

En los resultados de potencia de corte en relación a la profundidad de cepillado, no se aprecian mayores diferencias entre las muestras de albura (290 Kg./m³) y duramen (233 Kg./m³) de Sequoia.

En Sequoia la diferencia 57 Kg/m³ de densidad básica no se aprecia como un factor de incidencia dentro de los resultados obtenidos, ya que las líneas de tendencia tienen pendientes similares y constantes con diferencias insignificantes.

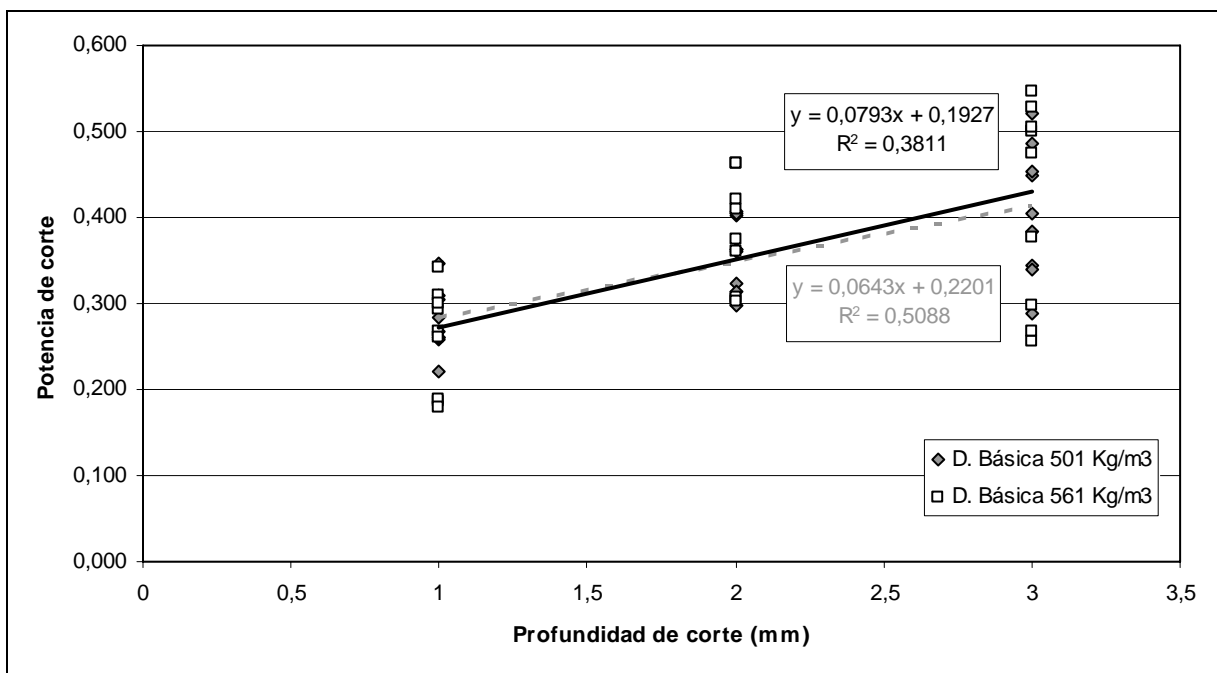


Figura 10, Requerimientos de potencia de corte en *Acacia melanoxylon* en relación a distintas profundidades de corte, considerando velocidades de avance de 4, 8 y 11 mm.

Consecuentemente con el análisis de velocidad de avance, los resultados de potencia de corte en Aromo en relación a profundidad de corte son mayores que en Sequoia y demuestran la correlación positiva entre estas variables. Los resultados de potencia de corte a la profundidad de 2 mm presentaron una mayor alza en el Aromo más denso, lo que se aprecia en la mayor pendiente que presenta la línea de tendencia.

La variación de la profundidad de corte y la velocidad de avance, a pesar de generar claros efectos sobre los requerimientos en la potencia de corte, no es el mejor indicador en este tipo de análisis, ya que no considera muchos factores que pueden variar en el maquinado. Sin embargo, esto no hace que el análisis sea inválido, ya que las curvas son realizadas considerando una sola variable a la vez, ya sea velocidad de avance o profundidad de corte según corresponda, las demás condiciones son constantes o se repiten los mismos cambios en cada uno de los casos estudiados, por lo cual, éstos cambios pueden ser considerados como constantes.

4.1.3 Relación entre Potencia de corte y Densidad de madera

Según el test de Tukey la densidad de la madera si es un factor que produce una diferencia en las necesidades de potencia de corte, a mayor densidad de madera, se requiere una mayor cantidad de energía para el proceso de corte, cumpliéndose claramente la teoría.

Cuadro 8, Resumen de Potencia de corte a distintas densidades de madera

Densidad Básica (Kg/m ³)	Promedio Potencia (Kw)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
233	0,244	0,072	0,131	0,373
290	0,247	0,075	0,133	0,380
501	0,349	0,075	0,222	0,520
561	0,351	0,107	0,178	0,547

El cuadro 8, presenta el promedio de potencia de corte obtenido en todos los ensayos realizados, en relación a la densidad básica de la madera procesada, con la desviación estándar de los resultados y los límites máximos y mínimos obtenidos.

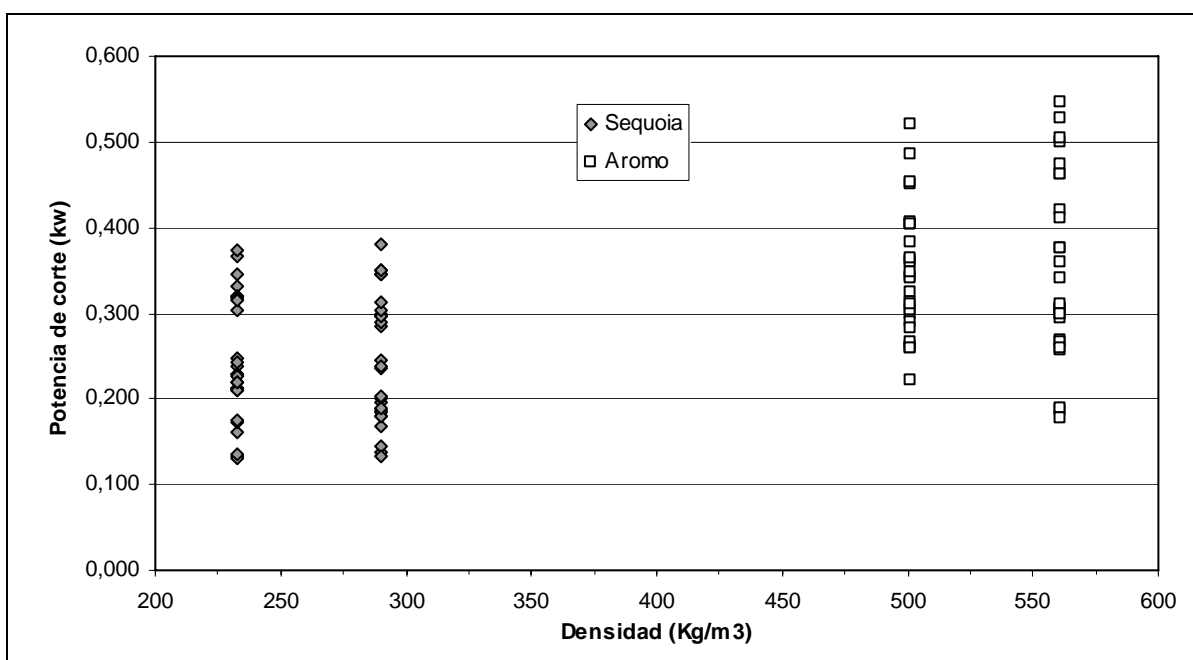


Figura 11, Requerimientos de potencia de corte según densidad de la madera cepillada, a velocidades de avance de 4, 8 y 11 m/min., y profundidades de corte de 1, 2 y 3 mm.

Si bien, la relación entre potencia de corte y densidad de madera es clara, ésta presenta una correlación baja, esto explica la poca diferencia entre las curvas de una misma especie en cuanto potencia de corte se refiere, además, esto indica que en los requerimientos de energía en el proceso de corte no son un impedimento a la hora de decidir si procesar o no diferentes densidades o elegir entre una especie u otra, ya que pueden ser mucho más importantes otros factores del maquinado o

propiedades inherentes a la madera, los cuales pueden tener diferentes reacciones, condiciones de trabajo o costos mas significativos en procesos futuros.

4.1.4 Relación entre Potencia de corte y Espesor de viruta

Las figuras 12 y 13 presentan los resultados obtenidos en las pruebas del control de los requerimientos de potencia de corte relacionados con el espesor de viruta producido durante el maquinado en *Sequoia Sempervirens* Endl. y *Acacia melanoxylon* R. Br., respectivamente, se presentó claramente una relación positiva existente entre estas dos variables en las dos especies.

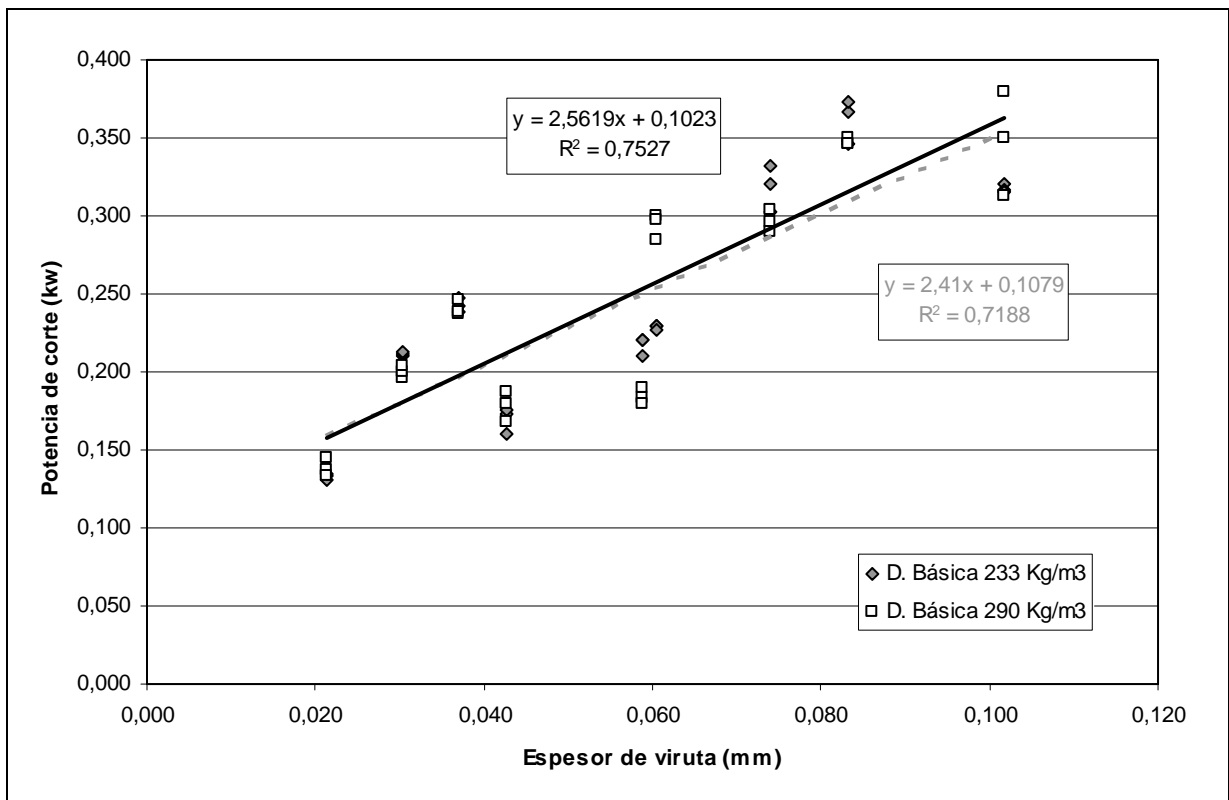


Figura 12, Requerimientos de potencia de corte en *Sequoia Sempervirens* respecto el espesor de viruta.

El espesor de viruta es, sin duda, el mejor indicador dentro de los estudiados, para proyectar los requerimientos en la potencia de corte en el maquinado, se obtienen tendencias mas claras, con una dispersión de puntos más cercanos a la línea de tendencia, lo que es llamado una relación más fuerte entre las variables.

Los resultados obtenidos concuerdan con los encontrados en la búsqueda bibliográfica, de los cuales, algunos son presentados en el marco teórico, ya que precisamente éstos últimos fueron hechos en una madera más densa como el *Pinus radiata* D. Don., los resultados en *Sequoia* se encuentran correctamente situados levemente bajo la curva del Pino.

La correlación obtenida entre las variables fue alta (sobre 0.72), y se sitúa entre las correlaciones resultantes en los estudios citados anteriormente.

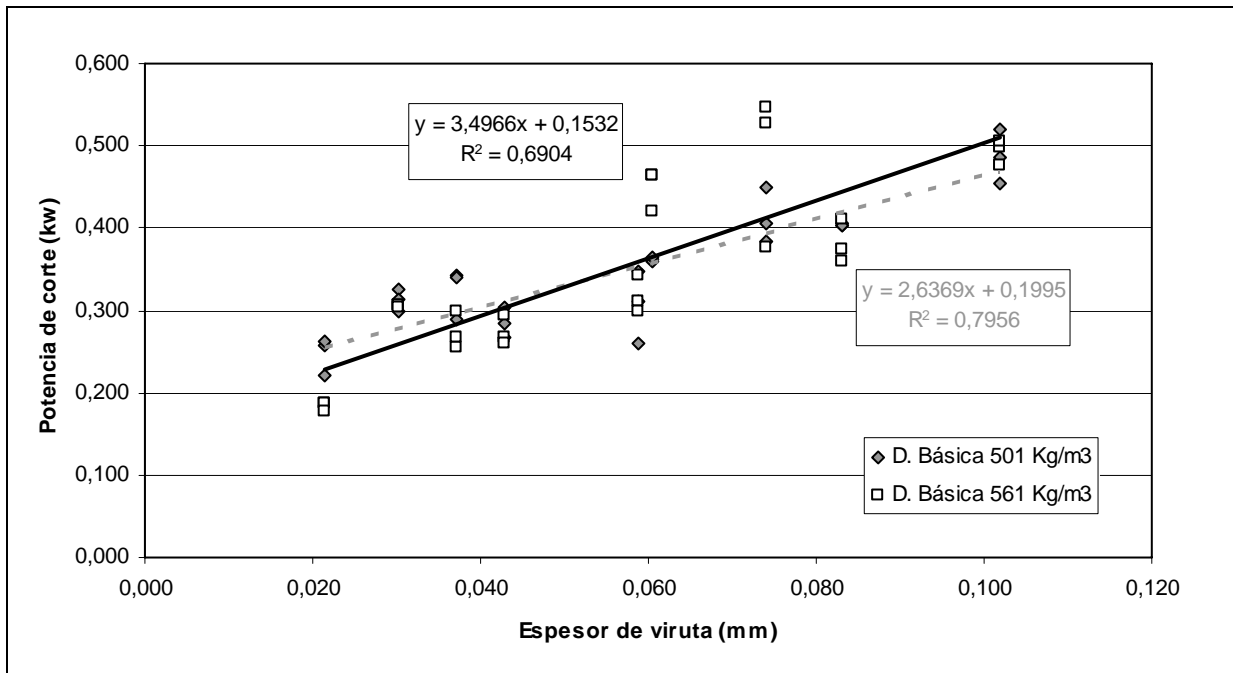


Figura 13, Requerimientos de potencia de corte en *Acacia melanoxylon* respecto al espesor de viruta.

En Aromo se vuelve a obtener curvas bastantes cercanas, debido a la poca diferencia de densidad, pero se vuelve a percibir el mismo efecto en la gran mayoría de los análisis, donde la madera de mayor densidad presenta mayores pendientes, debido a que los cambios de las condiciones de maquinado, como la profundidad de corte y la velocidad de avance, en conjunto con la mayor densidad de la madera, generan un aumento exponencial en la presencia de material fibroso en el área de corte, por lo que se requiere de mayor energía para su separación.

Las curvas se encuentran posicionadas levemente por sobre los resultados obtenidos en otros estudios realizados en *Pinus radiata* D. Don., debido a la mayor densidad del Aromo australiano.

4.2 Rugosidad

4.2.1 Relación entre Rugosidad superficial y Velocidad de avance

Según test de Tukey, no se aprecian diferencias significativas en rugosidad superficial variando la velocidad de avance a un nivel de confianza del 95% en Sequoia, pero si en Aromo, aunque vale la pena dejar en claro que el factor Rz tiene aumentos leves a medida que las marcas por pulgada disminuyen en ambas especies, es decir, a mayores espesores de viruta se obtienen peores calidades superficiales.

Cuadro 9, Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes velocidades de avance.

Vf (m/min.)	Promedio Rugosidad Rz (μm)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
4	20,39	8,204	9,94	38,79
8	21,56	6,890	13,50	39,41
11	23,79	6,958	14,34	38,09

El cuadro 9, presenta el promedio general de rugosidad superficial obtenido en todos los ensayos realizados separados según la velocidad de avance, se presenta la desviación estándar de los resultados y los máximos y mínimos obtenidos.

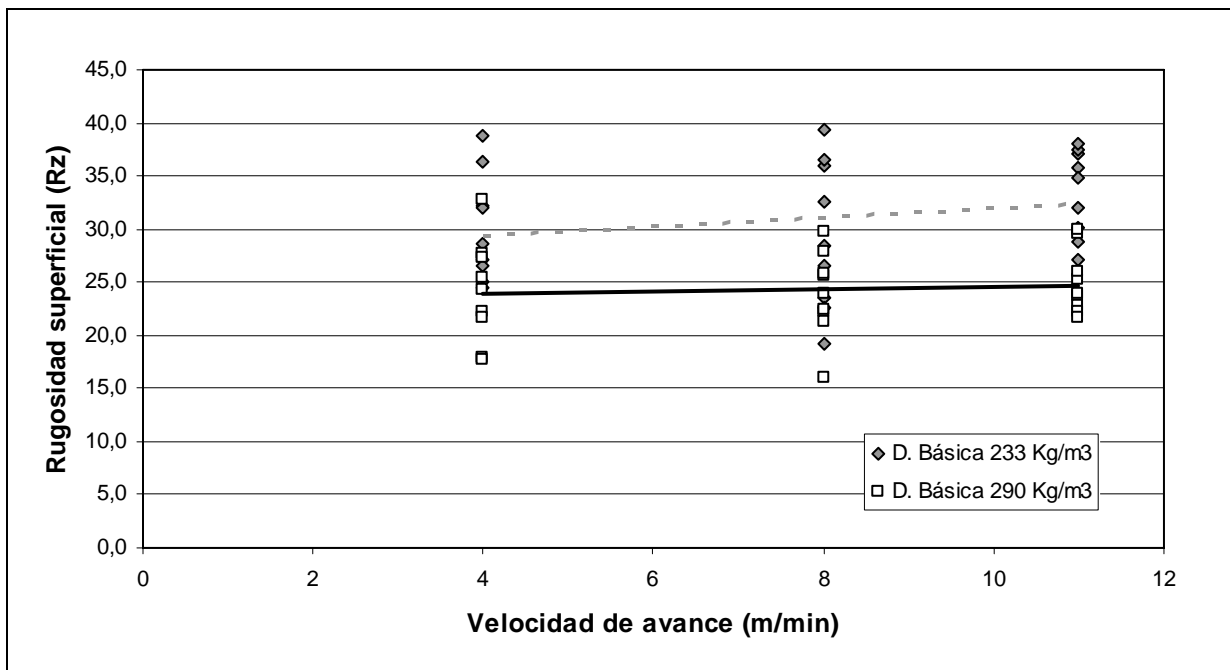


Figura 14, Rugosidad superficial en *Sequoia Sempervirens* frente a diferentes velocidades de avance.

Claramente, según muestra la figura 14, a mayor densidad en la madera de Sequoia se obtienen mejores calidades superficiales.

Además, se logra apreciar un leve empeoramiento de la calidad superficial a medida que la velocidad de avance aumenta, a pesar de no ser significativa según los análisis estadísticos.

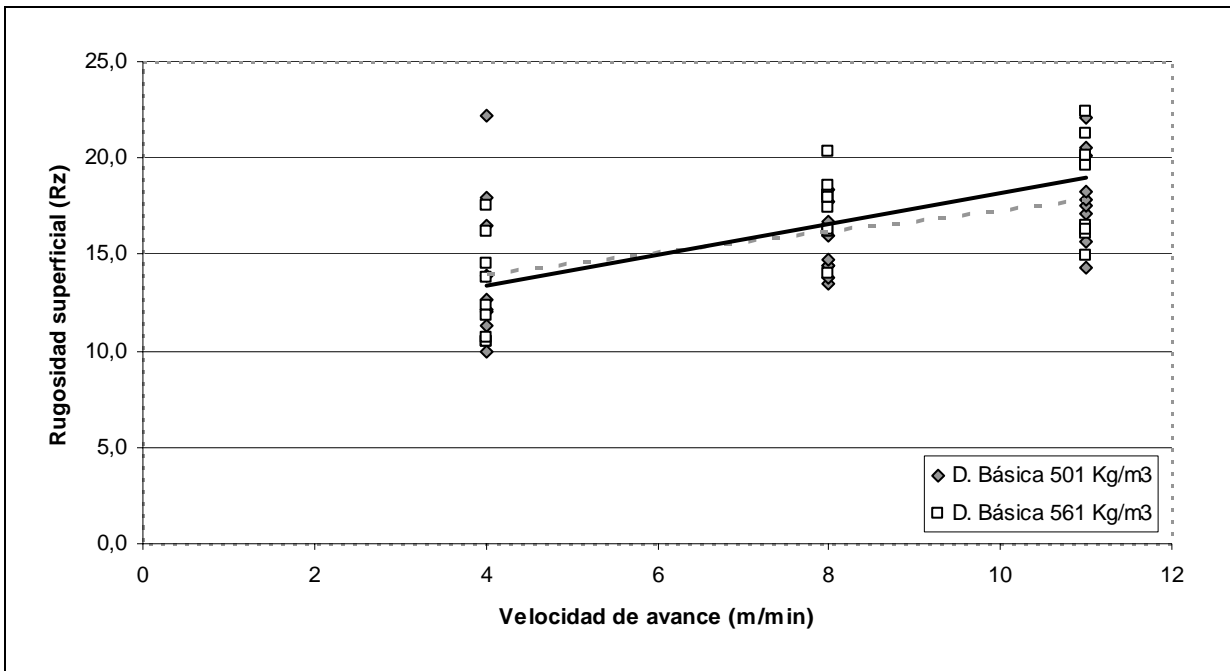


Figura 15, Rugosidad superficial en *Acacia melanoxylon*, frente a diferentes velocidades de avance.

Los resultados en Aromo muestran, levemente, que se obtienen peores calidades superficiales en las muestras más densas, además presentan un empeoramiento mucho más acentuado que la Sequoia a medida que aumenta la velocidad de avance.

Las líneas de tendencia en Aromo presentan mayor cercanía que en Sequoia, lo que indica que los resultados en calidad superficial tienen un límite máximo, es decir, que las variaciones de densidad pueden hacer mejorar o empeorar la calidad superficial hasta cierto punto, por razones propias de la madera y su estructura anatómica, esto indicaría que a la densidad del aromo y a las condiciones en las que se realizaron los ensayos se estaría cerca de este límite de calidad máxima a lograr.

4.2.2 Relación entre la Rugosidad superficial y la Profundidad de corte

Según test de Tukey, no se aprecian diferencias significativas en rugosidad superficial variando la profundidad de corte en el cepillado de madera entre 1, 2 y 3 milímetros en ambas especies, a un 95% de nivel confianza, pero cabe resaltar que de todas formas el aumento de la profundidad de corte genera pequeñas disminuciones en las calidades superficiales.

Cuadro 10, Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes profundidades de corte.

ap (mm)	Promedio Rugosidad (Rz)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
1	22,29	7,889	9,940	39,410
2	21,95	7,846	10,440	38,090
3	21,50	6,725	11,280	35,980

El promedio en los resultados de rugosidad superficial, presentados en el cuadro 0, son una prueba fehaciente de que la variación de una gran cantidad de cambios en las condiciones de maquinado realizadas en el estudio no logran ser un factor capaz de afectar la calidad superficial de tal forma que sean estadísticamente significativos los cambios producidos.

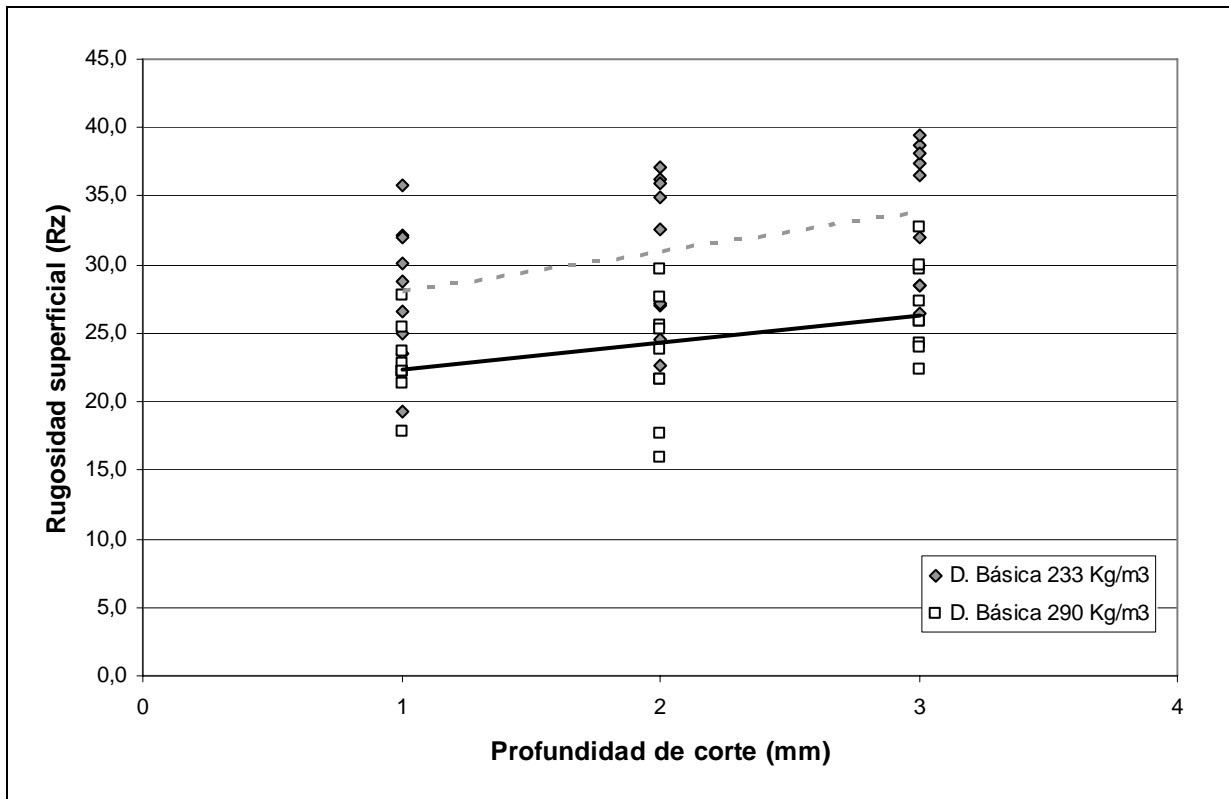


Figura 16, Rugosidad superficial en *Sequoia Sempervirens* frente a diferentes profundidades de corte.

En Sequoia se aprecia fácilmente los mejores resultados obtenidos en la calidad superficial con la madera mas densa, obteniendo un Rz (μm) menor para las muestras de 290 Kg/m³ de densidad básica, lo que indica una menor magnitud en las irregularidades de la superficie cortada.

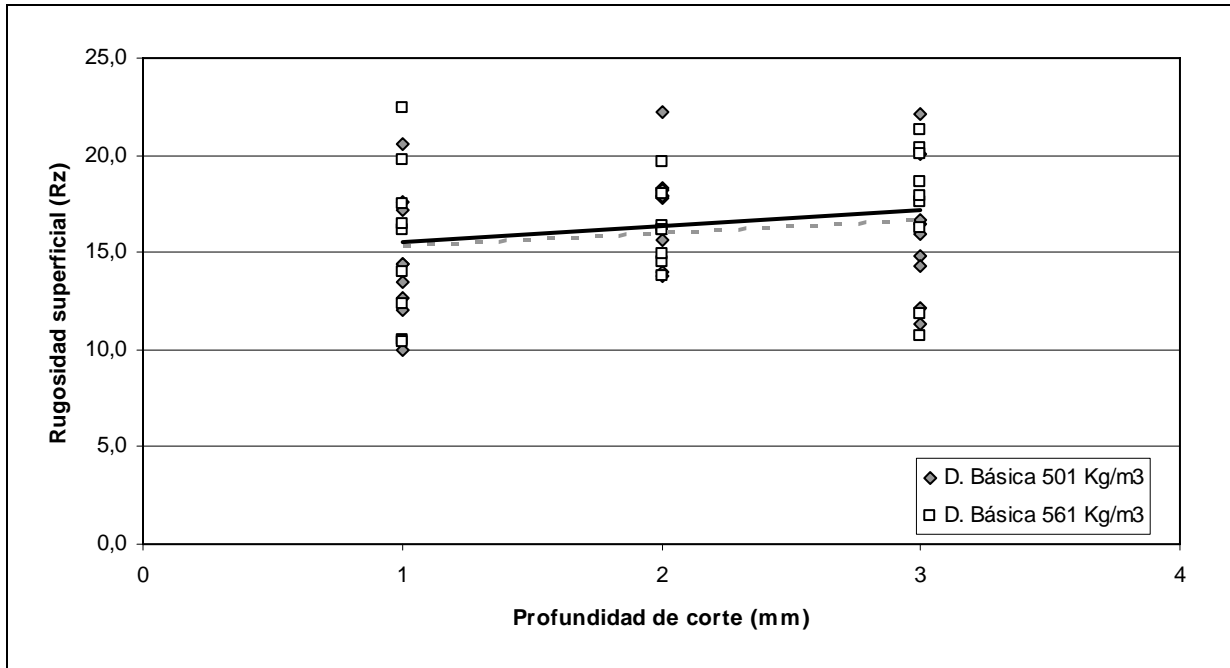


Figura 17, Rugosidad superficial en *Acacia melanoxylon* frente a diferentes profundidades de corte.

Los resultados en Aromo, al igual que en la relación con la velocidad de avance, confirman que se obtienen peores calidades superficiales en maderas más densas.

Las líneas de tendencia en Aromo, ahora relacionando la rugosidad superficial frente a la profundidad de corte, también presentan mayor cercanía que en Sequoia, lo que reafirma la teoría de que se encuentra una cercanía con el límite máximo de calidad superficial posible a lograr en éstas condiciones de trabajo, y que no necesariamente la misma diferencia dentro de una especie de baja densidad debe generar las misma diferencias en rugosidad superficial en una especie de alta densidad.

4.2.3 Relación entre la Rugosidad superficial y Densidad de madera

El test de Tukey reveló que existen diferencias significativas en rugosidad superficial variando la densidad de la madera, a un nivel de confianza del 95%. Los resultados obtenidos de rugosidad superficial se comportaron de forma diferente en la latifoliada (Aromo) y la conífera (Sequoia).

Cuadro 11, Resumen de rugosidad superficial (Rz), debido al cepillado a diferentes densidades de madera.

Densidad Básica (Kg/m3)	Promedio Rugosidad (Rz)	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
233,46	30,99	5,605	19,280	39,410
290,67	24,31	3,931	15,950	32,760
501,09	16,00	3,189	9,940	22,230
561,53	16,36	3,931	15,950	32,760

El cuadro 11, presenta el promedio general de rugosidad superficial obtenido en todos los ensayos realizados separados según la densidad de la madera estudiada, se presenta la desviación estándar de los resultados y los máximos y mínimos obtenidos en micrómetros.

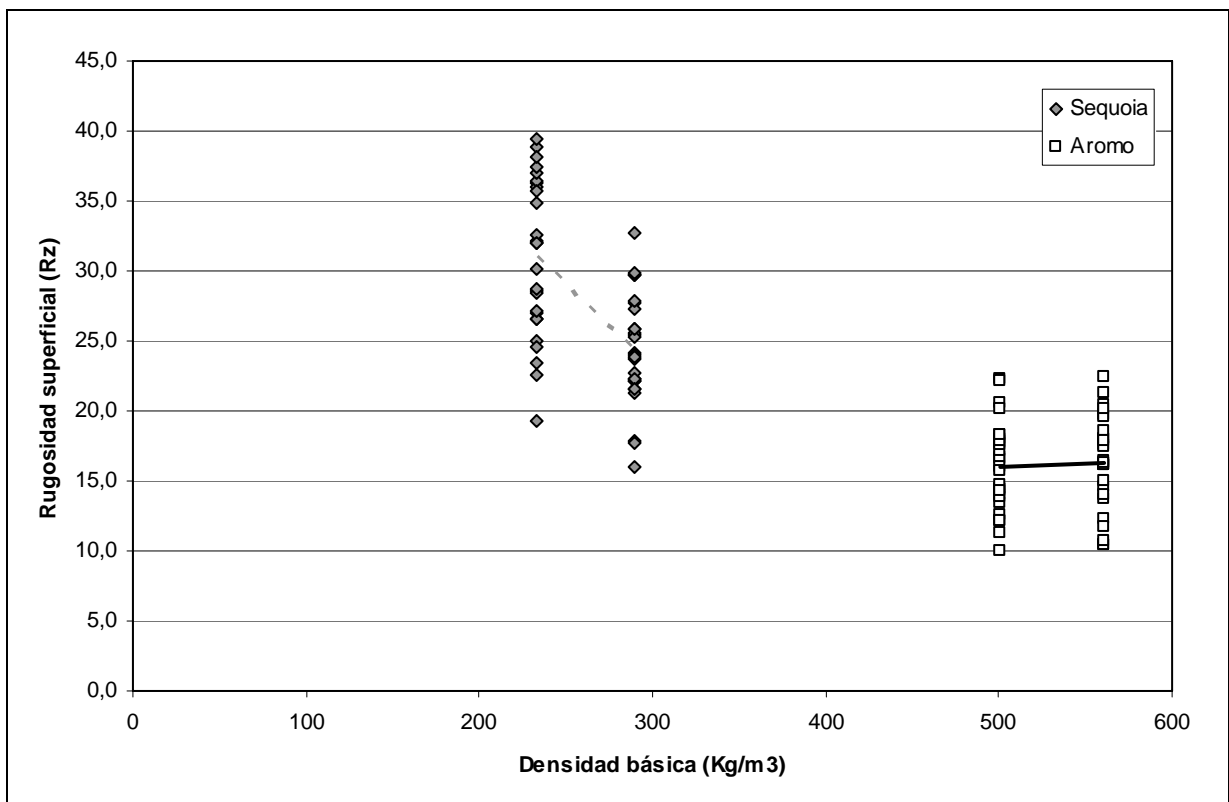


Figura 18, Resultados de rugosidad superficial frente a diferentes densidades de madera.

En el caso de la conífera, la calidad superficial producto del cepillado mejora en la madera de mayor densidad, de acuerdo a esto, se puede inferir que los dos grupos de densidades en las muestras de madera pertenecían a madera juvenil y madura, siendo esta última la de mayor densidad como es el comportamiento general de las coníferas, por lo tanto, obteniendo mayores calidades superficiales gracias a su mayor largo de fibra.

Por el contrario, en el caso de la latifoliada, se obtienen peores calidades superficiales en las muestras de mayor densidad, y en este caso también se puede

deducir que son muestras obtenidas a partir de madera juvenil y madura, siendo esta última la de menor densidad según el comportamiento general de las latifoliadas, las que presentan una mayor densidad en la madera central, de forma inversa a las coníferas.

4.2.4 Relación entre la Rugosidad superficial y Espesor de viruta

En este caso los resultados obtenidos de rugosidad superficial también se comportaron de forma diferente en la latifoliada y la conífera, el test de Tukey reveló que no se producen diferencias significativas en rugosidad superficial en la Sequoia siempre verde, variando la densidad de la madera a un nivel de confianza del 95%, pero en Aromo australiano si se presentan diferencias.

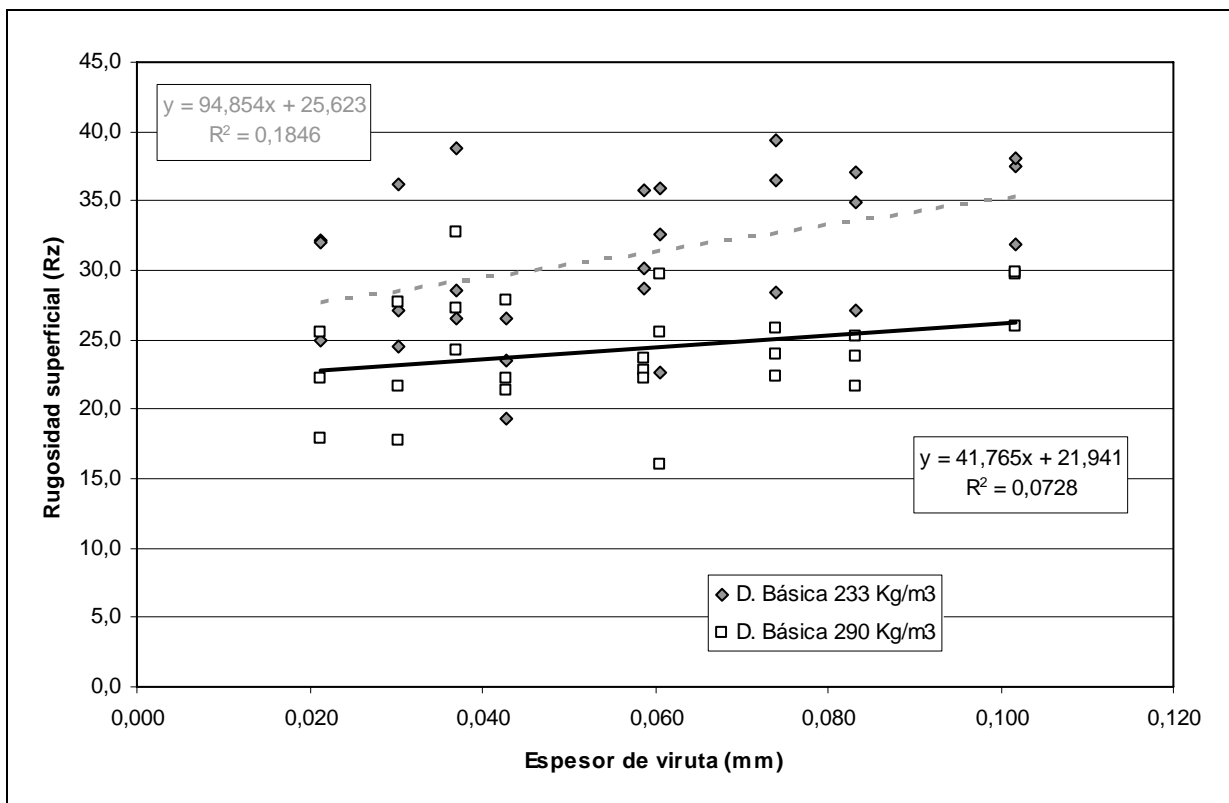


Figura 19, Rugosidad superficial en *Sequoia Sempervirens*, frente a diferentes espesores de viruta.

La no diferencia estadísticamente significativa se puede apreciar en la baja correlación que se obtiene de la dispersión de puntos en la relación, haciendo del espesor de viruta, al igual que con la velocidad de avance y la profundidad de corte, un factor inadecuado para realizar proyecciones en resultados de rugosidad superficial.

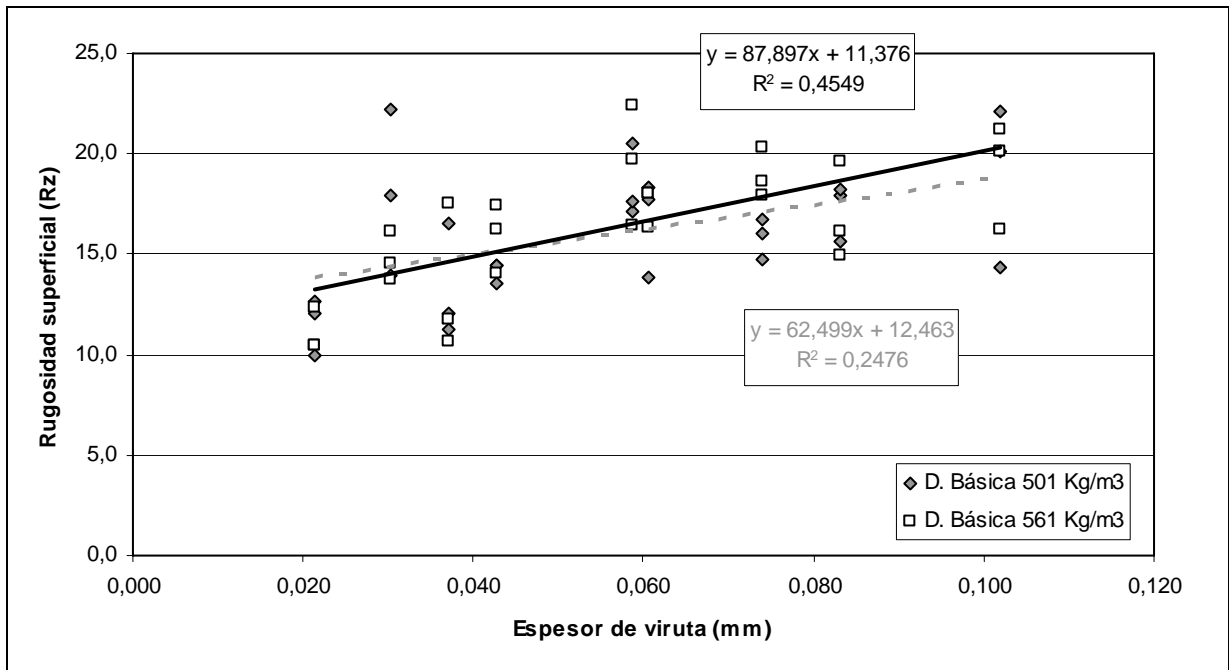


Figura 20, Resultados de rugosidad superficial en *Acacia melanoxylon*, frente a diferentes espesores de viruta.

Los resultados en Aromo son totalmente contradictorios con el caso de la conífera, ya que si se produce una diferencia estadísticamente significativa en rugosidad superficial variando el espesor de viruta, y es gracias a las diferencias que produce la velocidad de avance, ya que la otra variable en el estudio, la profundidad de corte, no genera efectos considerables.

A pesar de esto, al proyectar resultados en rugosidad superficial a partir del maquinado con diferentes espesores de viruta no parece tan asertivo como lo era en el caso con la potencia de corte, debido a la mayor magnitud de la nube de puntos en el gráfico, pero de todas formas es válida.

4.3 Relación Rugosidad superficial respecto Potencia de corte

A continuación, se presentan los modelos lineales para las diferentes densidades de maderas estudiadas, los cuales se acompañan con gráficos de dispersión que presentan los datos de potencia de corte obtenidos respecto a la rugosidad superficial resultante del maquinado.

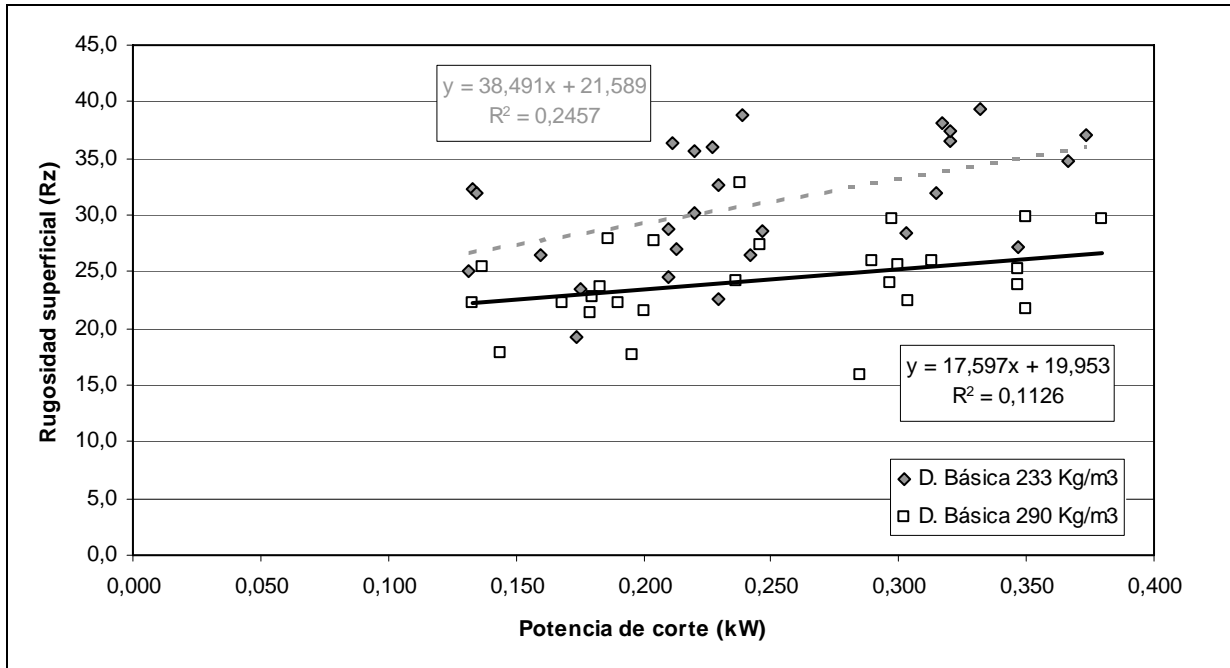


Figura 21, Relación de Rugosidad superficial respecto la potencia de corte, en *Sequoia Sempervirens*.

Estos modelos tienen las limitantes de que sólo funciona con estas condiciones de densidad de 233 o 290 Kg/m³, según sea el caso, y humedad de 17% bms., ya que estos factores son altamente incidentes en los resultados de potencia y condiciones diferentes producen un mayor error en la estimación.

Los datos presentan alta variación estándar, con correlaciones bajas, pero presentan una tendencia de pendiente positiva, consecuentemente con los resultados de éstas variables respecto a los espesores de viruta.

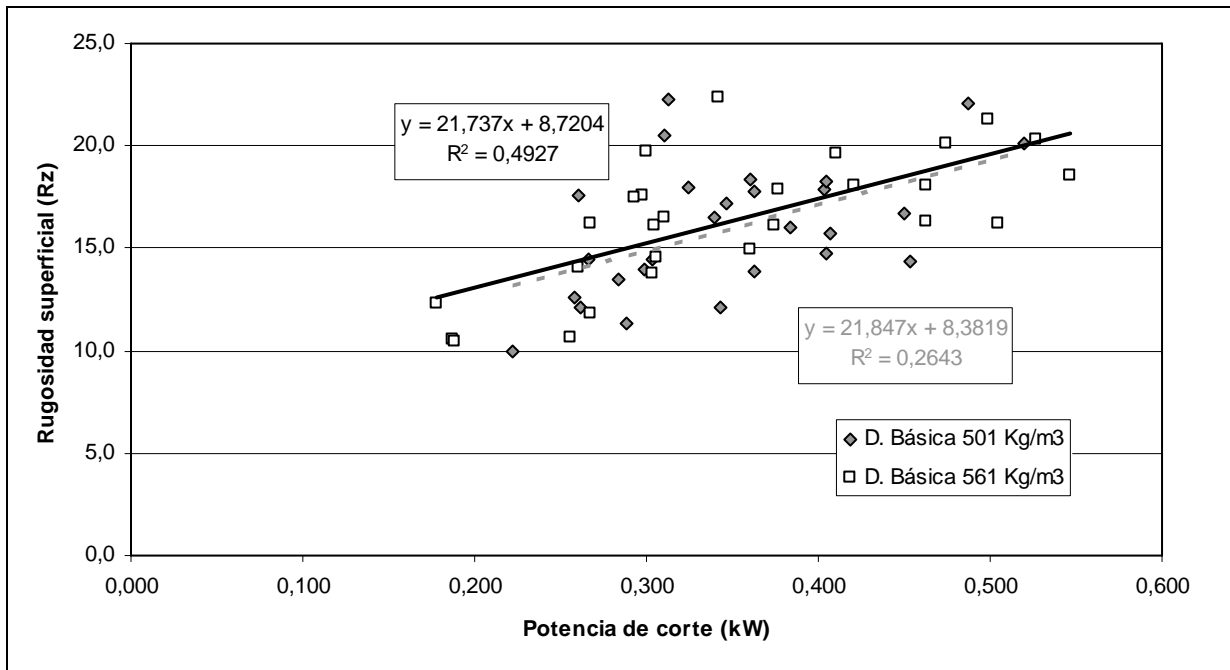


Figura 22, Relación de Rugosidad superficial respecto la potencia de corte, en *Acacia melanoxylon*.

Este modelo tiene las limitantes de que sólo funciona con estas condiciones de densidad de 501 o 561 Kg/m³, según corresponda, y humedad de 14% bms, de lo contrario, aumentan las posibilidades de error en la estimación

Los datos presentan una muy alta variación estándar, una clara tendencia de pendiente positiva, con un coeficiente de correlación bastante mas alto que en *Sequoia*.

Vale recalcar la notoria diferencia en la ubicación de los puntos en el grafico con respecto de los resultados obtenidos en madera de baja densidad, ya que se vuelven a mostrar las diferencias en el comportamiento en calidad superficial que generan las coníferas y latifoliadas.

5. CONCLUSIONES

Potencia de corte

- Los resultados de potencia de corte fueron notoriamente afectados por las variaciones en la velocidad de avance de la madera, y se debe claramente a la relación positiva que existe entre espesor de viruta (dependiente de la Vf) y la potencia de corte.
- La potencia de corte también tuvo la reacción esperada, según la teoría, en relación a los cambios en la profundidad de corte, ya que al igual que la velocidad de avance tienen una relación positiva.
- La densidad es un factor que produce cambios en la potencia de corte, a pesar de presentar correlaciones bajas, esta claro que ésta va aumentando con maderas más densas.
- Los resultados relacionados respecto el espesor de viruta logran por lejos la mejor relación con potencia, ya que este parámetro considera las dos variables estudiadas para su cálculo, y son consecuentes con valores obtenidos en otros estudios.

Rugosidad superficial

- La rugosidad superficial resultante fue bastante irregular en Sequoia, ya que presentó grandes cambios al variar la velocidad de avance en el cepillado, no se presentó una relación fuerte, pero si un leve aumento en las irregularidades superficiales a medida que aumenta la velocidad de alimentación, estas diferencias si fueron estadísticamente significativas en Aromo australiano.
- La rugosidad superficial no mostró ser un factor relevante a la hora de generar cambios en la profundidad de corte, aunque se evidenció un leve aumento del factor Rz a mayores profundidades de corte, pero presenta relaciones bastante débiles.
- La densidad de la madera demostró ser un factor importante en los resultados de rugosidad superficial en el cepillado, mostrando tendencias muy claras a medida que varía la densidad, y quedó claro que los resultados en calidad superficial no dependen solo de la densidad, sino que también del tipo de madera, obteniendo diferencias considerables en coníferas y latifoliadas.
- El espesor de viruta no resulta ser un factor que provoque cambios estadísticamente significativos en Sequoia, pero si lo hace en Aromo australiano.

Relación Rugosidad superficial - Potencia de corte

- La realización de modelos lineales fue posible, y cumplen con la tendencia de los datos recogidos en el estudio donde quedó claro que ambos aumentan a medida que se trabaja con espesores de viruta mayores, lamentablemente, los modelos tienen la limitante de las condiciones de maquinado y físicas de la madera muy específicas, lo cual reduce claramente su utilización, esto se puede solucionar estudiando una mayor cantidad de variables y contando con una mayor cantidad y variedad de materias primas. Se comprueba que trabajando a condiciones de maquinado que ahorren energía, a la vez, se logran conseguir mejores resultados superficiales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera A., P. J. Meausoone, P. Martin. Wood material influence in routing operations: the MDF case. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2000, vol. 58, N° 4, p. 278-283.

Aguilera, A., Vega, M., 2004. Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque (Chile)* 25 (3): 25-32.

Aguilera, A., Vega, M., 2005. Caracterización de la rugosidad superficial y de la energía de corte durante el maquinado de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque (Chile)* 26 (1): 101-108.

Cárdenas, P. 2006. Cinemática del proceso de fresado de Acacia melanxylon R. Br. Su efecto sobre calidad superficial y consumo de energía. Tesis Ing. Mad., Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 62 p.

Espinoza, A. 2005. Aserrió de Aromo Australiano (*Acacia melanoxylon* R.BR). Tesis Ing. en Maderas. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 28 p.

Kivimaa, E. 1950. Cutting force in wood working. The state institute for technical research, Finland. Helsinki 102 p.

Undurraga, M. 1995. Maquinado y algunas propiedades físico mecánicas de *Sequoia sempervirens* (D.Don) Endl. creciendo en Chile. Tesis Ing. Forestal. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 85 p.

Vignote, S., F. Jiménez. 2000. Tecnología de la madera. 2ª Edición. Madrid-España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaria General Técnica, Centro de publicaciones.109p.

ANEXOS

Anexo 1
Abstract

ABSTRACT

The cutting power control in wood machining process is important where cutting conditions changes or species, and more when tool wear affects the cutting performances.

Two species, *Sequoia sempervirens* and *Acacia melanoxylon* were studied, considering wood basic density in two levels for each species. As machining variables the cut depth in three levels (1, 2 and 3 mm) and the feed speed also in three levels (4, 8 and 11 m/min). The cutting speed remains constant as well others parameters like moisture content, cutting geometry, number of teeth and cut width. The cutting power was measured with an energy analyzer connected to the input energy of the planing machine and the roughness was measured with a contact stylus considering Rz parameter.

As a results, it was found a well correlated relationship between chip thickness and cutting power, where more energy was demanded with the chip thickness becomes greater, and more power it was required at higher speed rates and, likewise, there were positive relationship between cutting power and the depth of cut.

Surface roughness show some differences regarding different machining conditions, been clearer the tendencies in acacia than sequoia samples. The better surface quality was found at higher wood densities in conifer, but inverse results in hardwoods. Positive tendencies were found between cutting power and surface roughness; correlation coefficients were obtained to measure the degree of association between the variables and linear models that prove to be quite assertive, especially in terms of cutting power and surface roughness regarding the chip thickness parameter.

Anexo 2.
Cuadros Generales

Resultados de Rugosidad y potencia para Sequoia Albura

D. Básica (Kg/m3)	Vf (m/min)	ap (mm)	Rz	Kw
233	4	1	32,2	0,133
233	4	1	25,0	0,131
233	4	1	32,0	0,134
233	4	2	24,5	0,210
233	4	2	36,3	0,211
233	4	2	27,1	0,213
233	4	3	38,8	0,239
233	4	3	28,5	0,247
233	4	3	26,5	0,242
233	8	1	26,5	0,160
233	8	1	19,3	0,174
233	8	1	23,5	0,175
233	8	2	32,6	0,229
233	8	2	22,6	0,229
233	8	2	36,0	0,227
233	8	3	39,4	0,332
233	8	3	36,5	0,320
233	8	3	28,4	0,303
233	11	1	28,8	0,210
233	11	1	35,7	0,220
233	11	1	30,1	0,220
233	11	2	34,9	0,367
233	11	2	37,1	0,373
233	11	2	27,2	0,347
233	11	3	37,4	0,320
233	11	3	38,1	0,317
233	11	3	31,9	0,315

Resultados de Rugosidad y potencia para Sequoia Duramen

D. Básica (Kg/m3)	Vf (m/min)	ap (mm)	Rz	Kw
290	4	1	25,5	0,137
290	4	1	17,8	0,144
290	4	1	22,2	0,133
290	4	2	17,7	0,196
290	4	2	21,6	0,200
290	4	2	27,7	0,204
290	4	3	24,2	0,237
290	4	3	27,3	0,246
290	4	3	32,8	0,238
290	8	1	22,2	0,168
290	8	1	27,8	0,187
290	8	1	21,3	0,179
290	8	2	25,5	0,300
290	8	2	29,7	0,298
290	8	2	16,0	0,285
290	8	3	25,9	0,290
290	8	3	24,0	0,297
290	8	3	22,3	0,303
290	11	1	23,7	0,183
290	11	1	22,8	0,180
290	11	1	22,2	0,190
290	11	2	25,3	0,347
290	11	2	21,6	0,350
290	11	2	23,9	0,347
290	11	3	25,9	0,313
290	11	3	29,7	0,380
290	11	3	29,9	0,350

Resultados de Rugosidad y potencia para Aromo

D. Básica (Kg/m3)	Vf (m/min)	ap (mm)	Rz	Kw
501	4	1	9,9	0,222
501	4	1	12,6	0,258
501	4	1	12,1	0,261
501	4	2	18,0	0,324
501	4	2	14,0	0,298
501	4	2	22,2	0,313
501	4	3	12,1	0,343
501	4	3	16,5	0,340
501	4	3	11,3	0,288
501	8	1	14,5	0,267
501	8	1	14,4	0,304
501	8	1	13,5	0,283
501	8	2	17,8	0,362
501	8	2	18,3	0,360
501	8	2	13,8	0,363
501	8	3	16,0	0,383
501	8	3	14,8	0,405
501	8	3	16,7	0,450
501	11	1	20,5	0,310
501	11	1	17,2	0,347
501	11	1	17,6	0,260
501	11	2	17,9	0,403
501	11	2	15,7	0,407
501	11	2	18,3	0,404
501	11	3	20,1	0,520
501	11	3	14,3	0,454
501	11	3	22,1	0,487

Resultados de Rugosidad y potencia para Aromo

D. Básica (Kg/m3)	Vf (m/min)	ap (mm)	Rz	Kw
561	4	1	10,5	0,187
561	4	1	10,4	0,188
561	4	1	12,3	0,178
561	4	2	16,2	0,305
561	4	2	14,6	0,306
561	4	2	13,8	0,303
561	4	3	10,7	0,256
561	4	3	11,8	0,268
561	4	3	17,6	0,298
561	8	1	17,5	0,293
561	8	1	16,2	0,267
561	8	1	14,0	0,260
561	8	2	18,0	0,463
561	8	2	16,3	0,463
561	8	2	18,0	0,421
561	8	3	20,4	0,527
561	8	3	18,6	0,547
561	8	3	17,9	0,377
561	11	1	16,5	0,310
561	11	1	22,4	0,342
561	11	1	19,7	0,300
561	11	2	15,0	0,360
561	11	2	19,6	0,410
561	11	2	16,1	0,375
561	11	3	20,1	0,475
561	11	3	21,3	0,499
561	11	3	16,2	0,505