

CARLOS EDUARDO CEA PARRA

**EVALUACIÓN DE FIBRAS CELULOSICAS PRODUCIDAS EN
PLANTA DE CELULOSA NUEVA ALDEA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C384e
2011

Cea Parra, Carlos Eduardo, 1964-

Evaluación de fibras celulosicas producidas em planta de celulosa nueva aldea / Carlos Eduardo Cea Parra. – Viçosa, MG, 2011.

xi, 143f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Rubens Chaves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 108-109

1. Polpa de madeira. 2. Propriedades físicas. 3. Polpa de madeira - Propriedades mecânicas. 4. Polpa de madeira - Morfologia. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986

CARLOS EDUARDO CEA PARRA

**EVALUACIÓN DE FIBRAS CELULOSICAS PRODUCIDAS EN
PLANTA DE CELULOSA NUEVA ALDEA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 20 de julho de 2011.

Hélio Garcia Leite

Teresa Cristina Fonseca da Silva

Rubens Chaves de Oliveira
(Orientador)

A mi Sra. Magaly e Hijos, Eduardo y Carlos, por haberme apoyado con mucho cariño en mis estudios y su generosidad por brindarme el tiempo requerido para desarrollar este curso de especialización.

AGRADECIMENTOS

Agradezco a mi empresa Arauco, la oportunidad que me ha brindado para desarrollarme profesionalmente por medio de este programa de post graduación en el área de la celulosa y el papel, rubro que me ha acompañado fielmente en mi época de estudiante y durante toda mi vida laboral.

Expreso la satisfacción que ha resultado ser alumno de la prestigiosa Universidad de Viçosa y el privilegio de poder aprender, dialogar y conocer a tan distinguido grupo de profesores que componen esta importante casa de estudios. Gracias a todos ellos por los conocimientos y experiencias entregadas.

Agradezco el apoyo y consejos de aquellas personas que me han colaborado en el desarrollo de este trabajo: Profesor Rubens, Jaqueline Almeida, Marco, Fabiola, Sra. María, Karen, Axel, Camilo, Felipe y Emilio.

ÍNDICE

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
RESUMEN	x
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	4
3. ANTECEDENTES.....	5
3.1 Planta de Celulosa Nueva Aldea.....	5
3.2 Material Fibroso Utilizado en el Proceso (Maderas)	5
3.2.1 Eucaliptus Globulus (eucalipto globulus labill).....	5
3.2.2 Eucaliptus Nitens.....	8
3.2.3 Pino Insigne (Pinus radiata D.Don)	10
4. BUSQUEDA BIBLIOGRAFICA	14
4.1 Evaluación de Fibras de Celulosa.....	14
4.1.1 Métodos Tradicionales.....	14
4.1.2 Nuevas Tecnologías en la Evaluación de la Calidad de la Fibra	22
4.1.2.1 Nuevas Tecnologías.....	23
4.1.2.2 Propiedades Medibles de la Fibra	25
4.2 Predicción de las Propiedades Físico Mecánicas del Papel en Función de las Propiedades Biométricas de la Fibra.....	30
4.2.1 Elongación	31
4.2.2 Índice de Tensión	32
4.2.3 Índice de Explosión.....	34
4.2.4 Índice de Rasgado	36
4.2.5 Modulo de Elasticidad.....	38
4.2.6 Efecto del Refinamiento Sobre las Propiedades Físico Mecánicas	40
4.2.7 Regresiones Múltiples.....	41
4.3 Métodos de Predicción Estadística	43
4.3.1 Diagramas de Dispersión	43
4.3.2 Coeficiente de Correlación	45
4.3.3 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Correlación	45
4.3.4 Ecuaciones Lineales	47
4.3.4.1 Variables Dependientes y Predictoras	47
4.3.4.2 Modelo Estadístico.....	47
4.3.5 Recta de Regresión Muestreal.....	48
4.3.5.1 Recta de Regresión Muestreal	48
4.3.5.2 Método de Mínimos Cuadrados	49
4.3.6 Predicción e Intervalos de Confianza	50
4.3.7 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Regresión.....	52
4.3.7.1 Prueba de Hipótesis para la Pendiente.....	52
4.3.7.2 Prueba F	53
4.3.8 Regresión Múltiple	54
4.3.8.1 Matriz de Correlación	54
4.3.8.2 Multicolinealidad	55
4.3.8.3 Selección de la Variable Predictora	56
4.3.9 La Ecuación de Regresión Múltiple	56
4.3.9.1 Suposiciones de Regresión.....	57
4.3.9.2 Ecuación de Regresión Muestreal	57

4.3.10 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Regresión Múltiple	58
4.3.10.1 Coeficiente de Determinación Múltiple (R^2).....	58
4.3.10.2 Prueba t de Regresión.....	59
4.3.10.3 Prueba F de Regresión.....	59
4.4 Pretratamiento de Datos Mediante Técnicas de Suavizado	60
4.4.1 Metodología Binning	60
4.4.2 Metodología de Regresión	62
4.4.3 Metodología “Clustering” (Agrupación)	63
5. MATERIALES Y METODOS	65
5.1 Trabajo a Desarrollar	65
5.2 Evaluación de Celulosa en Planta Nueva Aldea.....	66
5.2.1 Laboratorio de Fibra Planta Nueva Aldea.....	67
5.2.2 Descripción de las Propiedades Medidas a la Fibra en Laboratorio de Planta Nueva Aldea	68
6. RESULTADOS Y DISCUSION	73
6.1 Evaluación de Celulosa de Pino y Eucaliptus producida en Planta Nueva Aldea.....	73
6.1.1 Evaluación Celulosa de Pino Planta Nueva Aldea	74
6.1.2 Evaluación Celulosa de Eucaliptus Planta Nueva Aldea.....	75
6.2 Análisis de Tendencias entre Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas.	76
6.2.1 Celulosa de Pino.....	76
6.2.2 Celulosa de Eucaliptus.....	78
6.3 Desarrollo de Correlaciones Multivariantes	80
6.3.1.1 Matriz de Correlación Propiedades Celulosa de Pino.....	80
6.3.2.1 Matriz de Correlación Propiedades Celulosa de Eucaliptus.....	91
7. CONCLUSIONES	103
7.1 Celulosa de Pino.....	103
7.2 Celulosa de Eucaliptus.....	104
8. RECOMENDACIONES.....	106
9. BIBLIOGRAFÍA	108

RESUMO

CEA PARRA, Carlos Eduardo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Avaliação de fibras celulósicas produzidas na Unidade Industrial de Nueva Aldea.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Coorientadores: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Adair José Regazzi.

O presente estudo visa avaliar a polpa de fibras celulósicas produzida na Unidade Industrial de Nueva Aldea no Chile (*pinus* e eucalipto), levando em consideração as abordagens tradicionais e modernas, usadas atualmente para esse fim. O estudo envolve relações e tendências entre as propriedades de resistência (índice de tração e de rasgo) e as características biométricas das fibras, medidas em equipamento do tipo OPTEST do laboratório da Unidade Industrial de Nueva Aldea. O estudo também envolve uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, aplicação de métodos estatísticos de análise de regressão dos mínimos quadrados e a geração de modelos preditivos entre propriedades físico-mecânicas da polpa e morfologia das fibras. São consideradas na análise, as variáveis de viscosidade da polpa e o número de revoluções utilizada do refinador laboratorial PFI para atingir um determinado grau de resistência a drenagem da polpa celulósica (25 °SR *pinus*, eucalipto 30 °SR). Ao analisar os gráficos de tendência e matriz de correlação para a polpa de *pinus* observa uma baixa correlação entre as variáveis. Análise estatística dos parâmetros de resistência e biométricos das fibras descarta a possibilidade de obtenção de modelos lineares simples ou multivariáveis para prever o comportamento do índice de tração. Para o índice de rasgo foi gerado um modelo linear simples com as revoluções do refinador PFI estatisticamente adequado com os parâmetros do modelo, satisfazendo os testes de hipótese e de coeficiente de determinação múltipla. No entanto, o coeficiente de determinação para o modelo obtido é baixo ($R^2 = 0,12$), indicando que o modelo não explica satisfatoriamente a variabilidade do índice de rasgo. No caso da polpa de eucalipto, foi possível encontrar melhores tendências entre os parâmetros de resistência e propriedades biométricas das fibras. Para o índice de tração da polpa de eucalipto, foi possível desenvolver um modelo de previsão com duas variáveis (revoluções do refinador PFI e índice de curl das fibras), que apresentou um coeficiente de determinação regular ($R^2 = 0,48$), indicando porém, que o modelo não explica totalmente a variabilidade do índice de tração. Para o índice de rasgo só foi possível desenvolver um modelo linear simples com as revoluções no refinador PFI. No entanto, como no caso da

polpa de pinus, o coeficiente de determinação para o modelo obtido é baixo ($R^2 = 0,16$), indicando que o modelo não explica satisfatoriamente a variabilidade do índice de rasgo. Estima-se que a principal razão para a baixa correlação encontrada entre os parâmetros de resistência e características biométricas das fibras celulósicas seja devido à homogeneidade da qualidade da polpa produzida na Unidade Industrial de Nueva Aldea. Esta situação afeta mais a celulose de pinus do que a de eucalipto. Portanto, torna-se importante observar que estudos de relações como estas exigem que propriedades de resistências variem em uma escala maior, influenciado por variações nas propriedades biométricas das fibras estatisticamente detectáveis. Isto poderá ser possível por mudanças na qualidade da madeira alimentada ao processo de polpação. Com o presente estudo recomenda-se a continuar trabalhar para aprofundar o conhecimento das fibras produzidas na Unidade Industrial de Nueva Aldea.

ABSTRACT

CEA PARRA, Carlos Eduardo, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Evaluation of cellulose fibers produced at Nueva Aldea Cellulose Mill.** Adviser: Rubens Chaves de Oliveira. Co-advisers: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho and Adair José Regazzi.

The present study aims to evaluate the cellulosic fibers produced in Nueva Aldea Pulp Mill in Chile (Pine and *Eucalyptus*), considering the traditional and modern approaches currently used for this purpose. It studies the relationships and trends between the resistance properties (tensile and tear index) and the biometric characteristics of the fibers, measured in FQA OPTEST equipment located at the Nueva Aldea Mill's Fiber Laboratory. Also is presented a literature search on this topic. Statistical methodology (least-squares regression) is applied to obtain predictive models between the physical-mechanical properties and morphology of the fibers. Another variables of interest also are considered in the analysis, such as the viscosity and revolutions in PFI pulp refiner (to achieve pulp drainage resistance of 25 °SR for Pine and 30 °SR for *Eucalyptus*). Analyzing the trend graphs and correlation matrix for Pine a poor relationship between the variables has been found. Statistical analysis of the resistance and biometric parameters for Pine, rule out the possibility of obtaining a suitable multiple or simple linear model to predict the tensile index. For tear index a simple linear model has been generated with PFI revolutions which are statistically adequate, compliance the hypothesis tests of the coefficient of multiple determination and population model parameters. However, the determination coefficient found for the model is poor ($R^2 = 0.12$), indicating that it does not explain satisfactorily the variability of tear index. In the case of *Eucalyptus* pulp, best trends could be found between resistance parameters and biometric properties in respect to what happens with Pine pulp. For the tensile index in *Eucalyptus* pulp, it was possible to develop a prediction model with two parameters (PFI revolutions and curl index of the fibers) which presented a regular determination coefficient ($R^2 = 0.48$), indicating that the model doesn't explain at all the tensile index variability. For the Tear Index, it was only possible to develop a simple linear model with the PFI revolutions. However, as in the case of Pine pulp the determination coefficient for the model obtained is poor ($R^2 = 0.16$), indicating that the model does not explain satisfactorily the variability of tear index. It is considered that the main cause for the low correlations found between resistance parameters and biometric characteristics is

mainly due to the homogeneity of the cellulose produced in Nueva Aldea Mill. This situation affects most Pine pulp than *Eucalyptus*. In order to obtain better data relationships between the parameters analyzed, it's required a wider range variation in resistance properties according to detectable variations in biometrics characteristics of the fibers. This may be possible by changes in wood quality feed to the pulping process. According to this study, it's recommended to do new works in order to deepen the knowledge of the fibers produced in Nueva Aldea Pulp Mill.

RESUMEN

CEA PARRA, Carlos Eduardo, M. Sc., Universidad Federal de Viçosa, Julio del 2011. **Evaluación de fibras celulósicas producidas en Planta de Celulosa de Nueva Aldea.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Consejeros: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho y Adair José Regazzi.

El presente estudio tiene por objetivo evaluar las fibras celulósicas producidas en Planta Nueva Aldea (Pino y Eucaliptus), teniendo en consideración los enfoques tradicionales y modernos que actualmente se utilizan para este efecto. Se estudia las relaciones y las tendencias existentes entre las propiedades de resistencia (índice de tensión y de rasgado) y las características biométricas de la fibra, medidas en equipo FQA OPTTEST existente en el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea. Además, se realiza una búsqueda bibliográfica sobre este tema. Aplicando metodología estadística de análisis de regresión de mínimos cuadrados, se busca generar modelos de predicción entre las propiedades físico mecánicas y las morfológicas de las fibras. Además, se consideran en el análisis, las variables de interés viscosidad y revoluciones utilizadas en refinador PFI para alcanzar en la celulosa un cierto grado de drenabilidad (Pino 25° SR, Eucaliptus 30 °SR). Analizando las gráficas de tendencia y matriz de correlación, se encuentra para el Pino una baja relación entre las variables analizadas. El análisis estadístico de los parámetros de resistencia y biométricos para Pino, descarta la posibilidad de obtener modelos adecuados multilíneales o lineales simples que predigan el índice de tensión. Para el índice de rasgado, se generó un modelo lineal simple con las revoluciones del refinador PFI, que resulta adecuado estadísticamente, cumpliendo con las pruebas de hipótesis del coeficiente de determinación múltiple y los parámetros del modelo poblacional. Sin embargo, el factor de determinación obtenido para el modelo es bajo ($R^2 = 0,12$), lo cual indica que éste no explica en forma satisfactoria la variabilidad del índice de rasgado. En el caso del Eucaliptus, fue posible encontrar mejores tendencias entre los parámetros de resistencia y las propiedades biométricas, respecto a lo encontrado con Pino. Para el índice de tensión en Eucaliptus, fue posible desarrollar un modelo de predicción con dos variables (revoluciones en refinador PFI y el curl index), el cual presentó un factor de determinación regular ($R^2 = 0,48$), lo cual indica que el modelo explica en forma mediana la variabilidad del índice de tensión. Para el rasgado, solo fue posible desarrollar un modelo lineal simple con las revoluciones en refinador PFI. Sin embargo, al igual que en el caso de la celulosa de Pino, el factor

de determinación obtenido para el modelo es bajo ($R^2 = 0,16$), lo cual indica que el modelo no explica en forma satisfactoria la variabilidad del índice de rasgado. Se estima que la causa principal para las bajas relaciones encontradas entre los parámetros de resistencia y características biométricas, se debe principalmente a la homogeneidad de la celulosa producida en Planta Nueva Aldea. Esta situación afecta más a la celulosa de Pino que a la de Eucaliptus. Para poder observar en los datos mejores relaciones entre los parámetros analizados, se requiere que las propiedades de resistencia varíen en un mayor rango, influenciadas por variaciones perceptibles estadísticamente en las propiedades biométricas. Lo anterior, puede ser posible por cambios en la calidad de la madera alimentada al proceso de producción de celulosa. Del presente estudio, se recomienda continuar los trabajos que permitan profundizar en el conocimiento de las fibras producidas en Planta de Celulosa Nueva Aldea.

1. INTRODUCCION

Planta de Celulosa Nueva Aldea inició su funcionamiento en Agosto del año 2006, produciendo a finales del año 2010 una cantidad aproximada de 3.370.000 toneladas de celulosa blanca de mercado (ECF), de las cuales, el 48,3 % corresponde a Pino y 51,7 % a Eucaliptus.

En la Superintendencia Técnica de la Planta, se ha planteado el desafío de iniciar un proceso de estudio y conocimiento del producto que se está vendiendo en el mercado. En efecto, el desafío de conocer y caracterizar estas pequeñas fibras microscópicas que componen el producto denominado celulosa, son la “inspiración” del desarrollo de una serie de trabajos tendientes a cumplir con este objetivo.

Entre los trabajos desarrollados hasta el momento, podemos mencionar los siguientes:

- Evaluación de propiedades físico mecánicas y biométricas de la celulosa de Pino y Eucaliptus producida en la Planta.
- Determinar el daño que sufren las fibras celulósicas en las líneas de producción de celulosa.

En una primera etapa, en el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea, se consolidaron las metodologías de análisis y el funcionamiento de los equipos necesarios para poder realizar una correcta evaluación de la celulosa producida en la Planta. El sistema implementado se encuentra acreditado bajo el sistema de gestión de calidad ISO 9001.

En un estudio posterior, se evaluó como las fibras sufren daño químico y mecánico durante su transformación en el proceso de fabricación de celulosa. En efecto, la acción de agentes oxidantes para deslignificar la celulosa, como la Soda Cáustica, Oxígeno, Peróxido de Hidrógeno y Dióxido de Cloro principalmente, junto a la acción mecánica de bombas, agitadores, válvulas reductoras, etc., hacen que las fibras sufran daños estructurales y morfológicos que se traducen en pérdidas de propiedades físico mecánicas (resistencia) en los papeles que se pueden fabricar con esta importante materia prima.

Una realidad existente en nuestro Laboratorio de Fibra, es que los métodos tradicionales para caracterizar las fibras celulósicas, requieren de una importante

cantidad de tiempo para obtener información sobre la calidad del producto que se está fabricando (determinación de propiedades físico mecánicas). En el caso de Planta Nueva Aldea, este tiempo alcanza aproximadamente a los dos días.

Los métodos tradicionales de evaluación de la celulosa requieren transformar la pulpa en hojas de papel para ensayos. Para lo anterior, la pulpa es sometida a un acondicionamiento de las fibras mediante la refinación con equipo PFI. Con la pulpa refinada se forman las hojas, las cuales se prensan, se secan y se cortan en muestras testigos definidos según el parámetro físico mecánico a medir. El tiempo requerido en esta preparación es de aproximadamente 8 horas, sin considerar el tiempo de acondicionamiento a temperatura y humedad que requieren las hojas de ensayos, antes de realizar los test de resistencias y de características físicas.

Los métodos ópticos actualmente existentes, permiten obtener caracterizaciones biométricas que se podrían considerar como información casi en línea, datos con los cuales se puede inferir sobre las propiedades de resistencia que tendrán las fibras analizadas.

Resulta interesante, la posibilidad de poder correlacionar las propiedades biométricas de las fibras con los resultados de resistencia como la tracción y el rasgado. Las primeras características, son de rápida medición si se dispone de un equipo adecuado. En cambio, las segundas requieren de un trabajo previo para la preparación y acondicionamiento de las hojas de ensayo, lo cual hace que los resultados de las propiedades físico mecánicas requieran más de un día para su obtención.

En efecto, ha ocurrido en Planta Nueva Aldea la situación de tener que retrasar el despacho de una celulosa en stock, por no disponer de la evaluación de propiedades físico mecánica de esta pulpa, debido a desperfectos en los equipos medidores de estas propiedades en el Laboratorio de Fibra.

Por lo anterior, el poder generar modelos que logren relacionar con un grado de confiabilidad las propiedades biométricas de las fibras, como la longitud y ancho de fibra, índice de quiebres, etc., con los índices de resistencia (tensión, rasgado, etc.), permitiría disponer de un método predictivo de rápida ejecución, para proyectar las principales propiedades físico mecánicas de la celulosa que se está produciendo.

En el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea, se cuenta con el equipo óptico de propiedades biométricas OPTEST, modelo FQA LDA02 HiRes, con el cual se miden las principales propiedades biométricas de las fibras de Pino y Eucaliptus.

Por lo planteado anteriormente, en el presente trabajo se cubrirán los siguientes aspectos principales:

- Recopilar información técnica sobre la evaluación tradicional y moderna de fibras de celulosa.
- Recopilar antecedentes técnicos sobre la relación existente entre las propiedades biométricas de las fibras y los parámetros de resistencia medidos en hojas de ensayo.
- Buscar relaciones entre las propiedades biométricas y físico mecánicas, para las pulpas de Pino y Eucaliptus producidas en Planta Nueva Aldea.
- Desarrollar modelos multilineales y simples entre los parámetros anteriores, que permitan predecir el comportamiento de las propiedades físico mecánicas a partir de las características biométricas de las fibras de celulosa.

Estoy seguro, que el presente estudio contribuirá a continuar con el objetivo final de conocer de mejor forma el producto que se fabrica en Planta de Celulosa Nueva Aldea.

Como parte de mis objetivos profesionales y académicos, se define el poder continuar desarrollando estudios relacionados con estos temas, que contribuyan a incrementar la “cultura” del conocimiento respecto a las características de la celulosa producida en Planta Nueva Aldea, muy orientada actualmente a los parámetros de calidad como blancura, suciedad e índices de resistencia tradicionales, respecto a parámetros biométricos y morfológicos de las fibras y como estos se relacionan entre sí.

2.- OBJETIVOS

Los objetivos planteados en el presente trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos principales:

- Hacer una búsqueda bibliográfica que permita obtener información técnica sobre los siguientes temas :
 - Evaluación de fibras de celulosa (propiedades físico mecánicas y biométricas).
 - Relaciones existentes entre las propiedades biométricas de las fibras y las propiedades físico mecánicas medidas en hojas de ensayo.
 - Metodología estadística para relacionar variables y realizar predicciones.
- Realizar una evaluación de la celulosa de Pino y Eucaliptus producida en Planta Nueva Aldea, generando una tabla de información de las propiedades físico mecánicas y biométricas.
- Buscar relaciones (tendencias) entre las propiedades biométricas de las fibras y las propiedades físico mecánicas obtenidas en hojas de ensayo.
- Buscar modelos (estadísticos) multilineales y lineales simples, que permitan predecir propiedades físico mecánicas de interés, como el índice de rasgado y tensión, a partir de las propiedades biométricas de las fibras, utilizando como herramienta de trabajo la metodología de análisis de regresión por mínimos cuadrados.

El objetivo general de este trabajo, es continuar en Planta Nueva Aldea los estudios tendientes a conocer las características de las fibras celulósicas producidas y los temas relacionados con este objetivo.

3. ANTECEDENTES

3.1 Planta de Celulosa Nueva Aldea

Planta de Celulosa Nueva Aldea se encuentra ubicada en la Octava Región de Chile, en la Provincia del Ñuble, comuna de Ranquil, aledaña al Pueblo de Nueva Aldea.

Geográficamente se encuentra al costado Sur de la confluencia de los ríos Itata y Ñuble y al costado de la carretera del Itata que une las ciudades de Concepción y Chillán. La Planta de Celulosa se encuentra aproximadamente a 30 km. de Chillán y a 60 km. de Concepción.

La principal actividad económica de Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Nueva Aldea, corresponde a la producción de Celulosa Kraft Blanqueada, mediante la tecnología de blanqueo ECF (proceso de blanqueo libre de cloro elemental). Su capacidad de diseño es de 856.000 ADt/año, donde un 50 % corresponde a celulosa producida con madera de Pino (softwood) y el otro 50 % a celulosa producida con madera de Eucaliptus (hardwood).

La Planta entró en operaciones el año 2006, produciendo su primer fardo en el mes de Agosto de ese año. Actualmente, la Planta ha superado su capacidad de diseño, produciendo aproximadamente 900.000 ADt/año durante el año 2009.

Durante el año 2010, la producción de la Planta disminuyó a 789.619 ADt (48 % producción de Pino y 52 % de Eucaliptus), debido principalmente al terremoto ocurrido en Chile el 27 de Febrero, el cual afectó las instalaciones industriales.

Actualmente, se encuentra en la etapa de implementación un proyecto de ampliación que permitirá incrementar la producción de la Planta sobre el millón de toneladas. La puesta en marcha del proyecto está programada para el mes de Septiembre 2011.

3.2 Material Fibroso Utilizado en el Proceso (Maderas)

3.2.1 Eucaliptus Globulus (eucalipto globulus labill)

Más de 600 son las especies de Eucaliptus reconocidas en el mundo. Estas se ubican particularmente en Australia, al sureste del continente y en la isla de

Tasmania, donde crecen asociadas a especies que pertenecen a la familia botánica de los robles y coigües.

Su rápido crecimiento y adaptabilidad al clima y suelo de Chile, han permitido establecer plantaciones forestales en nuestro país que totalizan, a la fecha, más de 489 mil hectáreas, siendo cerca de un 70% de ellas de la especie *globulus* .

Características generales

El *Eucalyptus Globulus Labill* es fácilmente reconocible en su estado adulto por ser la única especie arbórea que posee el cono (o fruto) solitario.

La madera de Eucaliptus tiene cualidades técnicas que la hacen muy requerida en la industria de la celulosa y como madera propiamente tal. Se caracteriza por su fibra corta, cualidad que la hace atractiva en el rubro de la celulosa, donde se la utiliza en la fabricación de papeles finos. Su madera es utilizada en la producción de muebles para hogares y oficinas, y su hermosa chapa se destina al forrado (o enchapado) de tableros.

Estos árboles pueden alcanzar hasta 60 metros de altura, con la corteza blanquecina que se desprende fácilmente en tiras en los ejemplares adultos.

Para el Eucaliptus, la densidad de plantación más utilizada es 1.111 árbol/ha, lo que implica plantar a 3 x 3 metros.

En cuanto al volumen por hectárea (ha), es variable y depende de las condiciones de suelo y clima donde se haga la plantación. Por ejemplo, en Valparaíso se puede esperar 198 m³ de madera, en Concepción 220 m³ y en Valdivia 242 m³.

Características de la madera

Arbol perenne de la familia de las mirtáceas, que alcanzan alturas de 40 a 60 metros.

Desde el punto de vista de su estructura, la madera de *E. Globulus* está formada básicamente por células alargadas y huecas que normalmente se orientan siguiendo el eje del árbol.

Las fibras constituyen los elementos más numerosos con un porcentaje del 50 %. Estas son del tipo libriformes y poligonales. El grosor medio de las paredes oscila entre 4 a 6 μm y el diámetro máximo del espacio intercelular (lumen) entre 10 y 12 μm . Los vasos de eucaliptos son poco numerosos, de distribución difusa y aislada, y con un diámetro máximo oscilando entre 150 y 170 μm . (DON, 2010)

Las características físicas y morfológicas promedio de la madera de *E. Globulus*, son las siguientes:

Tabla 1. Características Físicas y Morfológicas E. Globulus.

Longitud de Fibra	0,918	mm
Ancho promedio fibra	14,6	μm
Espesor promedio de pared	3,2	μm

Composición química de la madera de Eucaliptus.

Por ser el género Eucaliptus, tan representado en la naturaleza por especies y subespecies (más de 670), es de esperar singulares variaciones en su composición química, si a esto se le añade, el grado de expansión geográfica que ha alcanzado, entonces aumentarán considerablemente las variaciones que se puedan encontrar.

Los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en los Eucaliptus varían en rangos apreciables, así, la celulosa se puede encontrar entre 40 y 60%, las hemicelulosas entre 12 y 22 % y las ligninas entre 15 y 22%. No obstante, algunas especies de Eucaliptus manifiestan variaciones considerables con respecto a los datos anteriores. El contenido de celulosa en el Eucaliptus Globulus es del orden de 36 a 57 %, 27 % de hemicelulosas, 28 % de lignina y 3 % de extractivos y otros compuestos.

El contenido de extraíbles y su composición en las maderas de Eucaliptus varían en forma importante entre especies y también dentro de las diferentes partes del propio árbol.

Las sustancias extraíbles están formadas principalmente por compuestos alifáticos (grasas y ceras), terpenos, terpenoides y compuestos fenólicos.

En las maderas de Eucaliptus se han encontrado una gran diversidad de compuestos, en lo fundamental de taninos condensados, ácidos terpénicos, vainillina, ácido siríngico y sitosterol, entre otros.

Los contenidos de extraíbles en los Eucaliptus son relativamente superiores comparados con otros géneros de árboles y son considerables las variaciones existentes dentro de la misma especie. (HAKÂN, 2006)

3.2.2 Eucaliptus Nitens

Entre las especies de rápido crecimiento introducidas en Chile para la obtención de celulosa Kraft se encuentra el Eucaliptus. Actualmente, la superficie de las plantaciones de *Eucaliptus* en el país alcanza las 489 mil hectáreas, de las cuales la más importante corresponde a *E. Globulus* con 70 % de esta superficie y la restante a *E. Nitens*. Plantaciones de *E. Nitens* surgieron a partir de 1992, como especie alternativa por ser altamente resistente al frío y heladas que se presentan en la zona sur de Chile y por presentar alto interés productivo en la IX y X Regiones del País.

Su tasa de incremento anual promedio es de 30 m³/ha/año y sus rotaciones entre los 8 a 14 años, características que le otorgan la posibilidad de convertirse en otra importante materia prima para la producción de celulosa Kraft.

Características generales.

Es un árbol de gran desarrollo, que llega a una altura de 60 a 70 metros y ocasionalmente a los 90 metros, con diámetros de 1 a 2 metros y más.

Esta especie ha cobrado gran importancia en Chile, debido a su excelente desarrollo, ya que se trata de la especie con más rápido crecimiento plantada en el país y de gran resistencia al frío. A pesar de ser una especie de introducción relativamente reciente, 1967, hoy ocupa el segundo lugar en importancia después del *E. Globulus*.

Características de la madera.

La madera seca es casi blanca y liviana para ser de Eucaliptus. La densidad básica promedio de muestras obtenidas en Chile es de 495 Kg/m³, comparada con Eucaliptus de Australia que varían entre 645 y 720 Kg/m³. Se explica esta diferencia, por el rápido crecimiento que presenta en Chile. La madera a la intemperie o enterrada es menos durable que la de *E. Globulus*.

En comparación con la madera de *E. Globulus*, el *E. Nitens* presenta distintas propiedades, tales como una densidad básica 11% menor, fibras más cortas y de menor coarseness, mayor contenido de extraíbles, que superan en un 23,8 % sobre el *E. Globulus* y mayor diferencia en el contenido de lignina que va de 7 a 14%. Dichas diferencias influyen en los procesos de obtención de pulpa, en los cuales el *E. Nitens* presenta una reducción de 4,0 a 8,3 % en el rendimiento clasificado, menor producción, menores resistencias mecánicas, trama de menor resistencia al aire que dificulta el drenado y bajo volumen específico, entre otras limitantes.

Las características físicas y morfológicas de duramen y albura no presentan grandes diferencias en densidad básica, pero sí en las dimensiones de la fibra. El duramen presenta fibras de menor longitud (12,6%) y menor espesor de pared (11%) que las fibras de albura. En cuanto al factor de Runkel, se aprecia que las fibras de duramen tendrán mayor tendencia al colapso, por lo que su pulpa será menos voluminosa que la de albura. (HAKÂN, 2006)

Tabla 2. Propiedades físicas y morfológicas *E. Nitens* correspondientes a albura y duramen. (HAKÂN, 2006)

Propiedad	Duramen	Albura
Densidad básica kg/m ³	478	486
Longitud de fibra mm	1,038	1,169
Diámetro de fibra µm	16,39	16,54
Espesor de pared µm	3,52	3,97
Factor Runkel	0,75	0,92

Características químicas

La composición química del *E. Nitens* presenta diferencias entre duramen y albura, especialmente en los compuestos de mayor peso molecular como son la lignina, celulosa y pentosanos (hemicelulosas). El duramen tiene un menor contenido de celulosa (diferencia de 12,6 %) y mayor contenido de lignina y pentosanos (diferencias de 15 y 20 % respectivamente) comparados con la albura.

Tabla 3. Propiedades químicas duramen y albura en *E. nitens*. (HAKÂN, 2006)

PROPIEDADES	CENTRAL	CERCANA A CORTEZA
Solubles:		
Etanol-tolueno	2,5	2,3
Agua fría (% bms)	1,6	2,3
Agua caliente (%bms)	2,7	2,9
Extraíbles totales (% bms)	5,6	5,1
Cenizas (% bms)	0,24	0,36
Lignina (% bmsle)	25,1	21,8
Celulosa (%bmsle)	46,1	51,9
Pentosanos (%bmsle)	22,0	17,6
Holocelulosa (%bmsle)	68,4	70,9

bms: base madera seca; bmsle: base madera seca libre de extraíbles.

Aplicando diferentes porcentajes de duramen y albura en un pulpaje kraft, se tendrán diferencias significativas en rendimiento clasificado, rechazo y consumo de álcali, debido principalmente a las diferencias químicas de ambos materiales.

Las propiedades físico mecánicas de las pulpas con el incremento de duramen en mezcla de astillas, presentan la tendencia de incrementar el índice de tensión y explosión y reducir el rasgado y volumen específico. (TORRES, FERNÁNDEZ Y MORALES, 2006)

3.2.3 Pino Insigne (*Pinus radiata* D.Don)

El *Pinus Radiata* (*D.Don*), conocido comúnmente como Pino Insigne o Pino Monterrey es originario de la costa occidental de los Estados Unidos de Norteamérica, específicamente de California. Fue introducido en Chile a fines del siglo XIX logrando adaptarse exitosamente al clima y suelo del País, inclusive alcanzando crecimientos superiores, y en menor tiempo, respecto a su región de origen.

La madera de Pino Insigne posee cualidades técnicas que la hacen muy apetecida en la industria de la celulosa, donde resulta muy atractiva por su fibra larga. Se utiliza en la fabricación de cartones, cartulinas y papeles de resistencia. Asimismo, su uso se ha difundido extensamente en la industria maderera y en la construcción de casas.

En Chile existen más de 1.4 millones de hectáreas (Información año 2005) plantadas con esta especie, desde la V a la X Región, sustentando cerca del 80% del abastecimiento industrial de esta madera.

La densidad de plantación más utilizada para el Pino es de 1.250 árbol/ha, lo que implica plantar a 2,83 x 2,83 metros.

En cuanto a su volumen, es variable y depende de las condiciones de suelo y clima donde se realice la plantación. Por ejemplo, en Valparaíso se puede esperar 300 m³ de madera, en Talca 375 m³, en Concepción 450 m³, y en Valdivia 500 m³.

Pinus Radiata (D. Don) es la especie productora de madera más importante del País en la actualidad, ya que presenta múltiples ventajas como es el rápido crecimiento, gran respuesta a tratamientos silviculturales, etc. Hoy en día existen alrededor de 2 millones de hectáreas de plantaciones de las cuales un porcentaje importante se encuentran sometidas al manejo con el objetivo de obtener madera de mayor calidad. (HAKÂN, 2006)

Características generales

El Pino Insigne es un árbol cuya madera presenta características físico mecánicas similares al resto de las coníferas, que lo hacen muy apreciado para la industria de carpintería y muebles, para la construcción de estructuras de madera, para los embalajes y para la producción de celulosa. Una de sus características más sobresalientes es su homogeneidad.

Características de la madera

Entre los indicadores de la calidad de la madera más utilizados destaca el espesor de los anillos de crecimiento. En general, se entiende que cuanto más estrecho es el anillo, mejor calidad de madera al presentar una mayor densidad. El anillo de crecimiento es el resultado de acumular cada año la madera producida en verano (más densa) y la producida en primavera (menos densa). Si el crecimiento de primavera es muy superior al de verano y las diferencias de densidad de sus maderas es muy grande, la densidad promedio de la madera baja mucho y, en consecuencia, disminuye la calidad. Por el contrario, si los espesores de la madera de primavera y de verano son reducidos y más o menos semejantes, la densidad será muy homogénea y, por lo tanto, se producirá una madera de alta calidad.

En esta especie, la diferencia de densidad entre la madera de verano y primavera es pequeña y, por lo tanto, no influye tanto en su conjunto. Así, la madera de Pino Insigne presenta un alto grado de homogeneidad y un buen comportamiento mecánico, a pesar de que el tamaño de su anillo de crecimiento sea superior a 6,5 mm. como media.

La madera joven, es decir, aquella que produce el árbol en sus primeros años de crecimiento, se sitúa rodeando al eje vertical del árbol, con anillos de crecimiento generalmente muy anchos. Esta madera presenta una menor densidad, deficientes propiedades mecánicas y contracciones longitudinales superiores a la adulta. También contiene una mayor presencia de nudos, si es que se ha efectuado una poda artificial de las ramas. Todo ello caracteriza una madera de mala calidad que en el Pino Insigne se concentra generalmente en los seis primeros anillos de crecimiento.

Los árboles a partir de una cierta edad comienzan a sufrir un proceso en el que la madera de albura se transforma en duramen. La madera de albura, de color claro, está situada hacia el exterior y es la que se requiere en los usos de mayor valor. La madera de duramen, de color oscuro, se genera hacia el interior del tronco y sus características físico mecánicas son muy diferentes. En el Pino Insigne este proceso comienza entre los doce y los quince años, más tarde que en la mayoría de las coníferas.

La densidad básica del Pino Insigne adulto varía entre 400 a 500 kg/m³. Las fibras, denominadas traqueidas, son los elementos más numerosos. En particular el Pino Radiata, presenta además de las traqueidas, células epiteliales de canales resiníferos y radiotraqueidas.

Las traqueidas longitudinales son elementos alargados de gran longitud y con diámetros de aproximadamente 100 veces menores que el largo. Las paredes celulares son delgadas en la madera temprana y gruesas en madera tardía. Los factores que influyen en el espesor de la pared celular, son la heredabilidad, las condiciones ambientales en que crecen y la madurez del cambium.

El espesor de la pared celular y el diámetro del lumen celular, son características de la estructura de las traqueidas longitudinales de alta heredabilidad, que pueden por tanto ser modificada a través de programas de mejoramiento genético. (DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, 2009)

Tabla 4. Propiedades físicas y morfológicas de Pino Insigne (DON, 2010).

Propiedad	
Densidad básica kg/m ³	400-500
Longitud de fibra mm	3-3,5
Diámetro de fibra μm	35-45
Espesor de pared μm	13-23

Características químicas de la madera.

Al analizar los materiales lignocelulósicos (MLC) se distinguen inicialmente dos grandes grupos:

- **Componentes estructurales de la pared celular:** (celulosa, hemicelulosa y lignina), representan el 80-90% del peso total del material lignocelulósico.
- **Componentes no estructurales** (agua, sustancias extraíbles, cenizas y otros), que son fracciones minoritarias dentro del material lignocelulósico.

La celulosa es el componente mayoritario de los materiales lignocelulósicos, constituyendo entre el 40 a 55 % en las maderas de coníferas. Se agrupa dentro de la pared celular en paquetes denominados fibrilas elementales.

Los polímeros hemicelulósicos varían entre 15 a 35 % y están constituidos principalmente por tres hexosas; glucosa, galactosa y manosa, y dos pentosas; xilosa y arabinosa. (FERNANDEZ y SALVO, 2003)

4. BUSQUEDA BIBLIOGRAFICA

4.1 Evaluación de Fibras de Celulosa

Se describen a continuación, los métodos que actualmente se utilizan para evaluar las propiedades físico mecánicas y biométricas de las fibras en las instalaciones industriales. (HAKÂN, 2006).

4.1.1 Métodos Tradicionales

Se aplican los métodos de evaluación de calidad de la fibra con el objeto de controlar la producción, de asegurar una calidad estable de la pulpa y como una herramienta para optimizar y desarrollar nuevos productos relacionados con la fabricación del papel.

Las normas existentes y acordadas entre investigadores y productores, son las siguientes (HAKÂN, 2006):

- **ISO - International Standardization Organization**
- **SCAN – Scandinavian Pulp, paper and Board testing Committee (Finland, Norway and Sweden)**
- **TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry, USA**
- **PAPTAC – Pulp and Paper Technical Association of Canada**
- **APPITA – Australian Pulp and Paper Industry technical Association**

Evaluación de la pulpa

Los métodos y análisis típicos utilizados para caracterizar y evaluar la pulpa, son los siguientes:

- Formación de hojas en laboratorio
- Resistencia al Drenaje
- Refinación
- Índice kappa
- Viscosidad en cuproetilendiamina

- Clasificación Bauer McNett
- Clasificación Sommerville
- Valor de retención de agua WRV
- Índices de resistencia como tensión, explosión y rasgado
- Resistencia a la tensión Zero-span

Formación de la hoja

Para evaluar la calidad de la pulpa se requiere preparar las hojas de papel (ensayo) en equipos de formación, de acuerdo a la norma ISO 5269 – 1:1998. Las hojas son obtenidas según la norma ISO 5269- 2:1998. El método de Rapid Kotten, tiene una formación de hoja muy similar a la hoja de salida en la máquina.

Resistencia al Drenaje

Es la propiedad de la fibra que se caracteriza por la resistencia que ofrece al flujo de agua. Los métodos más comunes para medir resistencia al drenaje en la pulpa son el Canadian Standard Freness CSF (USO 5267 – 2:2001), Tappi T227 y el test Schopper Riegler (ISO 5267- 1:1:1997).

CSF y Schopper Riegler tienen escalas inversas. Este control es usado como una indicación de calidad de la pulpa mecánica y es una medida del grado de refinación de la pulpa química. La fracción de finos es la responsable de los cambios en el tiempo del drenaje.

Refinación

Es el proceso para acondicionar mecánicamente las fibras en la fabricación de papel. Existen varios equipos para refinar la pulpa. El equipo más conocido es el molino PFI (ISO 5264 -2:2002).

La Batidora Valley (ISO 5264-1:1979), fue un equipamiento muy utilizado para realizar refinaciones de laboratorio en las décadas pasadas.

Indice Kappa

Es una indicación del contenido de lignina o blanqueabilidad de la pulpa. Se usa para conocer el grado de deslignificación producida durante la cocción y los químicos requeridos en el proceso de blanqueo.

El test para medir el índice Kappa es el descrito en la norma ISO 302:1981 (titulación realizada con Permanganato de Potasio).

Viscosidad en Cuproetilendiamina

La viscosidad es una indicación del grado de polimerización de la celulosa y se mide disolviendo la celulosa una cantidad definida en cuproetilendiamina. El método está dado en la norma ISO 5351 – 1:1981.

Clasificación Bauer McNett

Clasificación de las fibras de acuerdo a su longitud o flexibilidad, mediante mallas distribuidas en 4 ó 5 espacios. Las mallas van desde 16 a 200 mesh.

Este procedimiento es reemplazado en la actualidad por los analizadores ópticos de fibras.

Clasificación Sommerville

El propósito del método es separar los contaminantes de la pulpa como haces de fibras, stickies, plásticos, arena, metales, etc., para así poder cuantificarlos e identificarlos.

Valor de Retención de Agua WRV (Water Retention Value)

Es la razón de masa de agua retenida, después de centrifugación bajo condiciones específicas, por una cantidad de pulpa húmeda y masa seca de la misma pulpa. Este control es aplicable a pulpas químicas, con muy buena reproducibilidad. Tiene relación con la capacidad de hidratación de la fibra.

Resistencia a la Tensión Zero Span

Mide la tensión de ruptura cuando la separación de las mordazas del equipo es cercana a cero. Esta medición pretende medir la resistencia intrínseca de la fibra. Este control es dependiente de la deformación de la fibra.

Mediciones de propiedades en Papel

Debido a los distintos tipos de papel y a la variedad de sus propiedades, existe una necesidad de ensayos para su análisis.

El número de propiedades es importante tanto para el tipo de papel como para los ensayos a utilizar, existiendo en algunos casos una vasta aplicación, mientras que otros métodos han sido desarrollados sólo para ciertos tipos y poseen una aplicación limitada.

Las mediciones de las propiedades del papel dependen tanto del instrumento o equipo usado y en los detalles del procedimiento de cada ensayo.

El hecho que el papel sea viscoelástico e higroscópico, hacen que los ensayos sean más complicados. Dado que el papel posee cualidades plásticas y elásticas, cualquier método utilizado conduce a la deformación o destrucción de la muestra, entregando resultados dependientes del grado de aplicación de la fuerza.

El papel siempre busca el equilibrio con la humedad del aire que lo rodea (material higroscópico), por lo tanto las propiedades del papel son altamente dependiente de la humedad relativa.

Los ensayos físicos en el papel pueden ser divididos en cinco diferentes grupos:

- Propiedades estructurales.
- Propiedades de resistencia y rigidez.
- Propiedades de superficie.
- Propiedades ópticas.
- Propiedades de absorción.

Propiedades estructurales

- Espesor
- Densidad
- Contenido de humedad
- Gramaje
- Formación
- Permeabilidad de aire

Espesor

Para las mediciones de espesor, se utiliza un instrumento donde el papel, o un conjunto de papeles se mantienen bajo presión entre dos platos paralelos. Este ensayo determina que tan denso es el papel para un determinado gramaje. El grosor es importante tanto para la fabricación del papel como para sus propiedades de impresión. Sus variaciones pueden afectar las propiedades básicas, incluyendo resistencia, propiedades ópticas y la calidad del propio papel.

Densidad

La densidad es la masa por unidad de volumen del papel, calculado como la razón entre el gramaje y el grosor del material y expresado como kg/m^3 . Es un parámetro del papel muy importante, particularmente para el papel de impresión. El volumen específico es el inverso de la densidad. El volumen específico de la hoja hace referencia a distintas propiedades en el papel, su disminución hace que la hoja sea más lisa, más brillante, menos opaca, más oscura, menos resistente, etc. Un alto volumen específico es deseable para papeles absorbentes, mientras que menores son preferibles para papeles de impresión.

Contenido de humedad

Casi todos los tipos de papel contienen cierto porcentaje de humedad. Dependiendo de la humedad relativa, el tipo de pulpa, el grado de refinación y de los químicos. La humedad del papel puede variar entre 2 a 12%. Muchas de las propiedades del papel se someten a cambios como resultado de la variación del contenido de humedad. El agua posee un efecto negativo en el papel, plastifica la célula de la fibra, relaja y debilita las uniones entre fibras. La cantidad de agua presente en una hoja de papel juega un importante rol en todo el proceso de fabricación. La obtención de la cantidad de humedad del papel involucra determinar la masa antes y después del secado.

Gramaje

El gramaje (también llamado peso base) es la masa por unidad de área de papel, expresado en g/m^2 . La determinación incluye determinar la masa de papel por unidad de área.

Formación

El índice de formación indica que tan uniforme se encuentran las fibras a lo largo de la hoja. Muchas de las propiedades del papel dependen de una buena formación. En una hoja con imperfecciones en su formación, es fácil encontrar puntos débiles, delgados, o gruesos, afectando posteriormente las propiedades de grosor, opacidad, resistencia, como también a sus características de impresión. La tendencia a flocular de las fibras, depende principalmente del tipo de fibra, en general, las fibras más largas poseen una mayor capacidad a flocular que las más cortas. No existe una medida estándar o unidad de la formación.

Permeabilidad del aire

En general, la permeabilidad del aire se obtiene midiendo un flujo de aire por un área definida, bajo una conocida caída de presión. La unidad de permeabilidad es $\mu\text{m}/\text{Pa s}$.

La permeabilidad del aire es influenciada por aditivos en la pulpa, grado de refinación, formación de la hoja y compresiones.

Controlando la combinación de estos componentes, es posible obtener el nivel de permeabilidad deseado. La permeabilidad tiene una relación cercana a la resistencia al aire de la hoja, y por lo tanto a la absorción de tintas de impresión.

Propiedades de resistencia

- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la explosión
- Resistencia al doblado
- Resistencia Z-direccional
- Resistencia al rasgado

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es determinada midiendo la fuerza requerida para romper una tira de papel, determinado mediante un ensayo, siguiendo un procedimiento estándar. La resistencia a la tracción depende de las propiedades de la fibra.

Los resultados son afectados por las condiciones a las que se practica el ensayo. Un aumento en la humedad del papel disminuirá la resistencia a la tracción, mientras que aumenta la elongación. La resistencia a la tracción es altamente dependiente de la direccionalidad del papel.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es definida como la máxima fuerza aplicada por unidad de ancho, que una pieza de papel pueda soportar hasta el inicio de falla en el ensayo de compresión. Este ensayo puede ser llevado a cabo de distintas maneras, según normas ISO.

Resistencia a la explosión

La resistencia a la explosión es la máxima presión que puede ejercerse en la superficie del papel, antes que ocurra la ruptura.

Resistencia al doblado

La resistencia al doblado es la habilidad de una tira de papel de resistir el quiebre, cuando se dobla bajo una determinada carga.

Es expresada directamente como el número de doble-plegado que un papel pueda resistir, expresándose como el logaritmo en base diez del número de doble-plegado.

El valor de la resistencia al doblado es muy sensible a variaciones locales en la estructura del papel. Consecuentemente, los resultados del ensayo son sensibles a las variaciones de las condiciones a las que se someten, por ejemplo, a la humedad relativa del aire.

Resistencia Z-direccional

La resistencia z-direccional representa la habilidad del papel para resistir cargas tensionales en una dirección perpendicular al plano del papel (dirección z). Cuando la resistencia z-direccional del papel se excede, un rompimiento en la estructura del papel ocurre en la hoja, pero no en su superficie. Existen dos métodos comunes para obtener la resistencia z-direccional, el método de tensión z-direccional y el Scott-Bond.

Resistencia al rasgado

La resistencia al rasgado es la fuerza requerida para continuar el rasgado del papel, bajo condiciones específicas. Es muy dependiente de la orientación de la fibra en la hoja. Cuando la hoja es sometida a refinación, el índice de rasgado en una primera etapa aumenta, del mismo modo, al aumentar el índice de tracción se produce una disminución en el índice de rasgado. El índice de rasgado no es considerado para describir el producto final, pero sí es comúnmente usado en las especificaciones del papel.

Propiedades de superficie

- Resistencia en la superficie
- Rugosidad o lisura
- Fricción
- Suavidad

Resistencia en la superficie

La habilidad de resistir una fuerza que intenta remover las fibras de su superficie, se conoce como resistencia en la superficie del papel. Una resistencia baja puede causar problemas de “deshilachado”.

Los métodos empleados para medir esta propiedad, usualmente utilizan alta viscosidad, como tintas de impresión, aceites y cintas adhesivas.

Rugosidad y lisura

El propósito de las mediciones de rugosidad y lisura es obtener una representación que describa la topografía de la superficie del papel de manera simple. El método generalmente utilizado mide la habilidad de la superficie del papel para prevenir una corriente de aire desde la superficie del papel a otra presionada contra ésta. El resultado obtenido es un indicador de rugosidad o lisura.

Fricción

La resistencia a la fuerza que ocurre entre dos papeles en contacto, cuando las superficies se deslizan una contra otra, se conoce como fricción. El ensayo

utilizado para obtener el coeficiente de fricción es empírico. La cantidad puede ser medida usando un ensayo en un plano inclinado, y luego el resultado informado como un ángulo de deslizamiento. También puede realizarse el ensayo en un plano horizontal.

Suavidad

La suavidad es una propiedad subjetiva, puede ser relacionada a la impresión que produce acariciar la superficie del papel con los dedos.

Propiedades de rigidez

La rigidez se relaciona a las propiedades elásticas de un material, y se refiere a la resistencia dada por el material a una fuerza aplicada. Dos tipos de rigidez son medidas: doblés y rigidez al curvamiento.

- **Doblés:** Propiedad muy importante de un papel de impresión para resistir la tensión, siendo necesario un alto índice para obtener una alta rigidez al curvamiento en el cartón corrugado.
- **Rigidez al curvamiento:** Representa la capacidad del papel para resistir fuerzas de curvamiento. (HAKÂN, 2006).

4.1.2 Nuevas Tecnologías en la Evaluación de la Calidad de la Fibra

Los métodos tradicionales mencionados anteriormente, requieren de tiempo para su realización y no siempre son representativos de los nuevos procesos y productos.

Los métodos tradicionales de evaluación de la celulosa requieren transformar la pulpa en hojas de papel, para ello la pulpa es sometida a un acondicionamiento de las fibras mediante la refinación. Con la pulpa refinada se forman las hojas de ensayo, las cuales, se prensan, se secan y se cortan en testigos definidos según el parámetro a medir. El tiempo requerido en esta preparación es de 3 a 16 horas, sin considerar el tiempo de acondicionamiento a temperatura y humedad que requieren

las hojas de ensayos, antes de realizar los test de resistencias y de características físicas.

Este procedimiento se puede obviar, basándose en que la pulpa está formada de fibras y que las propiedades de estas fibras otorgan finalmente la calidad de la pulpa.

Un análisis directo en la imagen de la fibra (técnicas ópticas), son la base de las nuevas tecnologías para designar la calidad de la pulpa.

4.1.2.1 Nuevas Tecnologías

Según explica Karlsson (HAKÅN, 2006), las nuevas tecnologías o técnicas que se están desarrollando para la caracterización de algunas propiedades de la fibra, son las siguientes:

Técnica óptica

Esta técnica consiste en analizar las cualidades de la fibra usando un haz de luz sobre esta, donde el tamaño de la partícula afecta la dispersión de la luz. Mientras más pequeña sea la partícula mayor va a ser la dispersión de luz, pero cuando el tamaño de la partícula es menor que la mitad de la longitud de onda de luz emitida, su dispersión empieza a disminuir. Estos aspectos son importantes para efectuar la selección del tamaño del filtro lumínico.

Técnica con luz polarizada

Este fenómeno es utilizado para un la medición del largo de la fibra debido al cambio de polarización que sufre la luz. Este tipo de medición presenta problemas para medir fibras amorfas y fibras muy finas.

Técnica con el escáner electromagnético

Para medir las propiedades de la fibra generalmente se usa el “scanning electron microscope” (SEM) o la versión moderna ESEM, el cual puede medir las propiedades químicas de las fibras.

Este equipo trabaja las ondas “near infrared” (NIR).

NIR

Cuando se emplea la reflexión difusa con NIR (longitudes de onda de 800-2500 nm), se puede determinar el número de Kappa, el contenido de lignina, glucosa, xilosa y ácido urónico, durante el proceso Kraft. Para este método la cantidad de agua y el ancho de papel son parámetros a considerar

Técnica con luz ultravioleta (UV)

Se emplea rayos UV (longitudes de onda de 170-400 nm) para medir el contenido de lignina en fibras con técnicas ópticas automatizadas.

Técnicas con rayos X

Con los rayos X (longitudes de onda ≤ 20 nm) es posible determinar distintas propiedades de la fibra, como la densidad, ancho y el ángulo de la microfibrilla. La delgadez de la pared, coarseness y la rigidez al curvamiento.

Analizador de imagen

Existe un analizador de imágenes (Fibermaster) usado para medir el longitud y ancho de una fibra. Este analizador puede procesar las imágenes a altas velocidades, procesando y analizando en paralelo. Para obtener una imagen representativa de la fibra, es necesario colocar las fibras entre dos platos, con esto la fibra se proyectara en dos dimensiones, las cuales representaran la forma real y longitud de la fibra.

El sistema trabaja dividiendo la imagen en cuadros (píxeles), detectando las sombras producidas en la imagen. Luego se le ajusta un rectángulo para así obtener el área y perímetro de la fibra.

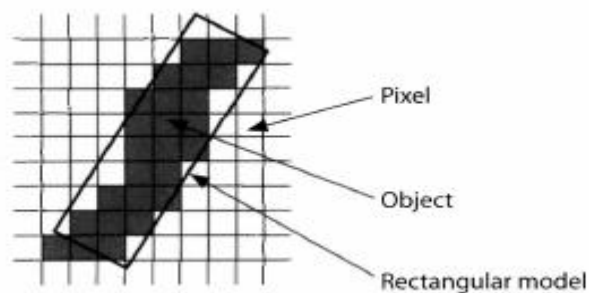


Figura 1. Imagen digital de la fibra construida por un número de píxeles (HAKÂN, 2006)

4.1.2.2 Propiedades Medibles de la Fibra

Según explica Karlsson (HAKÅN, 2006), las propiedades biométricas que actualmente se miden en el laboratorio para la caracterización y el control de la calidad de las fibras de celulosa, son las siguientes:

Longitud de fibra

Una fibra tiene una estructura compleja, que varía con la especie de la madera, proceso de crecimiento, tecnologías de pulpage utilizadas para la fabricación de la celulosa y proceso de refinación a la cual se ha sometido.

De las propiedades de la fibra, su longitud es la más compleja de medir. En los equipos con técnicas avanzadas como el Fibermaster, el área (A) y el perímetro (P) de la fibra son medidos para cada una de ellas. En cambio la longitud (L) y el ancho (W) son calculadas de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$A = L * W$$

$$P = 2 * L + 2 * W$$

Con estas formulas se calcula la longitud y el ancho de la fibra. La longitud de la fibra es proporcional con la resistencia de la hoja, pero puede tener algún efecto negativo para el proceso de formación de la hoja de papel.

Ancho de la fibra

El ancho de la fibra (W) se calcula de las ecuaciones anteriores. Las fibras delgadas tienden a favorecer la formación pareja de la hoja, en cambio, las fibras gruesas tienden a formar hojas disparejas.

Debido que el ancho de la hoja varía en función de su longitud, se calcula el ancho promedio de las fibras.

Las fibras se caracterizan por tener definidos los extremos y por la variación del ancho a lo largo de la extensión del eje fibrilar. Por esta razón, para estimar el ancho fibrilar, se calcula un ancho promedio de ella.

Deformaciones de fibra

La influencia de las deformaciones de la fibra influye sobre la resistencia de la fibra. Es así que una variación entre 81 a 85 % en el factor de forma, puede producir una diferencia de 15 Nm/g en el índice de tensión en pulpas no refinadas. Esta diferencia puede permanecer después de la refinación, aún cuando la tensión de ruptura vaya en aumento, debido a la fibrilación en la superficie de la fibra.

Factor de forma

Es una medida importante para la calidad de la fibra. Se define como la razón entre la máxima extensión de la fibra, o longitud proyectada, y la longitud verdadera de la fibra.

$$S = 100 * I / L$$

I = longitud proyectada

L = longitud verdadera

Un valor alto de este factor indica fibras rectas que en la mayoría de los casos darán buenas propiedades mecánicas a la hoja de papel.

Una alternativa comúnmente usada para el factor de forma es el "Curl" (C), el cual es una modificación al cálculo anterior:

$$C = (L/I) - 1$$

Quiebre de la fibra (Kink)

Los quiebres son deformaciones locales, como dobleces y torsiones. Son cambios detectados en la dirección del eje fibrilar de la fibra.

El número de deformaciones indica puntos débiles en las fibras. Estos puntos débiles son importantes para la resistencia fibrilar, la cual influye en las propiedades de resistencia mecánica.

Existen distintos tipos de mediciones para el Kink, entre ellas están el índice de quiebre, ángulo de quiebre y quiebres por milímetro.

Para realizar el cálculo del índice de quiebre se tiene que definir un peso de la muestra, luego se clasifican los quiebres de las fibras en las distintas clases en función del ángulo de quiebre y se cuantifican las cantidades de quiebres para cada

clase. El peso asociado a la clasificación (weight) es proporcional al peso de la muestra.

Tabla 5. Clasificación tipos de quiebres (HAKÂN, 2006)

Class (i)	Angle	Weight
1	10-20	1
2	20-50	2
3	50-90	3
4	90-180	4

Finalmente, con los datos obtenidos, se calcula el índice de quiebre según la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Kink} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Peso}_i \times \text{numero de quiebres}_i}{\text{Longitud de fibra}}$$

El número de deformación en la fibra indica puntos débiles en ésta. Esto es importante, debido a que influye en la fuerza intrínseca de la fibra.

Finos

Los finos se refieren a partículas y fibras pequeñas cuyo límite de longitud máxima es de 0,2 mm.

La presencia de finos tiene a menudo un impacto diferente sobre los procesos y sus productos, que sobre la fibra.

Los llamados finos primarios son los disponibles antes de la refinación e incluye a las células radiales. Los finos secundarios son creados durante el refinado y mejoran la resistencia de la hoja. Ambos tipos de finos tienen un impacto negativo sobre la capacidad de secado en la máquina papelera.

Capacidad de doblez

La capacidad de doblez es medida por el cambio del factor de forma que presenta la fibra al ser expuesta a altos flujos. Las fibras que no se deforman tienden a generar una hoja con una alta rigidez en la hoja de papel, y las fibras flexibles tienden a generar una mayor adhesión a la hoja de papel.

Vasos

La presencia de vasos (celulosa de Eucaliptus) en relación con la cantidad de fibras, es un buen indicador para la calidad de resistencia de la fibra. Los vasos no son deseados por los papeleros, ya que generan defectos en la impresión del papel (vessel picking).

Shives (conglomerados de fibras)

Los haces de fibras producen una escasa unión interfibrilar y se producen problemas de calidad del papel y en los procesos de fabricación del papel.

Coarseness

Coarseness es definido como el peso por unidad de longitud de fibra. Este concepto ha sido usado en vez de la densidad de la fibra.

Grosor de la pared de la fibra

El grosor de la pared tiene influencia en la flexibilidad de la fibra. Para el caso de una pared fina, produce que la fibra sea más flexible y genera mejor adhesión para el papel. En cambio, una pared de fibra gruesa produce el efecto contrario.

Delgadez

La delgadez está definida como la proporción entre la longitud y el ancho de la fibra.

Resistencia al Drenaje

Concepto que mide la capacidad que tiene la fibra de drenar el agua. Existen dos equipos para este efecto; el Canadian Standard Freeness, usado especialmente para pulpa mecánica y el Schopper Riegler usado para pulpa química.

Resistencia fibrilar

EL espectro NIR es usado para la detección de ciertos grupos funcionales presentes en la fibra (control de calidad). En combinación con la distribución de fibras es usado para determinar la resistencia fibrilar. Este tipo medición con este espectro, depende de la cantidad de humedad de la hoja y del proceso de formación de la hoja de papel.

Propiedades ópticas

Para la celulosa, la propiedad óptica más importante es la Blancura, que se usa especialmente para comercializar las celulosas blanqueadas. (HANDBOOK, 2000)

Color

Consiste en la medición de tres parámetros, usando CIE tristimulus values X, Y, Z, para poder cuantificar el color de la hoja de papel. Luego de obtener los valores de X, Y, Z (tristimulus values), se relacionan con las funciones colour matching para obtener la función de luminosidad y el factor de reflexión. Los otros parámetros calculados de tristimulus values son eje grey-scale (L), eje red-green (a), y eje yellow-blue, los cuales especifican el color final del papel.

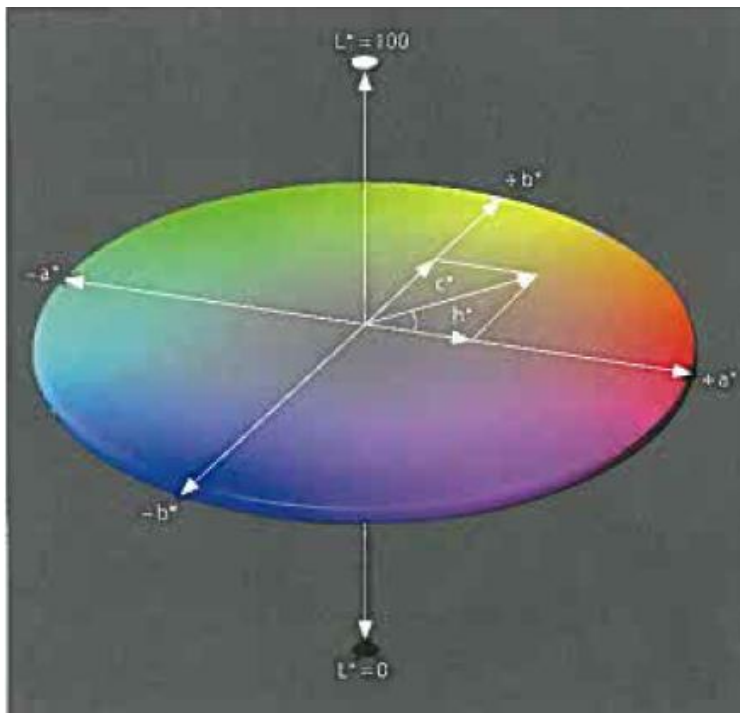


Figura 2. CIE L*a*b* espacio de colores (HAKÂN, 2006)

Tinta residual

La medición de tinta residual, es usada como control en el proceso de flotación durante el reciclaje del papel. La tinta absorbe la luz en un mayor grado que la fibra de celulosa.

Estudios en Infrarrojo cercano

El espectro infrarrojo en combinación con la distribución de fibras ayuda a predecir la resistencia fibrilar.

Esta técnica permite conocer y confirmar el rendimiento y la calidad de la fibra, identificando las diferentes longitudes de ondas para los grupos funcionales de los componentes químicos presentes en la pulpa (fibra).

Es así que la celulosa aparece en longitud de onda de 1490, 2102, y 1818 nm, las hemicelulosas a 1982 nm y la lignina a varias longitudes de onda como, por ejemplo, a 1680 nm.

4.2 Predicción de las Propiedades Físico Mecánicas del Papel en Función de las Propiedades Biométricas de la Fibra

Las investigaciones que han estudiado relaciones existentes entre la morfología de las fibras y las propiedades físico mecánicas del papel producido con pulpa, comenzaron hace décadas. Sin embargo, los resultados obtenidos de estos diversos estudios a menudo son contradictorios.

La predicción de las propiedades físico mecánicas del papel generaría una disminución en el tiempo de control de calidad. Hoy en día, con el equipo adecuado, la medición de las propiedades biométricas de la fibra duran alrededor de 6 horas, en cambio, la medición de las propiedades físico mecánicas duran alrededor de 24 horas o más tiempo. Por esto, una temprana predicción de las propiedades físico mecánicas agilizaría el proceso de control de calidad en aproximadamente 18 horas.

Las propiedades biométricas mayormente estudiadas son la longitud de la fibra y el ángulo fibrilar. Sin embargo, el efecto que poseen éstas sobre las propiedades físico mecánicas todavía no está claro, pero por lo general, se les han asociado a la resistencia y a la elasticidad de la hoja de pulpa, respectivamente.

A continuación, se expondrán algunas relaciones existentes entre las propiedades biométricas de la fibra y las propiedades físico mecánicas de la hoja de papel de pulpa, para fibra corta y fibra larga. Para efecto de apreciación de datos, se usará el porcentaje de variación como unidad de referencia.

4.2.1 Elongación

Las propiedades de elongación (stretch) de una hoja de pulpa sin refinar, presentan una fuerte correlación (r) con el ángulo fibrilar. Para el caso de una pulpa de fibra larga presenta una correlación positiva (HORN, 1974), con un porcentaje de variación de un 79% ($r^2 = 0.792$) (ver Figura 3).

En el caso de la fibra corta (HORN, 1978), el porcentaje de variación que presenta la elongación con el ángulo fibrilar es de un 70.2% ($r = 0.838$), y con la longitud de la fibra presenta un 77.6% ($r = 0.881$). También se ha encontrado que esta propiedad físico mecánica de la hoja de pulpa, posee una relación negativa con la densidad de la madera (WIMMER, 2002).

Luego de refinar la pulpa, los puntos de unión entre fibra son mayores que en el caso de la pulpa sin refinar, por lo tanto, la mayor cantidad de uniones interfibrilares se vuelve el factor principal para la elongación. Los porcentajes de variación mencionados anteriormente disminuyen para el caso de la fibra larga (HORN, 1974). El porcentaje de variación con el ángulo fibrilar disminuye a un 45% ($r^2 = 0.45$) y no presenta una relación significativa con otra propiedad biométrica de la fibra. Para el caso de la fibra corta (HORN, 1978), el porcentaje de variación con el ángulo fibrilar disminuye a un 45% y tampoco presenta alguna relación significativa con otra propiedad biométrica.

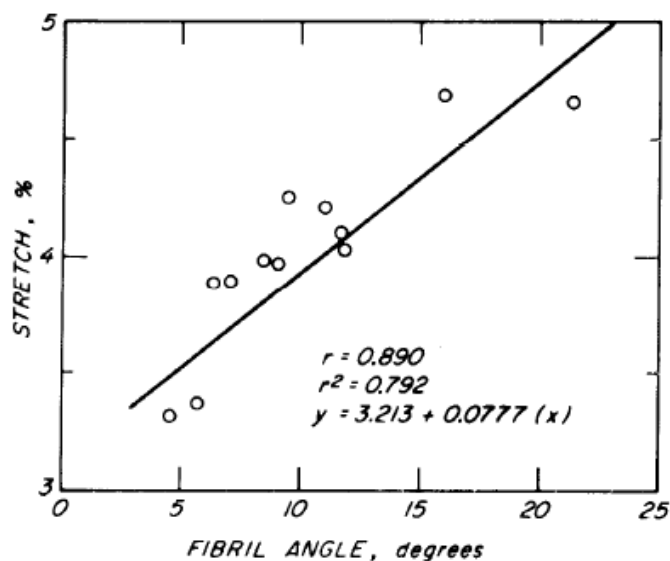


Figura 3. Relación entre el ángulo fibrilar y la elongación de la hoja de pulpa de fibra larga, sin refinar ni banquear (HORN, 1974).

4.2.2 Índice de Tensión

El índice de tensión (tensile strength) es una propiedad físico mecánica altamente dependiente de la capacidad de unión entre fibras. Por esto, las propiedades biométricas más dominantes para el índice de tensión son la longitud de fibra (L), el espesor de la pared celular de la fibra (T) y la razón entre estos dos parámetros (L/T).

Para la fibra larga (HORN, 1974), esta propiedad presenta una fuerte relación con el espesor de la pared celular de la fibra. Para el caso de la pulpa sin refinar, el índice de tensión presenta un porcentaje de variación de un 82% con respecto al grosor de la pared de la fibra, y para la pulpa refinada, este porcentaje de variación disminuye a un 76%, (ver Figura 4), pero aumenta el índice de tensión.

A pesar que el índice de tensión no posee una relación significativa con la longitud de la fibra, se ha encontrado que el grosor de la fibra posee una relevante relación con la longitud de fibra ($r^2=0.853$) y la razón de estas propiedades (L/T) si correlacionan mejor con la tensión. Al realizar un análisis de regresión del índice de tensión en función de la razón longitud y grosor de la pared de la fibra (L/T), para una pulpa sin refinar y sin blanquear, se observa un porcentaje de variación del 78%, para maderas con densidades mayores a $0,45 \text{ g/cm}^3$, y de 91,7% para densidades menores a $0,45 \text{ g/cm}^3$. Para la pulpa refinada se obtiene un porcentaje de variación de un 91.5% (ver Figura 5). Estos resultados implican que la densidad de la madera es un factor a considerar para la predicción del índice de tensión.

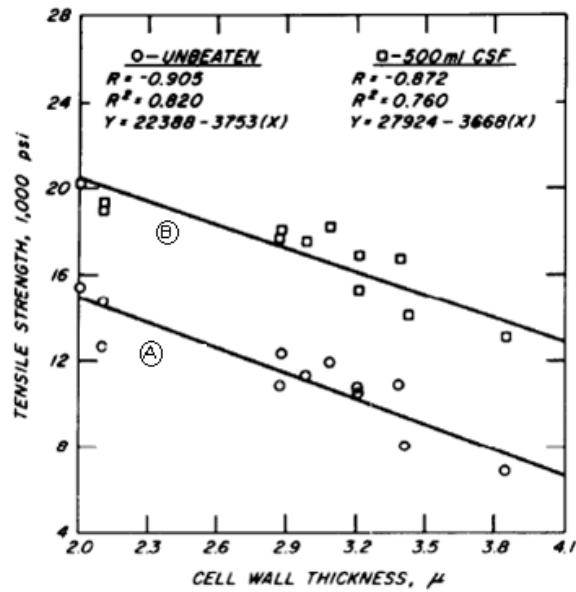


Figura 4. Relación del índice de tensión y el grosor de la pared de la fibra, de una pulpa (fibra larga) sin blanquear; para una pulpa refinada (500 ml CSF) (A) y una pulpa sin refinar (B) (HORN, 1974).

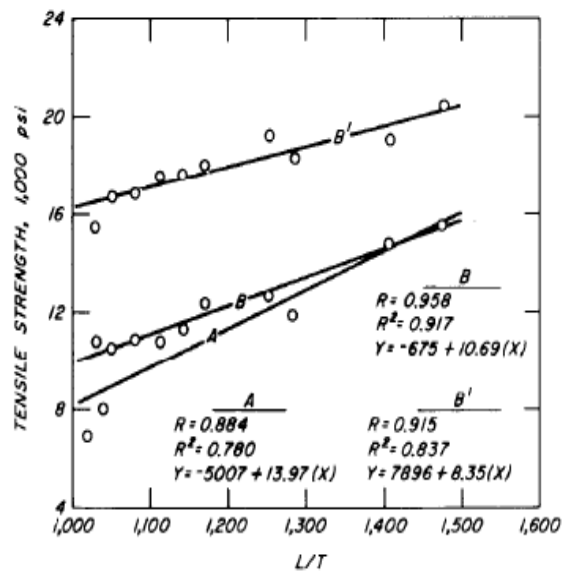


Figura 5. Relación del índice de tensión y L/T, de una pulpa (fibra larga) sin blanquear, sin refinar (A, B) y refinada (B' (500 ml CSF)) (HORN, 1974).

Para la fibra corta (HORN, 1978), al igual que la fibra larga, el índice de tensión también presenta una alta relación con el grosor de la pared de la fibra, pero paralelamente presenta una alta relación con el largo de la fibra. Estas relaciones se acentúan en el caso de la pulpa refinada. El factor más influyente para el índice de tensión es el factor L/T. El porcentaje de relación para la pulpa sin refinar es 63.7% ($r=0.798$) y para la pulpa refinada es 69.4% ($r=0.833$) (ver Figura 6).

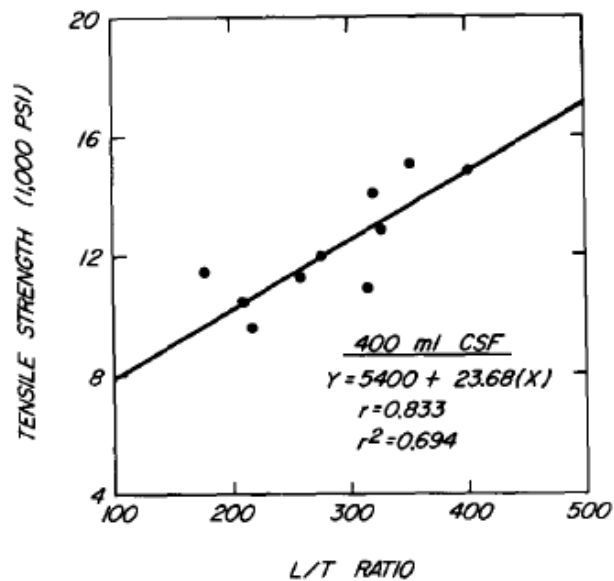


Figura 6. Relación entre índice de tensión y L/T, para la hoja de pulpa de fibra corta sin blanquear y refinada (400 ml CSF) (HORN, 1978).

Al refinar la pulpa se produce un aumento en del índice de tensión, ya que las fibras incrementan su flexibilidad y los puntos de contacto entre ellas, lo cual se traduce en un incremento en la capacidad de uniones entre las fibras. La razón del aumento de flexibilidad de la fibra, es producto de la hidratación de las hemicelulosas, lo cual incrementa las áreas de uniones entre las fibras.

4.2.3 Índice de Explosión

El índice de explosión (burst factor), al igual que el índice de tensión, depende de la capacidad de unión entre las fibras. Debido a esto, el índice de explosión y el índice de tensión tienden a tener el mismo comportamiento en función de los cambios de las propiedades biométricas de la fibra.

Para la fibra larga (HORN, 1974), esta propiedad no tiene relación significativa con la longitud de fibra. En la Figura 7, se observa que el factor L/T presenta una buena relación con el índice de explosión, para una hoja de pulpa sin refinar y sin blanquear, con un porcentaje de variación del 72.8%.

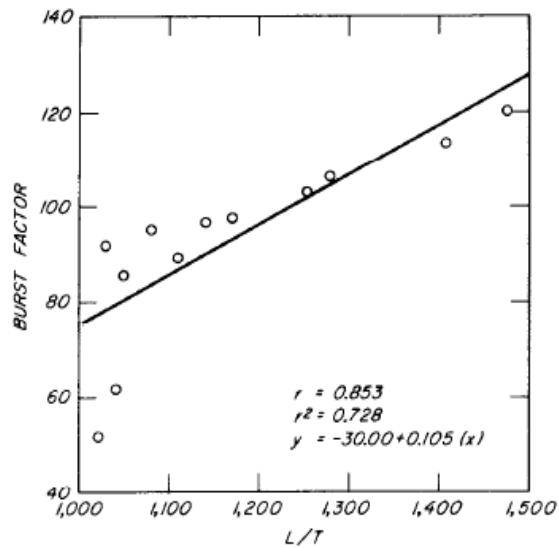


Figura 7.

Relación entre el índice de explosión y el L/T, de una hoja de pulpa (fibra larga) sin refinar y fibras sin blanquear (HORN, 1974).

Para la fibra corta (HORN, 1978), la longitud de la fibra es el factor dominante para el índice de explosión, con un porcentaje de variación de 69% ($r=0.833$) (ver Figura 8). Otro agente que tiene una influencia significativa, es el factor L/T, con un porcentaje de variación 50.2% ($r=0.709$). Al refinar la pulpa, el factor que se vuelve dominante es la relación L/T, con un porcentaje de variación de 64.2% ($r=0.801$) (ver Figura 9).

El índice de explosión posee una relación negativa con la densidad de la madera y no se ve afectada con el refinamiento de la pulpa (WIMMER, 2002).

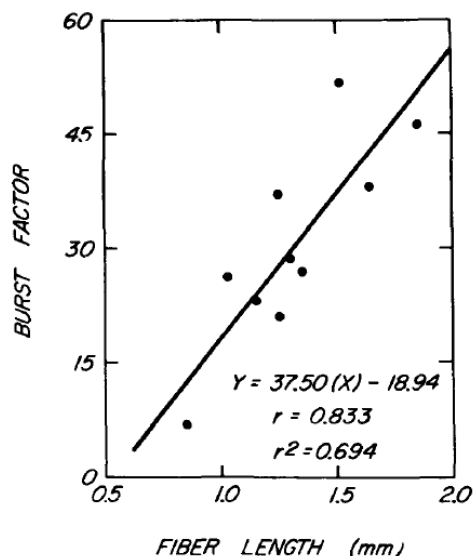


Figura 8. Relación entre el índice de explosión y la longitud de fibra, de una hoja de pulpa (fibra corta) sin blanquear y sin refinar (HORN, 1978).

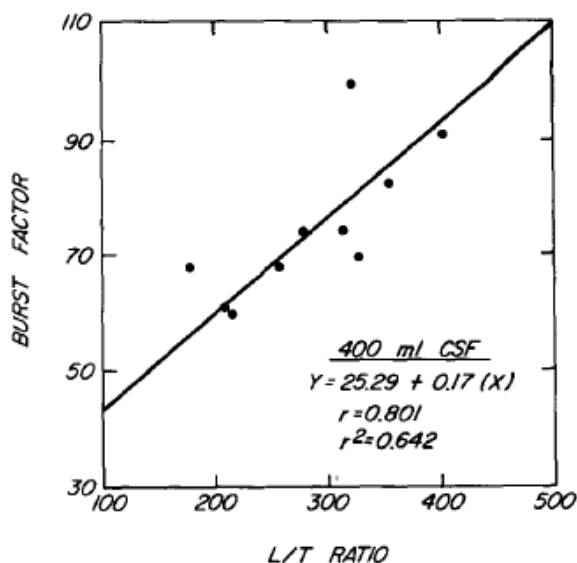


Figura 9. Relación entre el índice de explosión y el L/T, de una hoja de pulpa (fibra corta) sin blanquear y refinada (400 ml CSF) (HORN, 1978).

4.2.4 Índice de Rasgado

El índice de rasgado (tear factor) es una de las propiedades físico mecánicas más estudiadas, los investigadores presentan distintas teorías respecto a cuál es la propiedad biométrica que ejerce la mayor influencia sobre este índice.

Para la fibra larga (HORN, 1974), la principal influencia sobre el índice de rasgado de una hoja de pulpa sin refinar, es el área de la sección transversal (ver Figura 10), la cual posee un porcentaje de variación de 45.7%. El segundo parámetro a considerar es el grosor de la pared de la fibra. Estudios anteriores, habían propuesto la principal influencia la ejercía sobre el índice de rasgado era la longitud de la fibra. La importancia que tiene el área de la sección transversal, proviene que en el proceso de rasgado de la hoja tiende a ocurrir un deslizamiento de fibras, pero en el caso que la fibra sea muy delgada esta se rompe, facilitando el rasgado de la hoja (WIMMER, 2002). Para el caso de una hoja de pulpa refinada (fibra larga), el principal factor que influye en este índice es el coarseness (ver Figura 11), con un porcentaje de variación de 59.1%.

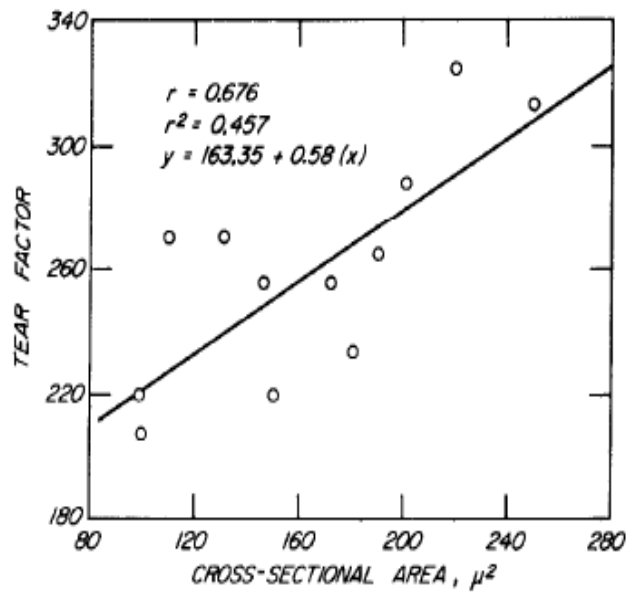


Figura 10. Relación de la sección de la fibra e índice de rasgado, para hoja de pulpa (fibra larga) sin refinar y sin blanquear (HORN, 1974).

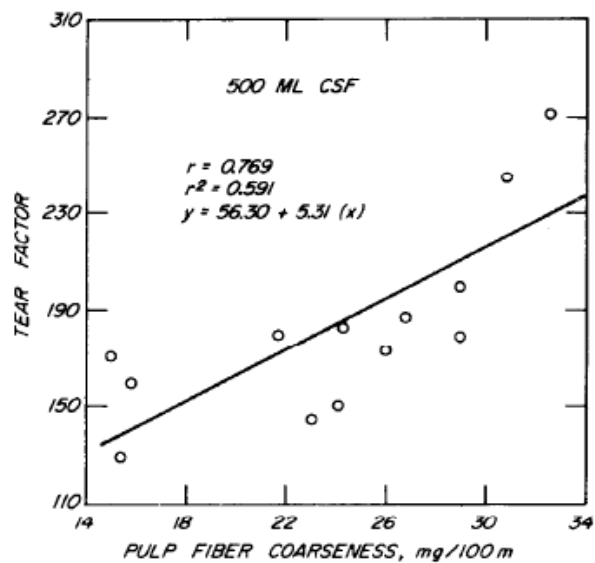


Figura 11. Relación del coarseness e índice de rasgado, para hoja de pulpa (fibra larga) refinada (500 ml CSF) y sin blanquear (HORN, 1974).

Para el caso de la fibra corta (HORN, 1978), el índice de rasgado depende principalmente de la longitud de la fibra, con un porcentaje de variación que aumenta al refinar la pulpa de un 66.8% (ver Figura 12) a 83.2% (ver Figura 13). No obstante, para la pulpa sin refinar, el ángulo fibrilar tiene una significativa relación con el índice de rasgado, con un porcentaje de variación de un 53.3% ($r=0.73$).

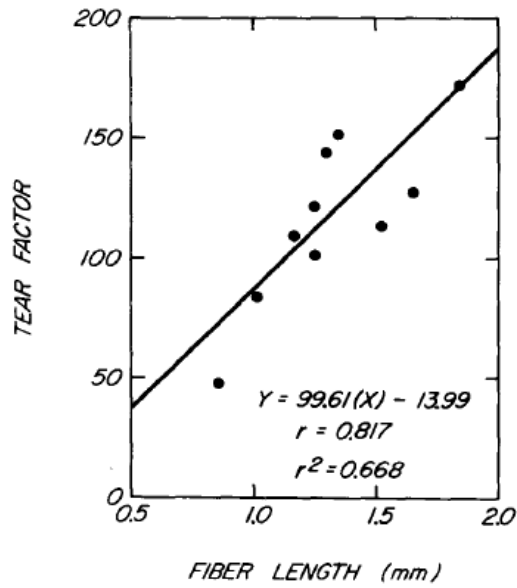


Figura 12. Relación de la longitud de la fibra e índice de rasgado, para hoja de pulpa (fibra corta) sin refinar y sin blanquear (HORN, 1978).

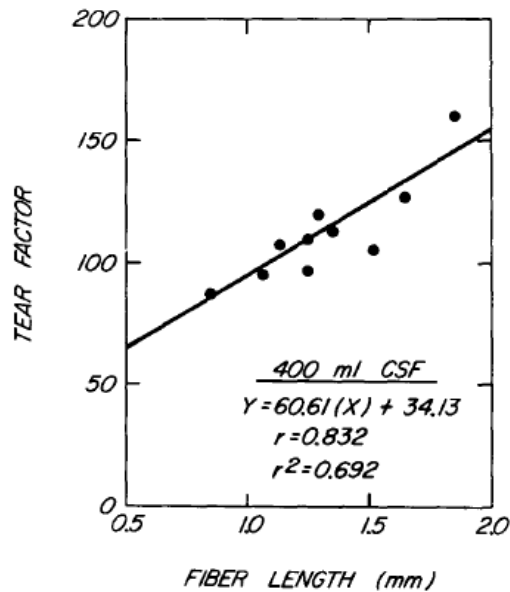


Figura 13. Relación de la longitud de la fibra e índice de rasgado, para hoja de pulpa (fibra corta) refinada (400 ml CSF) y sin blanquear (HORN, 1978).

4.2.5 Modulo de Elasticidad

La medición de del modulo de elasticidad (MOE) está en función de la rigidez al curvamiento y el espesor de la hoja de pulpa (LORENTZEN & WETTRE, 1998). La ecuación del modulo de elasticidad es la siguiente:

$$E = \frac{E^b}{t}$$

- E= Modulo de elasticidad
 E^b= Rigidez al curvamiento
 t= Espesor de la hoja de pulpa

Para la fibra larga, estudios preliminares habían relacionado el ángulo fibrilar con la elasticidad de una fibra de madera, debido a esto, se esperaba que alguna de las propiedades elástica de la hoja de papel estuviera relacionada con el ángulo fibrilar. Los resultados obtenidos por HORN, 1974, no muestran alguna relación significativa entre el MOE y el ángulo fibrilar.

A pesar que la rigidez al curvamiento no presenta relación con alguna propiedad biométrica de la fibra, el MOE presenta relaciones con estas propiedades. El principal factor que influye sobre el MOE, de una hoja de pulpa sin refinar, es la área transversal de la fibra, la cual presenta un porcentaje de variación de un 52.3% (ver Figura 14). Luego de refinar la pulpa, la propiedad que pasa a tener la mayor relevancia es el coarseness, con un porcentaje de variación de un 45.7% (ver Figura 15).

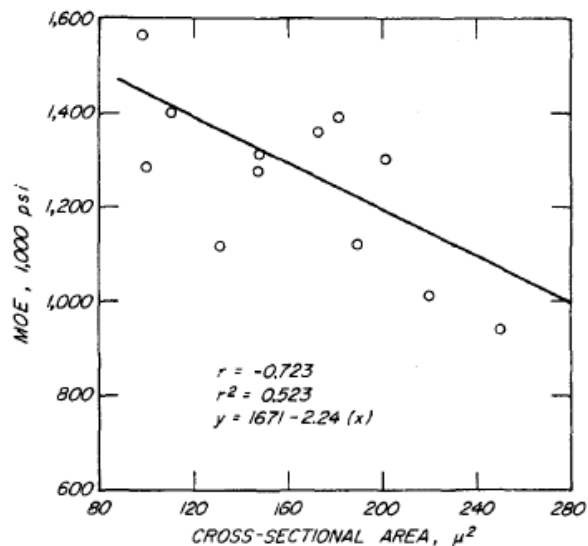


Figura 14. Influencia del área transversal de la fibra sobre el MOE de hojas de pulpa (fibra larga), sin refinar y sin blanquear (HORN, 1974).

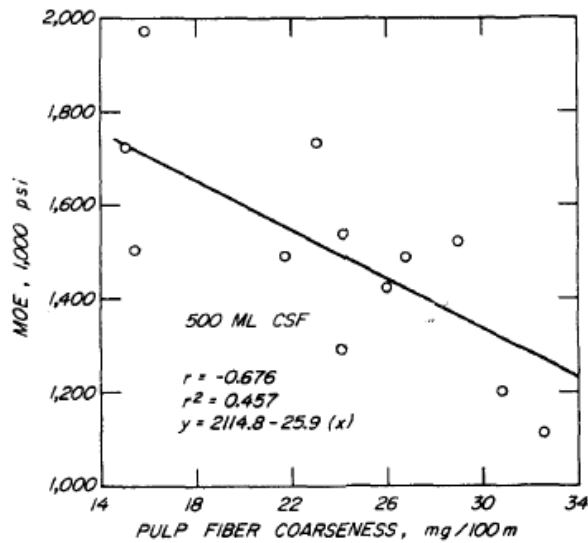


Figura 15. Influencia del factor de coarseness sobre el MOE de hojas de pulpa (fibra larga), refinadas (CSF 500 ml) y sin blanquear (HORN, 1974).

Para la fibra corta (HORN, 1978), para pulpas sin refinar, el factor que tiene la mayor relevancia para el MOE es la densidad básica de la madera, con un porcentaje de variación de un 53.3% ($r=0.772$). El otro factor que tiene una elevada relación es el índice L/T, el cual posee un porcentaje de variación de 43.9% ($r=0.663$). Para pulpa refinadas, el L/T pasa a ser el factor más influyente para el MOE con un 60% ($r=0.772$) y lo sigue la densidad básica con un 46.2% ($r=-0.68$).

Estos factores que influyen en el MOE, son los mismos factores que promueven la formación de la hoja y determinan la densidad de la hoja de pulpa.

4.2.6 Efecto del Refinamiento Sobre las Propiedades Físico Mecánicas

El proceso de refinación generalmente tiene una gran influencia sobre las propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa (ver Figura 16), lo cual se ha demostrado en los antecedentes expuestos anteriormente (LEVLIN, J. AND SODERHJLN, 1999). Por esto, la elección del grado de refinación es un factor importante a considerar para la predicción de las propiedades de la hoja de pulpa. La otra propiedad que se ve afectada por el proceso de refinación es la resistencia al drenaje, la cual aumenta con la refinación (WIMMER, 2002).

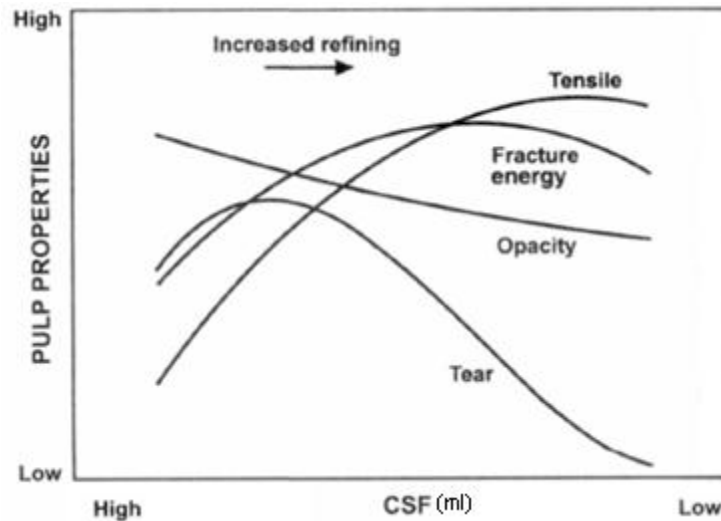


Figura 16. Influencia de la refinación en algunas propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa (LEVLIN, J. AND SODERHJLN, 1999).

La refinación afecta a distintas propiedades de las fibras, las cuales influyen en el proceso de formación de la hoja, por ejemplo, la fibrilación interna y/o externa, formación de finos, acortamiento de fibras y enderezamiento de fibras. Estos efectos ocurren en todo los tipos de pulpas, pero la importancia de estos efectos dependen del tipo de pulpa (fibra larga o corta) y método de refinación.

4.2.7 Regresiones Múltiples

A continuación, se expondrán los resultados encontrados por HORN, 1974 y 1978, al hacer el análisis de regresión múltiple para las propiedades físico mecánicas de la hoja de papel y las propiedades biométricas de la fibra.

Tabla 6. Regresiones múltiples entre propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa y propiedades biométricas de la fibra

	Propiedades físico-mecánicas	CSF/(ml)	Propiedades biométricas	r²
Fibra corta	Elongación	0	Longitud de fibra y factor de coarseness	0,923
		400	Longitud de fibra y factor de coarseness	0,745
	Índice de tensión	0	Factor L/T, población de fibras y el ángulo fibrilar	0,979
		400	Longitud de la fibra, el ángulo fibrilar y el factor de coarseness	0,899
	Índice de explosión	0	Factor L/T y población de fibras	0,973
		400	Longitud de fibra y factor de coarseness	0,736
	Índice de rasgado	0	Longitud de fibra y ángulo fibrilar	0,758
		400	Ángulo fibrilar y área de sección transversal de la fibra	0,860
	Módulo de elasticidad	0	Factor L/T y ángulo fibrilar	0,889
			Ángulo fibrilar, factor L/T y población de fibras	0,952
		400	Factor L/T y ángulo fibrilar	0,954
	Fibra larga	Elongación	500	Ángulo fibrilar y número de fibras/cm ³ de hoja de pulpa
Índice de tensión		0	Longitud de fibra y el grosor de la pared celular de la fibra	0,880
		500	Longitud de fibra y el grosor de la pared celular de la fibra	0,800
Índice de explosión		0	Longitud de fibra y el grosor de la pared celular de la fibra	0,780
		500	Longitud de fibra y el grosor de la pared celular de la fibra	0,840

De los resultados presentados en la tabla anterior, se infiere que para tener una cercana predicción de las propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa, es necesario analizar más de una propiedad biométrica de la fibra a la vez, para así obtener valores del porcentaje de variación cercanos a la unidad.

Para la fibra corta, se observa que las propiedades biométricas más importantes para la correlación con las propiedades físico mecánicas, son aquellas que le dan resistencia a la fibra y capacidad de enlaces entre fibras. La refinación de la pulpa produce fuertes cambios en la fibra, dificultando las predicciones de las

propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa. Para este tipo de fibra, el factor L/T es un mejor factor de predicción que la longitud de la fibra.

Para la fibra larga, al igual que la fibra corta, las propiedades biométricas más relevantes para la correlación con las propiedades físico mecánicas de la hoja de pulpa, son aquellas que le dan resistencia a la fibra y capacidad de entrelazado entre fibras. Para este tipo de fibra, el índice de tensión y explosión está altamente relacionado con la longitud de la fibra y el grosor de la pared celular de la fibra y presenta una pequeña diferencia de los porcentajes de variación al refinar la pulpa.

4.3 Métodos de Predicción Estadística

4.3.1 Diagramas de Dispersión

Tanto en el análisis de correlación como en el de regresión, se investiga la relación lineal entre dos variables continuas denominadas x e y , poniendo especial atención en el grado en que estas dos variables se relacionan o correlacionan (HANKE, 1997).

Una manera útil de examinar la relación $x - y$, es ver los datos en una gráfica. Para esto se usa un sistema de coordenadas $x - y$. La escala del eje x contiene el rango de valores necesarios para la variables x , y el eje y tiene una escala adecuada para los valores de y . Los pares de datos se representan gráficamente después en el espacio de dos dimensiones. Esta gráfica $x - y$ se conoce como diagrama de dispersión.

Un diagrama de dispersión es una gráfica de pares de datos $x - y$ en un espacio bidimensional.

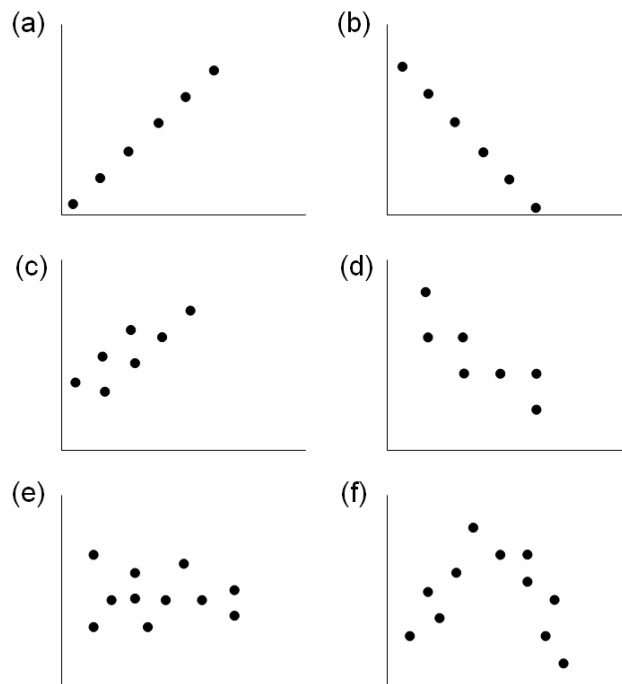


Figura 17. Diagramas de dispersión (HANKE, 1997).

La gráfica (a) de la Figura 17, ilustra una relación lineal positiva perfecta. Es lineal porque los puntos representados están en línea recta. Es positiva porque al aumentar x , y también aumenta, y es perfecta porque todos los puntos $x - y$ representados están sobre esta línea recta. La gráfica (b), ilustra una relación lineal negativa perfecta. La relación es negativa porque al aumentar x , y disminuye. Las gráficas tipo (a) y (b), muy rara vez se encuentran en situaciones prácticas y están incluidas aquí para ejemplificar los casos extremos de una relación $x - y$ lineal.

Las gráficas (c) y (d) de la Figura 17, ilustran relaciones comunes en los diagramas de situaciones reales. Los puntos en la gráfica (c), representan una relación lineal positiva, pero no perfecta, ya que los puntos no están precisamente sobre una línea recta. El diagrama (d) es similar, excepto que la relación lineal es negativa. La mayor parte de los diagramas de dispersión que se encuentran en situaciones prácticas son variaciones de las gráficas (c) y (d).

La gráfica (e) ilustra una completa falta de relación entre x e y . El conocimiento de la variable x no proporciona información útil sobre la variable y . Esta falta de relación lineal es un concepto importante en la prueba de hipótesis.

Por último, la gráfica (f) da la idea de una relación curva entre x e y . Se observa, que aunque el diagrama (f) muestra una relación entre x e y , no se trata de una relación lineal.

4.3.2 Coeficiente de Correlación

La ventaja de los diagramas de dispersión es que permiten al analista ver la relación entre las dos variables de interés. Estos diagramas son particularmente valiosos para descubrir la presencia de relaciones no lineales, que tal vez no se pueden ver cuando se calculan las medidas numéricas de la correlación lineal (HANKE, 1997).

Por lo general, se desea medir el grado de la relación entre x e y , al igual que observarla en un diagrama de dispersión. La medida que se usa para este propósito es el coeficiente de correlación, que es un valor numérico entre -1 y +1 y que mide la fuerza de la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

$$r = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2}}$$

Figura 18. Coeficiente de Correlación Entre dos Variables $x - y$ (HANKE, 1997).

La ecuación anterior, se usa para calcular el coeficiente de correlación de la muestra. Se usa la misma ecuación para calcular el coeficiente de correlación de la población, excepto que el tamaño de la muestra n , sustituye al tamaño de la población N .

4.3.3 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Correlación

Siempre debe hacerse una pregunta estadística cuando se selecciona una muestra y se toman medidas sobre sus elementos: ¿puede suponerse que los resultados de la muestra se cumplan para toda la población de interés?

La preocupación específica en el análisis de correlación es si se puede concluir, con arreglo a la evidencia muestral, que existe una relación lineal entre las dos variables continuas de la población. La hipótesis nula que se quiere probar establece que no existe correlación en la población, es decir, $\rho = 0$ (HANKE, 1997).

Las hipótesis nula y alternativa de dos colas para un coeficiente de correlación, son las siguientes:

$$H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho \neq 0$$

En la prueba se usa la alternativa con dos colas cuando el analista quiere determinar si existe alguna relación lineal en la población. Se usa una alternativa de una cola cuando la meta del analista es determinar si existe ya sea una relación positiva ($H_1 : \rho > 0$) o bien una relación negativa ($H_1 : \rho < 0$).

Una vez que se ha obtenido una muestra aleatoria a partir de una población, se calcula el coeficiente de correlación con la ecuación anteriormente descrita. Luego se usa el valor de r junto con el tamaño de la muestra n para calcular el estadístico muestral para la prueba. Si este estadístico es cercano a 0, la hipótesis nula no se rechaza. Si el estadístico está lejos del 0, la hipótesis nula se rechaza.

Si se seleccionan muestras del mismo tamaño (n) a partir de una población, y si los valores r calculados para cada muestra siguen una distribución normal alrededor de $\rho = 0$, sólo se tiene que conocer el error estándar de r para poder llevar a cabo la prueba usual con la distribución normal:

$$z = \frac{\text{Valor observado} - \text{Valor hipotético o supuesto}}{\text{Error estándar de la distribución muestral}}$$

Desafortunadamente, los valores de r no siguen una distribución normal, por tanto, no se puede usar la curva normal. Sin embargo, si la hipótesis nula es cierta, entonces la distribución muestral adecuada para esta prueba es la distribución t con $n - 2$ grados de libertad. Se pierden dos grados de libertad porque se estiman dos parámetros poblacionales (μ_x y μ_y) usando los estadísticos (\bar{x} e \bar{y}). El valor del error estándar estimado de r se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$s_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}$$

Donde: s_r = error estándar del coeficiente de correlación
 r = coeficiente de correlación
 n = número de observaciones pareadas

La ecuación siguiente da el estadístico de prueba adecuado:

$$t = \frac{r - \rho}{s_r}$$

Donde: r = coeficiente de correlación muestral
 ρ = coeficiente de correlación poblacional hipotético
 s_r = error estándar del coeficiente de correlación

4.3.4 Ecuaciones Lineales

4.3.4.1 Variables Dependientes y Predictoras

Cuando se examina la correlación de dos variables, por lo general se hace con el propósito de usar una para pronosticar a la otra. La mayor parte de los estudios de regresión y correlación se inician con el deseo de examinar y explicar el valor cambiante de esta variable, que en el análisis de regresión se llama variable dependiente. El símbolo elegido para la variable dependiente es y . Se identifica una segunda variable que se piensa que está asociada a y , la cual se le llama variable independiente o predictora cuyo símbolo es x (HANKE, 1997).

Cuando sólo se identifica una variable predictora, el análisis se llama regresión simple. Cuando hay dos o más variables predictoras, se trata de un análisis de regresión múltiple.

4.3.4.2 Modelo Estadístico

Si se reconoce que la mayoría de las variables del mundo real no se pueden pronosticar con exactitud, se debe construir un modelo que suponga una relación entre las variables y que permita que haya algún error aleatorio. La siguiente ecuación se llama modelo estadístico o probabilístico (HANKE, 1997):

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \varepsilon$$

Donde: β_0 = ordenada al origen
 β_1 = pendiente de la recta
 ε = error

En la ecuación anterior, ε representa el error que ocurre cuando se usa una variable independiente para pronosticar la variable dependiente. Este término de error toma en cuenta las variables independientes que afectan a y , pero que no están incluidas en el modelo. También toma en cuenta el factor de variabilidad aleatoria, o probabilística. Así, el parámetro ε incluye dos tipos de error; el error del modelo (lo que significa que no todas las variables independientes relevantes están incluidas) y el error aleatorio.

La distribución probabilística del parámetro ε determina el grado en que el modelo de regresión describe la relación entre las variables independientes y dependientes. Cuatro suposiciones importantes sobre la forma general de la distribución de probabilidad de ε fundamentan los procedimientos de análisis de regresión, los cuales se describen a continuación:

1. La distribución de probabilidad de ε es normal
2. La varianza de la distribución de ε es constante para todos los valores de x .
3. La media de la distribución de probabilidad de x es de 0. Esta suposición implica que el valor medio de y para un valor dado de x , es: $E(y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$.
4. Los valores de ε son independientes entre sí. Esta suposición implica que se ha seleccionado una muestra aleatoria de elementos de una población para medirlos.

4.3.5 Recta de Regresión Muestreal

4.3.5.1 Recta de Regresión Muestreal

Por lo general, nunca se conocen los valores exactos de los parámetros de regresión β_0 , β_1 y ε . Se encuentran estimaciones de estos parámetros a partir de

los datos muestrales y se determina la línea recta que mejor se ajusta a este conjunto de puntos, llamada recta de regresión muestral (HANKE, 1997).

La siguiente ecuación utiliza b_0 y b_1 para estimar β_0 y β_1 .

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x$$

Donde: \hat{y} = valor pronosticado de la variable dependiente
 x = variable independiente

b_0 = valor estimado de la ordenada al origen y de la población

b_1 = valor estimado de la pendiente de la recta poblacional

La recta determinada por la ecuación anterior debe pasar entre los puntos de los datos de manera que pueda predecirse el valor y para un valor dado de x . Se observa que \hat{y} , el valor pronosticado de la variable dependiente, en realidad es el valor medio de y para un valor dado de x . Se observa, también que para cualquier valor específico x en la muestra, existen dos valores y correspondientes; el valor real observado de y , que corresponde al valor observado de x , y la media pronosticada de y para este x . Por tanto, (x, y) es un punto en el diagrama de dispersión, y (x, \hat{y}) es un punto sobre la recta de regresión $\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x$. La diferencia $(y - \hat{y})$ mide el error que ocurre al pronosticarse la variable dependiente. Se observa, que la recta siempre pasará por un punto determinado por las medias (\bar{x}, \bar{y}) .

La recta de regresión muestral, es la línea recta que mejor se ajusta a un conjunto de puntos $x - y$.

En realidad la definición de la recta de regresión no es muy adecuada. El término que mejor se ajusta puede interpretarse de varias formas. En particular, debe definirse el método que se usa para ajustar una línea recta a un conjunto de valores de datos $x - y$.

4.3.5.2 Método de Mínimos Cuadrados

El método que se usa con más frecuencia para determinar la recta de regresión para un conjunto de pares $x - y$ se llama método de mínimos cuadrados. Este es un procedimiento matemático para encontrar la ecuación de la línea recta que minimiza la suma de los cuadrados de las distancias entre la línea y los puntos, medidas en la dirección vertical (y).

El desarrollo de la ecuación que se necesita para encontrar la ordenada al origen y la pendiente de una recta de regresión usando el método de mínimos cuadrados requiere el uso del cálculo diferencial. Las siguientes ecuaciones se usan en el análisis de regresión para encontrar la pendiente y la ordenada al origen de la recta de regresión muestral (HANKE, 1997).

$$b_1 = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Donde:

- $\sum x$ = suma de los valores x
- $\sum y$ = suma de los valores y
- $\sum x^2$ = suma de los cuadrados de los valores x
- $(\sum x)^2$ = cuadrado de la suma de los valores x
- $\sum(x \cdot y)$ = suma de productos de x e y para cada observación pareada
- n = número de observaciones $x - y$

$$b_0 = \frac{\sum y}{n} - \frac{b_1 \cdot \sum x}{n}$$

Donde:

- $\sum x$ = suma de los valores x
- $\sum y$ = suma de los valores y
- b_1 = pendiente de la recta
- n = número de observaciones $x - y$

Debe notarse que la ecuación para determinar b_0 con frecuencia se escribe $b_0 = \bar{y} - b_1 \cdot \bar{x}$.

4.3.6 Predicción e Intervalos de Confianza

La ecuación de regresión muestral se usa con frecuencia para hacer predicciones para y . Si un valor dado de x se sustituye en la ecuación de regresión, se puede encontrar el valor esperado de y . Este valor y es similar a la estimación puntual de la media. O sea, se obtiene una sola estimación numérica de y sin que se indique su exactitud (HANKE, 1997).

Una estimación puntual no proporciona información sobre la distancia a la que se encuentra del parámetro poblacional. Para determinar esta información, se desarrolla una predicción o intervalo de confianza. De hecho, los analistas pueden elegir entre dos tipos de intervalos; intervalo de predicción (para un valor específico de y) o la estimación del intervalo de confianza (para el valor esperado de y). Los intervalos de predicción se usan para pronosticar un valor específico de y para un valor dado de x . Los intervalos de confianza se usan para estimar el valor medio de y para un valor específico de x .

Siempre que se quiere predecir un valor en particular de la variable dependiente, dado un valor específico de la variable independiente, se calcula un intervalo de predicción (HANKE, 1997):

$$\hat{y} \pm t \cdot s_{\hat{y}.x}$$

Donde: \hat{y} = estimación de regresión muestral para y

t = valor de la distribución t basado en $n - 2$ grados de libertad para un nivel de predicción dado

$s_{\hat{y}.x}$ = error estándar de la estimación del pronóstico

En lugar de tratar de pronosticar el resultado de un solo experimento para un valor dado de x , un analista puede intentar estimar el resultado medio de un número muy grande de experimentos para un valor dado de x . El mismo valor se utiliza para pronosticar un valor y para un valor dado de x . La siguiente ecuación se usa para obtener un intervalo de confianza.

$$\hat{y} \pm t \cdot s_{\hat{\mu}.x}$$

Para un intervalo de confianza, el error estándar estimado de la estimación $s_{\hat{\mu}_x}$, se usa como la estimación de la desviación estándar de la distribución muestral del estimador de y .

4.3.7 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Regresión

4.3.7.1 Prueba de Hipótesis para la Pendiente

Otro estadístico importante es el valor t , que se usa para probar la hipótesis nula de que la pendiente de la ecuación de regresión para la población es 0. Si una ecuación de regresión tiene pendiente 0, un cambio en x no afecta a y . En otras palabras, x e y no tiene correlación en la población. El símbolo para la pendiente en la ecuación de regresión poblacional es β_1 . La hipótesis nula y la hipótesis alternativa de dos colas para probar la pendiente son (HANKE, 1997):

$$H_0 : \beta_1 = 0$$
$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

La alternativa de dos colas se usa cuando el objetivo es determinar si la pendiente de la ecuación de regresión para la población no es 0. Se usa una alternativa de una cola cuando se realiza la prueba para determinar si la pendiente es positiva ($H_1 : \beta_1 > 0$) o negativa ($H_1 : \beta_1 < 0$).

De la misma manera con la que se realizó la prueba de hipótesis para el coeficiente de correlación, se puede demostrar que si la hipótesis nula (la pendiente de la población es 0) es cierta, entonces la distribución muestral adecuada para esta prueba es la distribución t con $(n-2)$ grados de libertad. Se pierden dos grados de libertad porque se estiman dos parámetros poblacionales (β_0 y β_1) mediante dos estadísticos muestrales (b_0 y b_1). El valor del error estándar estimado de b_1 (s_b) se calcula con la siguiente ecuación:

$$s_b = \frac{s_{y \cdot x}}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

Donde: s_b = error estándar del coeficiente de regresión
 $s_{y.x}$ = error estándar de la estimación
 $\sum(x - \bar{x})^2$ = suma de los cuadrados de las diferencias entre cada

x observado y la media de x

La siguiente ecuación presenta el estadístico adecuado:

$$t = \frac{b_1 - \beta_1}{s_b}$$

Donde: b_1 = coeficiente de regresión muestral
 β_1 = coeficiente de regresión poblacional hipotética
 s_b = error estándar del coeficiente de regresión

4.3.7.2 Prueba F

Otro estadístico importante en el análisis de regresión es el estadístico F , que se usa para probar la hipótesis nula de que la ecuación de regresión muestral no explica un porcentaje significativo de la varianza de la variable y . La hipótesis nula y alternativa son (HANKE, 1997):

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

A primera vista, parece que esta hipótesis nula y la hipótesis nula probada por el estadístico t son la misma y ambas aseguran que no se puede suponer que los resultados muestrales se cumplan para la población. Estas dos hipótesis nulas sin duda son similares para el análisis de regresión simple, pero para la regresión múltiple sirven para dos propósitos diferentes. Por esta razón se presentan ambos enfoques.

El estadístico de prueba para la hipótesis nula establecida se obtiene de la distribución teórica F si la hipótesis nula es cierta. Se trata de una prueba de una cola ya que ρ^2 solo puede ser 0 o mayor. Un estadístico F grande llevará al rechazo de la hipótesis nula; un estadístico pequeño no lo hará.

La Tabla Número 7, presenta una tabla ANOVA típica para regresión. Primero, se explica la parte que se refiere a los grados de libertad. Ya se sabe que los grados de libertad totales son $n - 1$, se pierde un grado de libertad cuando se usa la media de y para pronosticar y . También se sabe que cuando se usa una ecuación de regresión muestral para pronosticar y , los grados de libertad son $n - 2$, porque β_0 y β_1 se estiman usando b_0 y b_1 en la ecuación. Esto deja un grado de libertad para la regresión. Así, en la regresión simple, el número de grados de libertad para la regresión será siempre 1.

Tabla Número 7. Análisis de varianza para la regresión (HANKE, 1997).

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Estimación de σ^2	Cuociente F
Regresión	$k - 1$	SCR	$SCR/(k - 1)$	$(SCR/(k - 1))$
Error residual	$n - k$	SCE	$SCE/(n - k)$	$(SCE/(n - k))$
Total	$n - 1$	SCT		

4.3.8 Regresión Múltiple

4.3.8.1 Matriz de Correlación

En un análisis de regresión múltiple, el primer paso es identificar la variable dependiente y las variables de predicción o predictoras que se van a incluir en el modelo. Después se toma una muestra aleatoria, y se registran todas las variables para cada elemento de la muestra. El tercer paso es identificar las relaciones entre las variables de predicción y la dependiente, y entre las propias variables de predicción.

Esto se hace mediante el análisis de los datos en un software que produzca una matriz de correlación para las variables. El tamaño de esta matriz depende del número de variables que se investigan. Si el análisis incluye tres variables, la matriz de correlación será de 3 x 3 (tres filas y tres columnas). Si se tienen 10 variables, la matriz de correlación será de 10 x 10.

Para cada combinación de dos variables, en la intersección de cada fila con cada columna aparece el coeficiente de correlación. Las dos variables que se miden se designan por el número de fila y el número de columna. La Tabla Número 8, es un ejemplo de una matriz de correlación de cuatro variables (4 x 4). El coeficiente de correlación que indica la relación lineal entre las variables 2 y 3 se representa por $(r_{2,3})$. El primer subíndice se refiere a la fila y el segundo a la columna. Además, la relación entre las variables 2 y 3 $(r_{2,3})$ es justo la misma que la que hay entre las variables 3 y 2 $(r_{3,2})$. Por último, los coeficientes en la diagonal primaria $(r_{1,1}, r_{2,2}, r_{3,3}, r_{4,4})$ siempre serán 1 ya que una variable siempre tendrá una relación positiva perfecta consigo misma.

Tabla Número 8. Matriz de correlación (HANKE, 1997).

VARIABLES	1	2	3	4
1	$r_{1,1}$	$r_{1,2}$	$r_{1,3}$	$r_{1,4}$
2	$r_{2,1}$	$r_{2,2}$	$r_{2,3}$	$r_{2,4}$
3	$r_{3,1}$	$r_{3,2}$	$r_{3,3}$	$r_{3,4}$
4	$r_{4,1}$	$r_{4,2}$	$r_{4,3}$	$r_{4,4}$

Una matriz de correlación despliega los coeficientes de correlación para cada posible par de variables en el análisis.

Por consistencia y para facilitar la lectura de una típica salida de un software, la variable y se dará primero y se representará como la variable 1, o x_1 . Esto significa que la primera variable de predicción se representará por la variable 2, o x_2 .

4.3.8.2 Multicolinealidad

Si dos variables de predicción en una regresión múltiple tienen una correlación muy fuerte, interfieren entre sí explicando la misma varianza de la variable dependiente. Esta condición de alta correlación entre las variables predictoras se llama multicolinealidad, y es indeseable porque sugiere que las variables de predicción no son independientes y, como consecuencia, es difícil distinguir qué cantidad del efecto observado se debe a una variable de predicción

individual. En otras palabras, si dos variables están altamente correlacionadas, proporcionan casi la misma información en el pronóstico.

Cuando dos variables tienen una alta correlación, los coeficientes de regresión muestral $b_0, b_2, b_3, \dots, b_k$, estimadores de los parámetros de regresión poblacional $\beta_0, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ no son confiables. La estimación b_2 de β_2 puede no ser siquiera cercana al valor real de β_2 debido a la alta variabilidad en la distribución muestral de β_2 . En casos extremos, b_2 puede incluso ser negativo cuando debiera ser positivo. Como dos variables que tienen una correlación alta no proporcionan información adicional sobre la varianza de la variable dependiente y crean coeficientes de regresión poco confiables, una de ellas debe eliminarse del modelo.

La multicolinealidad surge cuando las variables predictoras tienen una correlación muy alta entre ellas (HANKE, 1997).

4.3.8.3 Selección de la Variable Predictora

Las siguientes dos reglas resumen las consideraciones que deben prevalecer al seleccionar la variable predictora en una regresión múltiple (HANKE, 1997).

Reglas para seleccionar las variables predictoras en una regresión múltiple:

1. Una variable predictora debe tener una correlación fuerte con la variable dependiente.
2. Una variable predictora no debe tener una correlación demasiado alta con ninguna otra variable predictora.

4.3.9 La Ecuación de Regresión Múltiple

La siguiente ecuación indica cómo se escribe el modelo de regresión múltiple de la población (HANKE, 1997):

$$y = \beta_0 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon$$

Donde : y : variable dependiente
 x_2, x_3, \dots, x_k : variables de predicción

$\beta_0, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$: parámetros del modelo poblacional
 ε : componente de error aleatorio

4.3.9.1 Suposiciones de Regresión

Las suposiciones del modelo de regresión múltiple son similares a las del modelo de regresión lineal simple:

1. La distribución de probabilidad de ε es normal.
2. La varianza de la distribución de probabilidad de ε es constante para todos los valores de x .
3. La media de la distribución de probabilidad de ε es 0. Esta suposición implica que el valor medio de y para un valor dado de x es $E(y) = \beta_0 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \dots + \beta_k \cdot x_k$.
4. Los valores de ε son independientes entre sí. Esta suposición implica que se ha elegido una muestra aleatoria de objetos a partir de la población para medirlos.

4.3.9.2 Ecuación de Regresión Muestral

A partir de los datos de la muestra, se encuentran las estimaciones de los parámetros y se determina el hiperplano que mejor se ajuste al conjunto de datos, llamado hiperplano de regresión muestral. La siguiente ecuación usa b_0, b_2, b_3, \dots y b_k para determinar $\beta_0, \beta_2, \beta_3, \dots$ y β_k .

$$\hat{y} = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_k \cdot x_k$$

Donde : \hat{y} : valor estimado de la variable dependiente
 x_2, x_3, \dots, x_k : variables predictoras
 $b_0, b_2, b_3, \dots, b_k$: estimaciones muestrales de $\beta_0, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$

Igual que en el caso del modelo de regresión simple, las estimaciones muestrales $b_0, b_2, b_3, \dots, b_k$, se obtienen como soluciones de un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas. Éstas son difíciles de resolver sin un software.

Un coeficiente de regresión estimado específico mide el cambio promedio en la variable dependiente debido a un incremento de una unidad en la variable predictora relevante, manteniendo constantes las otras variables de predicción.

4.3.10 Pruebas de Hipótesis en el Análisis de Regresión Múltiple

Una vez que se ha recogido una muestra aleatoria, se han medido las variables y se ha examinado la matriz de correlación para determinar aquellas combinaciones de variables que son de interés, se analizan los modelos con el mejor potencial. El objetivo es encontrar la mejor ecuación para predecir y y después decidir si esta ecuación satisface las necesidades de exactitud del analista.

4.3.10.1 Coeficiente de Determinación Múltiple (R^2)

Un estadístico que se consulta con frecuencia en el análisis de regresión múltiple es el coeficiente de determinación múltiple, representado por el símbolo R^2 . Es útil para medir el porcentaje de variabilidad en la variable dependiente y , que se puede explicar mediante las variables de predicción.

El coeficiente de determinación múltiple R^2 , mide el porcentaje de la variabilidad en y que se puede explicar mediante las variables de predicción.

Un valor R^2 cercano a 1 significa que la ecuación es muy exacta porque explica una gran porción de la variabilidad de y . La ecuación que se presenta a continuación se usa para calcular R^2 en una regresión múltiple (HANKE, 1997).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

4.3.10.2 Prueba t de Regresión

Esta hipótesis nula establece que para la población, independientemente de los resultados muestrales, cuando x_2 aumente en uno, y no queda afectado por este aumento y adquiere un valor aleatorio. En otras palabras, la contribución de x_2 a la habilidad predictiva de la ecuación de regresión es nula. Si esta hipótesis es cierta, el valor de prueba para t se obtiene a partir de la distribución t con $(n-k)$ grados de libertad, donde n es el tamaño de la muestra y k es el número de parámetros linealmente independientes, o β s, estimados en el análisis. Un valor de t más grande ($t > 3$ o $t < -3$) por lo general llevará al rechazo de la hipótesis nula, y un valor de t cercano a 0 no lo hará. El analista, por tanto, espera obtener un valor grande de t , ya sea positivo o negativo, de manera que el coeficiente de regresión muestral se pueda generalizar a la población (HANKE, 1997).

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

4.3.10.3 Prueba F de Regresión

El valor F es otro estadístico que se verifica antes de usar la ecuación de regresión para explicar la variabilidad en y o predecirla. Igual que en una regresión simple, el valor F prueba la hipótesis nula de que la ecuación de regresión simple no explica un porcentaje significativo de la varianza de y . Esta hipótesis nula es (KANKE, 1997):

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

La ecuación de regresión muestral no explica un porcentaje significativo de la varianza en y .

Esta hipótesis se rechaza si el estadístico F calculado a partir de los datos muestrales es mayor que el valor de la tabla F .

4.4 Pretratamiento de Datos Mediante Técnicas de Suavizado

Antes de determinar si existe una relación entre ciertas variables, en algunas ocasiones es necesario hacer un pretratamiento de los datos. En muchos casos, esta operación tiene como objetivo separar la información “ruidosa”, incompleta e inexistente presente en los datos, con el fin de revelar las tendencias en forma más clara.

Una forma fácil de abordar esta situación es construyendo un gráfico de tendencia con el fin de observar si existe o no la presencia de “ruido”. En caso de existir esta situación de ruido, los datos pueden ser limpiados o suavizados mediante la aplicación del procedimiento denominado “Data Cleaning”, el cual pertenece a la metodología “Datamining”, ampliamente empleada en el tratamiento de base de datos (HAN y KAMBER, 2006).

Al eliminar el ruido, el “Data Cleaning” (rutinas para limpieza de datos) permite identificar los valores atípicos y aquellos que son inconsistentes. Generalmente la limpieza de datos, se realiza como un proceso iterativo de dos fases que consiste en la detección de las discrepancias y la transformación de datos.

Para el tratamiento del ruido en los datos, se pueden utilizar 3 metodologías de suavizado (HAN y KAMBER, 2006):

4.4.1 Metodología Binning

El “Binning”, corresponde a un suavizado de los datos mediante la agrupación de ellos de acuerdo a una clase o intervalo. Se pueden distinguir 3 estrategias:

- Binning de igual anchura, donde el tamaño de cada intervalo es siempre el mismo.
- Binning de igual frecuencia, en la que cada contenedor o binning tiene aproximadamente el mismo número de elementos.
- Binning basado en Clustering, donde la agrupación se realiza por medio de atributos cuantitativos de los puntos que pertenecen a una misma vecindad (determinado mediante diversas medidas de distancia).

Este método también está relacionado con el concepto de discretización. Los datos pueden ser discretizados mediante la transformación de los valores pertenecientes a un “bin”, en uno representativo tanto en la abscisa como en la ordenada. Por ejemplo, se puede utilizar como representante en el “eje x” al valor medio del bin y en el “eje y” el promedio de los datos contenidos en él.

Esta operación genera un único punto en el plano cartesiano, el cual representa de mejor manera a los puntos originales. Una vez graficados los nuevos puntos, puede visualizarse en una tendencia suavizada si existe alguna relación entre las variables (suavizadas).

Cabe mencionar que esta metodología es sensible a la cantidad de “bins” seleccionados para el pretratamiento de la información. Un número muy bajo de “bins” incurre en una pérdida excesiva de información y por consiguiente en una tendencia errónea. En cambio, un número de “bins” muy alto no genera el suavizado esperado.

A continuación, se describe la aplicación de la metodología.

- Definir un número de “bins” (intervalos) de discretización para los datos en el eje x.

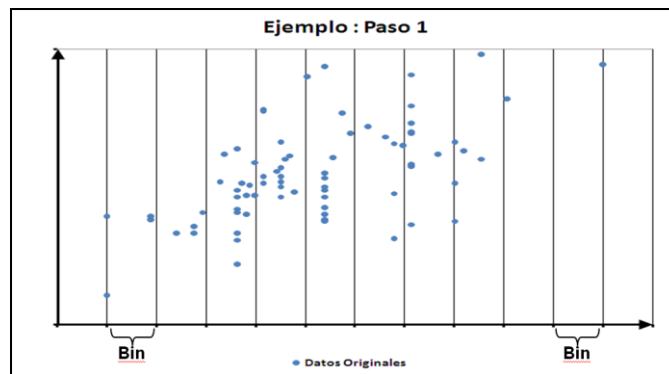


Figura 19. Asignación de “Bins” en Eje x

- Para cada intervalo se define un nuevo punto de manera que x sea igual al punto medio del “bin. La nueva coordenada “y” corresponderá al promedio de los datos.

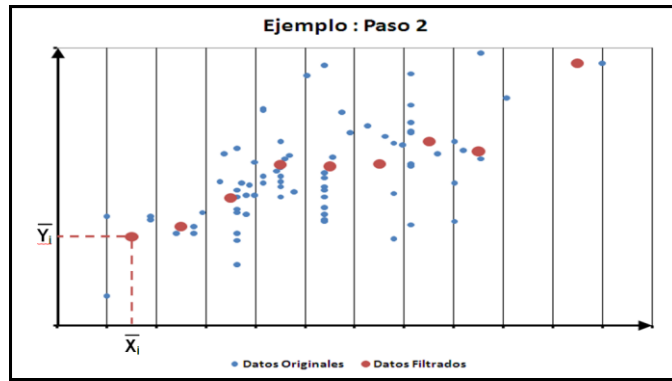


Figura 20. Generación de Nuevo Punto Suavizado en el “Bin”

- Graficar los nuevos puntos en busca de una tendencia entre las variables.

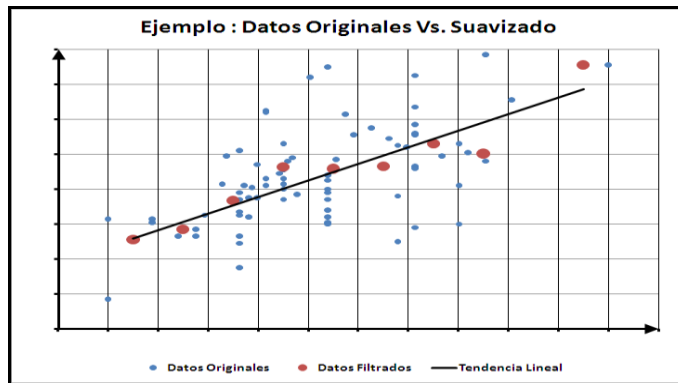


Figura 21. Datos Originales Vs. Datos Suavizados después de Proceso “Binning”

4.4.2 Metodología de Regresión

En este caso el pretratamiento de datos se puede realizar mediante una regresión lineal. La función ajustada se utiliza para identificar aquellos puntos alejados de la tendencia (outliers).

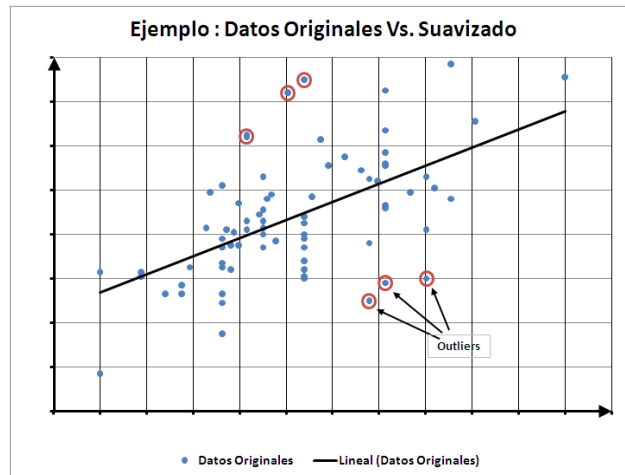


Figura 22. Datos Originales Mostrando la Presencia de “Outliers”

La regresión lineal resuelta mediante mínimos cuadrados dará como resultado una función del tipo $y = ax + b$.

Con la función ajustada es posible generar una tabla conteniendo los valores reales x_i , y_i , y los valores calculados para y según la ecuación lineal obtenida.

También es necesario evaluar el residual (diferencia) entre el valor real y el calculado para cada punto, definido como $y - y_i$.

Finalmente se evalúa el residual estandarizado el cual corresponde al valor absoluto del cociente entre el residual para cada punto dividido por la desviación estándar de los residuales (COOK y WEISBERG, 1982).

Se descartan los puntos (“outliers” o valores atípicos) cuyo residual estandarizado sea mayor que 2.

X_i	y_i Experimental	$Y_i = a \cdot x_i + b$ Predecido	Residual	Residual Estandarizado (Residual/Desv. Est Residuales)

Figura 23. Tabla de Análisis para Identificar “Outliers” Mediante Regresión

4.4.3 Metodología “Clustering” (Agrupación)

Este es un método popular de discretización de datos. Los “outliers” o valores atípicos, son detectados mediante la agrupación de los datos (“clustering”), donde

los valores similares son organizados dentro grupos o “clusters”. Los valores que caen fuera de los conjuntos de los “clusters”, se consideran “outliers”.

Como se puede ver en la Figura 24, cada centro del “cluster” o conjunto de valores, es marcado con un signo “+”, representando el punto promedio de los datos. Los “outliers” pueden ser detectados con valores que caen fuera del conjunto de los “clusters”.

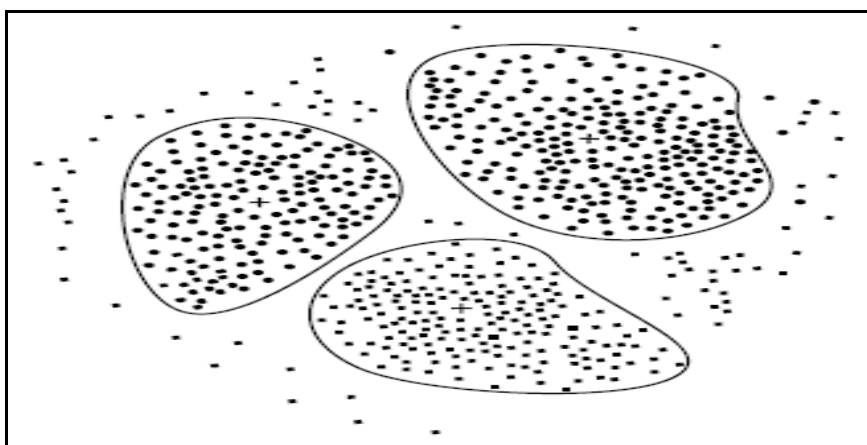


Figura 24. Muestra de Tres “Clusters” Presentes en un Set de Datos

El “Clustering” toma en cuenta la distribución, así como la cercanía entre los puntos. Por lo tanto, es capaz de producir resultados discretizados de alta calidad.

La calidad de los “Clusters”, pueden estar representados por el diámetro, que es la máxima distancia entre cualquiera de dos valores dentro del “Cluster”, representando la información que reemplaza a los datos originales.

La eficiencia de la técnica depende de la naturaleza de la información.

5. MATERIALES Y METODOS

5.1 Trabajo a Desarrollar

Los ensayos a realizar y presentar en el presente estudio, tienen como objetivo cubrir los siguientes puntos:

- Evaluar las fibras de celulosa producidas en Planta Nueva Aldea (Pino y Eucaliptus), en cuanto a propiedades físico mecánicas como biométricas.
- Generar una base de datos, tanto para la celulosa de Pino como de Eucaliptus, con las propiedades físico mecánicas y biométricas.

Buscar relaciones (tendencias) entre las propiedades biométricas y físico mecánicas, para las pulpas de Pino y Eucaliptus producidas en Planta Nueva Aldea.

- Desarrollar modelos multilineales y lineales simples, que permitan predecir el comportamiento de las propiedades físico mecánicas a partir de las características biométricas de las fibras de celulosa.

La celulosa a evaluar corresponde a la producida en Planta Nueva Aldea entre los meses de Agosto y Noviembre del año 2010 (Pino y Eucaliptus).

Los ensayos biométricos y de resistencia, fueron realizados en el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea.

En el presente estudio se ha considerado evaluar los resultados de las propiedades físico mecánicas a los siguientes grados de resistencia al drenaje, en grados Shopper Riedgler:

- Pino : 25 °SR
- Euca. : 30 °SR

Los valores anteriores corresponden a los puntos de refinación, en los cuales se especifican las propiedades físico mecánicas en los “data sheet” de nuestras pulpas en el mercado.

La determinación de las propiedades biométricas, fueron realizadas con equipo FQA OPTEST disponible en Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea, las cuales se desarrollaron con las pulpas sin refinar.

Las propiedades consideradas para el análisis de tendencias y regresiones, fueron las siguientes:

- Viscosidad intrínseca
- Largo de fibra
- Contenidos de finos
- Coarseness
- Población de fibras
- Ancho promedio de fibra
- Índice de quiebre (“Kink”)
- Angulo de quiebre
- Curl index
- Revoluciones en refinador PFI para alcanzar 25 °SR en Pino y 30 ° SR en Eucaliptus
- Índice de tensión (a 25 ° SR en Pino y 30 °SR en Eucaliptus)
- Índice de rasgado (a 25 ° SR en Pino y 30 °SR en Eucaliptus)

Si bien, el objetivo del estudio es poder relacionar propiedades biométricas con físico mecánicas, se ha considerado incluir la viscosidad y las revoluciones del refinador PFI, como variables interesantes de analizar.

Para realizar el análisis de tendencias entre las variables, se ha utilizado la metodología de “binning” (ver capítulo 4.4.1). El procedimiento anterior, permite eliminar el “ruido” existente entre los datos, lo cual permite visualizar en forma más clara las tendencias entre las variables.

Para desarrollar los modelos multivariables y simples, se ha utilizado como herramienta de trabajo las planillas electrónicas del software Microsoft Excel, mediante la aplicación análisis de regresión por mínimos cuadrados.

5.2 Evaluación de Celulosa en Planta Nueva Aldea

5.2.1 Laboratorio de Fibra Planta Nueva Aldea

El laboratorio de Fibra de Celulosa Nueva Aldea, es el encargado de evaluar el producto final (celulosa de Pino y Eucaliptus) a través de los ensayos físico mecánicos, propiedades biométricas, propiedades ópticas y viscosidad intrínseca. Esta información es requerida para asignar dichas características a lotes de expedición que son destinados para la venta del producto.

Muestreo

El Analista del área Máquina es el encargado de muestrear, guardar y trasladar las muestras de hojas de celulosa de Pino y Eucaliptus al Laboratorio de Fibra, ubicado en el segundo piso del Edificio Principal de Planta Nueva Aldea, para la ejecución de los análisis respectivos.

Ensayos

El Analista de Fibra ejecuta los análisis de acuerdo a lo indicado en los instructivos, según norma ISO 9000, para los diferentes ensayos.

Los métodos de análisis se basan en las normas detalladas en la siguiente tabla.

Tabla 9. Normas según método de análisis.

Análisis	Equipo	Referencia
Viscosidad Intrínseca	Viscomat	Scan CM 15:99
Capilaridad de agua en hojas de ensayo	Equipo Klemm	ISO 8787
Blancura ISO	Elrepho	ISO 3688
Consistencia en formadora de hoja	Formadora de Hoja	Tappi 240 om-93
Propiedades Biométricas	Analizador de Fibra FQA	Manual de Operación Analizador de Fibra FQA
Resistencia al drenaje por Método Schopper-Riegler	Canadian standard-freeness	ISO 5267-1
Refinación	Refinador PFI	ISO 5264-2
Formación Hojas de ensayo	Formadora de hojas	ISO 5269-1
Corte de hojas de ensayo	Guillotina simple y doble	Tappi 220 sp-96
Propiedades ópticas	Elrepho	ISO 2471 : 1988 ISO 2470 : 1999
Índice de Explosión	Medidor de explosión	ISO 5269-1 ISO 2758 : 2001
Índice de Tensión, Elongación e índice de Rigidez a la Tensión	Medidor de tensión	ISO 5269-1 ISO 1924-2 : 1994
Índice de Rasgado	Medidor de rasgado	ISO 5269-1 ISO 1974 : 1990
Resistencia al aire	Medidor de resistencia al aire	ISO 5269-1 ISO 5636-5 : 2003
Rigidez al Curvamiento	Medidor de Rigidez	Tappi 556 om-95

En el Apéndice A, se muestran y describen los equipos utilizados en el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea.

5.2.2 Descripción de las Propiedades Medidas a la Fibra en Laboratorio de Planta Nueva Aldea

Viscosidad intrínseca

La viscosidad intrínseca se determina midiendo la viscosidad relativa a diferentes concentraciones de la pulpa en un solvente definido y luego extrapolando la viscosidad específica a concentración cero. La viscosidad se expresa en cm^3/g .

Resistencia al Drenaje Schopper Riegler

El test de Schopper Riegler está diseñado para medir la velocidad a la cual una suspensión de fibras pierde agua. Esta resistencia al drenaje está relacionada a las condiciones de superficie y de hidratación de las fibras y constituye un índice muy útil para conocer las necesidades mecánicas a aplicar sobre las fibras.

La escala del Schopper Riegler está diseñada para que el valor de 100 corresponda a 0 SR y el cero corresponde a 100 SR.

Factor de reflectancia difusa Blancura ISO

La blancura ISO se mide en un reflectómetro que tiene las características descritas en la norma ISO 3688. El equipo está equipado con un filtro para una longitud de onda de 457 nm., y ajustada al contenido de luz UV de la luz incidente con un dispositivo que corresponde al iluminante C de la CIE (International Commission on Illumination).

La reflectancia se expresa como el porcentaje de un estándar en situaciones iguales de iluminación y de observación. La blancura ISO se basa en la iluminación difusa, utilizando un iluminante tipo C (luz día), cuya emisión de luz llega en 90 grados, mientras que su reflejo se mide a 0 grados.

Opacidad

Es la razón, expresada como porcentaje, entre el factor de reflectancia luminosa R_0 y el factor de reflectancia luminosa intrínseca R_∞ de la misma muestra.

La opacidad de una hoja es influenciada por el espesor, la humedad, una buena formación de la hoja, grado de blancura de la fibra, etc.

Resistencia al aire

Es el tiempo requerido para que un volumen de aire (cm^3/min) bajo cierta presión (1,00 kPa), difunda sobre una superficie de papel. Se expresa en $\text{seg.}/(100 \text{ mL})$.

Energía de refinación

Es la energía que requiere la fibra para alcanzar los grados de refinación requeridos. Se expresa en watts/hr .

Indice de rasgado

Es la fuerza media requerida para continuar el rasgado de una hoja previamente rasgada. El trabajo efectuado para rasgar viene dado por la pérdida de energía potencial del péndulo. La escala está calibrada de tal forma que indica la fuerza media (trabajo efectuado dividido por la distancia total rasgada). Se expresa en mNm^2/g .

Indice de explosión

Es la máxima presión desarrollada por un sistema hidráulico en extender un diafragma de goma y aplicar esa presión sobre un área circular del papel. Se expresa en kPam^2/g .

Indice de tensión

Corresponde a la fuerza máxima de tensión desarrollada para generar la ruptura de una hoja de ensayo, bajo condiciones ya establecidas. Se expresa en Nm/g .

Rigidez al curvamiento

Representa el trabajo que se necesita aplicar para obtener una curvatura, en un ángulo determinado de una muestra de papel de un radio igual a la unidad. Se expresa en m/Nm .

Elongación

Al someter el extremo de una tira de hoja de ensayo de 15 mm de ancho a un esfuerzo de tracción lento y continuo, ésta sufre un alargamiento que irá aumentando con la fuerza hasta llegar un momento en que se rompe. El equipo mide el % de elongación, con respecto a su longitud original, que sufre una hoja de ensayo antes de romperse. Corresponde a la fuerza máxima de tensión desarrollada para generar la ruptura de una muestra, bajo condiciones establecidas.

Absorción energía de tensión (TEA)

Cantidad de energía por unidad de superficie (longitud por ancho) de un papel, absorbida durante la ruptura de la hoja de papel. Se expresa en J/cm^2 .

Volumen específico

Se mide el espesor de la hoja de papel en el equipo Caliper, valor que dividido por el gramaje de la hoja entrega la densidad. El volumen específico es el valor inverso, y se expresa en cm^3/g .

Absorción de agua

Se mide por la capacidad capilar del agua bajo condiciones de temperatura y humedad ($23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \pm 2 \%$ de humedad) en un tiempo de 10 minutos.

Propiedades biométricas

Esta determinación se realiza a través de un Analizador de Fibra FQA con luz polarizada, obteniendo como resultado las principales propiedades biométricas de la fibra como largo, ancho, coarseness, etc. De esta forma se puede caracterizar la fibra asociada a una especie particular. Por otro lado, permite explicar el comportamiento de algunas propiedades físico mecánicas que están relacionadas a estas características morfológicas.

Longitud de fibra

Se expresa generalmente en mm, como promedio aritmético (l_n), promedio ponderado por longitud (l_{nw}) o promedio ponderado por peso (l_{ww}).

Porcentaje de finos P y W

Se define como finos, aquellas fibras menores a 0,2 mm.

Hay dos tipos de finos, los primarios que son detectados antes del refinado de la pulpa, donde se incluyen los rayos, los cuales tienen pobre capacidad de entrelazamiento fibrilar, y los finos secundarios que son producidos durante el refinado de la pulpa, que se caracterizan por mejorar la resistencia fibrilar de las hojas.

Coarseness

Se define como la masa de las fibras por unidad de longitud. Se expresa en mg/m .

Población de fibra

Es el número de fibra por cantidad de pulpa que presenta un coarseness determinado.

Ancho promedio

El ancho de la fibra varía a lo largo de ella. Por esta razón para calcular el ancho de la fibra se define un promedio para toda la fibra.

Índice de quiebre (Kink Index)

Los quiebres observados en la fibra son deformaciones como compresiones, torceduras etc. Son detectados por los cambios en la dirección del eje principal de la fibra dentro de una distancia límite de ella.

El quiebre de la fibra es el cambio brusco en la curvatura de la fibra. El índice de quiebre se expresa como el número de quiebres por longitud promedio de fibra.

Ángulo de quiebre promedio

Es la suma de todos los ángulos de quiebre mayores a 20 grados, dividida por el número total de quiebres detectados.

Índice de deformación (Curl Index)

Se mide como la razón entre la longitud de la fibra deformada y la longitud de la misma fibra sin deformación (fibra estirada).

6. RESULTADOS Y DISCUSION

En el Apéndice B, se muestran las propiedades Biométricas y Físico Mecánicas obtenidas para la Celulosa de Pino.

En el Apéndice C, se muestran las propiedades Biométricas y Físico Mecánica obtenidas para la Celulosa de Eucaliptus.

6.1 Evaluación de Celulosa de Pino y Eucaliptus producida en Planta Nueva Aldea

Se presenta a continuación la evaluación de la celulosa de Pino y Eucaliptus producida en Planta Nueva Aldea, la cual ha sido desarrollada en el Laboratorio de Fibra de la Planta.

6.1.1 Evaluación Celulosa de Pino Planta Nueva Aldea

Tabla 10. Evaluación Pulpa de Pino BKP Planta Nueva Aldea.

		CELULOSA PINO
	REVOLUCIONES (rev.)	6324
	VISCOSIDAD (cm ³ /g)	766
	BLANCURA ISO (%)	90
P. BIOMETRICAS	LONGITUD DE FIBRA LW (mm)	2,162
	PORCENTAJE DE FINOS W (%)	4,86
	COARSENESS (mg/m)	0,154
	POBLACIÓN DE FIBRA (fibras/mg)	6624
	ANCHO PROMEDIO (um)	27,3
	INDICE DE QUIEBRE "KINK" (1/mm)	1,87
	ANGULO DE QUIEBRE (°)	54,58
	QUIEBRES POR MM (1/mm)	0,87
	INDICE DE DEFORMACION "CURL"	0,145
	VASOS/m	---
P. FÍSICO- MECANICAS	RESISTENCIA AL DRENAJE (°SR)	25,0
	ENERGIA DE REFINACIÓN (Wh)	74
	INDICE DE RASGADO (mNm ² /g)	10,6
	INDICE DE EXPLOSIÓN (KPam ² /g)	6,6
	INDICE DE TENSIÓN (Nm/g)	83,5
	VOLUMEN ESPECÍFICO (cm ³ /g)	1,44
	OPACIDAD (%)	58,14
	RESISTENCIA AL AIRE (s/100 ml)	8,03
	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN (m ² /Kg)	17,83
	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (m ² /Kg)	0,21
	ELONGACIÓN (%)	3,5
	ABSORCIÓN DE AGUA (mm)	38
	RIGIDEZ AL CURVAMIENTO (m/Nm)	3,6
	TEA (J/g)	1,96

6.1.2 Evaluación Celulosa de Eucaliptus Planta Nueva Aldea

Tabla 11. Evaluación Pulpa de Eucaliptus EKP Planta Nueva Aldea.

	CELULOSA EUCALIPTUS	
	REVOLUCIONES (rev.)	1615
	VISCOSIDAD (cm ³ /g)	906
	BLANCURA ISO (%)	90
P. BIOMETRICAS	LONGITUD DE FIBRA LW (mm)	0,770
	PORCENTAJE DE FINOS W (%)	2,95
	COARSENESS (mg/m)	0,058
	POBLACIÓN DE FIBRA (fibras/mg)	28458
	ANCHO PROMEDIO (um)	17,1
	INDICE DE QUIEBRE "KINK" (1/mm)	2,02
	ANGULO DE QUIEBRE (°)	29,80
	QUIEBRES POR MM (1/mm)	1,03
	INDICE DE DEFORMACION "CURL"	0,105
	VASOS/m	3,89
P. FÍSICO- MECANICAS	RESISTENCIA AL DRENAJE (°SR)	30,0
	ENERGIA DE REFINACIÓN (Wh)	17
	INDICE DE RASGADO (mNm ² /g)	8,4
	INDICE DE EXPLOSIÓN (KPam ² /g)	3,9
	INDICE DE TENSIÓN (Nm/g)	60,6
	VOLUMEN ESPECÍFICO (cm ³ /g)	1,62
	OPACIDAD (%)	73,33
	RESISTENCIA AL AIRE (s/100 ml)	4,52
	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN (m ² /Kg)	34,21
	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (m ² /Kg)	0,27
	ELONGACIÓN (%)	3,6
	ABSORCIÓN DE AGUA (mm)	65
	RIGIDEZ AL CURVAMIENTO (m/Nm)	4,2
	TEA (J/g)	1,50

6.2 Análisis de Tendencias entre Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas

En el Apéndice D, se muestran los gráficos de tendencias y correlación entre las propiedades Biométricas y Físico Mecánicas para Celulosa de Pino.

En el Apéndice E, se muestran los gráficos de tendencias y correlación entre las propiedades Biométricas y Físico Mecánicas para Celulosa de Eucaliptus.

Se ha utilizado la metodología de suavizado “Binning” (ver capítulo 4.4.1), para visualizar tendencias entre las variables analizadas y los datos puros presentados en los Apéndices B y C, que muestran las propiedades físico mecánicas y biométricas obtenidas para celulosa de Pino y Eucaliptus.

6.2.1 Celulosa de Pino

Para el caso de la celulosa de Pino, se encuentra que el índice de tensión presenta las siguientes tendencias con las propiedades biométricas, viscosidad y revoluciones en refinador PFI (ver figuras del Apéndice D) :

Se observa una tendencia “positiva” (aumenta la tensión al aumentar la otra variable), con la siguiente variable:

- Viscosidad

Se observa una tendencia “negativa” (disminuye la tensión al aumentar la otra variable), con las siguientes variables:

- Angulo de quiebre
- Revoluciones

No se observa una tendencia (relación) con las siguientes variables:

- Largo de Fibra
- Contenido de finos

- Coarseness
- Población de fibras
- Ancho promedio de fibras
- Índice de quiebre
- Curl index

En general, se encuentra una discreta relación o tendencias del índice de tensión con las variables analizadas.

Para el caso del índice de rasgado, se encuentra lo siguiente:

Se observa una tendencia “positiva”, con las siguientes variables:

- Ancho promedio
- Revoluciones

Se observa una tendencia “negativa” con las siguientes variables:

- Viscosidad
- Población de fibras

No se observa una tendencia con las siguientes variables:

- Largo de Fibra
- Contenido de finos
- Coarseness
- Índice de quiebre
- Angulo de quiebre
- Curl index

Al igual que para la tensión, se encuentra una discreta relación o tendencias del índice de rasgado con las variables analizadas.

La mejor tendencia encontrada, tanto para la tensión como el rasgado, es con las revoluciones en refinador PFI para alcanzar un grado de drenaje de 25 °SR.

Según bibliografía (HORN, 1974), el índice de tensión presenta alta dependencia entre la longitud de la fibra, el espesor de la pared celular de la fibra y la razón entre estos parámetros (L/T). Lamentablemente en este estudio, no se tuvo la posibilidad de medir espesor de la pared celular de las fibras. Para los datos analizados, no se encontró una relación entre la tensión y la longitud de fibra (ver figura 47, Apéndice D).

Para la fibra larga, el índice de rasgado presenta alta dependencia del área de la sección transversal de la fibra y del grosor de la pared de la fibra (HORN, 1974). Para la pulpa refinada, el coarseness resulta ser influyente para el rasgado. Sin embargo, en los datos analizados no se encontró una relación entre el rasgado y el coarseness (ver figura 50, Apéndice D).

La baja relación encontrada entre los índices de resistencia y las propiedades biométricas, viscosidad y revoluciones, se explican por el bajo rango de variación que presentan los datos analizados. En efecto, en la tabla de datos analizada (ver Tabla 25, Apéndice B) el índice de tensión y rasgado presentan una desviación estándar de 1,8 y 0,5 respectivamente.

Lo anterior, se explica que la tabla de datos de propiedades construida para la celulosa de Pino, se basa en un producto homogéneo de baja variabilidad, lo cual no permite encontrar tendencias claras entre las variables analizadas. Esta situación repercute en forma negativa en los modelos de predicción que se intentaron desarrollar para Pino, entre las propiedades biométricas y físico mecánicas.

6.2.2 Celulosa de Eucaliptus

Para el caso de la celulosa de Eucaliptus, se encuentra que el índice de tensión presenta las siguientes tendencias con las propiedades biométricas, viscosidad y revoluciones con refinador PFI (ver figuras del Apéndice E):

Se observa una tendencia “positiva” (aumenta la tensión al aumentar la otra variable), con las siguientes variables:

- Viscosidad
- Largo de fibra
- Contenido de finos

- Población de fibras
- Ancho promedio de fibra
- Revoluciones

Se observa una tendencia “negativa” (disminuye la tensión al aumentar la otra variable), con las siguientes variables:

- Corseness
- Índice de quiebre
- Angulo de quiebre
- Curl index

En general, se encuentran algunas relaciones o tendencias del índice de tensión con las variables analizadas.

Para el caso del índice de rasgado, se encuentra lo siguiente:

Se observa una tendencia “positiva”, con las siguientes variables :

- Viscosidad
- Población de fibras
- Revoluciones

Se observa una tendencia “negativa” con las siguientes variables :

- Coarseness
- Índice de quiebre

No se observa una tendencia con las siguientes variables :

- Largo de fibra
- Contenido de finos
- Ancho promedio de fibra
- Angulo de quiebre

- Curl index

A diferencia de la tensión, se encuentran menores relaciones o tendencias del índice de rasgado con las variables analizadas.

A diferencia de la celulosa de Pino, para los datos analizados de Eucaliptus, se pudo encontrar una discreta relación positiva entre la tensión y la longitud de fibra (ver figura 70, Apéndice E), la cual es predicha por la bibliografía.

La bibliografía indica que para la fibra corta, el índice de rasgado depende principalmente de la longitud de fibra. Sin embargo, en los datos analizados no se encontró una relación entre el rasgado y la longitud de fibra (ver figura 69, Apéndice E).

Las mejores relaciones encontradas para Eucaliptus, entre los índices de resistencia y las propiedades biométricas, viscosidad y revoluciones, se explican por el mayor rango de variación que presentan los datos analizados. En efecto, en la tabla de datos analizada (ver Tabla 26, Apéndice C) el índice de tensión presenta una desviación estándar de 2,8.

Lo anterior, se explica porque la tabla de datos de propiedades construida para la celulosa de Eucaliptus, se basa en un producto un poco más heterogéneo que presenta mayor variabilidad en los parámetros medidos, lo cual permite encontrar algunas tendencias entre las variables analizadas. Por lo anterior, es más probable desarrollar modelos de predicción en la celulosa de Eucaliptus.

6.3 Desarrollo de Correlaciones Multivariantes

6.3.1 Celulosa de Pino

6.3.1.1 Matriz de Correlación Propiedades Celulosa de Pino.

Tabla 12. Matriz de Correlación para las Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas en Pino

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
		Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	Largo fibra LW (mm)	Finos W (%)	Coarseness (mg/m)	Población (fibras/mg)	Ancho promedio (um)	Índice de quiebre (1/mm)	Ángulo de quiebre (-)	Curl Index	Revoluciones (rev)	Rasgado (mNm ² /g)	Tensión (Nm/g)
0	Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	1,000000	0,006971	0,249012	-0,039331	0,104395	0,192292	-0,191381	-0,136971	-0,083521	-0,684400	-0,277125	0,219112
1	Largo fibra LW (mm)	0,006971	1,000000	-0,424797	0,343423	-0,643105	0,584292	-0,268228	0,137512	-0,010189	0,051091	0,132491	0,106980
2	Finos W (%)	0,249012	-0,424797	1,000000	-0,062180	0,577299	-0,163345	0,050109	-0,088172	-0,050732	-0,270795	-0,030021	-0,006192
3	Coarseness (mg/m)	-0,039331	0,343423	-0,062180	1,000000	-0,798692	0,264852	-0,254248	-0,107576	-0,413977	0,200944	0,201647	-0,117506
4	Población (fibras/mg)	0,104395	-0,643105	0,577299	-0,798692	1,000000	-0,524306	0,228120	-0,091927	0,196033	-0,266212	-0,183144	0,066852
5	Ancho promedio (um)	0,192292	0,584292	-0,163345	0,264852	-0,524306	1,000000	-0,222974	0,293519	0,096381	-0,037487	0,065291	0,047405
6	Índice de quiebre (1/mm)	-0,191381	-0,268228	0,050109	-0,254248	0,228120	-0,222974	1,000000	0,819907	0,676244	0,162775	-0,056862	-0,087271
7	Ángulo de quiebre (-)	-0,136971	0,137512	-0,088172	-0,107576	-0,091927	0,293519	0,819907	1,000000	0,765509	0,209158	-0,026664	-0,078476
8	Curl Index	-0,083521	-0,010189	-0,050732	-0,413977	0,196033	0,096381	0,676244	0,765509	1,000000	0,091321	-0,031179	-0,018424
9	Revoluciones (rev)	-0,684400	0,051091	-0,270795	0,200944	-0,266212	-0,037487	0,162775	0,209158	0,091321	1,000000	0,350547	-0,177485
11	Rasgado (mNm ² /g)	-0,277125	0,132491	-0,030021	0,201647	-0,183144	0,065291	-0,056862	-0,026664	-0,031179	0,350547	1,000000	-0,117865
12	Tensión (Nm/g)	0,219112	0,106980	-0,006192	-0,117506	0,066852	0,047405	-0,087271	-0,078476	-0,018424	-0,177485	-0,117865	1,000000

6.3.1.2 Índice de Tensión

De acuerdo a la matriz de correlación mostrada en la Tabla 12, las tres variables que mejor correlacionan con la tensión son las siguientes:

- Viscosidad
- Coarseness
- Revoluciones

6.3.1.2.1 PASO I – Propuesta de Modelo Multilineal

Se propone un modelo multilineal, que considere las tres variables:

Modelo Multilineal

Y	Tensión
x1	Viscosidad
x2	Coarseness
x3	Revoluciones

$$Y=81,383+0,00704*X1-16,799*X2-0,00013*X3$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 13. Análisis Estadístico Modelo Multilineal – Índice de Tensión para Pino

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,245011642							
Coefficiente de determinación R ²	0,060030705							
R ² ajustado	0,015969644							
Error típico	1,742889096							
Observaciones	68							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	12,41592997	4,138643322	1,362443477	0,262252306			
Residuos	64	194,4103936	3,037662399					
Total	67	206,8263235						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	81,38349963	11,94061019	6,815690183	3,91367E-09	57,52938882	105,2376104	57,52938882	105,2376104
Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	0,007047191	0,005817833	1,211308544	0,230230924	-0,004575266	0,018669647	-0,004575266	0,018669647
Coarseness (mg/m)	-16,79973262	19,77922172	-0,849362672	0,398845562	-56,31326998	22,71380475	-56,31326998	22,71380475
Revoluciones (rev)	-0,000137875	0,001384181	-0,099607909	0,92096697	-0,002903094	0,002627343	-0,002903094	0,002627343

Como $r^2 = 0,06$, la variabilidad de Y es explicada en un 6 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 (coeficiente de determinación múltiple):

$H_0 : \rho^2 = 0$ (la ecuación de regresión muestral no explica un % significativo de la varianza en Y)

$H_1 : \rho^2 > 0$ (si la explica)

El valor $p = 0,26$ (valor crítico de F), es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , lo que implica que el modelo no es bueno.

Pero antes de rechazar el modelo, se deben realizar las pruebas de hipótesis para los coeficientes β_i .

$H_0 : \beta_1 = 0$ (el parámetro del modelo poblacional no es significativo)

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ (es significativo)

El valor $p = 0,23$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 no es significativo.

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

El valor $p = 0,399$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_2 no es significativo.

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

El valor $p = 0,92$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_3 no es significativo.

Por lo anterior, se concluye el modelo multilineal propuesto no es adecuado.

6.3.1.2.2 PASO II - Propuesta de Modelo Lineal Simple

De acuerdo a lo anterior, se propone un modelo lineal simple que considere la variable que tenga la correlación más alta con la tensión, esto es la Viscosidad.

Modelo Lineal Simple

Y	Tensión
x1	Viscosidad

$$"Y=77,343+0,007596*X1"$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 14. Análisis Estadístico Modelo Lineal Simple – Índice de Tensión para Pino

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,219111902							
Coefficiente de determinación R ²	0,048010026							
R ² ajustado	0,033585935							
Error típico	1,727217882							
Observaciones	68							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	9,92973712	9,92973712	3,328461208	0,07261729			
Residuos	66	196,8965864	2,983281612					
Total	67	206,8263235						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	77,34361899	3,275565118	23,61229779	6,73717E-34	70,8037423	83,88349568	70,8037423	83,88349568
Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	0,007596402	0,004163765	1,824407084	0,07261729	-0,000716823	0,015909626	-0,000716823	0,015909626

Como $r^2 = 0,048$, la variabilidad de Y es explicada en un 4,8 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

El valor $p = 0,072$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , lo que implica que el modelo no es bueno.

Pero antes de rechazar el modelo, se debe realizar la prueba de hipótesis para el coeficiente β_1 .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 0,072$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 no es significativo.

Luego el modelo lineal simple no es adecuado. Es decir, para este caso no es posible encontrar un buen modelo predictor.

6.3.1.3 Índice de Rasgado

De acuerdo a la matriz de correlación mostrada en la Tabla 12, las tres variables que mejor se correlacionan con el rasgado son las siguientes:

- Viscosidad
- Coarseness
- Revoluciones

6.3.1.3.1 PASO I – Propuesta de Modelo Multilineal

Se propone un modelo multilineal, que considere las tres variables:

Modelo Multilineal

Y	Rasgado
x1	Viscosidad
x2	Coarseness
x3	Revoluciones

$$"Y=6,233-0,00099*X1+6,859*X2+0,000608*X3"$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 15. Análisis Estadístico Modelo Multilineal – Índice de Rasgado para Pino

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,381757434							
Coefficiente de determinación R ²	0,145738739							
R ² ajustado	0,105695242							
Error típico	0,490746562							
Observaciones	68							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	2,629534057	0,876511352	3,639510806	0,017266713			
Residuos	64	15,41326006	0,240832188					
Total	67	18,04279412						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	6,233019196	3,362126378	1,853892	0,068364034	-0,4836003	12,94963869	-0,4836003	12,94963869
Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	-0,000994168	0,001638131	-0,606891362	0,546070048	-0,004266712	0,002278376	-0,004266712	0,002278376
Coarseness (mg/m)	6,859873322	5,569249983	1,23174096	0,222552505	-4,265982405	17,98572905	-4,265982405	17,98572905
Revoluciones (rev)	0,000608156	0,000389745	1,560396638	0,123597851	-0,000170448	0,001386761	-0,000170448	0,001386761

Como $r^2 = 0,146$, la variabilidad de Y es explicada en un 14,6 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

El valor $p = 0,017$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que indica que el modelo es bueno.

Se realizan las pruebas de hipótesis para los coeficientes β_i .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 0,54$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 no es significativo.

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

El valor $p = 0,22$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_2 no es significativo.

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

El valor $p = 0,12$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_3 no es significativo.

De esta manera concluimos que el modelo multilíneal propuesto no es adecuado.

6.3.1.3.2 PASO II - Propuesta de Modelo Lineal Simple

De acuerdo a lo anterior, se construirá un modelo lineal simple que considere la variable que tenga la correlación más alta con la tensión, esto es las Revoluciones.

Modelo Lineal Simple

Y	Rasgado
x1	Revoluciones

$$"Y=5,15+0,00083*X1"$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 16. Análisis Estadístico Modelo Lineal Simple – Índice de Rasgado para Pino

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,350546622							
Coefficiente de determinación R ²	0,122882934							
R ² ajustado	0,109593282							
Error típico	0,489675877							
Observaciones	68							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	2,217151479	2,217151479	9,246512195	0,003382022			
Residuos	66	15,82564264	0,239782464					
Total	67	18,04279412						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,150083255	1,714458526	3,003912417	0,003763527	1,727056403	8,573110107	1,727056403	8,573110107
Revoluciones (rev)	0,000837249	0,000275338	3,040807819	0,003382022	0,000287519	0,001386978	0,000287519	0,001386978

Como $r^2 = 0,122$, la variabilidad de Y es explicada en un 12,2 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza las prueba de hipótesis para ρ^2 .

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

El valor $p = 0,003$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que indica que el modelo es bueno.

Se realiza la prueba de hipótesis para el coeficiente β_1 .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 0,003$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 es significativo.

Luego el modelo lineal simple es adecuado.

$$"Y=5,15+0,00083*X1"$$

Verificación del Modelo

En la tabla adjunta, se verifica para un set de datos, los valores de índice de rasgado predichos por el modelo (calculados) y se comparan con los valores observados.

Tabla 17. Verificación Modelo Índice de Rasgado para Pino Vs. Revoluciones

Pino rasgado		x observado	y observado	y calculado	Diferencia	Error %
Modelo Lineal Simple		5.900	9,7	10,0	-0,3	3,6
Y	Rasgado	6.100	11,1	10,2	0,9	8,0
x1	Revoluciones	5.990	10,1	10,1	0,0	0,2
"Y=5,15+0,00083*X1"						

6.3.1.4 Discusión de Resultados Obtenidos para los Modelos Propuestos (Pino)

Como era de esperar, con lo observado en el análisis de tendencia para los parámetros de la celulosa de Pino, se detecta en la matriz de correlación (Tabla 12) una baja correlación entre las variables de resistencia y las biométricas.

Para el índice de tensión, se desarrolló un modelo multilíneal con aquellos parámetros que presentan una mayor correlación con este índice (viscosidad, coarseness y revoluciones). Sin embargo, el modelo propuesto no aprobó las pruebas de hipótesis para el coeficiente de determinación múltiple (ρ^2) y los parámetros del modelo poblacional (β_i), lo cual indicó lo poco factible que es proponer en este caso un modelo de este tipo con la información disponible para realizarlo.

En una segunda etapa del análisis, se trató de desarrollar un modelo lineal simple con el parámetro viscosidad de la celulosa, la cual presenta la mejor correlación con el índice de tensión. Sin embargo, el modelo tampoco pudo pasar las pruebas de hipótesis. Esto es consistente con lo obtenido con el análisis del modelo multilíneal, donde el coeficiente (β_i) asociado a la variable viscosidad resultó ser no significativo.

Para el índice de rasgado, se propuso un modelo multilineal con los parámetros viscosidad, coarseness y revoluciones refinador PFI (para alcanzar 30° SR), los cuales presentaban las mayores correlaciones con este índice. Sin bien, el modelo propuesto aprobó las pruebas de hipótesis del coeficiente de determinación múltiple (ρ^2), no aprobó las pruebas de hipótesis de los parámetros del modelo poblacional (β_i), indicado que el modelo desarrollado no es adecuado.

Al igual que para el caso del índice de tensión, se desarrolló un modelo lineal simple con el parámetro revoluciones, el cual presenta la mejor correlación con el índice de rasgado. Este modelo lineal simple pasó las pruebas de hipótesis, indicando que es adecuado. Sin embargo, el coeficiente de determinación obtenido para el modelo es bajo ($R^2 = 0,12$), lo cual indica que éste no explica en forma adecuada la variabilidad de Y (índice de rasgado). Lo anterior, se comprueba con la verificación del modelo desarrollado (ver tabla 17), donde se detectan errores del 8 % en los valores calculados.

6.3.2 Celulosa de Eucaliptus

6.3.2.1 Matriz de Correlación Propiedades Celulosa de Eucaliptus

Tabla 18. Matriz de Correlación para las Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas en Eucaliptus

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
		Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	Largo fibra LW (mm)	Finos W (%)	Coarseness (mg/m)	Población (fibras/mg)	Ancho promedio (um)	Índice de quiebre (1/mm)	Ángulo de quiebre (-)	Curl Index	Revoluciones (rev)	Rasgado (mNm ² /g)	Tensión (Nm/g)
0	Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	1,000000	-0,393324	0,212501	-0,153721	0,240509	-0,181942	-0,192744	-0,284665	-0,305748	-0,084683	0,130092	0,164788
1	Largo fibra LW (mm)	-0,393324	1,000000	-0,372767	0,096333	-0,208426	0,198093	-0,165220	0,012988	0,200008	0,057263	0,065606	0,036634
2	Finos W (%)	0,212501	-0,372767	1,000000	-0,316803	0,453788	0,044350	0,020544	-0,009369	-0,142047	0,077575	0,097335	0,214868
3	Coarseness (mg/m)	-0,153721	0,096333	-0,316803	1,000000	-0,970658	-0,041374	-0,091452	-0,079214	-0,034774	-0,242516	-0,131239	-0,256337
4	Población (fibras/mg)	0,240509	-0,208426	0,453788	-0,970658	1,000000	-0,017838	0,081061	0,048836	-0,046204	0,262320	0,191149	0,309724
5	Ancho promedio (um)	-0,181942	0,198093	0,044350	-0,041374	-0,017838	1,000000	-0,249475	-0,162552	-0,169954	-0,146486	0,004837	0,124420
6	Índice de quiebre (1/mm)	-0,192744	-0,165220	0,020544	-0,091452	0,081061	-0,249475	1,000000	0,963389	0,760505	0,097359	-0,056891	-0,214993
7	Ángulo de quiebre (-)	-0,284665	0,012988	-0,009369	-0,079214	0,048836	-0,162552	0,963389	1,000000	0,832353	0,113501	-0,032536	-0,195818
8	Curl Index	-0,305748	0,200008	-0,142047	-0,034774	-0,046204	-0,169954	0,760505	0,832353	1,000000	0,063294	-0,085785	-0,351158
9	Revoluciones (rev)	-0,084683	0,057263	0,077575	-0,242516	0,262320	-0,146486	0,097359	0,113501	0,063294	1,000000	0,404771	0,575654
11	Rasgado (mNm ² /g)	0,130092	0,065606	0,097335	-0,131239	0,191149	0,004837	-0,056891	-0,032536	-0,085785	0,404771	1,000000	0,434668
12	Tensión (Nm/g)	0,164788	0,036634	0,214868	-0,256337	0,309724	0,124420	-0,214993	-0,195818	-0,351158	0,575654	0,434668	1,000000

6.3.2.2 Índice de Tensión

De acuerdo a la matriz de correlación mostrada en la Tabla 18, las tres variables que mejor se correlacionan con la tensión son las siguientes:

- Revoluciones
- Curl Index
- Población

6.3.2.2.1 PASO I – Propuesta de Modelo Multilineal

Se propone un modelo multilineal que considere las tres variables:

Modelo Multilineal

Y	Tensión
x1	Revoluciones
x2	Curl Index
x3	Poblacion

$$"Y=55,1488+0,01403*x1-161,411*x2+0,00013*x3"$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 19. Análisis Estadístico Modelo Multilineal – Índice de Tensión para Eucaliptus

Estadísticas de la regresión									
Coefficiente de correlación múltiple	0,708276841								
Coefficiente de determinación R ²	0,501656083								
R ² ajustado	0,480599298								
Error típico	2,00856657								
Observaciones	75								
ANÁLISIS DE VARIANZA									
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F				
Regresión	3	288,3418836	96,1139612	23,82396355	8,92068E-11				
Residuos	71	286,4381164	4,034339668						
Total	74	574,78							
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%	
Intercepción	55,14885598	4,46164482	12,36065581	2,26751E-19	46,252589	64,04512296	46,252589	64,04512296	
Revoluciones (rev)	0,014032691	0,002175563	6,450143435	1,17712E-08	0,009694743	0,01837064	0,009694743	0,01837064	
Curl Index	-161,4117966	35,73226739	-4,517255924	2,43674E-05	-232,6599132	-90,16367994	-232,6599132	-90,16367994	
Población (fibras/mg)	0,000130045	7,81307E-05	1,66445637	0,100428821	-2,57431E-05	0,000285833	-2,57431E-05	0,000285833	

Como $r^2 = 0,501$, la variabilidad de Y es explicada en un 50,1 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

El valor $p = 8,92068E-11$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que indica que el modelo es bueno.

Se realizan las pruebas de hipótesis para los coeficientes β_i .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 1,17712E-08$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 es significativo.

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

El valor $p = 2,43674E-05$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_2 es significativo.

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

El valor $p = 0,100428821$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_3 no es significativo.

6.3.2.2 PASO II - Propuesta de Modelo con dos Variables

De acuerdo a lo anterior, eliminaremos la variable Población para proponer un modelo de dos variables.

Modelo Multilineal de 2 Variables

Y Tensión

x1 Revoluciones

x2 Curl Index

$$"Y=58,4269+0,0149961*X1-165,290*X2"$$

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 20. Análisis Estadístico Modelo dos Variables – Índice de Tensión para Eucaliptus

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,694413953							
Coefficiente de determinación R ²	0,482210739							
R ² ajustado	0,467827704							
Error típico	2,033111025							
Observaciones	75							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	277,1650885	138,5825442	33,52635502	5,12282E-11			
Residuos	72	297,6149115	4,133540438					
Total	74	574,78						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	58,42695901	4,052350965	14,41804017	6,41689E-23	50,34874512	66,50517291	50,34874512	66,50517291
Revoluciones (rev)	0,014996135	0,002122774	7,06440643	8,40796E-10	0,010764463	0,019227807	0,010764463	0,019227807
Curl Index	-165,2905677	36,0919117	-4,579712184	1,90476E-05	-237,2384778	-93,34265771	-237,2384778	-93,34265771

Como $r^2 = 0,482$, la variabilidad de Y es explicada en un 48,2 % por el modelo.

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

$$H_0 : \rho^2 = 0$$

$$H_1 : \rho^2 > 0$$

El valor $p = 5,12282E-11$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que indica que el modelo es bueno.

Se realizan las pruebas de hipótesis para los coeficientes β_i .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 8,40796E-10$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 es significativo.

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

El valor $p = 1,90476E-05$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_2 es significativo.

Entonces el modelo propuesto es apropiado:

$$"Y=58,4269+0,0149961*X1-165,290*X2"$$

Verificación del Modelo

En la tabla adjunta, se verifica para un set de datos, los valores de índice de tensión predichos por el modelo (calculados) y se comparan con los valores observados.

Tabla 21. Verificación Modelo Índice de Tensión para Eucaliptus Vs. Revoluciones y Curl Index

Euca tensión		x1 observado	x2 observado	y observado	y calculado	Diferencia	Error %
Modelo Multilineal 2 Variables		1.100	0.095	62,5	59,2	3,3	5,2
Y	Tensión	1.180	0.087	63,7	61,7	2,0	3,1
x1	Revoluciones	1.020	0.089	60,3	59,0	1,3	2,1
x2	Curl Index						
"Y=58,4269+0,0149961*X1-165,290*X2"							

6.3.2.3 Índice de Rasgado

De acuerdo a la matriz de correlación mostrada en la Tabla 18, las tres variables que mejor se correlacionan con el rasgado son las siguientes :

- Revoluciones
- Población
- Coarseness

6.3.2.3.1 PASO I – Propuesta de Modelo Multilineal

Se propone un modelo multilineal que considere las tres variables:

Modelo Multilineal

Y Rasgado
 x1 Revoluciones
 x2 Poblacion
 x3 Coarseness

"Y=-0,45077+0,001329*X1+0,0001203*X2+67,1299*X3"

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente :

Tabla 22. Análisis Estadístico Modelo Multilineal – Índice de Rasgado para Eucaliptus

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,463045727							
Coefficiente de determinación R ²	0,214411345							
R ² ajustado	0,181217458							
Error típico	0,363219953							
Observaciones	75							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	3	2,556526525	0,852175508	6,459362414	0,000627394			
Residuos	71	9,366940142	0,131928734					
Total	74	11,92346667						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,450770812	3,587414539	-0,125653394	0,900361423	-7,603872144	6,70233052	-7,603872144	6,70233052
Revoluciones (rev)	0,001329966	0,000392748	3,386309424	0,001157852	0,000546849	0,002113083	0,000546849	0,002113083
Población (fibras/mg)	0,000120364	5,69588E-05	2,113180777	0,038101339	6,79163E-06	0,000233937	6,79163E-06	0,000233937
Coarseness (mg/m)	67,12995862	34,12469814	1,967195676	0,053068733	-0,912756004	135,1726732	-0,912756004	135,1726732

Como $r^2 = 0,2144$, la variabilidad de Y es explicada en un 21,44 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

H0 : $\rho^2 = 0$

H1 : $\rho^2 > 0$

El valor $p = 0,0006$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , lo que indica que el modelo es bueno.

Se realizan las pruebas de hipótesis para los coeficientes β_i .

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 0,0011$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 es significativo.

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

El valor $p = 0,038$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_2 es significativo.

Sin embargo, el valor p es muy próximo al valor de $\alpha = 0,05$, por lo que se descarta esta variable como predictora.

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

El valor $p = 0,053$ es mayor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, no se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_3 no es significativo.

6.3.2.3.2 PASO II - Propuesta de Modelo Lineal Simple

De acuerdo a lo anterior, se eliminará la variable Población y Coarseness para proponer un modelo simple, que considera como variable predictora las Revoluciones.

Modelo Lineal Simple

Y Rasgado
 x1 Revoluciones

"Y=6,8037+0,001456*X1"

El análisis estadístico de este modelo es el siguiente:

Tabla 23. Análisis Estadístico Modelo Lineal Simple – Índice de Rasgado para Eucalipto

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,404770976							
Coefficiente de determinación R ²	0,163839543							
R ² ajustado	0,15238529							
Error típico	0,369559741							
Observaciones	75							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	1,953535327	1,953535327	14,30381755	0,000315777			
Residuos	73	9,96993134	0,136574402					
Total	74	11,92346667						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	6,803760037	0,382843601	17,77164359	3,14496E-28	6,04075385	7,566766223	6,04075385	7,566766223
Revoluciones (rev)	0,001456403	0,000385084	3,782038809	0,000315777	0,000688931	0,002223874	0,000688931	0,002223874

Como $r^2 = 0,1638$, la variabilidad de Y es explicada en un 16,38 % por el modelo.

Pruebas de Hipótesis

Se realiza la prueba de hipótesis para ρ^2 .

H0 : $\rho^2 = 0$

H1 : $\rho^2 > 0$

El valor p = 0,00031 es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H0, lo que indica que el modelo es bueno.

Se realiza la prueba de hipótesis para el coeficiente β_1 .

H0 : $\beta_1 = 0$

$$H1 : \beta_1 \neq 0$$

El valor $p = 0,00031$ es menor que el nivel de significación α , para $\alpha = 0,05$. Por lo tanto, se rechaza H_0 , por lo que el coeficiente β_1 es significativo.

Entonces el modelo propuesto es apropiado:

$$"Y=6,8037+0,001456*X1"$$

Verificación del Modelo

En la tabla adjunta, se verifica para un set de datos, los valores de índice de rasgado predichos por el modelo (calculados) y se comparan con los valores observados.

Tabla 24. Verificación Modelo Índice de Rasgado para Eucaliptus Vs. Revoluciones

Euca rasgado		x observado	y observado	y calculado	Diferencia	Error %
Modelo Lineal Simple		1.100	8.4	8.4	0.0	0.1
Y	Rasgado	1.180	8.3	8.5	-0.2	2.7
x1	Revoluciones	1.020	8.9	8.3	0.6	6.9
"Y=6,8037+0,001456*X1"						

6.3.2.4 Discusión de Resultados Obtenidos para los Modelos Propuestos (Eucaliptus)

Con lo observado en el análisis de tendencia para los parámetros de la celulosa de Eucaliptus, es posible detectar en la matriz de correlación para las propiedades de Eucaliptus (Tabla 18), una mejor correlación entre las variables respecto a lo obtenido para Pino.

Para el índice de tensión, se desarrolló un modelo multilíneal con aquellos parámetros que presentaban una mayor correlación con este índice (revoluciones, curl index y población de fibras). Sin bien, el modelo propuesto aprobó la prueba de hipótesis para el coeficiente de determinación múltiple (ρ^2) y los parámetros del modelo poblacional (β_i) para las variables revoluciones y curl index, no aprobó la

prueba de hipótesis para el parámetro del modelo poblacional relacionado con la población de fibras (coeficiente poco significativo), indicando que el modelo propuesto resulta no ser adecuado.

Con los resultados anteriores, se propuso un modelo con dos variables para el índice de tensión (revoluciones y curl index), el cual pasó las pruebas de hipótesis para el coeficiente de determinación múltiple (ρ^2) y los parámetros del modelo poblacional (β_i), indicando que el modelo propuesto es adecuado. Sin embargo, el coeficiente de determinación obtenido para el modelo resultó ser regular ($R^2 = 0,48$), lo cual indica que el modelo explica en forma mediana la variabilidad de Y (índice de tensión). Lo anterior, se comprueba con la verificación del modelo desarrollado (ver tabla 21), donde se detectan errores del 5 % en los valores calculados.

Para el índice de rasgado, se propuso un modelo multilineal con los parámetros revoluciones refinador PFI (para alcanzar 30° SR), población de fibras y coarseness, los cuales presentaban las mayores correlaciones con este índice. Sin bien, el modelo propuesto aprobó las pruebas de hipótesis del coeficiente de determinación múltiple (ρ^2), no aprobó las pruebas de hipótesis de los parámetros del modelo poblacional (β_i), asociados a las variables población de fibras y coarseness, indicando que el modelo desarrollado resulta no ser adecuado.

Al igual que para el análisis efectuado para la celulosa de Pino, en una segunda etapa se desarrolló un modelo lineal simple con el parámetro revoluciones, el cual presenta la mejor correlación con el índice de rasgado. Este modelo lineal simple pasó las pruebas de hipótesis, indicando que es adecuado. Sin embargo, el coeficiente de determinación obtenido para el modelo es bastante bajo ($R^2 = 0,16$), lo cual indica que el modelo no explica en forma satisfactoria la variabilidad de Y (índice de rasgado). Lo anterior, se comprueba con la verificación del modelo desarrollado (ver tabla 24), donde se detectan errores del 7 % en los valores calculados.

7. CONCLUSIONES

Respecto a los resultados obtenidos en el presente estudio, se puede establecer las siguientes conclusiones generales:

7.1 Celulosa de Pino

- Tanto en el análisis de tendencias como en los modelos de predicción propuestos, se encuentra una baja relación entre los parámetros analizados y el índice de tensión. En efecto, no fue posible para el índice de tensión generar un modelo predictor con las variables analizadas que tuviera una representatividad estadística.
- Para el índice de rasgado fue posible encontrar discretamente mayores tendencias y correlaciones. Sin embargo, estadísticamente solo fue posible ajustar un modelo lineal simple, con las revoluciones en refinador PFI para alcanzar los 25 °SR. El coeficiente de determinación obtenido para el modelo fue bajo ($R^2 = 0,12$), lo cual indica que el modelo no explica en forma adecuada la variabilidad de Y (índice de rasgado).
- Se estima que la causa para no encontrar mayores relaciones entre las propiedades físico mecánicas analizadas (tensión y rasgado) y las biométricas, más la viscosidad y revoluciones en refinador PFI, se debe a que la data generada en laboratorio presentó una bajo rango de variación en los parámetros que interesaba predecir.
- Lo expuesto en el punto anterior, se debe fundamentalmente a que la celulosa de Pino producida en Planta nueva aldea presenta una baja variación en sus características de resistencia y biométricas de la fibras (producto homogéneo), lo cual impide proyectar relaciones y modelos de predicción entre ellos.
- Para haber podido observar en los datos mejores relaciones entre los parámetros analizados, se requería que las propiedades de resistencia variaran en un mayor

rango, influenciadas por variaciones perceptibles estadísticamente en las propiedades biométricas.

7.2 Celulosa de Eucaliptus

- Tanto en el análisis de tendencias como en los modelos de predicción propuestos, se encontraron mejores relaciones entre los parámetros analizados y el índice de tensión y rasgado, respecto a lo encontrado para la celulosa de Pino.
- Para el índice de tensión fue posible encontrar mayores tendencias y correlaciones respecto a lo encontrado con Pino. Estadísticamente fue posible ajustar un modelo multilíneal con dos variables, con las revoluciones en refinador PFI para alcanzar 30 °SR y el índice de Curl. El coeficiente de determinación obtenido para el modelo fue regular ($R^2 = 0,48$), lo cual indica que el modelo explica en forma mediana la variabilidad de Y (índice de tensión).
- Para el índice de rasgado, solo fue posible ajustar un modelo lineal simple con las revoluciones en refinador PFI. El coeficiente de determinación obtenido para el modelo fue bajo ($R^2 = 0,16$), lo cual indica que el modelo no explica en forma satisfactoria la variabilidad de Y (índice de rasgado).
- En la celulosa de Eucaliptus se encontraron mayores relaciones respecto al Pino, entre las propiedades físico mecánicas analizadas (tensión y rasgado) y las biométricas, más la viscosidad y revoluciones en refinador PFI. Lo anterior, se debe a que los datos generados en laboratorio presentaron un mayor rango de variación en los parámetros que interesaba predecir.
- Lo expuesto en el punto anterior, se debe fundamentalmente a que en los datos la celulosa de Eucaliptus producida en Planta nueva aldea presentan una mayor variación que el Pino, en sus características de resistencia y biométricas de la fibras, lo cual permite proyectar mejores relaciones y modelos de predicción entre ellos.

- Sin embargo lo anterior, los modelos analizados para las propiedades del Eucaliptus, también presentaron una discreta representatividad estadística.

8. RECOMENDACIONES

En general, los temas tratados en el presente trabajo permitirán desarrollar a futuro muchos más estudios de profundización, los cuales complementarán la información analizada.

Resultaría interesante poder medir en los laboratorios de Planta Nueva Aldea, en la celulosa de Pino y Eucaliptus, el espesor de pared de las fibras, ya que la literatura indica la importante influencia que tiene este parámetro, junto a la razón con la longitud de fibra, en el índice de tensión.

Para poder correlacionar de mejor forma los parámetros de resistencia y biométricos de las pulpas producidas en Planta Nueva Aldea, se hace necesario generar una data que incluya variaciones en la calidad del producto final en cuanto a los parámetros mencionados. En los dato a analizar deben existir variaciones, por ejemplo, del índice de tensión o rasgado que puedan ser explicados por diferencias significativas en las propiedades biométricas.

Lo anterior, puede ser logrado con la producción de celulosa que tenga variaciones en las calidades de las maderas que sean alimentadas al proceso (digestor y líneas de fibra).

Independiente de los discretos resultados obtenidos en el presente estudio, para poder obtener modelos de predicción de las propiedades físico mecánicas a partir de las características biométricas de las fibras, este objetivo se mantiene vigente como una necesidad de trabajo en Planta Nueva Aldea.

En efecto, ha ocurrido en Planta Nueva Aldea la situación de tener que retrasar el despacho de una celulosa en stock, por no disponer de la evaluación de propiedades físico mecánica de esta pulpa, debido a desperfectos en los equipos medidores de estas propiedades en el Laboratorio de Fibra.

Independiente del no poder cumplir con el objetivo original planteado en el presente estudio, se cree que éste permitirá incrementar la “cultura” del conocimiento respecto a las características de la celulosa producida en Planta Nueva Aldea, muy orientada actualmente a los parámetros de calidad como blancura, suciedad e índices de resistencia, a parámetros morfológicos como son el largo y ancho de fibra, coarseness, población, contenido de finos, “Kink” (índice de

quiebre) y “Curls”, que dan cuenta de las características y las transformaciones y deformaciones que sufren las fibras en el proceso productivo.

9. BIBLIOGRAFÍA

CELSO, F. **The Eucalyptus Fibers and The Kraft Pulp Quality Requirements for Paper Manufacturing**, Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, Febrero-Marzo 2007.

COOK, D.; WEISBERG, S. **Residuals and Influence in Regression**, Chapman and Hall, p. 17-20, 1982.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA. **Fraccionamiento integral de vegetales no alimentarios para la obtención de pasta celulósica y sub productos**. Universidad de Huelva. 2009

DON, D. **Eucalyptus. A web Guide to the Eucalyptus**. Variación del área de la pared celular en Pinus Radiata. Disponible en www.conaf.cl. Acceso en: 10/01/2010.

FERNANDEZ, A., SALVO, L. **Variación del área de pared celular en Pinus radiata Maderas, Ciencias Tecnológicas**, .v 5.n1.Concepción, 2003.

HAN, J.; KAMBER, M. **Data Mining: Concepts and Techniques**, Morgan Publishers, p. 49-67, 2006.

HANDBOOK. **Fibre Analysis and Process Applications in The Pulp and Paper Industry**, p. 3-9, 2000.

HANKE, J.; REITSCH, A. **Estadística para Negocios**. Editorial Mac Graw Hill. Capítulo 14, p. 522-562; Capítulo 15, p. 582-601, 1997

HAKÂN, K. **Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry**, Suiza, Elander Tofters, p. 9-19, 2006.

HAKÂN K. **Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry**, Suiza, Elander Tofters, p. 41-67, 2006.

HORN, R. **Morphology of Wood Pulp Fiber From Softwood and Influence on Paper Strength**. U.S. Dep. of Agriculture / Forest Service / Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, 1974.

HORN, R. **Morphology of Wood Pulp Fiber From Softwood and Influence on Paper Strength**. U.S. Dep. of Agriculture / Forest Service / Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, 1974

LEVLIN, J.; SODERHJLN, L.. **Pulp and Paper Testing**. FAPET 1999.

LORENTZEN & WETTRE. **Instrucciones de manejo. L&W Tensil Tester/L&W Fracture Toughness Tester**. EDITION1.2, 1998.

MARIANO, S; TORRES, M; FERNANDEZ, A; MORALES, E. **Variabilidad en sentido radial en *Eucaliptus Nitens* y su efecto sobre pulpa Kraft**, 8 páginas, Laboratorio de Pulpa y Papel, Instituto de Tecnología de Productos Forestales Universidad Austral de Valdivia. Valdivia. Chile, 2006.

WIMMER, R. **Direct Effects of Wood Characteristics on pulp and Handsheet Properties of *Eucalyptus Globulus***. *Holzforschung* VOL. 56, 2002, N°3.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Equipos Utilizados en el Laboratorio de Fibra de Planta Nueva Aldea

Los principales equipos disponibles en el Laboratorio de Fibra de la Planta, se describen a continuación:

Descripción : **DESINTEGRADOR TAPPI.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 25. Desintegrador Tappi.

Descripción : **AGITADOR DE PALETA CON PEDESTAL.**

Marca : PTI.

Modelo : P95555.E000.

Proveedor : Tiar Ltda.



Figura 26. Agitador de paleta con pedestal.

Descripción : **FORMADORA DE HOJAS.**

Marca : TMI.

Modelo : 73-62-00-0001.

Proveedor : Testing Machines Inc.

Observación : La formación de hojas consiste en obtener 13 hojas por punto de refinación. Diez de éstas son destinadas a la determinación de propiedades físico mecánicas y las tres restantes son destinadas al análisis de rigidez al curvamiento.



Figura 27. Formador de hoja.

Descripción : **PRENSADORA PARA HOJAS TAPPI.**

Marca : TMI.

Modelo : 73-50-00-0002.

Proveedor : Testing Machines Inc.

Observación : Con el prensado termina el proceso de formación de hojas.



Figura 28. Prensadora para hojas Tappi.

Descripción : **GUILLOTINA HOJA SIMPLE.**

Marca : TMI.

Modelo : 22-02-01.

Proveedor : Testing Machines Inc.

Observación : Sirve para cortar las muestras para los análisis físico-mecánicos.



Figura 29. Guillotina hoja simple.

Descripción : **GUILLOTINA HOJA DOBLE.**

Marca : TMI.

Modelo : 22-34-04.

Proveedor : Testing Machines Inc.

Observación : Sirve para cortar las muestras para los análisis físico-mecánicos.



Figura 30. Guillotina hoja doble.

Descripción : **MEDIDOR DE TENSIÓN.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : TENSILE TESTER SE 062.

Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 31. Medidor de tensión.

Descripción : **MEDIDOR DE RASGADO.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : TEARING TESTER SE 009.

Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 32. Medidor de rasgado.

Descripción : **MEDIDOR DE EXPLOSIÓN.**

Marca : Lorentzen & Wettre.
Modelo : BURSTING STRENGTH TESTER SE 180.
Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 33. Medidor de explosión.

Descripción : **MEDIDOR DE RESISTENCIA AL AIRE.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : AIR PERMEANCE TESTER SE 166.

Proveedor : Elof Hansson Chile.

Observación : El aire atraviesa el papel debido a una presión ejercida y se mide el tiempo en que pasa una cantidad determinada de aire.



Figura 34. Medidor de resistencia al aire.

Descripción : **MEDIDOR DE ESPESOR.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : MICROMETRO SE 250.

Proveedor : Elof hansson Chile.

Observación : Mide el espesor de la hojas, para posteriormente medir el volumen específico en hojas de ensayo.



Figura 35. Medidor de espesor.

Descripción : **MEDIDOR DE RIGIDEZ.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : BENDING RESISTANCE TESTER SE 0160.

Proveedor : Elof Hansson Chile.

Observación : La rigidez al curvamiento representa el trabajo que se necesita aplicar para obtener una curvatura, en un ángulo determinado de una muestra de papel.

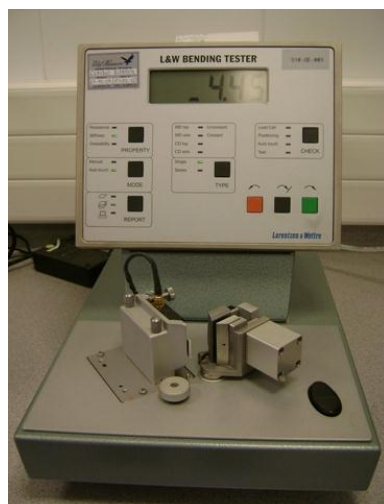


Figura 36. Medidor de rigidez.

Descripción : **MEDIDOR DE CANADIAN STANDARD- FREENESS.**

Marca : Robert Mitchell.

Proveedor : Elof Hansson Chile.

Observación : Mide la resistencia al drenaje de una suspensión de pulpa en agua.



Figura 37. Medidor de canadian standard-freeness.

Descripción : **MOLINO REFINADOR PFI.**

Marca : PFI.

Modelo : PFI-MILL Original.

Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 38. Molino refinador PFI.

Descripción : **PLANCHA DE SECADO RÁPIDO.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : SE 257.

Proveedor : Elof Hansson Chile.



Figura 39. Plancha de secado rápido.

Descripción : **VISCOSÍMETRO AUTOMÁTICO.**

Marca : Berg Technology.

Modelo : Viscomat 32020/ZW.

Proveedor : Elof hansson Chile.



Figura 40. Viscosímetro automático.

Descripción : **MEDIDOR DE BLANCURA Y OPACIDAD.**

Marca : Lorentzen & Wettre.

Modelo : ELREPHO SE 070R (s/PC)-071(c/PC).

Proveedor : Elob Hansson Chile.



Figura 41. Medidor de blancura y opacidad.

Descripción : **MEDIDOR DE CAPILARIDAD POR KLEMM (TIMER E231).**

Marca : PTI.

Modelo : p41010.E000.

Proveedor : Tiar Ltda.

Observación : La capilaridad en agua se basa en el método de Klemm, donde se determina la capilaridad del agua bajo condiciones estandarizadas de temperatura y humedad.



Figura 42. Medidor de capilaridad por Klemm.

Descripción : **ANALIZADOR DE FIBRA.**

Marca : OPTEST.

Modelo : LDA02 HiRes FQA.

Proveedor : Technology Trade Consulting S.A.

Observación : Actualmente se realiza la determinación de propiedades biométricas a través de un Analizador de Fibra con luz polarizada, obteniendo como resultado las principales propiedades biométricas de la fibra como largo, ancho y coarseness. De esta forma, se puede caracterizar la fibra asociada a una especie en particular. Por otro lado, permite explicar el comportamiento de algunas propiedades físico-mecánicas que están relacionadas a estas características morfológicas.



Figura 43. Analizador de fibra.

APENDICE B

Evaluación Propiedades Celulosa de Pino.

Tabla 25. Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas Pino

Fecha	Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	Largo fibra LW (mm)	Finos W (%)	Coarseness (mg/m)	Población (fibras/mg)	Ancho promedio (um)	Índice de quiebre (1/mm)	Ángulo de quiebre (-)	Curl Index	Revoluciones (rev)	Rasgado (mNm ² /g)	Tensión (Nm/g)
18/ago/2010	793	2,080	5,40	0,164	6.898	27,1	1,78	47,7	0,125	6.420	10,2	85,5
19/ago/2010	862	2,191	4,40	0,153	6.446	28,3	1,73	49,3	0,128	6.000	9,6	83,8
22/ago/2010	838	2,239	4,80	0,174	5.764	28,4	1,67	48,5	0,127	6.000	10,8	77,9
23/ago/2010	828	2,194	4,30	0,167	5.865	27,9	1,80	51,4	0,137	6.000	10,4	81,6
24/ago/2010	814	2,156	5,10	0,162	6.484	28,0	1,82	52,6	0,139	6.000	10,1	81,6
25/ago/2010	858	2,194	4,70	0,161	6.287	27,4	1,88	54,1	0,146	6.000	10,0	85,7
26/ago/2010	866	2,173	5,30	0,173	6.143	27,7	1,83	52,8	0,136	6.000	10,2	82,1
30/ago/2010	862	2,254	4,50	0,172	5.689	28,0	1,78	52,2	0,131	6.010	10,2	83,2
31/ago/2010	864	2,171	4,90	0,158	6.498	28,0	1,81	52,8	0,134	6.000	10,0	83,7
03/sep/2010	838	2,241	4,50	0,162	6.130	28,1	1,79	52,0	0,139	6.000	10,7	84,5
05/sep/2010	884	2,215	5,20	0,171	6.117	27,9	1,76	51,4	0,138	6.000	10,9	86,0
06/sep/2010	857	2,208	5,20	0,157	6.670	27,9	1,79	52,8	0,139	6.000	10,0	84,1
07/sep/2010	849	2,185	4,80	0,154	6.646	28,0	1,88	55,8	0,151	6.210	9,9	87,0
08/sep/2010	838	2,176	5,80	0,167	6.713	28,3	1,81	52,2	0,137	6.250	10,2	82,7
09/sep/2010	861	2,194	4,90	0,159	6.491	27,4	1,82	53,3	0,143	6.200	9,8	82,2
12/sep/2010	770	2,134	5,00	0,148	7.281	26,9	1,80	48,1	0,124	6.100	11,0	82,4
13/sep/2010	811	1,877	5,40	0,144	8.637	25,0	1,82	43,8	0,122	5.900	9,7	84,0
14/sep/2010	835	2,067	7,10	0,170	7.465	27,6	1,78	49,5	0,128	6.100	11,1	84,0
15/sep/2010	788	2,192	5,00	0,158	6.552	27,9	1,89	54,6	0,136	5.990	10,1	84,2
16/sep/2010	864	2,241	3,60	0,167	5.414	28,4	1,77	51,3	0,128	6.150	10,0	85,7
19/sep/2010	870	2,232	4,40	0,158	6.205	28,1	1,95	57,4	0,142	5.950	10,3	83,7
20/sep/2010	884	2,100	6,50	0,155	7.745	27,9	1,86	53,3	0,140	5.800	10,0	86,6
21/sep/2010	834	2,176	5,00	0,144	7.341	27,8	1,82	51,4	0,135	5.800	9,8	81,5
22/sep/2010	751	2,146	4,80	0,170	6.039	27,8	1,80	50,6	0,131	5.950	10,0	82,6
23/sep/2010	803	2,154	5,00	0,155	6.763	27,4	1,87	53,0	0,142	5.870	9,5	84,0
26/sep/2010	839	2,166	5,00	0,180	5.805	27,9	1,77	49,8	0,128	5.820	9,8	85,9
27/sep/2010	839	2,151	5,20	0,176	6.025	28,1	1,85	53,5	0,136	5.920	10,3	81,7
28/sep/2010	767	2,148	4,80	0,169	6.132	27,9	1,88	53,9	0,135	6.180	10,4	82,5
29/sep/2010	725	2,218	4,60	0,163	6.056	28,1	1,66	48,2	0,125	6.290	10,6	82,6
30/sep/2010	734	2,188	4,90	0,180	5.675	28,0	1,80	52,4	0,131	6.380	10,3	82,7
03/oct/2010	777	2,147	5,30	0,155	6.915	27,3	1,93	56,0	0,149	6.300	10,2	83,4
04/oct/2010	709	2,184	4,20	0,167	5.871	27,6	1,88	55,2	0,148	6.450	10,8	81,4
05/oct/2010	761	2,146	5,50	0,157	6.984	27,9	1,90	56,5	0,143	6.300	10,3	83,2
06/oct/2010	762	2,157	5,60	0,159	6.980	28,0	1,92	56,7	0,140	6.200	9,9	84,1
07/oct/2010	704	2,184	4,60	0,163	6.260	27,3	1,89	54,3	0,141	6.400	10,9	83,2
11/oct/2010	736	2,159	4,80	0,172	6.101	27,3	1,90	53,3	0,132	6.440	11,0	85,4
12/oct/2010	732	2,213	4,60	0,172	5.826	27,3	1,82	51,6	0,131	6.430	10,8	83,5
13/oct/2010	792	2,182	4,80	0,162	6.344	27,7	1,89	52,1	0,136	6.435	11,0	81,7
14/oct/2010	785	2,232	4,70	0,181	5.492	28,3	1,74	51,4	0,132	6.410	10,4	82,1
17/oct/2010	769	2,201	4,70	0,157	6.473	27,5	1,87	55,6	0,149	6.410	11,0	83,0
18/oct/2010	796	2,090	5,40	0,156	7.154	27,0	1,91	53,2	0,144	6.150	10,5	82,4
19/oct/2010	743	2,149	5,30	0,168	6.435	28,0	1,86	54,6	0,140	6.250	10,5	84,6
20/oct/2010	742	2,142	5,00	0,152	6.896	27,5	1,82	52,3	0,139	6.050	9,9	83,5
21/oct/2010	741	2,175	4,50	0,158	6.342	27,8	1,84	53,9	0,140	6.050	9,2	84,3
24/oct/2010	749	2,577	4,80	0,177	5.736	27,6	1,76	51,0	0,128	6.100	10,4	84,3
25/oct/2010	791	2,219	4,70	0,172	5.785	28,0	1,80	53,2	0,131	6.500	9,8	83,9
26/oct/2010	762	2,161	4,50	0,172	5.861	27,4	1,74	48,9	0,125	6.380	10,3	82,7
27/oct/2010	790	2,262	4,70	0,179	5.548	28,1	1,70	49,6	0,125	6.500	9,5	84,2
28/oct/2010	788	2,285	3,90	0,183	4.981	28,0	1,80	52,4	0,131	6.500	11,2	85,2
01/nov/2010	732	2,147	5,30	0,169	6.356	27,6	1,89	54,0	0,135	6.420	11,0	85,1
02/nov/2010	739	2,191	4,20	0,166	5.854	28,2	1,76	50,0	0,127	6.500	11,0	86,5
03/nov/2010	740	2,228	4,50	0,173	5.740	27,7	1,78	50,4	0,128	6.180	10,5	85,0
04/nov/2010	768	2,181	4,60	0,170	5.954	28,0	1,69	48,0	0,121	6.200	11,1	82,9
07/nov/2010	740	2,196	4,40	0,171	5.739	28,2	1,78	52,8	0,132	6.340	11,5	80,5
08/nov/2010	764	2,181	5,10	0,165	6.346	28,2	1,80	52,8	0,132	6.500	11,4	82,4
09/nov/2010	729	2,232	4,60	0,133	7.400	28,1	1,77	52,0	0,133	6.340	10,7	84,1
10/nov/2010	732	2,215	4,50	0,136	7.181	28,3	1,83	54,3	0,183	6.340	10,5	84,5
11/nov/2010	754	2,196	5,30	0,171	6.241	27,7	1,75	50,3	0,130	6.500	11,0	80,7
14/nov/2010	739	2,227	4,00	0,174	5.401	27,5	1,76	50,9	0,130	6.380	10,0	84,7
15/nov/2010	758	2,220	4,00	0,172	5.580	27,5	1,76	48,7	0,126	6.380	10,5	84,2
16/nov/2010	730	2,124	4,50	0,174	6.031	26,7	1,95	53,2	0,138	6.380	10,6	82,3
17/nov/2010	746	2,118	5,00	0,170	6.245	27,0	1,98	55,5	0,149	6.380	10,9	80,5
18/nov/2010	765	2,054	4,90	0,144	7.838	26,0	1,87	51,2	0,145	6.300	11,1	83,7
21/nov/2010	767	2,035	4,90	0,145	7.855	26,0	1,74	44,5	0,119	6.320	9,4	82,4
22/nov/2010	743	2,109	5,20	0,166	6.598	28,0	1,87	54,2	0,137	6.520	9,9	81,1
23/nov/2010	732	2,123	4,90	0,167	6.316	27,6	1,91	55,6	0,137	6.520	9,9	80,5
24/nov/2010	714	2,129	4,90	0,175	6.034	27,1	2,00	58,5	0,149	6.600	9,9	79,0
25/nov/2010	738	2,189	3,60	0,140	6.565	28,0	2,11	64,3	0,167	6.520	10,1	83,0

APENDICE C

Evaluación Propiedades Celulosa de Eucaliptus

Tabla 26. Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas Eucaliptus

Fecha	Viscosidad Intrínseca (cm ³ /g)	Largo fibra LW (mm)	Finos W (%)	Coarseness (mg/m)	Población (fibras/mg)	Ancho promedio (um)	Índice de quiebre (1/mm)	Ángulo de quiebre (-)	Curl Index	Revoluciones (rev)	Rasgado (mNm ² /g)	Tensión (Nm/g)
17/ago/2010	929	0,764	2,86	0,056	29.663	17,5	2,03	29,8	0,110	900	7,6	51,5
18/ago/2010	906	0,763	3,23	0,050	33.841	17,6	1,95	28,6	0,106	1.000	7,8	55,4
19/ago/2010	927	0,761	2,64	0,055	29.904	17,5	1,98	28,9	0,106	1.150	7,4	54,0
20/ago/2010	939	0,764	2,90	0,057	29.143	17,8	1,81	26,3	0,096	1.100	7,9	59,1
21/ago/2010	1.176	0,760	3,11	0,055	33.670	16,6	1,89	27,4	0,094	1.320	9,2	63,1
22/ago/2010	999	0,761	2,97	0,056	29.861	17,7	1,94	28,1	0,104	1.160	8,7	58,1
23/ago/2010	992	0,769	2,92	0,057	28.998	17,8	1,82	26,5	0,091	1.210	8,9	61,1
24/ago/2010	1.101	0,755	3,19	0,057	29.635	17,6	1,80	26,0	0,087	1.130	8,5	57,9
25/ago/2010	1.153	0,753	3,28	0,059	28.874	17,6	1,89	27,6	0,096	945	8,3	56,9
26/ago/2010	1.065	0,766	2,76	0,063	26.150	17,6	1,85	27,0	0,090	930	8,3	60,5
29/ago/2010	1.060	0,770	2,78	0,056	29.226	17,5	1,90	27,8	0,099	950	7,6	58,6
30/ago/2010	1.054	0,755	3,07	0,057	29.585	17,5	1,90	27,5	0,101	800	8,1	54,1
31/ago/2010	997	0,763	2,93	0,063	26.411	17,6	1,97	28,9	0,106	950	7,9	55,4
01/sep/2010	1.008	0,761	2,97	0,054	30.967	17,5	1,93	28,2	0,102	750	8,0	49,7
02/sep/2010	1.008	0,760	3,07	0,060	27.964	17,4	1,86	27,2	0,100	800	8,0	54,3
03/sep/2010	1.067	0,766	3,28	0,057	29.635	17,5	1,88	27,7	0,101	850	8,4	53,7
04/sep/2010	1.010	0,766	2,91	0,057	28.998	17,5	1,86	27,1	0,097	830	8,3	53,3
05/sep/2010	1.064	0,756	3,09	0,047	35.880	17,7	1,94	28,2	0,095	1.100	8,4	62,5
06/sep/2010	1.136	0,763	3,25	0,053	31.711	17,8	1,75	25,4	0,087	1.180	8,3	63,7
07/sep/2010	969	0,766	3,03	0,046	36.172	17,7	1,79	26,0	0,089	1.020	8,9	60,3
08/sep/2010	1.200	0,757	3,48	0,042	40.770	17,8	1,83	26,6	0,090	1.000	9,0	63,0
09/sep/2010	987	0,768	3,27	0,044	38.197	17,7	1,79	26,4	0,091	1.000	8,0	54,1
12/sep/2010	993	0,773	3,10	0,057	29.485	17,5	1,98	28,7	0,105	1.000	8,3	54,0
13/sep/2010	1.001	0,761	3,06	0,059	28.582	17,6	1,96	28,8	0,107	1.100	8,1	57,3
14/sep/2010	1.008	0,767	3,08	0,058	28.784	17,5	1,91	28,0	0,103	920	8,0	55,5
15/sep/2010	1.021	0,757	3,33	0,060	28.345	17,6	1,87	27,4	0,099	950	8,3	56,0
16/sep/2010	954	0,765	3,00	0,049	34.185	17,4	1,93	28,3	0,103	1.030	8,4	59,1
19/sep/2010	1.041	0,769	2,93	0,059	28.015	17,4	1,85	26,8	0,095	860	8,0	54,5
20/sep/2010	1.041	0,765	3,06	0,046	36.414	17,8	1,97	29,3	0,103	1.050	9,1	59,5
21/sep/2010	968	0,757	3,25	0,062	27.337	17,4	1,91	27,9	0,096	955	8,4	57,6
22/sep/2010	895	0,771	2,72	0,055	29.757	17,7	1,81	26,2	0,087	880	7,9	56,3
23/sep/2010	939	0,754	3,31	0,063	27.087	17,4	1,92	27,9	0,094	980	7,8	62,4
26/sep/2010	963	0,771	2,96	0,059	28.155	17,5	1,88	27,4	0,101	750	8,0	54,3
27/sep/2010	925	0,773	3,06	0,052	32.484	17,5	1,90	27,8	0,104	1.000	8,2	54,8
28/sep/2010	876	0,777	3,21	0,054	31.229	17,6	2,07	31,0	0,118	1.150	8,4	56,2
29/sep/2010	911	0,794	3,05	0,051	32.463	17,5	1,91	28,2	0,104	1.100	8,4	57,2
30/sep/2010	906	0,798	2,99	0,054	30.408	17,5	1,89	28,3	0,105	1.150	8,4	58,6
03/oct/2010	887	0,783	2,98	0,068	24.267	17,8	1,95	29,3	0,103	1.100	9,0	59,7
04/oct/2010	827	0,796	3,10	0,059	28.015	17,9	1,88	28,2	0,096	1.080	8,8	58,5
05/oct/2010	850	0,774	2,99	0,060	27.548	17,5	1,93	28,6	0,097	1.090	8,7	58,4
06/oct/2010	824	0,758	3,27	0,053	32.198	17,6	1,94	28,5	0,098	1.070	8,0	58,9
07/oct/2010	914	0,764	3,14	0,058	28.977	17,6	1,80	27,3	0,096	1.000	7,8	56,0
11/oct/2010	899	0,771	2,98	0,059	28.296	17,5	1,95	28,8	0,109	1.080	7,9	55,6
12/oct/2010	903	0,766	2,96	0,058	28.832	17,3	1,97	28,7	0,105	1.080	8,2	53,0
13/oct/2010	933	0,756	3,10	0,059	28.630	17,5	1,96	28,5	0,105	1.000	8,0	54,4
14/oct/2010	1.000	0,770	2,96	0,059	28.155	17,6	1,87	27,6	0,104	1.100	8,6	53,8
17/oct/2010	1.065	0,767	2,81	0,070	23.535	17,6	1,73	24,9	0,084	900	8,1	54,5
18/oct/2010	1.063	0,752	3,17	0,061	27.833	17,8	1,93	28,2	0,097	910	8,0	54,4
19/oct/2010	968	0,767	2,79	0,061	26.919	17,5	1,91	27,9	0,096	1.000	8,4	56,5
20/oct/2010	976	0,765	2,91	0,058	28.498	17,7	1,87	27,4	0,094	1.010	8,3	57,7
21/oct/2010	914	0,769	2,64	0,053	30.730	17,7	1,83	26,8	0,091	914	7,8	56,1
24/oct/2010	1.018	0,777	2,84	0,054	30.111	17,6	1,90	28,6	0,108	930	8,2	56,2
25/oct/2010	975	0,794	2,85	0,057	28.342	17,7	1,81	27,0	0,100	950	8,2	56,3
26/oct/2010	996	0,780	2,96	0,054	30.309	18,0	1,77	26,2	0,097	950	8,3	57,1
27/oct/2010	991	0,803	2,72	0,063	25.438	17,6	1,89	28,3	0,105	900	7,8	55,8
28/oct/2010	998	0,786	2,80	0,060	27.012	17,6	1,85	27,6	0,103	900	7,8	55,4
01/nov/2010	905	0,787	3,02	0,056	29.419	18,1	1,81	27,0	0,101	1.100	8,1	60,7
02/nov/2010	925	0,801	2,62	0,059	27.162	17,8	1,86	27,8	0,103	930	8,5	60,4
03/nov/2010	928	0,768	3,19	0,061	27.552	17,8	1,76	26,0	0,097	920	8,3	57,4
04/nov/2010	867	0,776	2,97	0,058	28.404	17,6	1,83	27,1	0,102	1.100	8,9	59,2
07/nov/2010	961	0,766	2,75	0,054	30.609	17,3	1,96	28,8	0,108	1.180	8,3	57,6
08/nov/2010	992	0,766	2,91	0,058	28.545	17,6	1,91	28,1	0,105	1.000	8,2	55,8
09/nov/2010	985	0,759	2,86	0,060	27.824	17,7	1,94	28,7	0,108	950	9,5	56,6
10/nov/2010	985	0,769	2,97	0,061	27.097	17,7	1,80	26,5	0,096	1.000	8,2	56,8
11/nov/2010	974	0,770	2,95	0,064	25.869	17,8	1,76	25,8	0,088	850	8,1	53,3
14/nov/2010	860	0,770	2,81	0,062	26.441	17,7	1,98	29,0	0,106	900	8,5	52,9
15/nov/2010	1.027	0,777	2,90	0,060	27.367	17,5	1,90	28,1	0,104	900	7,9	54,7
16/nov/2010	1.012	0,771	2,89	0,059	28.108	17,6	1,92	28,2	0,103	900	8,5	53,3
17/nov/2010	906	0,775	3,06	0,063	26.544	17,8	1,82	26,4	0,090	885	8,2	57,9
18/nov/2010	967	0,761	3,02	0,051	32.899	17,8	1,99	29,3	0,102	960	8,6	57,8
21/nov/2010	977	0,775	3,24	0,055	30.609	17,6	1,91	27,9	0,102	965	8,1	55,7
22/nov/2010	1.034	0,762	3,03	0,056	29.712	17,9	2,05	30,2	0,105	930	7,9	56,6
23/nov/2010	1.000	0,764	3,73	0,048	35.920	17,8	1,93	28,4	0,098	900	7,8	58,2
24/nov/2010	916	0,760	3,08	0,066	25.295	17,8	1,89	27,7	0,095	910	7,8	55,5
25/nov/2010	991	0,761	2,95	0,056	29.712	17,6	1,95	28,8	0,107	905	7,7	56,2

APENDICE D

Análisis de Tendencias y Correlación entre Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas Celulosa de Pino

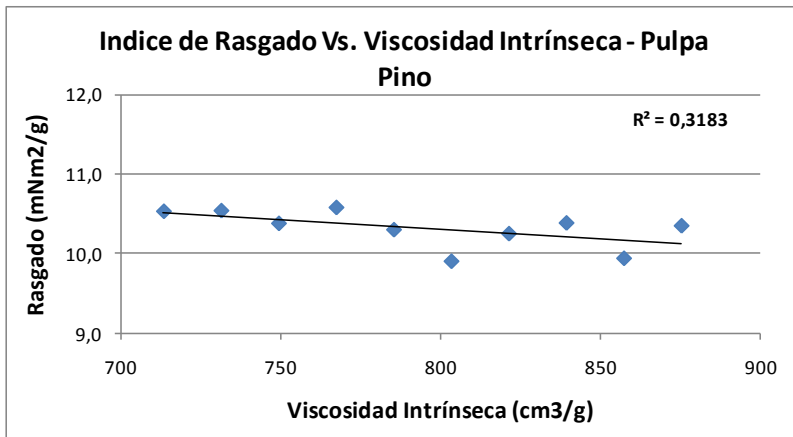


Figura 44

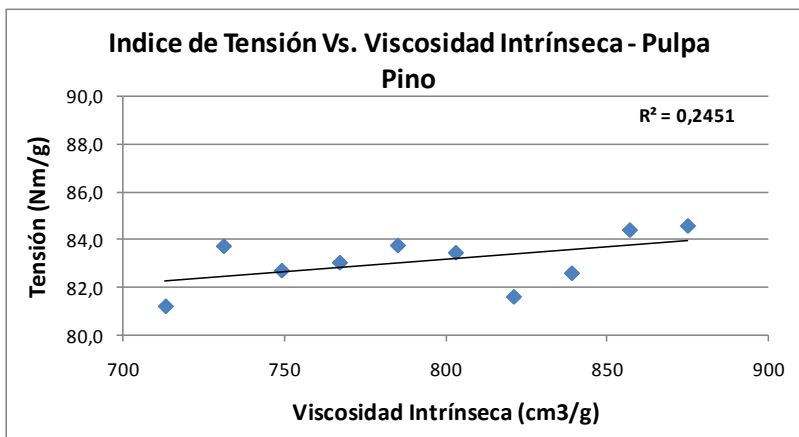


Figura 45

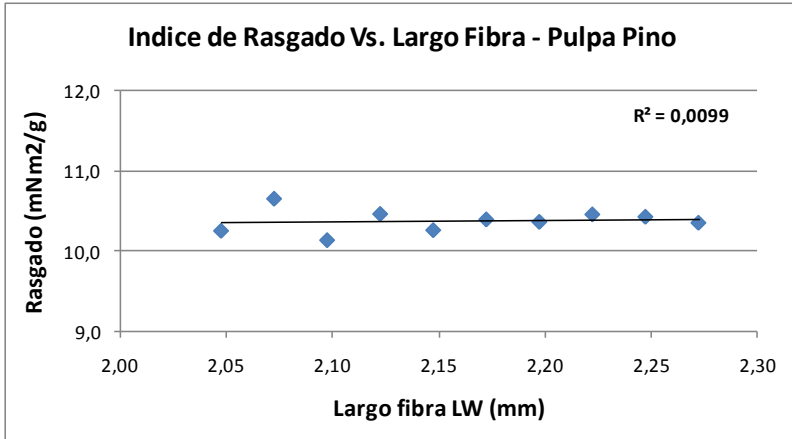


Figura 46

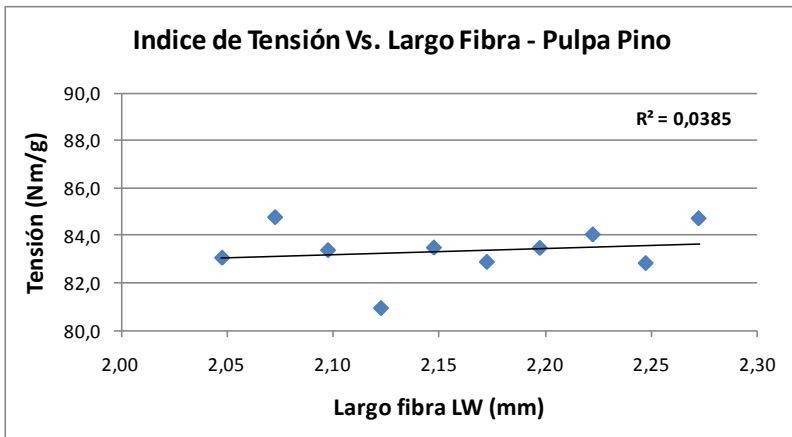
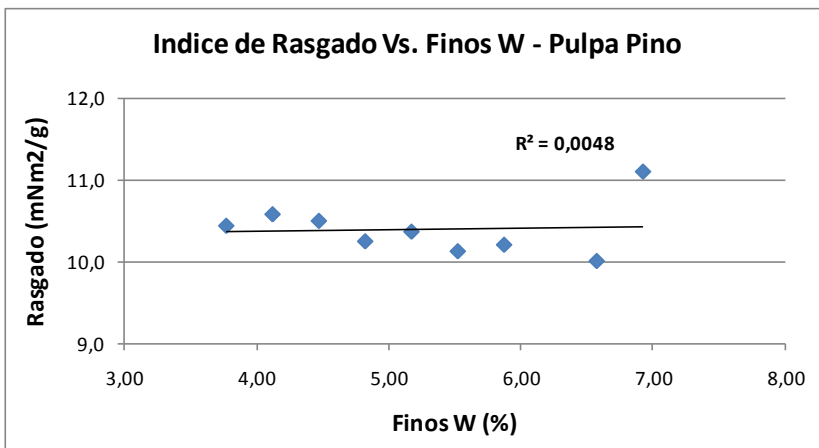


Figura 47



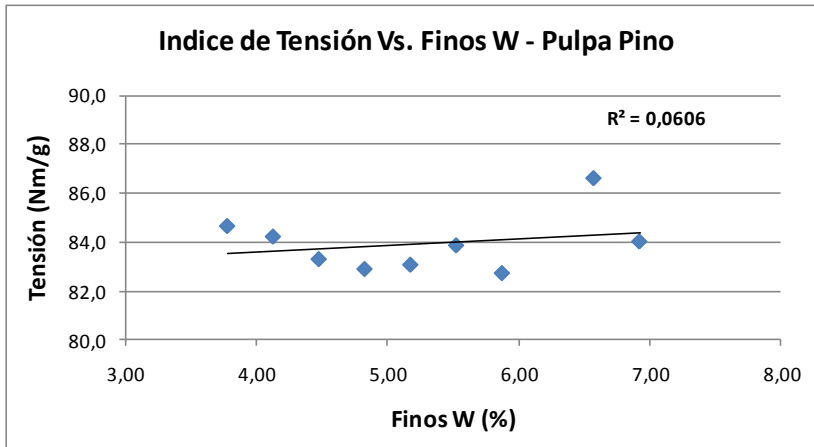


Figura 48

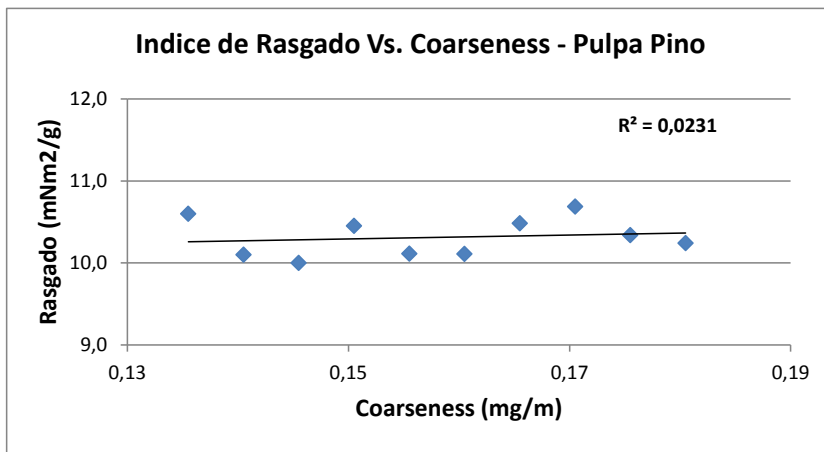


Figura 49

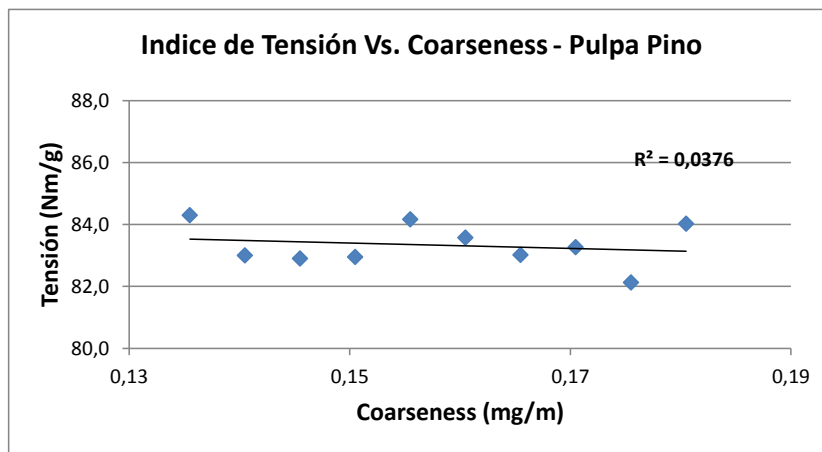


Figura 50

Figura 51

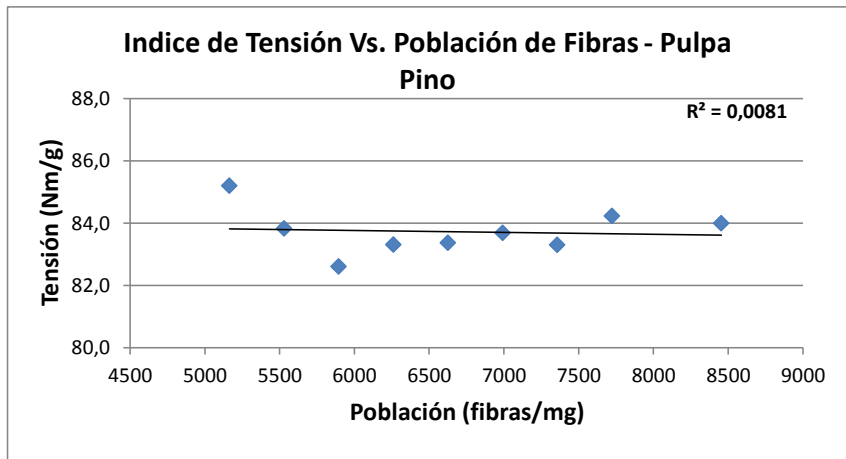
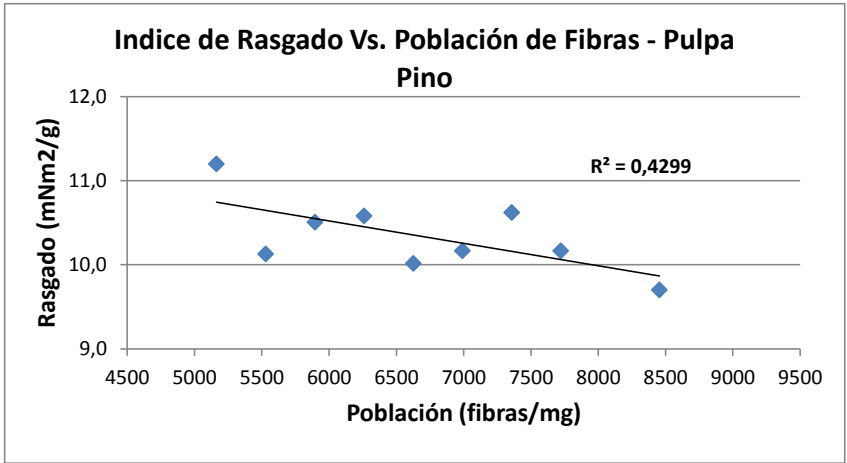


Figura 52

Figura 53

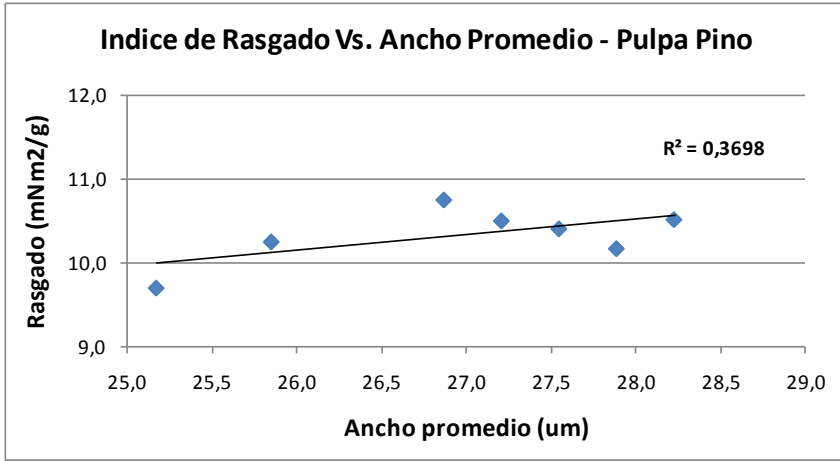


Figura 54

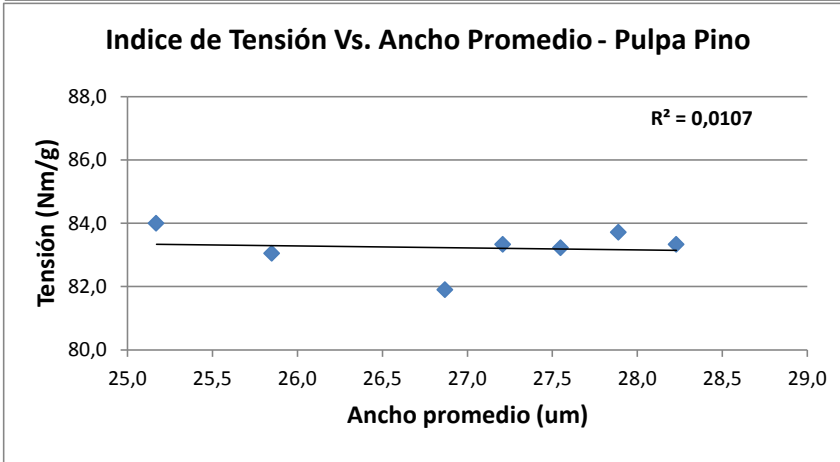


Figura 55

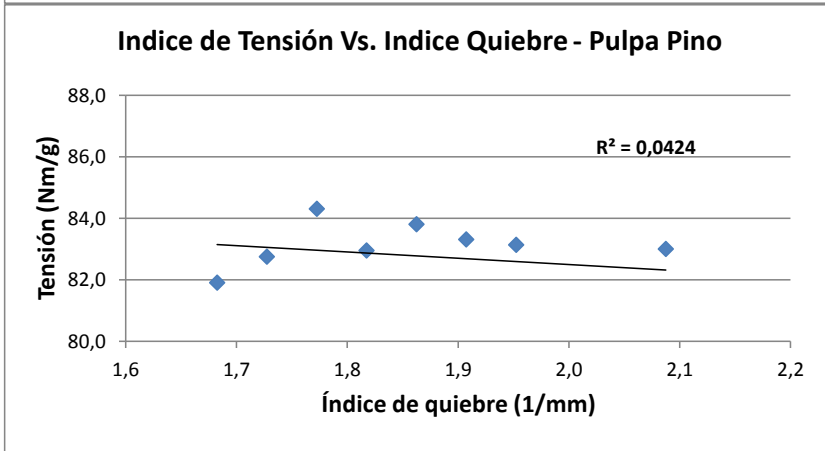
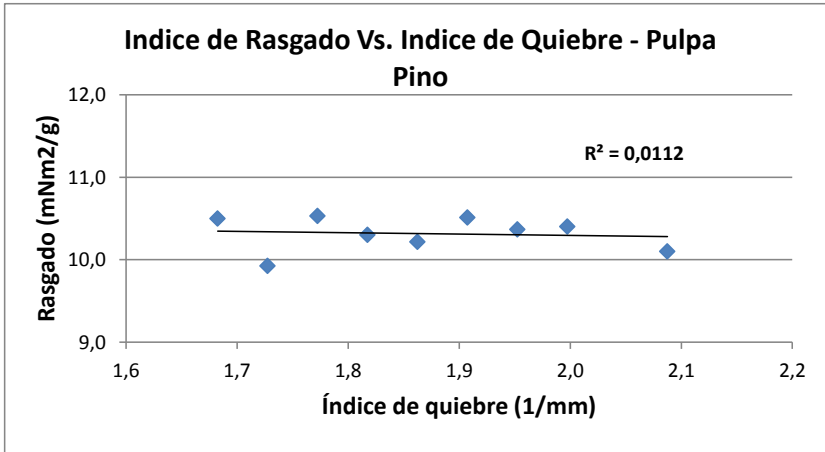


Figura 56

Figura 57

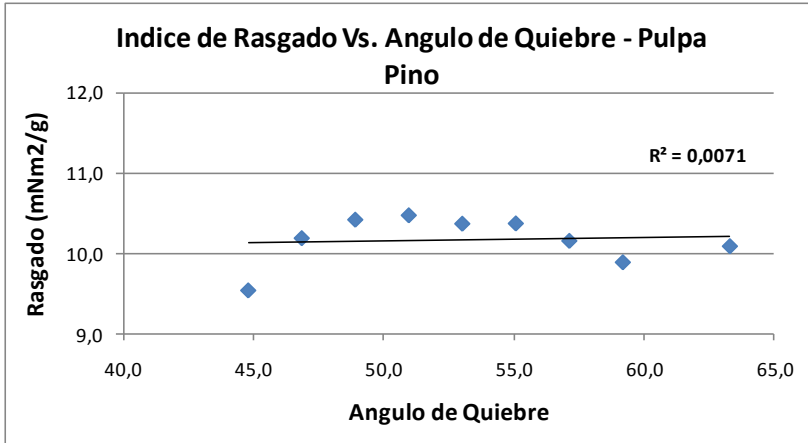


Figura 58

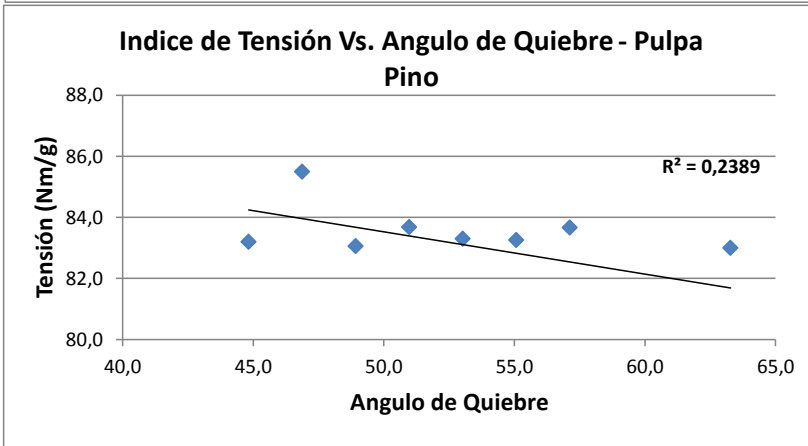


Figura 59

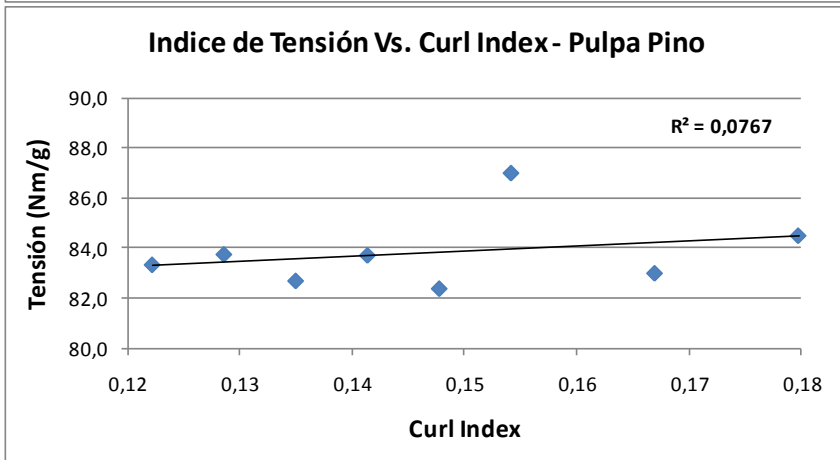
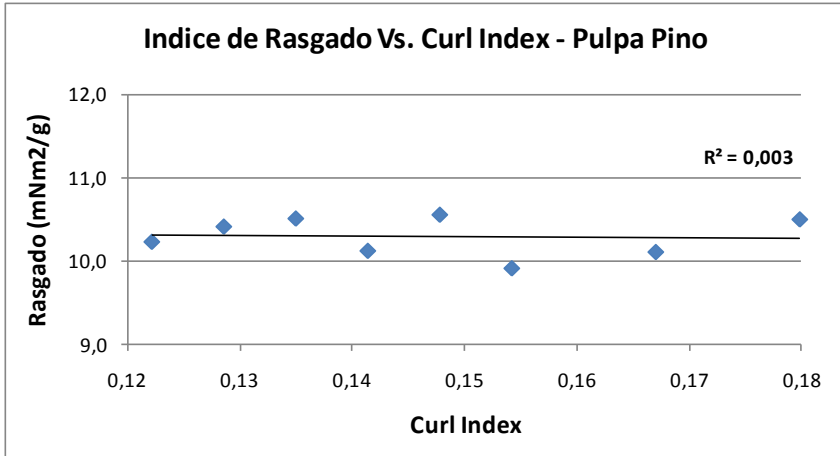


Figura 60

Figura 61

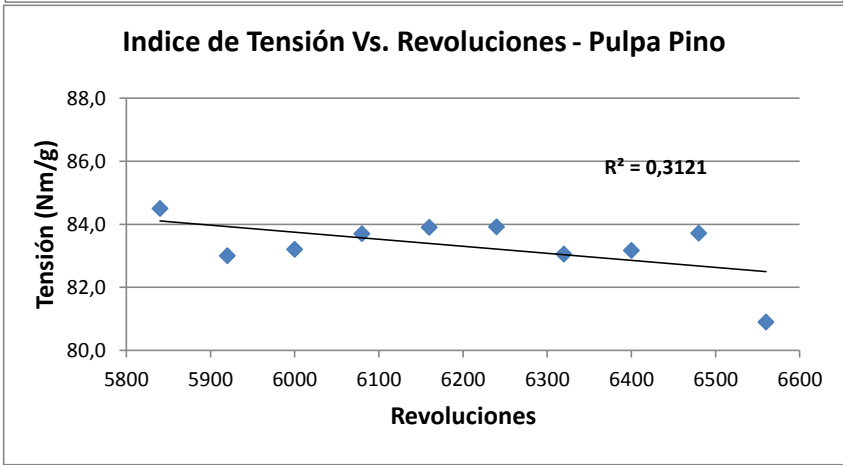
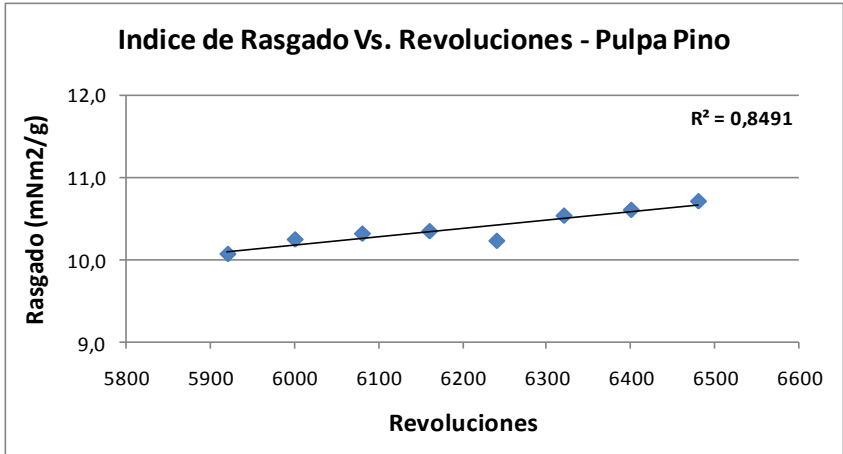


Figura 62

Figura 63

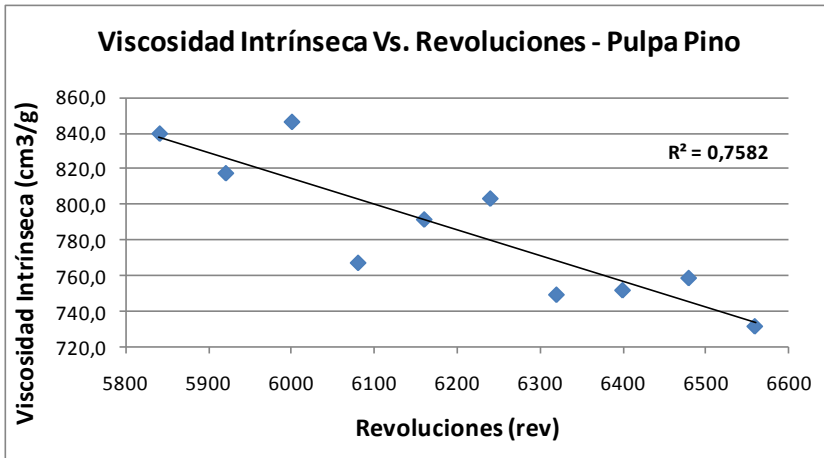


Figura 64

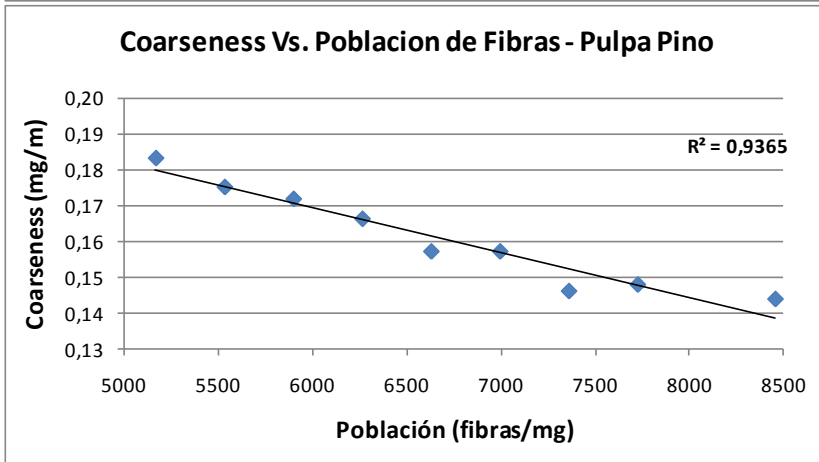


Figura 65

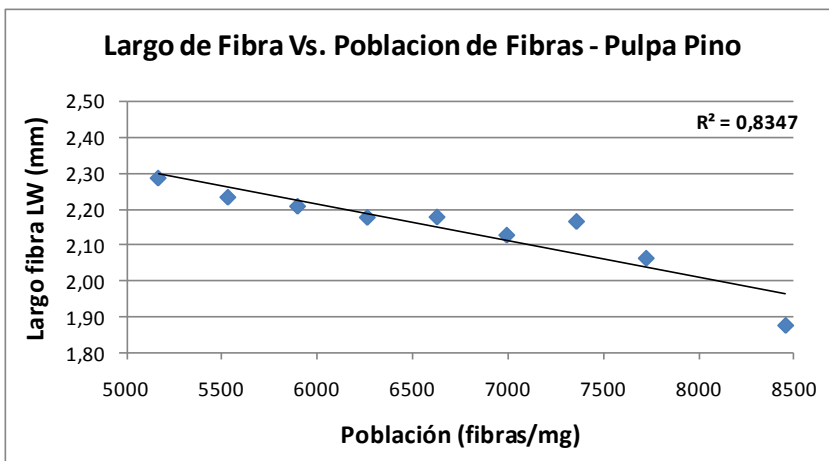


Figura 66

APENDICE E

Análisis de Tendencias y Correlación entre Propiedades Biométricas y Físico Mecánicas Celulosa de Eucaliptus

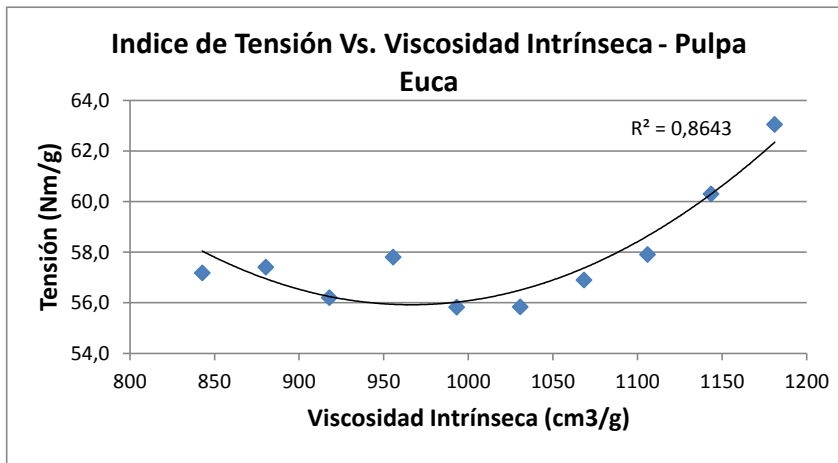
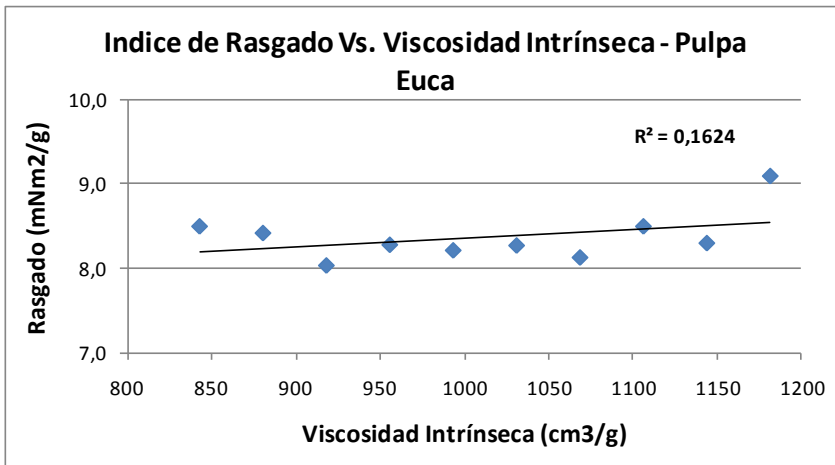


Figura 67

Figura 68

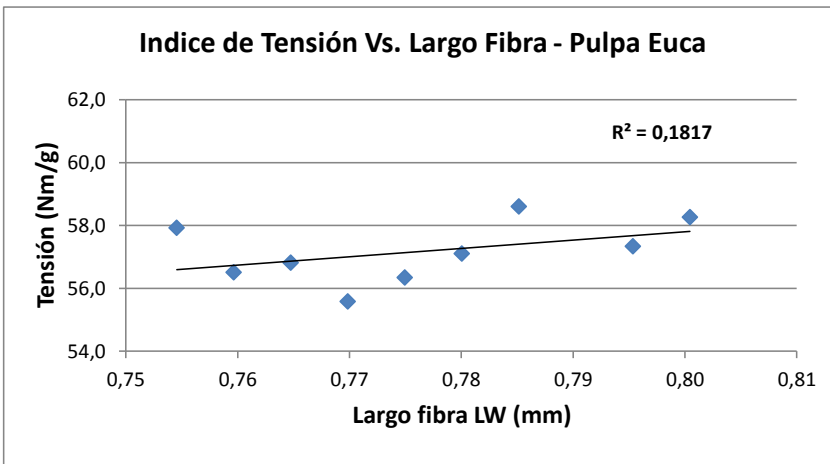
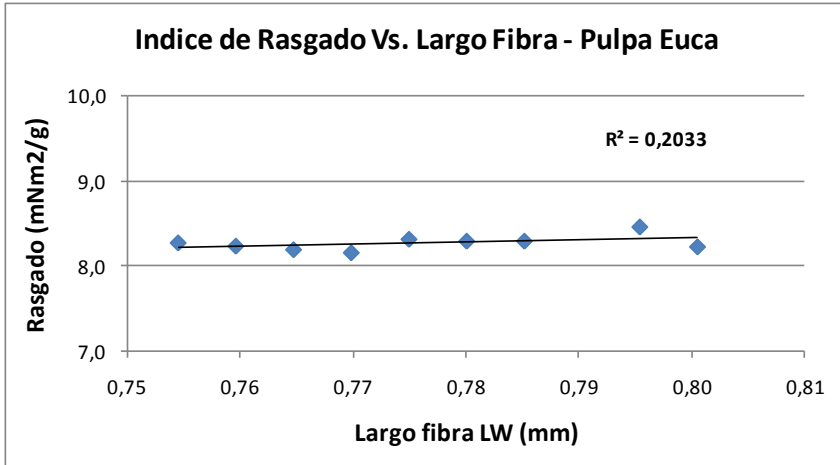


Figura 69

Figura 70

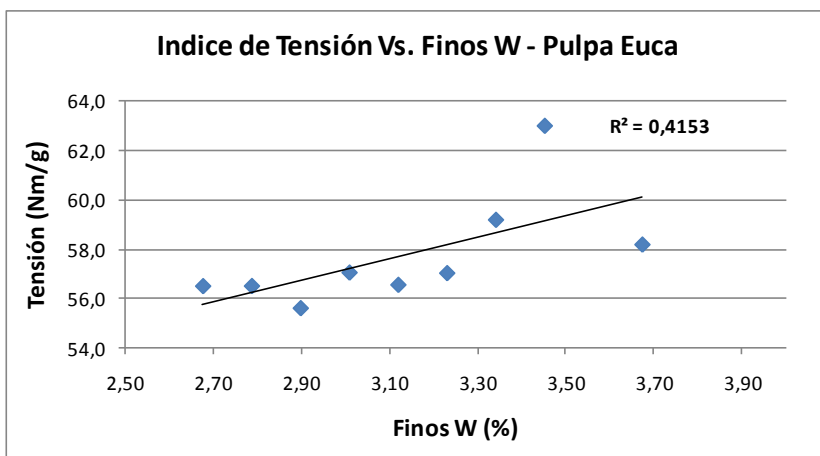
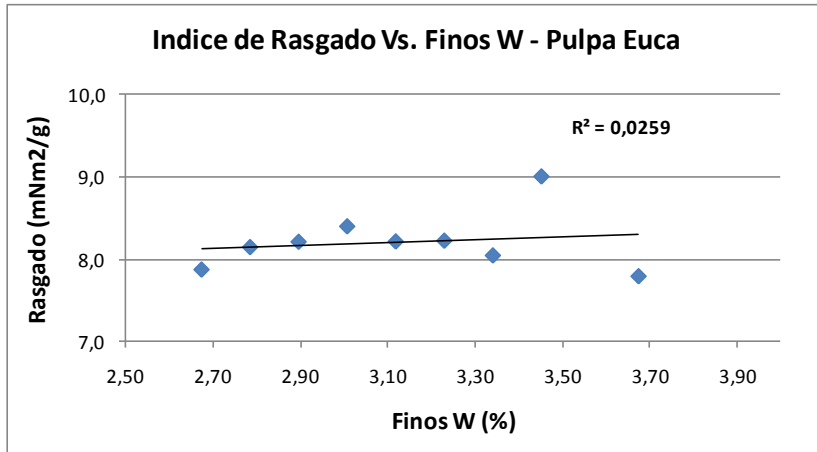


Figura 71

Figura 72

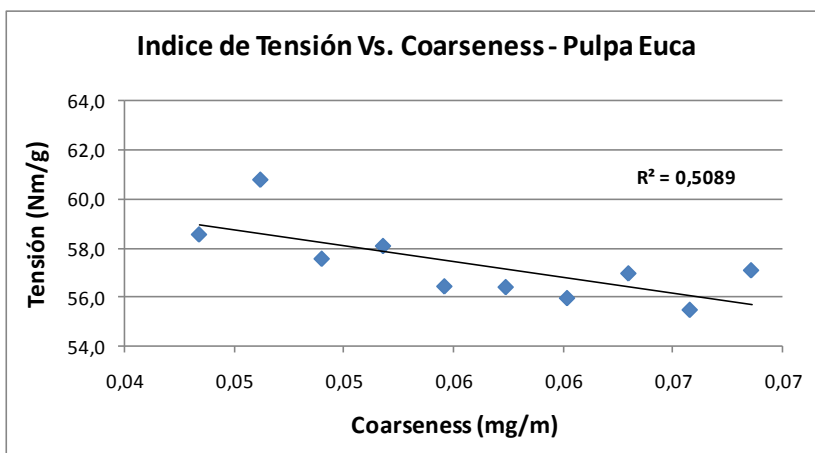
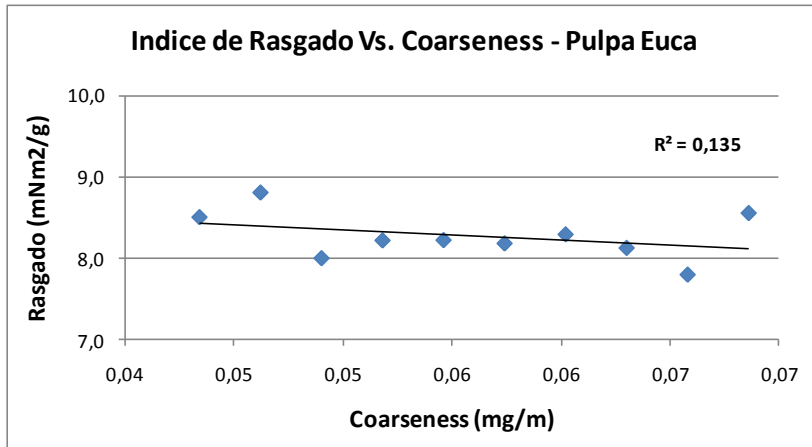


Figura 73

Figura 74

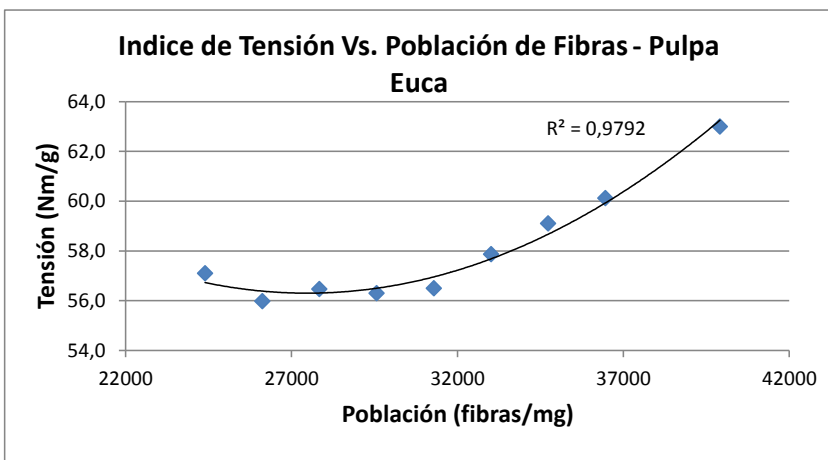
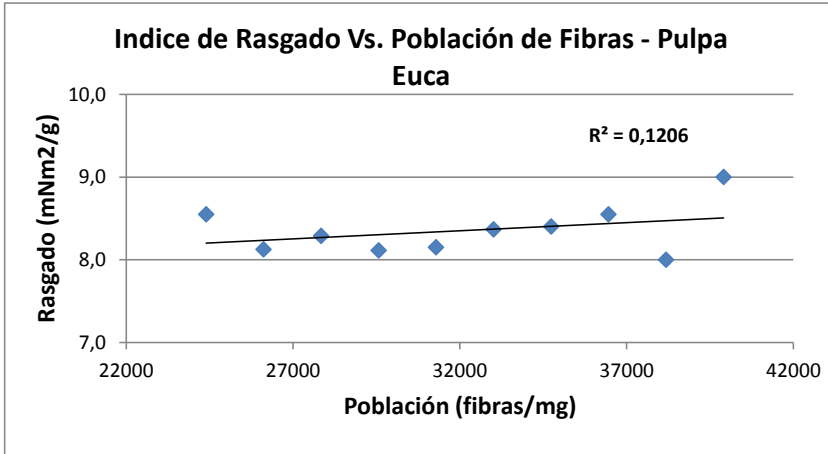


Figura 75

Figura 76

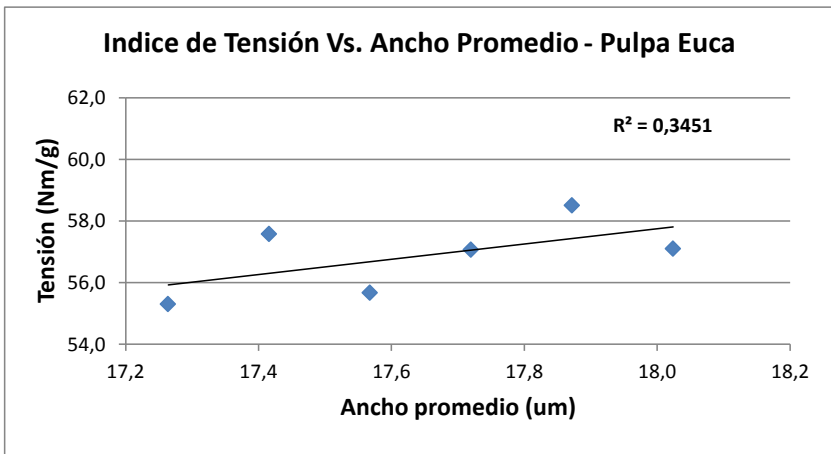
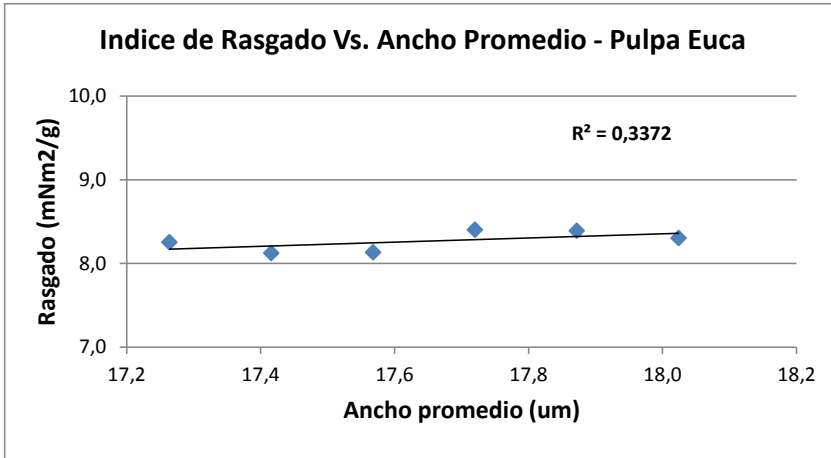
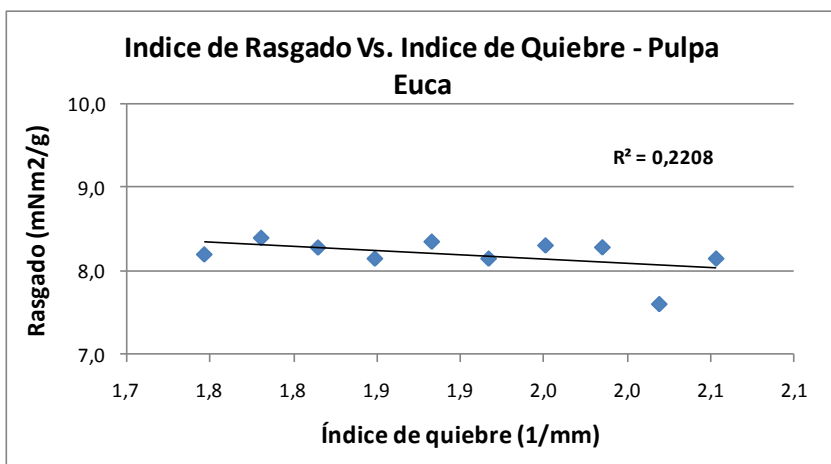


Figura 77

Figura 78



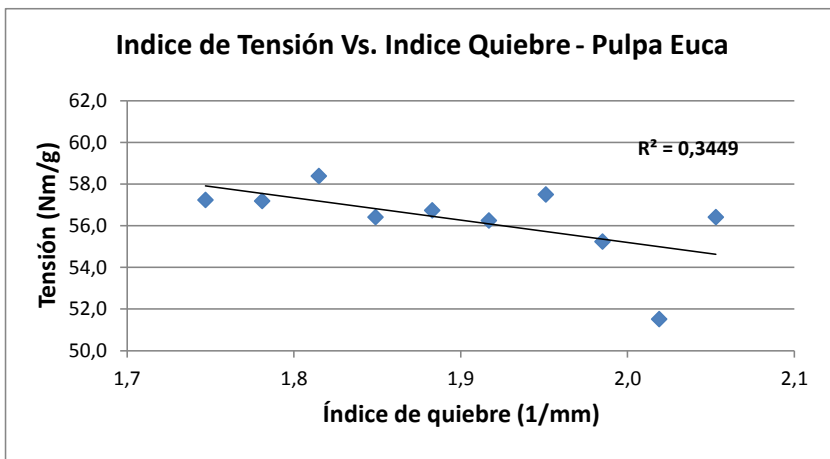


Figura 80

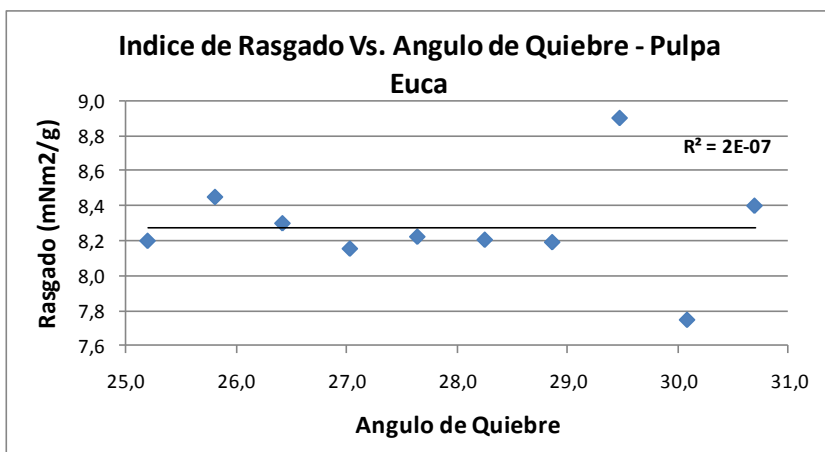


Figura 81

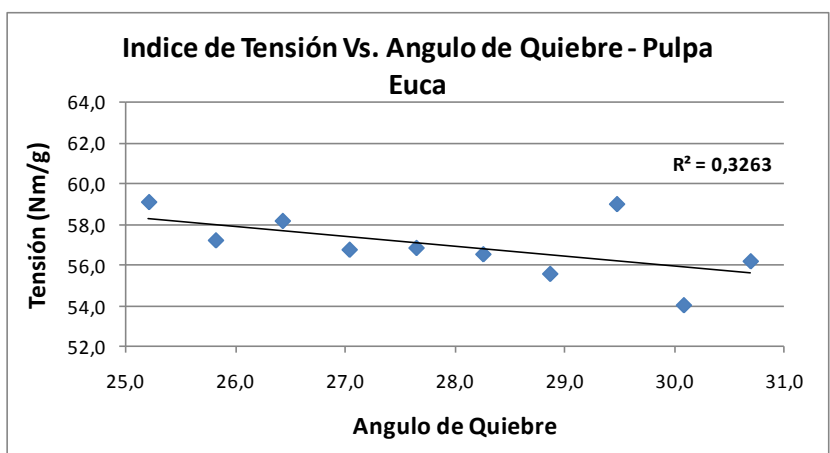


Figura 82

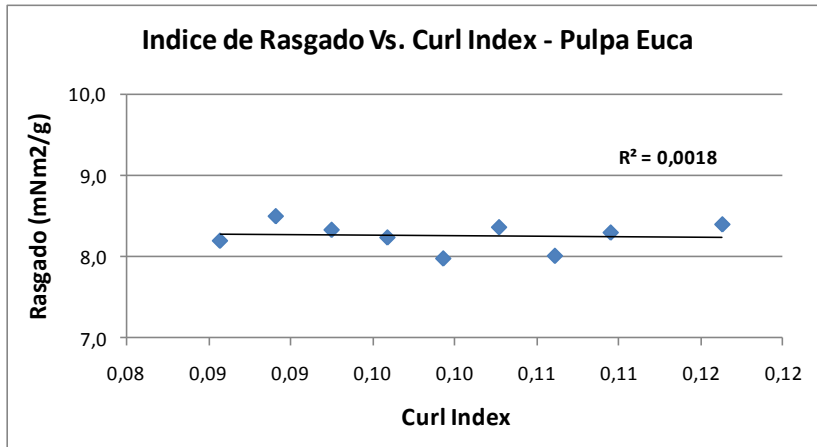


Figura 83

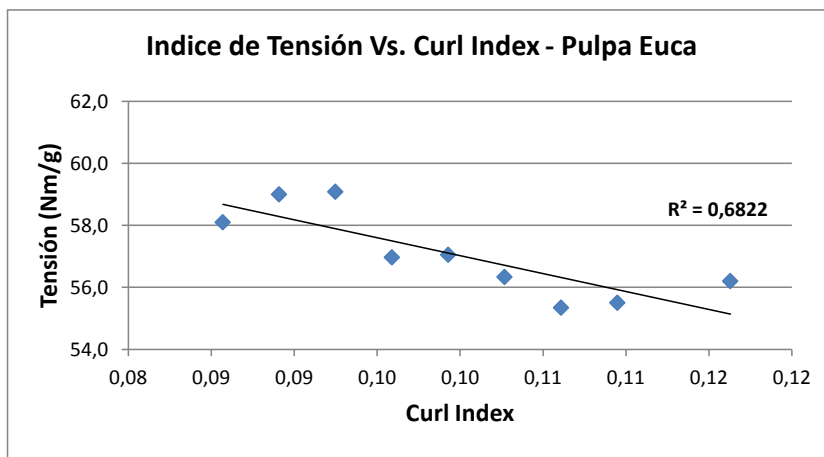


Figura 84

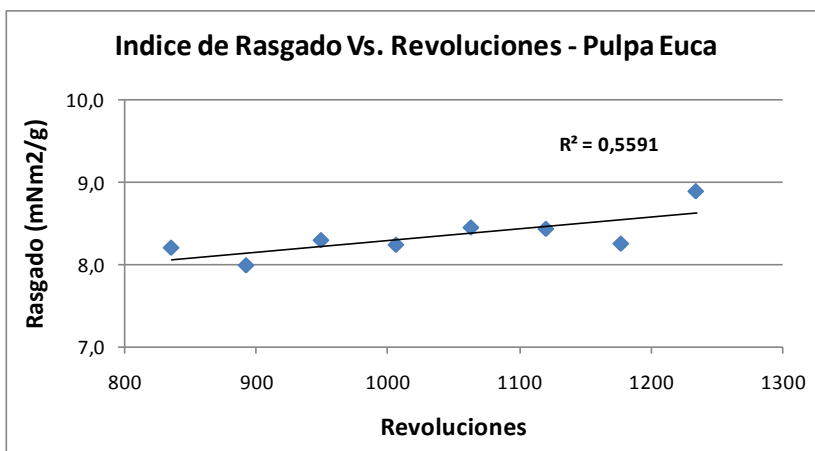


Figura 85

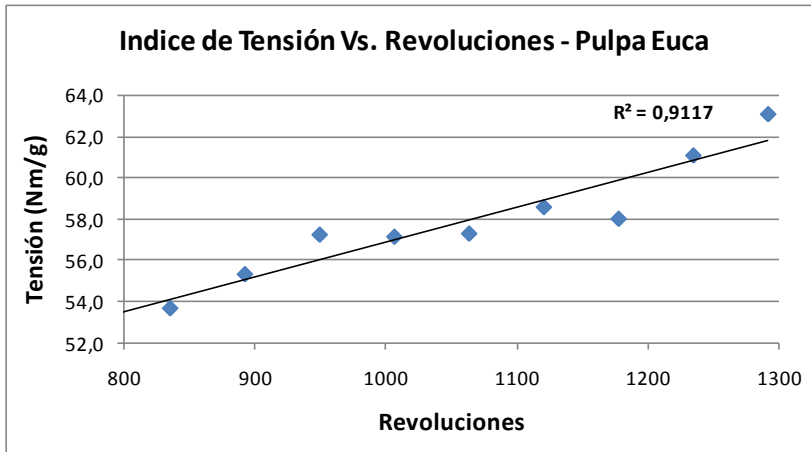


Figura 86

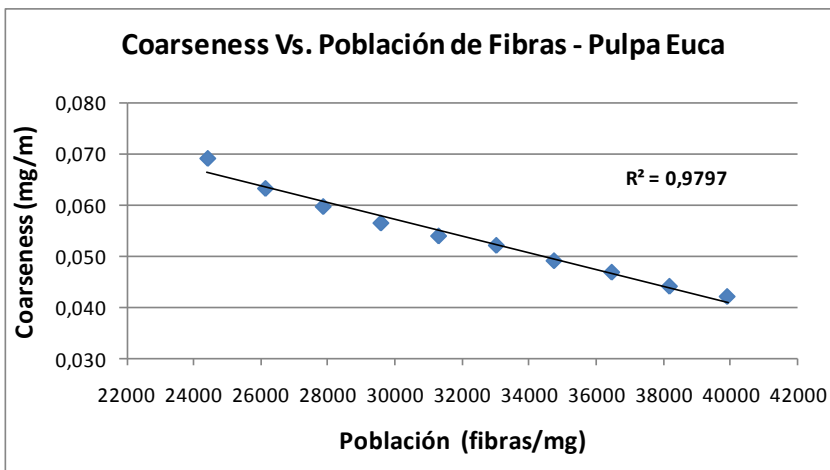


Figura 87

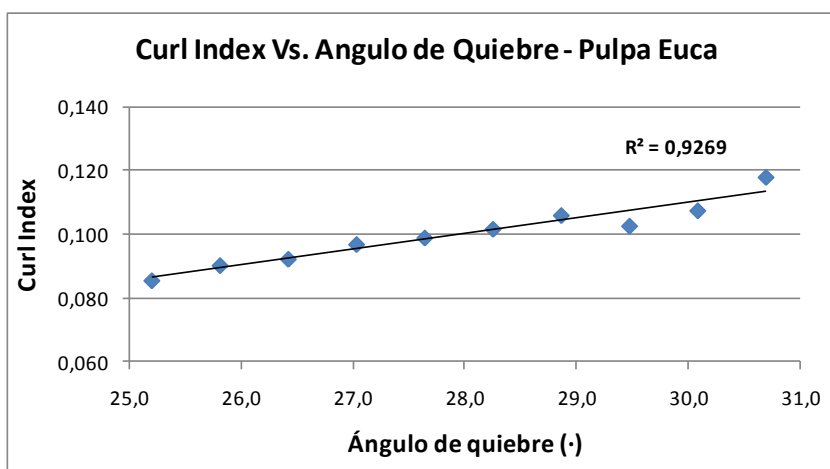


Figura 88

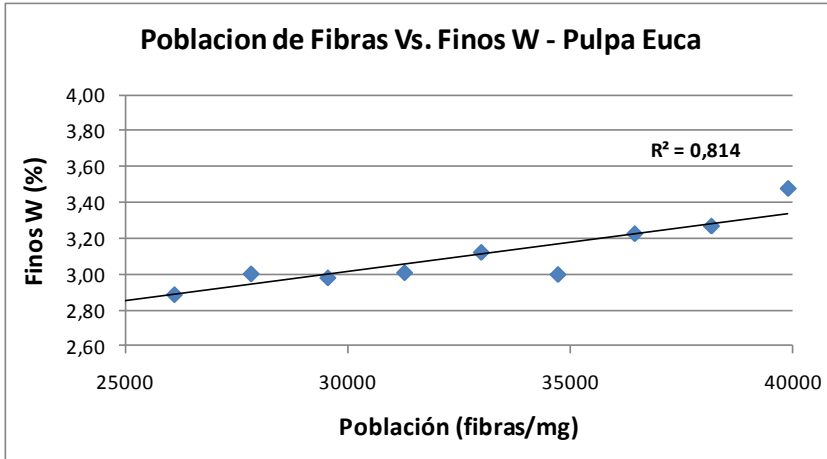


Figura 89

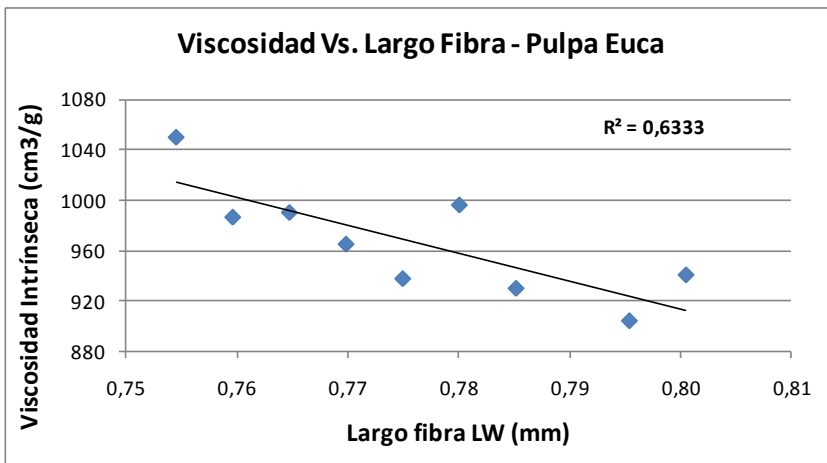


Figura 90