



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA
MADERA

TESIS

“OBTENCIÓN DE PULPA KRAFT Y A LA SOSA Y SU BLANQUEO,
A PARTIR DE MADERA DE *Eucalyptus robusta* Sm.”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA
MADERA

Presenta:

Ing. Ulises Trujillo Jiménez

Director:

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Asesores:

Dr. Rubén Sanjuán Dueñas

M. en C. Bruno Becerra Aguilar

Morelia, Michoacán

Agosto 2006



El presente trabajo de investigación (“**Obtención de pulpa kraft y a la sosa y su blanqueo, a partir de madera de *Eucalyptus robusta* Sm**”) se realizó en los Terrenos e Instalaciones de la empresa Crisoba Industrial S. A de C. V., Planta Morelia, en los Laboratorios del Departamento de Madera, Celulosa y Papel “Ing. Karl Augustin Grellmann”, CUCEI de la Universidad de Guadalajara y en las Instalaciones de la División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependiente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Y se desarrolló en el marco del proyecto con clave 12450 (2004-2006), aprobado por los Fondos Mixtos CONACYT - Gobierno del Estado de Michoacán al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, en el cual fungen como colaboradores el Dr. Rubén Sanjuán Dueñas y M. en C. Bruno Becerra Aguilar (DMCyP - U de G).

ÍNDICE

	Página
1 Introducción	1
2 Generalidades de la Especie	3
3 Antecedentes	8
4 Objetivos	11
5 Hipótesis	12
6 Justificación	13
7 Metodología	14
7.1 Área de colecta	14
7.2 Pulpeo Kraft y a la Sosa	19
7.3 Blanqueo de pulpa Kraft y a la Sosa	29
7.4 Evaluación físico-ecánica de las pulpas	36
8 Resultados y Discusión	42
8.1 Resultados	42
8.1.1 Pulpeo Kraft y a la Sosa	42
8.1.2 Blanqueo de la pulpa Kraft y a la Sosa	74
8.1.3 Evaluación físico-mecánica de la pulpa	78
8.2 Discusión	86
8.2.1 Pulpeo Kraft y a la Sosa	86
8.2.2 Blanqueo de la pulpa Kraft y a la Sosa	90
8.2.3 Evaluación físico-mecánica de la pulpa Kraft y a la Sosa	91
9 Conclusiones y Recomendaciones	99
10 Literatura citada	104
11 Anexos	111

RESUMEN

Para desarrollar el presente trabajo se derribó un ejemplar de *Eucalyptus robusta* Sm, de la plantación experimental de CRISOBA Industrial, S. A. de C. V, Planta Morelia. Se extrajeron del fuste comercial 2 trozas de 1.2 m de longitud, la primera después del tocón (abajo) y la segunda antes de que se bifurcara el árbol (arriba), se astillaron y pulpearon para la obtención de pulpa kraft y a la sosa, evaluando su comportamiento en los procesos de pulpeo y blanqueo, con el propósito de conocer sus propiedades y características.

Las cocciones por el proceso kraft se realizaron en dos fases, en la primera se aplicó un diseño experimental factorial $2 \times 2 \times 2$ con factores: zona, tiempo y carga, en la segunda se aplicó un diseño experimental 2^k , con factores: tiempo y carga; para ambas fases, se mantuvieron las constantes: relación de baño, sulfidez, álcali activo y temperatura. Para las cocciones a la sosa se utilizó un diseño experimental factorial de tipo 3×2 , los factores y niveles que se manejaron en este proceso fueron: carga y tiempo y las constantes: hidromódulo y temperatura. Las variables de respuesta fueron las mismas para los tres casos: rendimiento, No. de Kappa y rechazos.

Para el pulpeo kraft en la primera fase se obtuvo un rendimiento máximo de 46.90%, en la segunda de 49.3% y para el proceso a la sosa fue de 46.74%.

Para el blanqueo se siguieron dos secuencias, una clorada (CDEpPD) y otra totalmente libre de cloro (OAZEopPP). Las pulpas kraft y a la sosa blanqueadas con la secuencia clorada alcanzaron blancuras de 86.36% ISO y 84.45% ISO respectivamente, y las que se blanquearon con la secuencia libre de cloro alcanzaron blancuras de 79.77% ISO y 78.11% ISO respectivamente.

Se formaron hojas estándar con pulpa sin blanquear y blanqueada, a diferentes puntos de refinación. Y de acuerdo a las normas TAPPI, 2000 se probaron sus propiedades físico-mecánicas.

SUMMARY

To develop the following work an *Eucalyptus robusta* Sm. Exemplary was pull down to the experimental plantation of CRISOBA Ind. S.A de C.V., Planta Morelia. To the commercial stem 2 pieces of 1.2 m long was extracted, the first after tocón (below) and the second before the tree was bifurcated, then was shipped and pulped to the obtention of Kraft and Soda pulp evaluating their behavior in the pulping processes and bleaching, with the purpose of known it's properties and characteristics.

The coctions for Kraft process was made in two phases, in the first was applied a 2 x 2x 2 factorial experimental design with the factors: zone, time and charge, in the second was applied a 2^k experimental design, with the factors: time and charge; for both phases the constants was kepted: bath relation, sulfidity, active alkali and temperature. For the soda coctions was utilized a factorial 3 x 2 type experimental design, the factors and levels that was manage in this process were: charge and time, and the constants: hydromodule and temperature. The answer variables were the same for the three cases: performance, Kappa number and rejects.

For Kraft pulping in the first phase was obtained a maximum performance of 46. 9 %, in the second of 49. 30 % and for the soda process was of 46. 74 %.

For the bleaching was follow two sequences, one chlorates (CDE p PD) and other totally chlorine free (OAZE op PP). The Kraf pulp and soda pulp bleached with the chlorate sequence reached bleaches of 86. 36 % 150 y 84. 45 % 150 respectively and the witch ones that was bleached with the chlorine free sequence reached bleaches of 79.77 % 150 and 78.11 % 150 respectively.

Standard sheets was formed with brown pulp and bleached in different refination points. And according to the TAPPI, 2000 norms their physical-mechanical properties was tested.

1. INTRODUCCIÓN

Para millones de personas de todo el mundo, la industria de la pulpa y el papel constituye hoy un creciente problema, debido a la tala de bosques nativos, para la provisión de materia prima, para esta industria (Carrera, Lohmann s/f).

Una de las especies llamadas a alcanzar los retos que imponen los momentos actuales, lo constituyen los eucaliptos. En los últimos años se ha prestado mucha atención a la posibilidad del uso de la madera de eucalipto en la elaboración de pasta para papel. En esta materia Australia posee una basta experiencia, basada esencialmente en sus bosques naturales, y a partir de esta experiencia se emplean ya plantaciones de eucaliptos con estos fines en países, como Brasil, Portugal, España, Sudáfrica, Chile, y otros, que proveen de materia prima a la industria de la pasta celulósica (Orea y Cordero, s/f).

Mundialmente la producción de las plantaciones de eucalipto se destina en un 85% como madera para pulpa, un 10% para postes y productos de madera en rollo de buena calidad y un 5% para madera aserrada (FAO, 1990).

En México la industria de la celulosa consume principalmente maderas de los géneros *Pinus* y *Quercus*, además del bagazo de caña de azúcar (CNICP 2001). Se reporta que desde los años 90's se han tenido, problemas de abastecimiento y que una solución sería la implementación de plantaciones forestales comerciales con especies de Eucalipto (Macías 1993), así, paulatinamente se ha iniciado con esta actividad, en los estados de Tabasco, Guerrero, Veracruz, Nayarit y Michoacán, entre otros (SEMARNAT, 2000).

En Michoacán se han introducido diferentes especies de Eucalipto, con el propósito de recuperación y/o protección de suelos (Macias, 1993) o bien, para crear áreas de esparcimiento, encontrándose actualmente en la mayoría de sus municipios (Martínez, 1988).

Entre las especies de Eucalipto más importantes en el mundo, en términos de incremento corriente anual de madera, se encuentran: *E. grandis*, *E.*

camaldulensis, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna*, *E. deglupta*, *E. exserta*, *E. citriodora*, *E. paniculada* y ***E. robusta*** (Mangieri, Dimitri 1961; eufores s/f).

Las propiedades del papel se ven influenciadas por los procesos de obtención de la pulpa, materias primas fibrosas y la fabricación misma del papel. De estos factores el que ejerce la influencia más determinante es el tipo de materia prima, y le siguen en importancia el proceso de obtención de pulpa y la acción de fabricar el papel (Sanjuán, 1997).

El proceso a la Sosa, fue el primer método químico industrializado para obtención de pulpa a partir de madera, consistente en mezclar una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con la madera y someter la mezcla a temperaturas superiores a 165 °C para que pueda surtir efecto y se divida la pulpa celulósica de los demás componentes de la madera. El proceso al sulfato (Kraft) surgió como una modificación del proceso a la sosa, las pulpas producidas mediante este proceso son muy resistentes, particularmente cuando la cocción termina manteniendo un alto contenido de lignina en la pulpa, en este proceso la sustancia reactiva es el sulfuro de sodio (Na₂S) y la temperatura de cocción deberá estar entre 155 y 170 °C (Casey, 1990; Sanjuán 1997).

Aunque la celulosa por sí misma es de color blanco, las pulpas químicas son demasiado oscuras. Por lo tanto, el color de la pulpa se debe principalmente a la lignina residual del proceso de deslignificación de la fibra. Por ello el objetivo principal del proceso de blanqueo es la eliminación de la lignina residual de la pulpa café, así como de otros compuestos indeseables (Sanjuán, 1997).

En la presente investigación, se obtuvo pulpa por los procesos Kraft y a la sosa, se aplicaron secuencias de blanqueo cloradas y libres de cloro y se evaluaron física y mecánicamente las pulpas, sin blanquear y blanqueadas, obtenidas a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm procedente de una plantación experimental. Para tener así un fundamento científico que pueda contribuir a conocer su comportamiento a los procesos de obtención de pulpa, a la aplicación de secuencias de blanqueo y a la elaboración de papel.

2. GENERALIDADES DE LA ESPECIE

Taxonomía (ITIS report s/f; IHDCA 2004)

Reino:	Plantae
Subreino:	Tracheobionta
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	Rosidae
Orden:	Myrtales
Familia:	Myrtaceae
Genero:	Eucalyptus
Especie:	Eucalyptus robusta Sm

Descripción botánica (FAO 1956; FAO 1981; King, Skolmen 1990)

Nombre científico: *Eucalyptus robusta* Sm.

Nombre vulgar: “Swamp mahogany” (caoba de los pantanos) “Swamp messmate” en Australia, en Estados Unidos se le conoce como “robusta eucalyptus” y como robusta, eucalipto o “beakpod eucalyptus” en Puerto Rico.

Sinónimos: *E. multiflora* Poir.

Árbol: De 25 a 30 m de altura, porte muy erecto y de 0.9 a 1.20 m de diámetro.

Corteza: Persistente de color oscuro, fibrosa y con surcos profundos.

Madera adulta: Dura, de color pardo rojo y durable.

Hojas jóvenes: No opuestas, en más de cinco pares, pecioladas, lanceoladas, más o menos elípticas a ovales de 10 cm por 3 a 7 cm, aproximadamente.

Hojas adultas: Alternas, pecioladas, lanceoladas anchas, gruesas de color verde oscuro y brillante por la haz y verde pálido mate por el envés; de 10 a 18 cm por 4 a 8 cm; nervadura bastante regular; patente(60°).

Inflorescencias: En umbelas axilares o subterminales, de 5 a 10 flores, pedúnculo aplastado, de 20 a 30 mm de longitud.

Yemas: Pediceladas, de 7 a 10 mm de diámetro; opérculo cónico agudo, rostrado o coniforme.

Anteras: Macranteras.

Frutos: Con pedicelo corto atenuado o truncado; receptáculo cilíndrico, urceolado a veces, o claviforme, de 10 a 12 mm de diámetro por 12 a 15 mm de altura; disco oblicuo deprimido; valvas inclusas, deshilachadas, a menudo unidas por los extremos y sobresaliendo por el borde del receptáculo.



Figura 1. Árbol, hoja, flores y fruto del *Eucalyptus robusta* Sm

Hábitat (FAO 1956; FAO 1981)

Pantanos, riberas de estuarios, lagunas de agua salada y hondonadas.

Límites altitudinales (FAO 1956)

Inferior a nivel del mar; superior a algunos centenares de pies sobre el nivel del mar.

Suelos (FAO 1956)

Pesados, en estaciones pantanosas. Sin embargo puede crecer en suelos ligeros sino son demasiado secos.

Rocas madre: Variadas.

Subsuelo: Arcilloso pudiendo estar más o menos encharcado.

Área de distribución Natural

El *Eucalyptus robusta* Sm, conocido como robusta, es nativo a una estrecha zona costera en el suroeste de Australia. A lo largo de la costa australiana de New South Wales y el suroeste de Queensland. Se le encuentra principalmente en los pantanos y al borde de las lagunas y ríos costeros en donde se ve sujeto a inundaciones periódicas. La temperatura máxima promedio durante el mes más caliente es de 30 a 32 °C; la temperatura mínima promedio durante el mes más frío es de aproximadamente 3 a 5 °C. Ocurren de 5 a 10 heladas ligeras cada año en su área de distribución natural (FAO 1956; FAO 1981; King, Skolmen 1990).

Masas artificiales

La especie se adapta a una extensa variedad de climas y ha sido introducida en muchos climas tropicales, subtropicales y templados cálidos, incluyendo Puerto Rico, el sur de la Florida, la costa de California y en Hawai. Se ha naturalizado solamente en el sur de la Florida, Puerto Rico y Hawai (King, Skolmen 1990)

El *E. robusta* está muy diseminado por todo el mundo, para la repoblación de zonas diversas. En todas las regiones de los países mediterráneos no afectadas por heladas demasiado intensas hay muchos ejemplares, principalmente en España y Portugal, sobre todo al sur del país y en África del Norte, siendo más raro en Italia y Chipre (FAO 1981; FAO 1990)

La especie presenta bastante adaptabilidad para su aclimatación en países subtropicales con precipitaciones bien repartidas o de máxima estival, así como en los intertropicales, en las grandes altitudes. En conjunto se trata de una especie que se adapta mejor a las zonas tropicales húmedas que a las mediterráneas áridas (FAO 1981).

Plantaciones

Los distanciamientos de plantación más comunes son 3X3 m, 3X2 m, 3X1.5 m, la mejor época de plantación es a comienzo de la época lluviosa a finales de mayo y hasta finales del mes de julio. Se debe tener mucho cuidado con las malezas invasoras (Guardado 2004).

Especies afines

El *E. patentinervis* R. T. Baker es una especie muy afín al *E. robusta* desde los puntos de vista morfológico y ecológico. Algunos botánicos consideran incluso que se trata de un híbrido de *E. robusta* y otra especie desconocida. No es raro encontrar ejemplares con esta apariencia híbrida en las plantaciones de *E. robusta* de África del norte, España y Portugal (FAO 1956; FAO 1981).

Plagas y enfermedades

Es atacada por la bacteria *Phytophthora tumefaciens*. Los daños más comunes son por el viento y la pudrición de las raíces (Guardado 2004). Esta especie es propensa al ataque de gorgojo *Gonipterus* y termitas cuando es joven (Guardado 2004, Catálogo web de especies forestales s/f). La madera es susceptible a *Lyctus* y moderadamente resistente a las termitas (Catálogo web de especies forestales s/f).

Observaciones generales

Aunque sensible al frío, puede crecer sobre una variedad de suelos más amplia que la correspondiente a su distribución natural. La copa del árbol es demasiado densa, en comparación con el promedio de los eucaliptos, y el fuste está, por lo general, bien formado. A veces se emplea como cortavientos y como árbol de alineaciones (FAO 1956).

Su madera es de color rojo, con grano bastante áspero, fácil de trabajar. No seca bien en estufa y es recomendable para diversas construcciones, especialmente las expuestas al sol (FAO 1956).

Incremento 21 m³/ha/año, peso específico 0.64 g/cm³ y valor calorífico 4950 Kcal/Kg (Guardado 2004).

Usos

Se usa en la silvicultura urbana y como cortinas rompevientos (King, Skolmen 1990). La madera se emplea en la construcción general (FAO 1981; Guardado 2004), en construcciones pesadas y livianas, cajonería, postes, leña, carbón; para pulpa de fibra corta y como especie melífera (Catálogo web de especies forestales s/f). Además se usa en rollo y aserrada, lámina de plywood, postes de cercas, postes de tendido eléctrico, muelles y puentes (Guardado, 2004).

Híbridos

Se han reportado varios híbridos naturales con una contribución de *Eucalyptus robusta*. Todos los híbridos interespecíficos tienen lugar entre *E. robusta* y otras especies del subgénero *Symphomyrtus*. Se han otorgado unos nombres botánicos reconocidos a varios de estos híbridos. Estos son: *E. botryoides* var. *platycarpa* (*E. botryoides* x *E. robusta*), *E. grandis* var. *grandiflora* (*E. grandis* x *E. robusta*), *E. longifolia* var. *multiflora* (*E. longifolia* x *E. robusta*), *E. kirtoniana* (*E. robusta* x *E. tereticornis*), *E. patentinervis*, *E. insizwaensis* (*E. robusta* x *E. globulus*, probablemente) y un híbrido sin nombre (*E. robusta* x *E. saligna*, probablemente) (King, Skolmen 1990)

3. ANTECEDENTES

Trabajos relacionados directamente con pulpeo químico de la especie *Eucalyptus robusta* Sm, no se tuvieron a disposición; sin embargo existen investigaciones que se han realizado con diferentes especies de éste género.

Rodríguez (1971) lleva a cabo cocimientos a la sosa con madera de eucalipto, sin señalar la especie, cuyo rendimiento fue de 38.0% al cocer a 115 lb/plg², 343 °F, 3 horas y 15.5% de reactivos, y de 28.57% al pulpear a 110 lb/plg², 342 °F, 3.5 horas y 25.8% de reactivos.

Villalvazo (1973) obtiene pulpa kraft de *E. gigantea* y reporta un rendimiento de 31.5% al realizar cocciones a 165 °C, 300 minutos, 20% de reactivos y a 8 kg/cm² de presión. La pulpa la blanquea mediante la secuencia CEHP, alcanzando una blancura de 83 °GE.

King y Eskolman (1990) mencionan que el *Eucalyptus robusta* Sm., ha sido estudiado en la Florida como una fuente de pulpa, pero no reportan ningún dato relacionado.

Chávez (1996) realiza cocimientos etanol-agua-sosa con *E. globulus* Labell a 175 °C, 90 minutos y 19.0% de reactivos, logrando un rendimiento de 42.8%. Aplica la secuencia CEHH, logrando una blancura de 76.8%.

Fernández (1998) lleva a cabo cocimientos kraft con madera de *E. globulus* ssp: *globulus* y *E. dunnii*, de bosques técnicos de Uruguay. Para la primer especie el rendimiento fue de 46.7% al pulpear a 170 °C, 90 minutos y álcali activo de 20.5%. Para la segunda especie el rendimiento fue de 52% a las mismas condiciones, a excepción del álcali activo que fue de 19.6%.

Taques (1999) reporta para pulpa kraft obtenida de *E. globulus* una viscosidad de 18.05 cp y número de Kappa de 15.06 al pulpear a 170 °C, 90 minutos, álcali activo de 16.0% y sulfidez de 20.83%.

Rutiaga et al (2005) evaluaron rendimiento, No. de kappa y propiedades físicas en pulpa kraft de *Eucalyptus saligna*, reportando que las condiciones para maximizar el rendimiento (39.7%) fueron 15.5% de carga y 120 min de cocción y para minimizar el No. de Kappa, 15.5% y 150 min. Con respecto a los ensayos físico-mecánicos, señalan que en general, el punto óptimo de refinación fue a aproximadamente 45 °SR.

Gabriel et al (2005) blanquearon pulpa kraft de *Eucalyptus saligna* Smith, con No. de Kappa inicial 21.3, aplicando secuencias CDEopPD y OAZEopPP. Con las pulpas blanqueadas prepararon curva de refinación y formaron hojas estándar siguiendo las normas TAPPI (2000). Concluyen que el blanqueo con secuencia clorada es más eficiente, reflejándose en mayor blancura y que además la pulpa conserva buenas propiedades físico-mecánicas. Alcanzaron blancuras de 85.5 % ISO en secuencia clorada y 86.9 % ISO en libre de cloro.

Ortega et al (2005) realizaron pulpeo kraft con madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Manejando dos alturas del árbol, dos tiempos de cocción y dos niveles de carga de reactivo, evaluaron rendimiento, rechazos y No. de kappa. Encontrando que la zona (altura) presentó efecto sobre las tres variables de respuesta, la carga solo mostró efecto sobre los rechazos y el No. de Kappa, y el tiempo de cocción no causó ningún efecto.

Ortega et al (2005) blanquearon pulpa Kraft de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, utilizando secuencias CDEpPD y OAEOpPP, el No. de Kappa inicial fue 22 para la secuencia clorada y 18 para la libre de cloro. Refinaron las pulpas blanqueadas y determinaron sus propiedades físico-mecánicas, de acuerdo con las técnicas TAPPI (2000). Alcanzaron blancuras de 87.3% ISO para la secuencia clorada y 82% ISO para la libre de cloro, respecto a las propiedades físico-mecánicas, mencionan que las obtenidas con la secuencia (CD)EpPD presentan mejores resultados.

Rodríguez (2006) obtuvo pulpa kraft y a la sosa a partir de madera de *Eucalyptus citriodora* Hook, y la blanqueo. El pulpeo lo realizó en dos etapas, en la primera obtuvo pulpa kraft mediante un diseño factorial 2x2x2 y en la

segunda obtuvo pulpa Kraft y a la Sosa mediante un diseño 2^k evaluando para las dos etapas rendimiento, rechazos y No. de Kappa, obtuvo rendimientos máximos de 49.2% y 47.9% para el pulpeo kraft, primera y segunda etapa respectivamente, en el pulpeo a la sosa el rendimiento máximo fue 50.3%. Para el blanqueo utilizó las secuencias CDEpPD y OAZEopPP, alcanzando blancuras para la pulpa kraft de 87.2% y 71.3% con secuencia clorada y la libre de cloro respectivamente y para la pulpa a la sosa de 85.09% y 78.4% con las mismas secuencias.

Coello (2006) estudió la composición química de la madera de tres especies de eucalipto (*E. citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*), a dos alturas y en albura y duramen, determinando que el *E. robusta* presentó mayor acidez, siendo más alta en duramen y en la parte baja; menor proporción de sustancias inorgánicas siendo mayor en albura, mayor contenido de extraíbles teniendo más en la parte baja y en duramen y menor cantidad de holocelulosa existiendo más en la parte baja.

Pedraza (2006) realizó el estudio de composición química de la corteza de *E. camaldulensis*, *E. citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna* y evaluó las propiedades de sus extractos tánicos, concluyendo que la corteza de *E. robusta*: fue la más ácida, presentó la menor cantidad de cenizas, la menor cantidad de sustancias extraíbles, la mayor cantidad de lignina, la cantidad de holocelulosa fue muy similar a la de las demás y presentó el menor porcentaje de taninos.

Roncero et al (s/f) aplicaron postratamientos y aditivos en secuencia de blanqueo TCF (XOZP) a pasta Kraft de *Eucalyptus globulus* de procedencia industrial, el postratamiento lo realizaron después de la etapa Z, aplicando un reactivo (FAS, borohidruro sódico, hidrosulfito sódico y lavado alcalino) a consistencia media, obteniendo los mejores resultados con borohidruro sódico. Los aditivos (16 en total) los aplicaron a baja consistencia, antes de la etapa Z, sin lavar la pulpa entre ambas y determinaron que en general todos presentaron un efecto beneficioso, siendo más eficientes DMSO y ácido oxálico.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Realizar pulpeo Kraft y a la Sosa, blanquear y evaluar física y mecánicamente las pulpas obtenidas, a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm procedente de una plantación experimental.

4.2 Objetivos específicos

- Obtener pulpa Kraft y a la Sosa a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm.
- Aplicar una secuencia de blanqueo con cloro y otra totalmente libre de cloro, a las pulpas Kraft y a la Sosa obtenidas a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas en hojas estándar de pulpa Kraft y a la Sosa, sin blanquear y blanqueada (largo de ruptura, explosión, rasgado, blancura, porosidad y doblez).

5. HIPÓTESIS

Mediante el pulpeo kraft y a la sosa se puede obtener pulpa celulósica de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm., con propiedades físico-mecánicas similares o mejores a la pulpa celulósica obtenida de madera de *Quercus*, con datos reportados por la literatura, especie también de fibra corta, utilizada en la industria de la pulpa.

6. JUSTIFICACIÓN

Es conocido que en el país existen problemas de sobreexplotación, subutilización y deforestación, lo que ocasiona una presión sobre los bosques naturales existentes. Esta problemática ya se ha analizado en algunos sectores y se ha iniciado con posibles soluciones, una de ellas es la implementación y uso en plantaciones forestales comerciales de especies de rápido crecimiento, como lo son las del género *Eucalyptus* (FAO 1981, Montoya 1995).

Es necesario entonces, realizar estudios de pulpeo con las especies de eucalipto que vegetan en Michoacán, para así poder proponer, fundamentadamente, que especies podrían ser empleadas para este fin.

De ahí la importancia de realizar este trabajo de pulpeo a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm, especie de rápido crecimiento, a fin de sugerir su empleo en plantaciones comerciales forestales del Estado de Michoacán para la industria de la celulosa y contribuir a la protección y recuperación de los bosques naturales indirectamente, cabe destacar que el presente trabajo se desarrolla en el marco de un proyecto de investigación aprobado por los Fondos Mixtos CONACYT - Gobierno del Estado de Michoacán (clave: 12450), en colaboración con la empresa CRISOBA Industrial S. A. de C. V., Planta Morelia y la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Madera Celulosa y Papel.

Por ello, en el presente trabajo se estudiará la especie *E. robusta* Sm, que a una edad aproximada de siete años alcanza en promedio una altura total de 18 m y un diámetro a la altura del pecho de 19.4 cm.

7. METODOLOGÍA

7.1 Área de colecta

Se derribo un árbol de *Eucalyptus robusta* Sm, de una plantación forestal experimental propiedad de la empresa CRISOBA INDUSTRIAL, S. A. de C. V, planta Morelia. Esta plantación se localiza en terrenos pertenecientes a dicha empresa, mismos que se ubican a un costado de las instalaciones industriales de la planta, la cual esta situada en la región central del Estado de Michoacán, dentro del Municipio de Morelia, hacia la parte poniente de la ciudad y limita geográficamente al Norte con San Juanito Itzicuaru, al Sur con Cointzio, al Este con Morelos y al Oeste con la Minzita (fig. 2)

Se encuentra a 1997 m de A.S.N.M y su localización esta dada por las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: 19° 38.8'; Longitud: 101° 15.5'.

El tipo de clima que prevalece en la zona es templado subhúmedo en verano de acuerdo al sistema W. Koppen. Su temperatura media anual es alrededor de 17.7 °C, la temperatura máxima asciende a 20.3 °C y se presenta en los meses de mayo-junio y la mínima es de 14.4 °C y se registra durante los meses de diciembre-enero (INEGI, 2004).



Figura 2. Localización del área de colecta

A continuación se muestra un diagrama general (fig. 3) de la metodología mediante la cual se llevó a cabo el trabajo experimental para el desarrollo de la presente investigación.

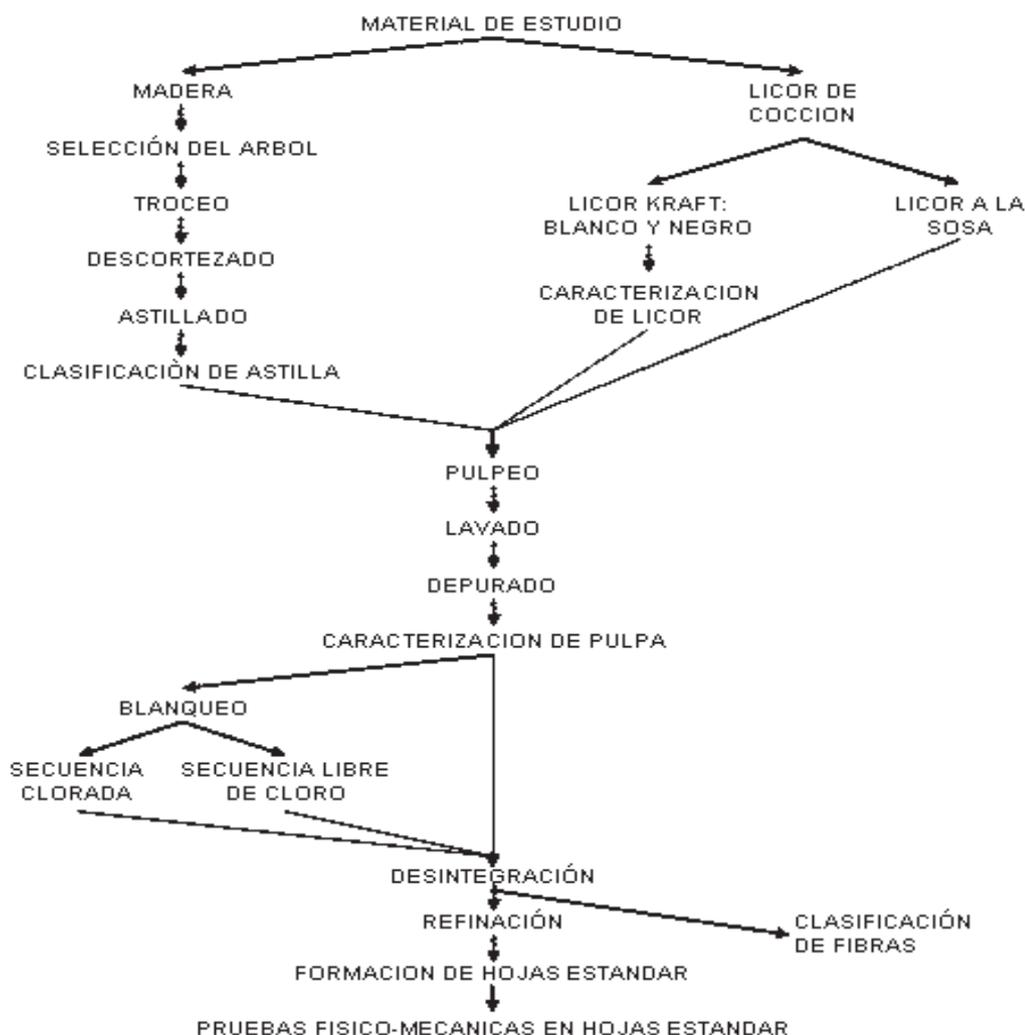


Figura 3. Diagrama general de la metodología seguida para el desarrollo experimental de este trabajo

Material de estudio

El ejemplar de estudio fue un árbol de 7 años de edad, con fruto, sano, sin plaga, de fuste recto, con una altura total de 18 m y un diámetro a la altura del pecho de 19.4 cm. Se derribo con motosierra y secciono en trozas de diferentes longitudes con la finalidad de aprovechar el material obtenido para la realización de diferentes trabajos de investigación. Para el presente estudio se destinaron dos trozas de 1.20 m de longitud cada una, de las cuales se obtuvo el material (madera), con que se llevaron a cabo los procesos de pulpeo. La

primera troza (zona de abajo) se tomo a 0.3 m del suelo, es decir enseguida del tocón y la segunda (zona de arriba) a una altura de 5.4 m del suelo (fig. 4).

La identificación botánica del ejemplar, estuvo a cargo de los biólogos M. en C. Patricia Silva Sáenz y Miguel Ángel Silva Farias.

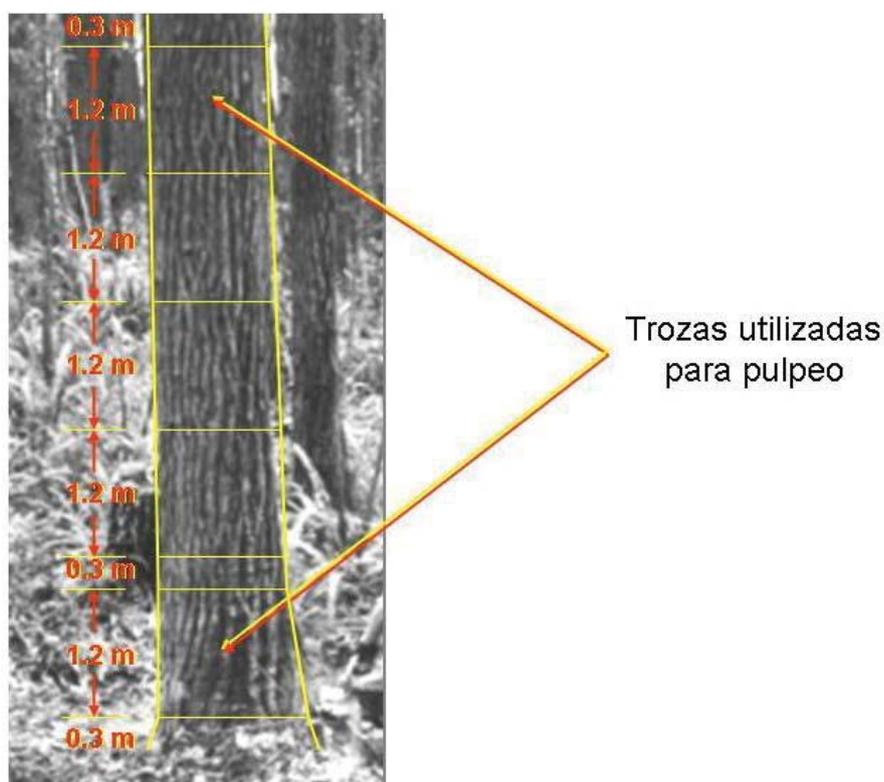


Figura 4. Ubicación en el árbol de las trozas utilizadas para pulpeo.

Preparación de astillas

Las trozas correspondientes se descortezaron de forma manual, posteriormente se astillaron y se realizó la clasificación de las astillas, todo esto en las instalaciones de CRISOBA INDUSTRIAL, S. A. de C. V., planta Morelia.

El astillador que se utilizó es tipo vertical de disco giratorio y sus características técnicas se presentan en la tabla 1. Cabe mencionar que para el astillado de las trozas se espero hasta el cambio de cuchillas en el astillador, con la finalidad de obtener astillas más uniformes, además se limpiaron y soplaron tanto el astillador como las bandas transportadoras para evitar que la astilla obtenida de esta especie, se fuera a contaminar con astilla de alguna otra especie que se hubiera astillado anteriormente.

Tabla 1. Características técnicas del astillador de CRISOBA INDUSTRIAL, S. A. de C. V., planta Morelia

NO. DE SERIE Y MODELO	IC-5052-83
Diámetro y material del disco	112"- Acero
No. de cuchillas	12
Detalle y tamaño de cuchillas	B-6730
Grosor	0.5"
Ancho	3"
Longitud	30"
Tipo de carga	Segmental-Normal
Tolva	Descarga por gravedad

La astilla se clasifico en una criba vibratoria de movimientos horizontales oscilatorios, velocidad constante y tiempo ajustable de acuerdo a los requerimientos, que para este caso fue de 5 minutos.

La criba consta de 7 elementos. De los cuales 6 son platinas de barras y orificios y la séptima es lisa. Sus características técnicas se presentan en la tabla 2.

Se aceptaron solamente las astillas obtenidas de las fracciones 3 y 4 con el propósito de asegurar una uniformidad en las cocciones.

Las dimensiones de la astilla aceptada son: espesor entre 3 y 7 mm, largo de 25 a 30 mm y ancho de 20 mm.

Tabla 2. Características técnicas de la zaranda utilizada para la clasificación de la astilla

FRACCIÓN	TIPO DE PLATINA	CARACTERÍSTICAS	OBTENCIÓN
1	Orificios	Diámetro de 45 mm	Largos
2	Ranuras o barras	Separación de 10 mm	Gruesos
3	Ranuras o barras	Separación de 8 mm	Aceptada
4	Orificios	Diámetro de 7 mm	Aceptada
5	Orificios	Diámetro de 5 mm	Cortos
6	Orificios	Diámetro de 3 mm	Pin-chips
7	Lisa	Retención de finos	Finos

Licor de cocción

Licor Kraft

Los licores de cocción que se utilizaron para el proceso Kraft, fueron licores industriales, donados por la empresa CRISOBA Industrial (Morelia).

Las características del licor blanco de acuerdo a los datos proporcionados por la planta fueron: sulfidez; 18.3% y concentración; 98%.

Los licores se analizaron (blanco y negro) en los laboratorios del DMCyPI, por el método potenciométrico (Sanjuán 1993; Sanjuán 1994), los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del análisis de los licores donados por CRISOBA INDUSTRIAL S.A de C. V., planta Morelia

CARACTERÍSTICAS	LICOR BLANCO g/l como Na ₂ O	LICOR NEGRO g/l como Na ₂ O
Álcali activo como NaOH	100.00	5.89
Álcali efectivo	87.26	2.63
Na ₂ S	20.00	6.51
Álcali total	108.65	107.00
NaOH	78.11	0.62
Na ₂ CO ₃	12.25	7.75
% Sulfidez	18.97	1.10
Densidad en g/mL	1.08	1.00

Determinación de la densidad en los licores de cocción

La determinación de la densidad, tanto en licor blanco como en licor negro se llevo a cabo de la siguiente forma:

- 1. Primeramente se peso un vidrio de reloj, y se tomo como A,
- 2. Después se tomo 1.0 ml de licor y se coloco en un vidrio de reloj, se peso y el peso de ambos se manejo como B
- 3. Finalmente la densidad se calculo de la siguiente manera: B-A, y las unidades obtenidas son g/ml.

Licor a la Sosa

El licor de cocción a la Sosa, se preparo a partir de una solución de sosa con una concentración de 44.9 % en peso como NaOH.

7.2 Pulpeo Kraft y a la Sosa

Pulpeo Kraft

La obtención de la pulpa Kraft se realizó en dos etapas.

En la primera etapa, se aplicó un diseño experimental factorial (2x2x2) (Montgomery, 1991), con la finalidad de llevar a cabo una evaluación estadística de los efectos:

A = altura de extracción de la troza (abajo, arriba)

B = carga de reactivos (14.0, 15.5 %) y

C = tiempo de cocción (120, 150 min)

Sobre las siguientes variables de respuesta: rendimiento, No. de Kappa y rechazos.

Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron: temperatura máxima (160 °C), relación de baño (4:1) y sulfidez (18 %).

Los resultados fueron analizados con un nivel de confianza estadístico, del 95.0% y se procesaron con el programa Statgraphics Plus versión 4.0.

El modelo estadístico correspondiente al diseño experimental factorial mencionado, es:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \xi_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl}	=	Variable de respuesta
μ	=	Efecto común o media general
α_i	=	Efecto del factor A
β_j	=	Efecto del factor B
γ_k	=	Efecto del factor C
$(\alpha\beta)_{ij}$	=	Efecto de la interacción AB
$(\alpha\gamma)_{ik}$	=	Efecto de la interacción AC
$(\beta\gamma)_{jk}$	=	Efecto de la interacción BC
$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$	=	Efecto de la interacción ABC
ξ_{ijkl}	=	Error aleatorio

A continuación se presentan ejemplos de hipótesis estadísticas que se pueden probar de acuerdo con este modelo estadístico, tomando para estos ejemplos como variable de respuesta el rendimiento.

H_0 : Efecto de A = 0

H_1 : Efecto de A \neq 0

H_0 : Efecto de B = 0

H_1 : Efecto de B \neq 0

H_0 : Efecto de C = 0

H_1 : Efecto de C \neq 0

H_0 : Efecto de AB = 0

H_1 : Efecto de AB \neq 0

H_0 : Efecto de AC = 0

H_1 : Efecto de AC \neq 0

H_0 : Efecto de BC = 0

H_1 : Efecto de BC \neq 0

H_0 : Efecto de ABC = 0

H_1 : Efecto de ABC \neq 0

En la tabla 4, se presentan las 16 corridas experimentales de pulpeo efectuadas en esta primera etapa, de acuerdo al diseño experimental aplicado.

Tabla 4. Plan de cocciones experimentales para la primera etapa de pulpeo Kraft, de acuerdo con el diseño experimental factorial (2x2x2).

NUMERO	ZONA DE UBICACIÓN	TIEMPO (MIN)	CARGA DE REACTIVOS (%)
1	ARRIBA	150	15.5
2	ABAJO	120	15.5
3	ABAJO	150	14.0
4	ARRIBA	150	14.0
5	ABAJO	150	15.5
6	ARRIBA	150	14.0
7	ARRIBA	120	15.5
8	ARRIBA	150	15.5
9	ABAJO	120	14.0
10	ABAJO	150	14.0
11	ARRIBA	120	15.5
12	ABAJO	120	15.5
13	ABAJO	150	15.5
14	ARRIBA	120	14.0
15	ABAJO	120	14.0
16	ARRIBA	120	14.0

Para la segunda etapa se aplicó un diseño experimental de tipo factorial 2^k (Mongomery, 1991), donde $k = 2$, aplicado en tres niveles ($n = 3$), con los siguientes factores y niveles:

Factor A = tiempo de cocción a temperatura máxima (120 y 150 min).

Factor B = Carga de reactivos (14.0 y 15.5%).

En esta etapa las cocciones se realizaron mezclando astilla de las dos zonas (abajo y arriba) en proporción de 50 y 50%.

Las variables de respuesta y las constantes manejadas, fueron las mismas que para la primera etapa.

Los datos resultantes se analizaron con un 95% de confianza estadística y se utilizó el mismo paquete estadístico que en la etapa anterior.

En la tabla 5, se presentan las 12 corridas que se llevaron a cabo para esta etapa, mismas que se determinaron en base al diseño experimental utilizado.

Tabla 5. Corridas experimentales de acuerdo con el diseño factorial 2^k , para las cocciones Kraft de la segunda etapa.

NUMERO	CARGA DE REACTIVOS (%)	TIEMPO (min)
1	15.5	150
2	15.5	120
3	14.0	150
4	14.0	120
5	15.5	150
6	15.5	120
7	14.0	150
8	14.0	120
9	15.5	150
10	15.5	120
11	14.0	150
12	14.0	120

Pulpeo a la Sosa

Para las cocciones a la Sosa se aplicó un diseño experimental factorial de tipo 3 x 2 (Montgomery, 1991) y al igual que en las cocciones kraft de la segunda etapa, se mezcló astilla de las dos alturas (abajo y arriba) en iguales proporciones.

Los factores y niveles que se manejaron en este proceso de pulpeo fueron:

A = Carga de reactivos (18, 24 y 28%)

B = Tiempo de cocción (120 y 180 min)

Las constantes que se mantuvieron en este proceso fue la temperatura máxima (175 °C) y el hidromódulo (4:1). Las variables de respuesta fueron las mismas que para el pulpeo kraft.

Los resultados al igual que en las cocciones Kraft, se analizaron y procesaron con el paquete estadístico Statgraphics Plus versión 4.0, a un nivel de confianza estadístico del 95.0%.

A continuación se muestran en la tabla 6, las corridas experimentales que se llevaron a cabo para este proceso.

Tabla 6. Corridas experimentales para el pulpeo a la Sosa conforme al diseño factorial 3x2

NUMERO	CARGA DE REACTIVOS (%)	TIEMPO (min)
1	24	180
2	18	120
3	28	180
4	28	120
5	18	180
6	18	120
7	28	120
8	28	180
9	24	120
10	18	180
11	24	120
12	24	180

Cocciones

Cualquier proceso químico de pulpeo consiste en mezclar la materia prima fibrosa (reactante) con una solución acuosa de sustancias inorgánicas (reactivo) denominada licor de cocción, cuya composición varía de acuerdo con el proceso que se utilice, y con el uso que se le vaya a dar a la pulpa. La mezcla se alimenta a un digestor y se le aplica calor, con lo que el material lignocelulósico sufre un proceso de cocción en el que se degrada la lignina, que se vuelve soluble en el medio y se liberan las fibras. El proceso se realiza bajo condiciones controladas de presión, temperatura y tiempo (Sanjuán 1997).

Cocciones Kraft

Las cocciones por el proceso Kraft se realizaron de acuerdo con el procedimiento que ejemplifica la figura 5, en un digestor rotatorio (fig. 6).

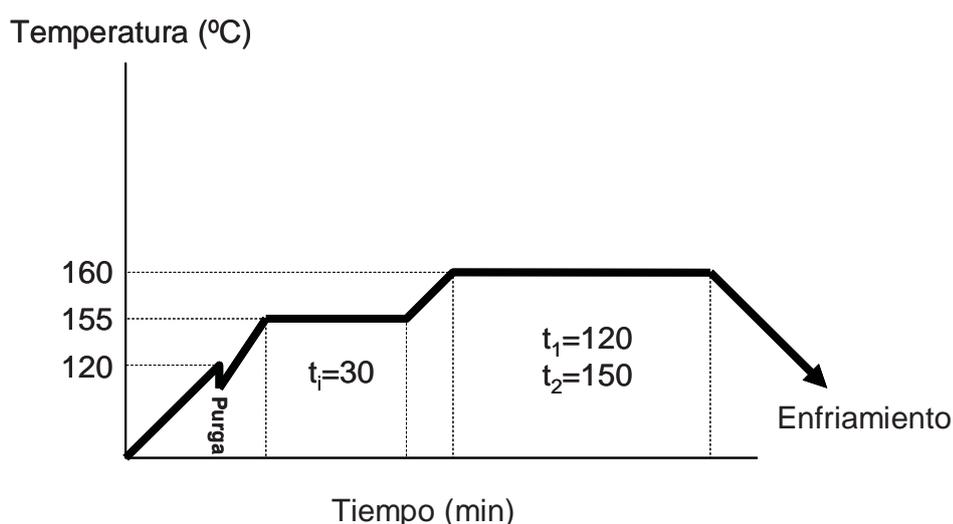


Figura 5. Diagrama representativo del proceso seguido para las cocciones del pulpeo Kraft.



Figura 6. Digestor rotatorio empleado para las cocciones del pulpeo Kraft.

Cocciones a la Sosa

Las cocciones se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento que se ilustra en la figura 7, y el equipo empleado fue un baño de aceite (fig. 8B) con microdigestores de 1000 ml de capacidad (fig.8A), y el enfriamiento se realizó en un baño de agua a temperatura ambiente (fig. 8C).

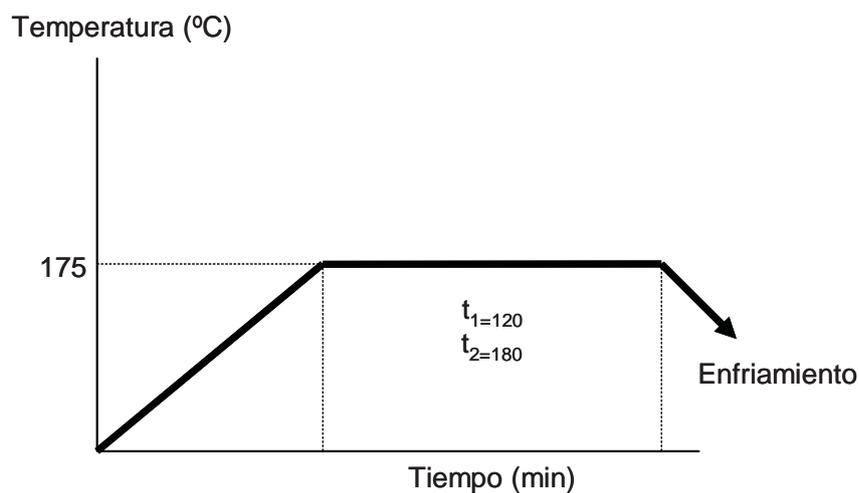


Figura 7. Diagrama del proceso seguido para las cocciones de pulpeo a la sosa.

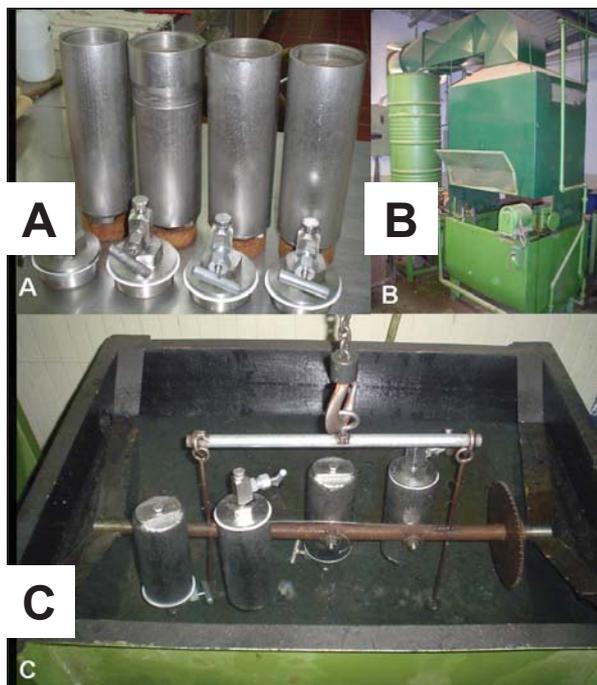


Figura 8. Equipo utilizado en las cocciones de pulpeo a la sosa, (A) Microdigestores; (B) Baño de aceite; (C) Baño de agua con eje y microdigestores.

Desintegrado

Al concluir el tiempo de cocción el material fibroso conserva su forma original (astilla), por lo que se le da un tratamiento en el que se disgregan o desfibran los paquetes o haces fibrosos y se eliminan los nudos (Sanjuán 1997).

El desfibrado se realizó en un pulper de laboratorio, a una velocidad de 1700 rpm, durante 1 min, este tiempo se considero para evitar un posible daño a las fibras celulósicas (fig. 9).



Figura 9. Equipo utilizado para desfibrar la pulpa.

Lavado

La pulpa se lava con el fin de separarla de los materiales solubles que la acompañan después de la cocción (Sanjuán 1997).

Las pulpas, fueron lavadas en un tamiz de metal, con tela de plástico, empleando para ello un chorro de agua a temperatura ambiente, hasta eliminar completamente el licor negro residual contenido en la pulpa (fig. 10).



Figura 10. Lavado de pulpa.

Depurado

El objetivo de esta etapa es la eliminación de las sustancias que interfieren en la suspensión fibrosa y que difieren de las fibras individuales en forma y composición química (Sanjuán 1997).

Para esta operación se utilizó un depurador experimental, de forma cilíndrica provisto con un agitador de hélice (fig. 11A), que sirve para mantener la disolución de la pulpa en el agua, además tiene un sistema de platinas intercambiables según el tipo de fibra que se quiere depurar. En este caso se utilizó la platina con abertura de 0.15 mm, para fibra corta (fig.11B).

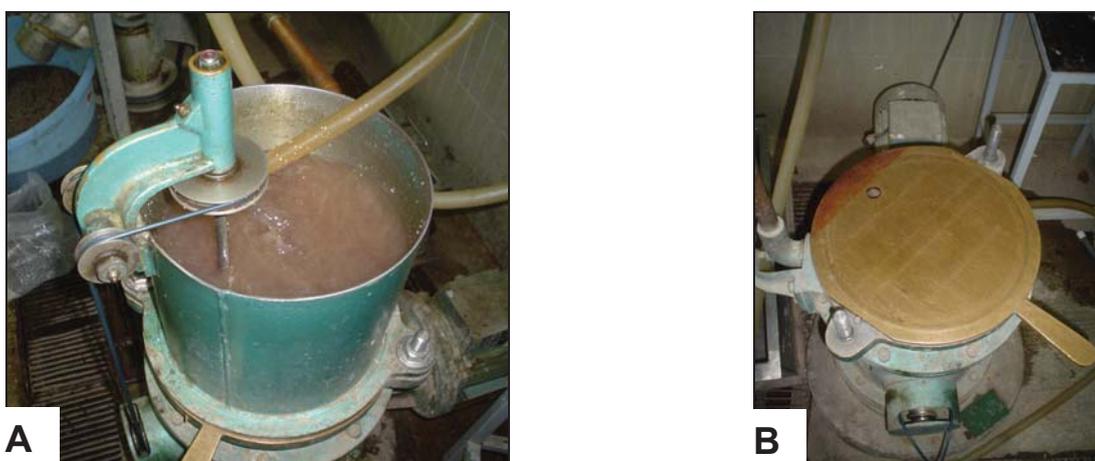


Figura 11. Equipo empleado en la depuración de las pulpas, (A) Depurador; (B) Platina para fibra corta

Centrifugado

Se realizó con la finalidad de retirar la mayor cantidad posible del agua contenida en la pulpa, la cual una vez lavada y depurada se colocó en un saco de tela (fig. 12A), se introdujo al equipo (fig. 12B), y se centrifugó por aproximadamente 5 min.

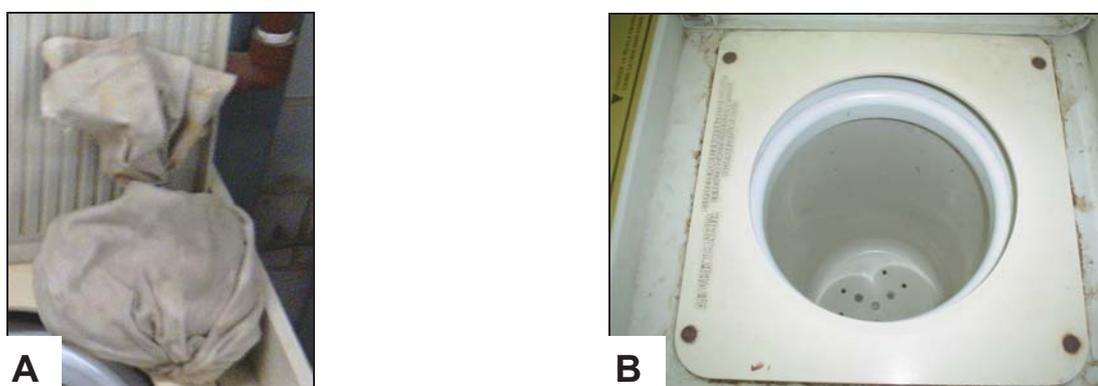


Figura 12. Equipo utilizado para centrifugar la pulpa y eliminar el exceso de agua, (A) saco de manta con la pulpa; (B) Centrifuga

Homogeneizado

Se llevó a cabo para tratar que la humedad se distribuyera uniformemente en toda la pulpa, la cual una vez centrifugada se pasó a un equipo para homogeneizar (fig. 13), el cual se operó a una velocidad media y el tiempo de homogeneizado se le dio de acuerdo con la apariencia que presentaba la pulpa a simple vista.



Figura 13. Equipo para homogeneizar la pulpa.

Caracterización de las pulpas

El análisis de las pulpas se llevó a cabo siguiendo las normas de la Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI 2000).

Rendimiento

Una vez homogeneizada la pulpa (fig. 14), se le determinó su contenido de humedad (fig. 15), para poder cuantificar la cantidad de pulpa base seca obtenida y conocer su porcentaje respecto a la madera base seca que se alimenta al digestor.

El rendimiento se determinó de acuerdo a las especificaciones de la norma T 240 om-93.



Figura 14. Pulpa homogeneizada y rechazos.

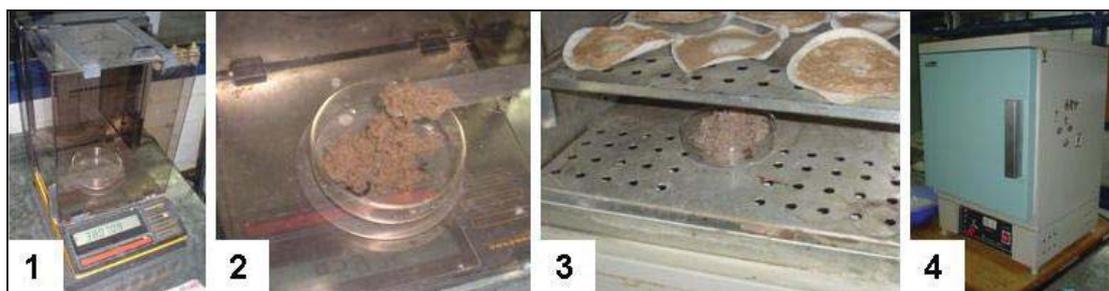


Figura 15. Determinación de contenido de humedad en pulpa.

No. de Kappa

Es aplicado para determinar la blanqueabilidad o el grado de deslignificación de una pulpa (Sanjuán 1994) (fig. 16).

Esta determinación se realizó siguiendo la norma T 236 om-99.

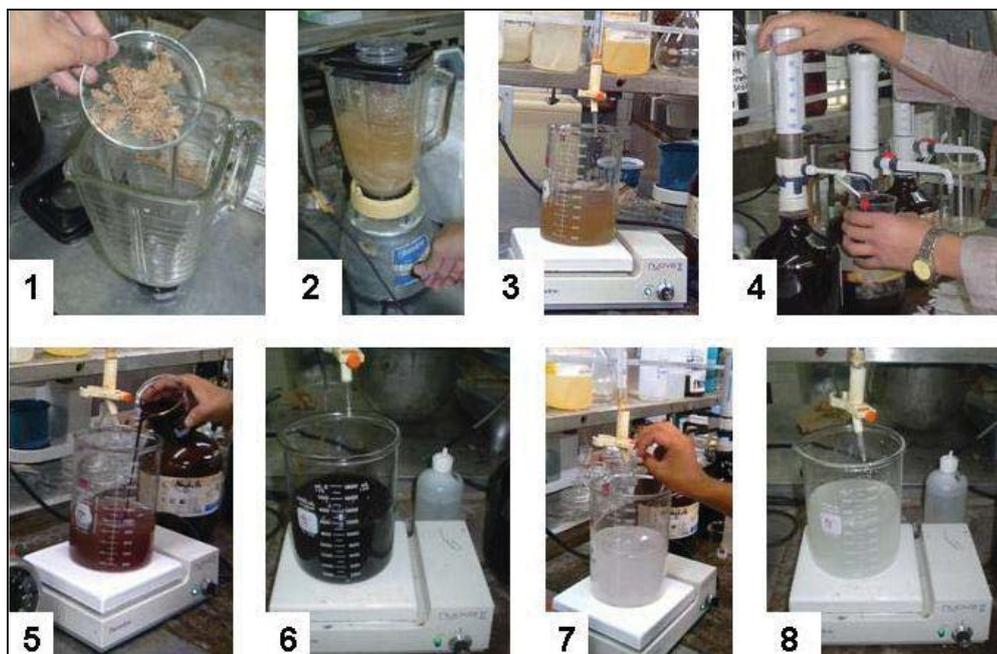


Figura 16. Determinación del No. de Kappa.

Rechazos

Se consideraron como rechazos, los paquetes fibrosos y/o nudos que se obtuvieron sobre la platina una vez terminada la depuración. Se recolectaron y colocaron en un platillo de aluminio (fig.17), se secaron en estufa (fig.18), con el fin de obtener su peso seco y determinar el porcentaje de los mismos con respecto a la madera base seca que se alimento al digestor.

La medición del porcentaje de rechazos, se efectuó bajo lo especificado por la norma T 23 on-60.



Figura 17. Rechazos en platillo de aluminio



Figura 18. Estufa de secado

7.3 Blanqueo de la pulpa Kraft y a la Sosa

Para el blanqueo tanto de la pulpa obtenida por el proceso Kraft, como la que se obtuvo mediante el proceso a la Sosa, se aplicaron dos secuencias, una en la que se usó cloro y otra totalmente libre de cloro.

La secuencia en la que se aplicó Cl_2 fue la siguiente: CDEpPD (Cloro-Dióxido, Extracción peróxido, Peróxido y Dióxido) y la secuencia TCF, consistió en las etapas: Oxigenación, Acidificación, Ozonificación, Extracción oxígeno-peróxido, una primera aplicación de Peróxido y una segunda aplicación de Peróxido (OAZEopPP).

Para cada etapa de blanqueo de las pulpas Kraft y a la Sosa. El pH, el consumo de reactivos y el No. de Microkappa fueron los parámetros de control, por lo que en cada etapa de las diferentes secuencias de blanqueo, se tomó el pH inicial, el pH final y se muestreo licor residual. La pulpa fue lavada, centrifugada, homogeneizada, se calculó su contenido de humedad y se determinó su No. de Microkappa.

Blanqueo con secuencia clorada

Pulpa Kraft

Para blanquear la pulpa Kraft, utilizando una secuencia clorada las condiciones de reacción y los parámetros que se siguieron en las diferentes etapas se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones para el blanqueo de *Eucalyptus robusta* Sm (secuencia CDEpPD), pulpa Kraft.

CONDICIONES DE REACCION				
PARAMETRO	ETAPA			
	CD	Ep	P	D
% Cl ₂	2.4			
% ClO ₂	1.25			0.3
% NaOH		2	0.8	0.08
% H ₂ O ₂		1	1.2	
% MgSO ₄			0.05	
% Na ₂ SiO ₃			1	
% Cs	4.5	12	12	12
Temperatura (°C)	60	70	80	70
Tiempo (min)	45	60	120	180
pH inicial	1.92	11.97	11.5	6.75

Pulpa a la Sosa

Para blanquear la pulpa a la Sosa utilizando una secuencia clorada las condiciones y parámetros que fueron empleados para cada etapa, se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones utilizadas para blanquear la pulpa a la Sosa, empleando la secuencia clorada (CDEpPD).

CONDICIONES DE REACCION				
PARAMETRO	ETAPA			
	CD	Ep	P	D
% Cl ₂	2.6			
% ClO ₂	1.4			0.4
% NaOH		2	1	
% H ₂ O ₂		1	1.6	
% MgSO ₄			0.05	
% Na ₂ SiO ₃			1.5	
% Cs	4.5	12	12	12
Temp. (°C)	60	70	80	70
Tiempo (min)	30	90	120	180
pH inicial	1.71	11.96	11.08	5.26

En ambas pulpas la forma en que se llevo a cabo el proceso y los pasos que se siguieron durante el desarrollo de las diferentes etapas de blanqueo fueron los mismos.

Etapa Cloro-Dióxido

La pulpa se colocó en bolsas de polietileno, se le adicionó el agua clorada y el dióxido de cloro, lo cual se llevo a cabo en una campana de extracción (fig. 19A), se procuró que la pulpa se impregnara con el licor lo más homogéneamente posible, se tomó el pH inicial (fig. 20B), se selló la bolsa y se puso en baño térmico con control de temperatura (fig. 19B), para mantener las condiciones requeridas.

Al finalizar el tiempo indicado, se tomó el pH final (fig. 20C) y se muestreo licor residual para calcular el consumo de reactivos (fig. 19C)



Figura 19. (A) adición del dióxido de cloro en la campana de extracción; (B) baño térmico con la bolsa de polietileno que contiene la pulpa y (C) embudo Buchner y vaso de precipitados para la extracción de licor residual

Extracción peróxido

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa inicial, se establecieron las condiciones de esta etapa y al igual que en la anterior, a la pulpa se le añadió el licor de blanqueo (fig. 20A), mismo que fue preparado previamente, se homogeneizó la pulpa, se determinó su pH inicial (fig. 20B), se depositó en la bolsa de polietileno, se selló la bolsa y se sumergió en el baño térmico para tener así las condiciones deseadas.



Figura 20. (A) adición del licor de blanqueo a la pulpa; (B) determinación de pH inicial y (C) medición de pH final

Peroxido

Para esta etapa, el procedimiento que se siguió fue el mismo que para la etapa de Extracción-peróxido.

Dióxido

En esta etapa la forma en que se llevo acabo el procedimiento, es semejante a la etapa Cloro–Dióxido

Blanqueo con la secuencia totalmente libre de cloro

Pulpa Kraft

Las condiciones de reacción y los parámetros manejados en cada una de las etapas de la secuencia totalmente libre de cloro para blanquear la pulpa Kraft se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Condiciones de blanqueo para *Eucalyptus robusta* Sm (secuencia OAZEopPP), pulpa Kraft

CONDICIONES DE REACCIÓN						
PARÁMETRO	ETAPA					
	O	A	Z	Eop	P	P
% NaOH	3			1.6	0.8	0.3
% H ₂ O ₂				0.8	1.2	0.7
% MgSO ₄	0.5				0.05	0.05
% Na ₂ SiO ₃					1	1
% DTPA					0.3	
% Cs	10	3	40	10	12	15
% Z			1			
Temp (°C)	110	Amb	Amb	90	80	80
Tiempo (min)	75	30	14.47	60	180	120
O (Kg/Cm ²)	4			2		
pH inicial	12.77		3.06	13.47	11.09	10.5

Pulpa a la Sosa

Para el blanqueo totalmente libre de cloro de la pulpa a la Sosa, las condiciones de trabajo y los parámetros que se manejaron se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Condiciones de blanqueo para *Eucalyptus robusta* Sm (secuencia OAZEopPP), pulpa a la Sosa

CONDICIONES DE REACCION						
PARAMETRO	ETAPA					
	O	A	Z	Eop	P	P
% NaOH	3			2	1.8	0.9
% H ₂ O ₂				1	3	1.5
% MgSO ₄	0.5				0.05	
% Na ₂ SiO ₃					2	
% Cs	10	3	37	10	15	15
% Z			1			
Temp. (°C)	100	Amb	Amb	90	80	80
Tiempo (min)	90	30	16.4	90	180	180
O (Kg/Cm ²)	4			2		
pH inicial	12.57	2.98	N D	12.12	11.27	11.08

En ambas pulpas el procedimiento para realizar el blanqueo fue el mismo.

Oxigeno

En esta etapa se utilizó un tanque con oxígeno y un digestor rotatorio de acero inoxidable (fig. 21) equipado con resistencias eléctricas para el control de temperatura, el cual sirvió como reactor.

Para llevar a cabo el blanqueo, la pulpa fue mezclada con el licor y homogeneizada. Se paso al digestor, al que una vez sellado se conecto el tanque de oxígeno a través de una válvula que fue colocada previamente en la tapa con esta finalidad, se aplico la presión de oxígeno requerida, se cerro la válvula para no dejar escapar presión, se retiro la conexión con el tanque de oxígeno y se puso en funcionamiento el digestor hasta alcanzar la temperatura y el tiempo señalado de acuerdo a las condiciones de reacción.



Figura 21. Equipo utilizado para el blanqueo con oxígeno

Acidificación

La pulpa se acidificó previamente al tratamiento con ozono, esto con la finalidad de disminuir un poco la degradación de las fibras en dicha etapa, la acidificación se llevó a cabo con ácido nítrico 4 N (H_2SO_4), el cual se adicionó por goteo con una pipeta hasta llegar al pH deseado. La pulpa acidificada se dejó reposar a oscuras.

Ozonificación

La pulpa fue desmenuzada en una licuadora a la que se le encintaron las aspas, para evitar que las fibras fueran cortadas, después se colocó en matraces bola y se llevaron al equipo generador de ozono (fig. 22), donde fue tratada la pulpa.



Figura 22. Equipo empleado para ozonificar la pulpa

Extracción oxígeno-peróxido

Esta etapa se realizó en el mismo equipo donde se llevó a cabo el tratamiento de oxigenación (fig. 21) y al igual que la etapa mencionada la pulpa se mezcló con el licor de blanqueo, homogeneizó y depositó en el reactor para aplicarle la presión de oxígeno requerida.

Peróxido 1ª y 2ª

Para la aplicación de las etapas de peróxido, la pulpa mezclada con el licor de blanqueo y homogeneizada, se colocó en bolsas de polietileno y se sumergió en un baño térmico donde se mantuvieron las condiciones de temperatura deseadas.

7.4 Evaluación físico-mecánica de las pulpas

La evaluación de la calidad de una pulpa en cuanto a sus propiedades físico-mecánicas, es utilizada para la determinación de las propiedades y características físicas que tiene la pulpa, como la longitud de la fibra, su composición fibrosa y sus resistencias físicas. Esta evaluación, se realiza normalmente mediante una curva de refinación, que incluye varias operaciones, entre las que se encuentran la desintegración y refinación de la pulpa, la formación de hojas estándar y la determinación de propiedades físico-mecánicas en las hojas estándar (Escoto 2004).

Desintegración

Se realizó de acuerdo al método T 205 sp-95 (ISO 5263), en un equipo para desintegración de pulpas (fig. 23), durante 5 min a una consistencia de 1.5 %.



Figura 23. Equipo para desintegración de pulpas

Clasificación de fibras

A través de una clasificación de fibras en fracciones fibrosas (fig. 24B), se puede conocer el grado de acortamiento fibrilar debido al tratamiento químico o mecánico, además de la distribución de los diferentes elementos celulares que componen una pulpa (Escoto 2004).

La clasificación de las fibras se realizó por el método Bauer McNett (fig. 24A), de acuerdo con la norma T 233 cm-95.

Solamente se realizó la clasificación en las pulpas Kraft y a la Sosa, sin blanquear y sin refinar.

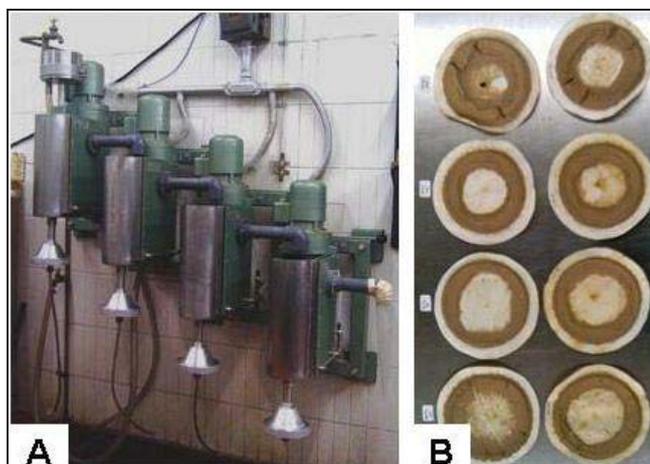


Figura 24. (A) Equipo Bauer McNett para la clasificación de fibras, (B) Fracciones fibrosas retenidas en las diferentes mallas.

Refinado

La refinación se llevó a cabo en un molino Jokro (fig. 25), de acuerdo con el método ISO 5264/3 (Escoto, 2003).

Las pulpas Kraft y a la Sosa, sin blanquear y blanqueadas con la secuencia que incluye cloro, se refinaron a 4 puntos (15, 30, 40 y 60 min). Las pulpas Kraft y a la Sosa, blanqueadas con la secuencia libre de cloro se refinaron solamente a 2 puntos (7 y 14 min y 15 y 30 min, respectivamente).



Figura 25. Equipo para refinación de pulpas (Molino Jokro y detalle de sus elementos)

Medición del tratamiento de refinación

La medición de los grados de refinación se realizó por el método (Schopper Riegler ($^{\circ}$ SR)) haciéndose la correspondiente corrección por peso, (fig. 26), según el método ISO 5267/1 (Escoto 2003).



Figura 26. Equipo para medir los $^{\circ}$ SR, en pulpas y Balanza para determinar el peso seco de la pulpa residual colectada del recipiente de drenado

Formación de hojas estandar

Este proceso se efectuó en un equipo TMI (Tappi) para formar hojas estándar, de tipo semiautomático digital con agitación mediante aire (fig. 27). Y se realizó de acuerdo al método TAPPI 205 sp-95 (TAPPI 2000; Escoto 2003)

Este equipo consiste de tres componentes; una consola de control en la que se ajustan las condiciones de aire y vacío que son utilizadas tanto por el formador

como por la prensa, un formador de hojas el cual es accionado electrónicamente y una consola de prensado (Escoto 2004).

Las hojas formadas se secaron al aire, adheridas en láminas de formaica.



Figura 27. Equipo TMI para formación de hojas estándar (según método Tappi)

Ensayos Físico-Mecánicos en las hojas de papel estándar

Las pruebas físico-mecánicas practicadas en a las hojas de papel estándar formadas con el material fibroso sin refinar y refinado, se llevan a cabo a través de un muestreo específico y los resultados son procesados mediante formulas de calculo. Esta evaluación nos sirve para estimar si la calidad de una pulpa puede ser la indicada para producir ciertos tipos de papeles, de acuerdo a sus propiedades y características (Escoto 2003).

Los ensayos se realizaron comenzando con los no destructivos (gramaje, espesor, porosidad y blancura), seguidos por los destructivos (tensión, explosión, rasgado y doblez).

Preparación de las muestras

Se seleccionaron 8 hojas sin defectos visibles y se acondicionaron en una cámara ambientada a una temperatura de 23 ± 1 °C y $52 \pm 2\%$ de humedad relativa (fig. 28-1), por un periodo de 48 horas, de acuerdo con la norma T 402 sp-98 (TAPPI 2000).

Peso base o gramaje

Para su determinación se utilizaron las hojas antes de ser cortadas y se llevó a cabo siguiendo la norma T 410 om-98 (TAPPI 2000).

Espesor

Al igual que para el gramaje se emplearon las hojas antes de su cortado en probetas, la medición se hizo en cinco puntos de la misma con un micrómetro (fig. 28-2), esta determinación se realizó de acuerdo con la norma T 411 om-97 (TAPPI 2000).

Muestreo

Las hojas se cortaron de acuerdo con la norma T 220 sp-96 (TAPPI 2000) (figs 28-3 y 28-4) y al igual que las hojas, las probetas obtenidas se ambientaron para poder realizar los ensayos.

Porosidad

Se determinó midiendo el tiempo en segundos que tarda en pasar 100 ml de aire a través del papel, el ensayo se llevo a cabo por el método Gurley (fig. 28-5) de acuerdo con la norma T 460 om-96 (TAPPI 2000).

Blancura

En esta prueba se utilizó un fotómetro Zeiss-Elrepho 3000 DATA color (fig. 28-6) y se midió en base a la norma T 525 om-92 (TAPPI 2000).

Tensión

Se determinó la resistencia a la tensión (fig. 28-7) mediante lo especificado en la norma T- 404 cm-92 (TAPPI 2000).

Explosión

Este ensayo se efectuó en un equipo Mullen (fig. 28-8), siguiendo lo que especifica la norma T 403 om-97 (TAPPI 2000).

Rasgado

El ensayo se llevo a cabo en un equipo para pruebas de rasgado tipo Elmendorf (fig. 28-9), cuyo factor de péndulo es 16. Esta prueba se realizó como se describe en la norma T 414 om-98 (TAPPI 2000).

Dobleces

El número de dobleces que resistieron las probetas, se determinó en un equipo para medir la resistencia al doblar (fig. 28-10), en base a la norma T 511 om-96 (TAPPI 2000).

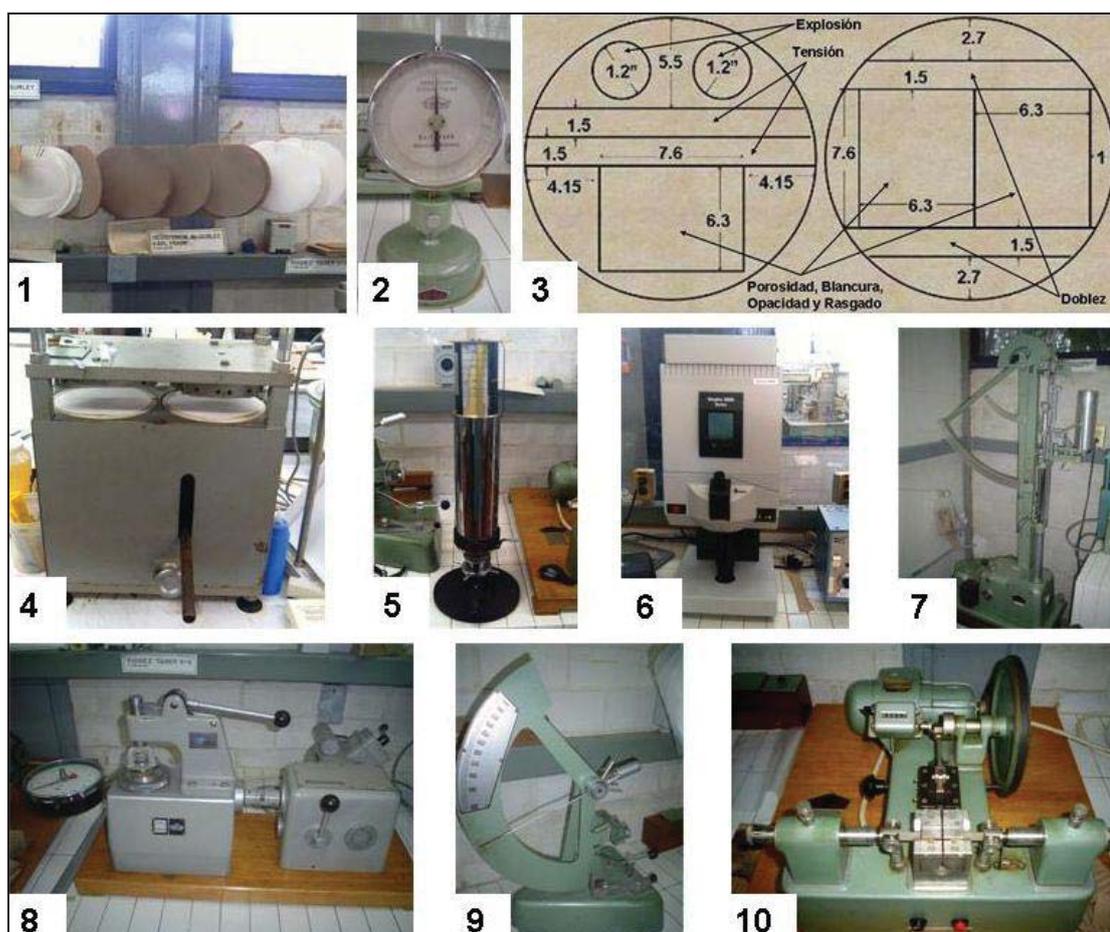


Figura 28. Equipo para la realización de los ensayos Físico-Mecánicos en hojas estándar: 1. Acondicionamiento; 2. Micrómetro; 3. Muestreo y medidas de las probetas; 4. Guillotina para corte de probetas; 5. Equipo Gurley; 6. Fotómetro Zeiss-Elrepho 3000 DATA color; 7. Equipo para tensión; 8. Equipo Mullen; 9. Péndulo tipo Elmendorf y 10. Equipo TMI para dobleces

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Resultados

8.1.1 Pulpeo Kraft y a la Sosa

Como ya se menciona en la metodología los resultados se analizaron con un nivel de confianza estadística del 95% y significancia de 0.05. Dichos resultados se procesaron con el paquete estadístico Statgraphics plus versión 4.0.

Pulpeo Kraft (primera etapa)

Rendimiento

En la tabla 11, se presenta el análisis de varianza (ANOVA) y de acuerdo a la columna *P-Value*, los valores correspondientes a zona, tiempo y carga, así como las interacciones de estos, son mayores al valor fijado (0.05), por lo tanto las hipótesis planteadas se aceptan, lo que quiere decir que los efectos no son significativos sobre el rendimiento.

Tabla 11. Análisis de varianza para el rendimiento

Analysis of Variance for Rend - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.2304	1	0.2304	0.20	0.6680
B:Tiempo	2.00222	1	2.00222	1.71	0.2236
C:Carga	2.3104	1	2.3104	1.97	0.1939
INTERACTIONS					
AB	0.81	1	0.81	0.69	0.4273
AC	1.83603	1	1.83603	1.57	0.2423
BC	0.0361	1	0.0361	0.03	0.8646
RESIDUAL	10.5482	9	1.17202		
TOTAL (CORRECTED)	17.7734	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

En las figuras 29, 30 y 31 correspondientes a la gráfica de medias para el rendimiento vs zona, tiempo y carga respectivamente, se puede corroborar lo observado en el análisis de varianza (tabla 11), que no existió diferencia estadística en cuanto a la zona del árbol de donde se tomó la madera, el tiempo de cocción y la carga de reactivos aplicada, sobre la variable rendimiento.

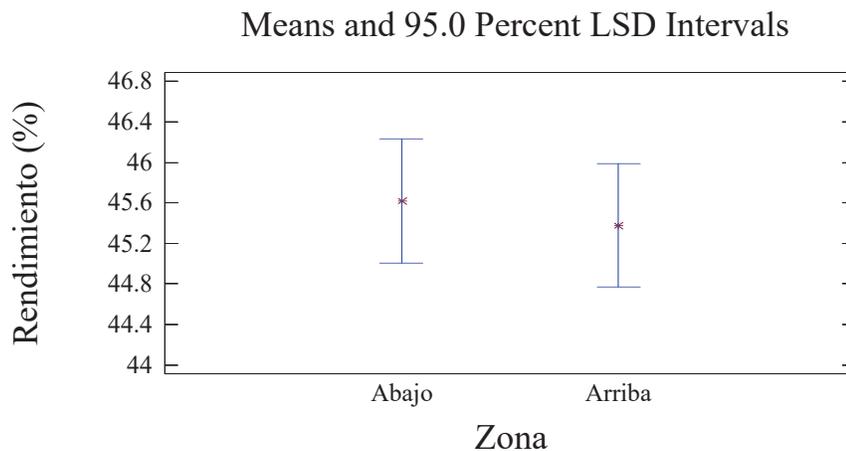


Figura 29. Gráfica de medias para el rendimiento respecto a la zona

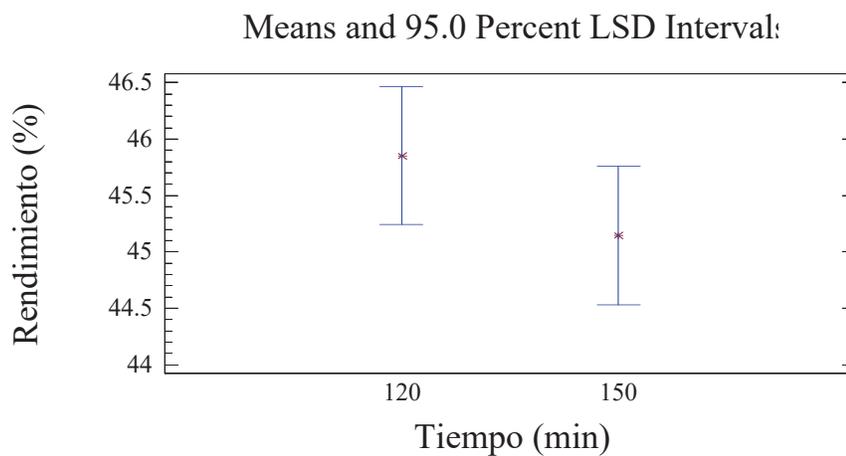


Figura 30. Gráfica de medias para el rendimiento con respecto al tiempo

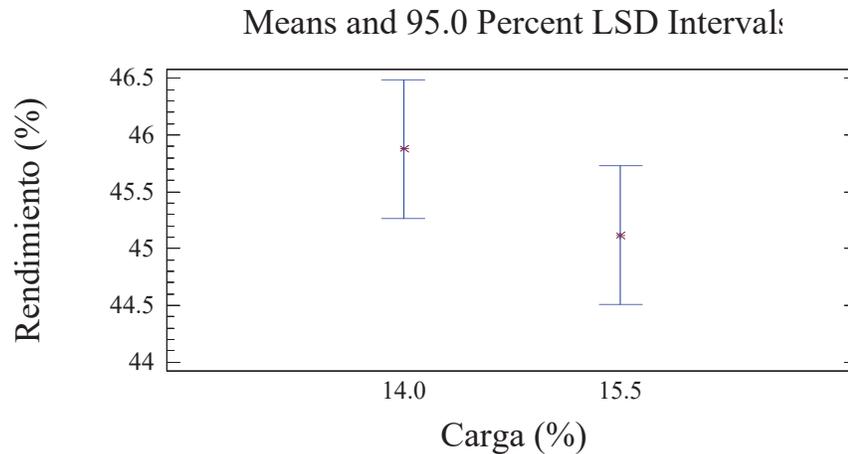


Figura 31. Gráfica de medias para el rendimiento con respecto de la carga

Las figuras 32, 33 y 34 muestran las gráficas de interacción zona-tiempo, zona-carga y tiempo-carga. Observándose que para la zona de arriba el rendimiento es mayor con tiempo de 120min y carga de 14.0%, sucediendo lo contrario para 150min de tiempo y 15.5% de carga que dan mayor rendimiento para la zona de abajo (Figs. 32 y 33), en relación al tiempo respecto de la carga, el rendimiento es mayor a 120min (fig. 34).

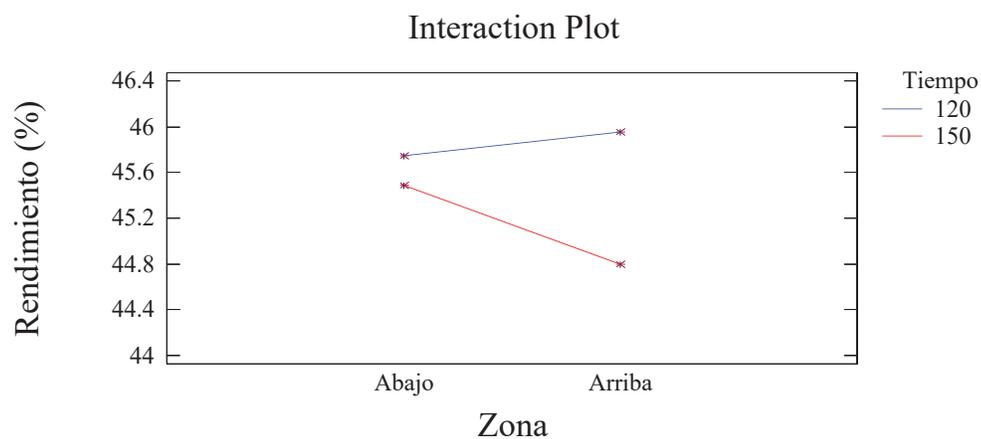


Figura 32. Efecto sobre el rendimiento de la interacción zona-tiempo.

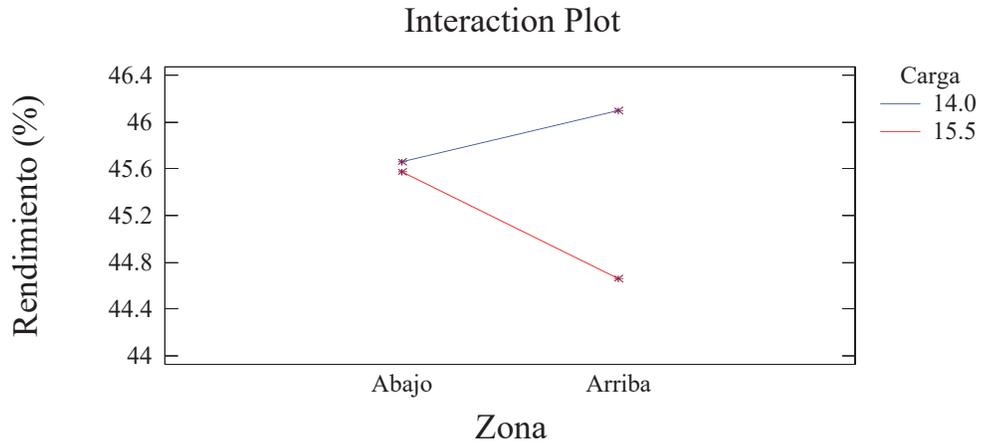


Figura 33. Efecto que ejerce sobre el rendimiento la interacción zona-carga

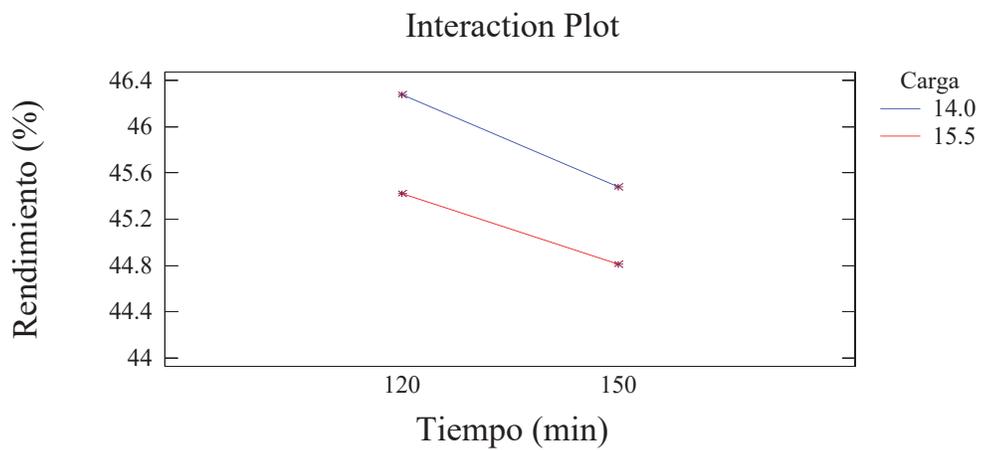


Figura 34. Efecto que tiene sobre el rendimiento la interacción tiempo-carga

Las tablas 12, 13 y 14, exponen las pruebas de rangos múltiples realizadas para el rendimiento, confirmando que no existen efectos significativos

Tabla 12. Prueba de rangos múltiples para el rendimiento por zona

Multiple Range Tests for Rend by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Arriba	8	45.3788	X
Abajo	8	45.6187	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	0.24	1.22451

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 13. Prueba de rangos múltiples para el rendimiento por tiempo.

 Multiple Range Tests for Rend by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
150	8	45.145	X
120	8	45.8525	X

Contrast	Difference	+/- Limit
120 - 150	0.7075	1.22451

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 14. Prueba de rangos múltiples para el rendimiento por carga

 Multiple Range Tests for Rend by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
15.5	8	45.1187	X
14.0	8	45.8788	X

Contrast	Difference	+/- Limits
14.0 - 15.5	0.76	1.22451

* denotes a statistically significant difference.

No. de Kappa

La tabla 15, muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el No. de Kappa, y en la columna *P-Value* se observa que los valores para zona y tiempo son mayores al valor fijado de 0.05, por lo que la hipótesis planteada se acepta, no existiendo efecto estadístico significativo, en cambio el valor presentado en la misma columna para el factor carga es menor al valor fijado, por lo que la hipótesis se rechaza, habiendo para este factor un efecto estadístico significativo. Los valores presentados en la columna *P-Value* para las interacciones de los factores zona, tiempo y carga son mayores que el valor fijado, por lo que la hipótesis se acepta no presentando efecto estadístico significativo.

Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) para el No. de Kappa.

Analysis of Variance for Kappa - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Val
MAIN EFFECTS					
A:Zona	4.6656	1	4.6656	3.66	0.08
B:Tiempo	0.024025	1	0.024025	0.02	0.89
C:Carga	11.1556	1	11.1556	8.75	0.01
INTERACTIONS					
AB	3.6481	1	3.6481	2.86	0.12
AC	2.48062	1	2.48062	1.94	0.19
BC	0.1369	1	0.1369	0.11	0.75
RESIDUAL	11.4801	9	1.27557		
TOTAL (CORRECTED)	33.591	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

La figura 35, muestra la gráfica de medias para el No. de Kappa con respecto a la zona de muestreo y la figura 36 la gráfica de medias para el No. de Kappa con respecto al tiempo, en ambas podemos ver que no existe diferencia significativa, sin embargo en la figura 37, se observa que la gráfica de medias para el No. de

Kappa con respecto al factor carga, si presenta diferencia por lo que se corrobora lo señalado en la ANOVA (tabla 15).

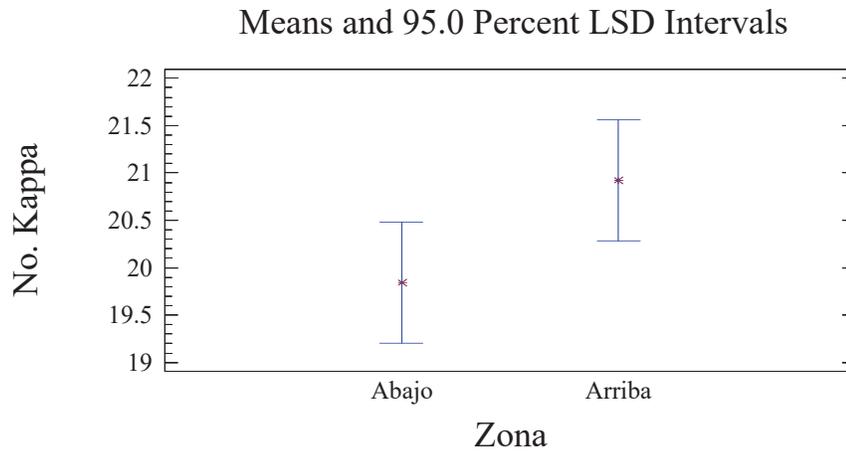


Figura 35. Gráfica de medias para el No. de Kappa respecto a la zona

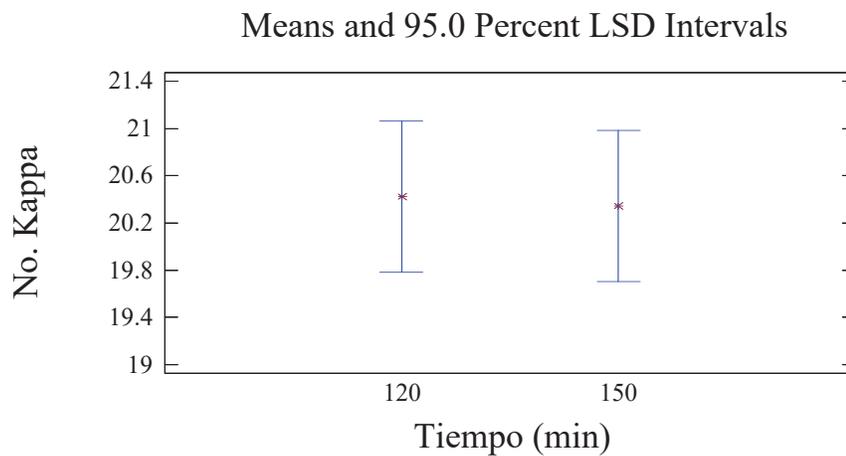


Figura 36. Gráfica de medias para el No. de Kappa con respecto al tiempo

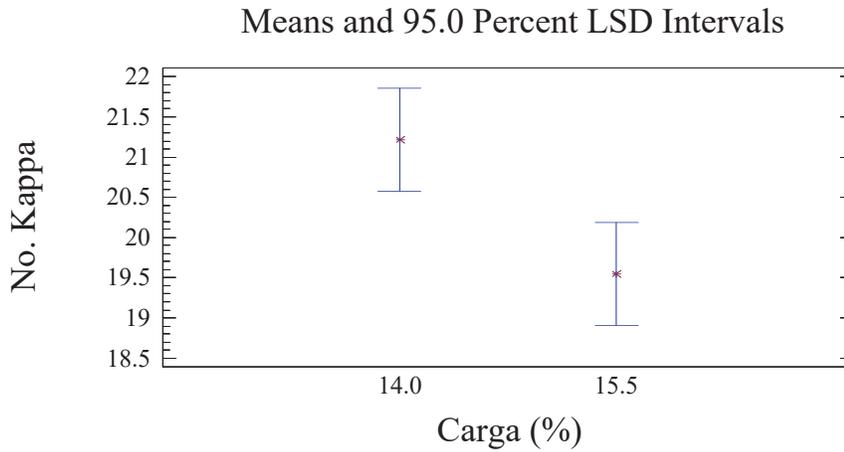


Figura 37. Gráfica de medias para el No. de Kappa con respecto a la carga

En la figura 38, se puede observar que en la interacción zona-tiempo el No de Kappa es mayor para la zona de arriba, lo cual es muy similar al efecto de la interacción zona-carga (fig. 39). En la figura 40 se puede ver que la interacción tiempo-carga nos indica que con carga de 14.0% el No de Kappa es mayor a 120 min y que con un 15.5% de carga es mayor a 150 min.

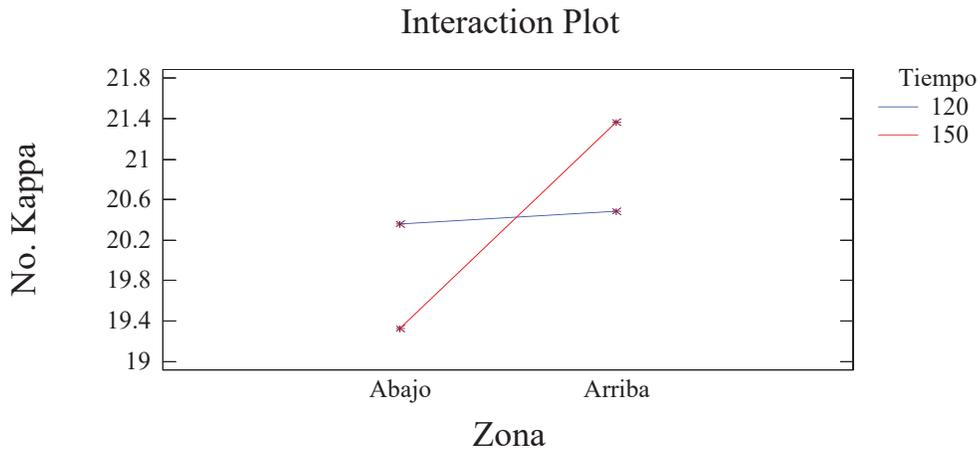


Figura 38. Efecto de la interacción zona-tiempo sobre el No. de Kappa

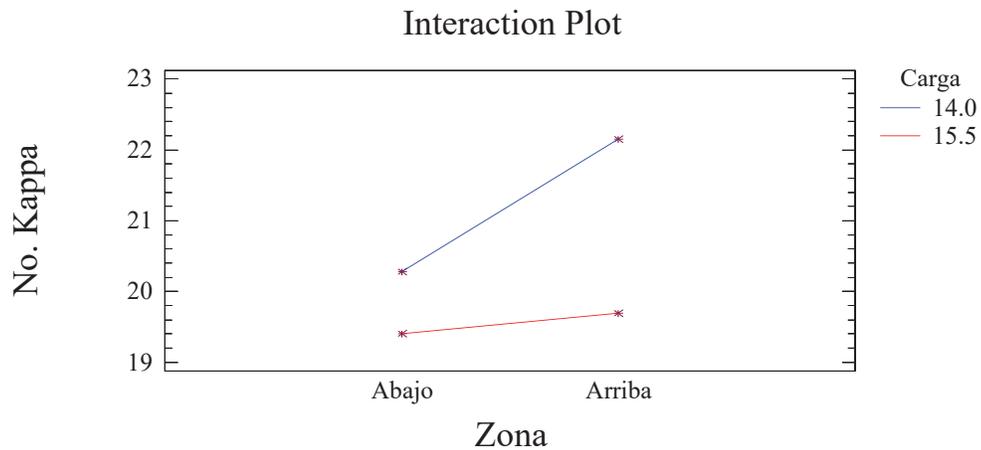


Figura 39. Efecto de la interacción zona-carga sobre el No. de Kappa

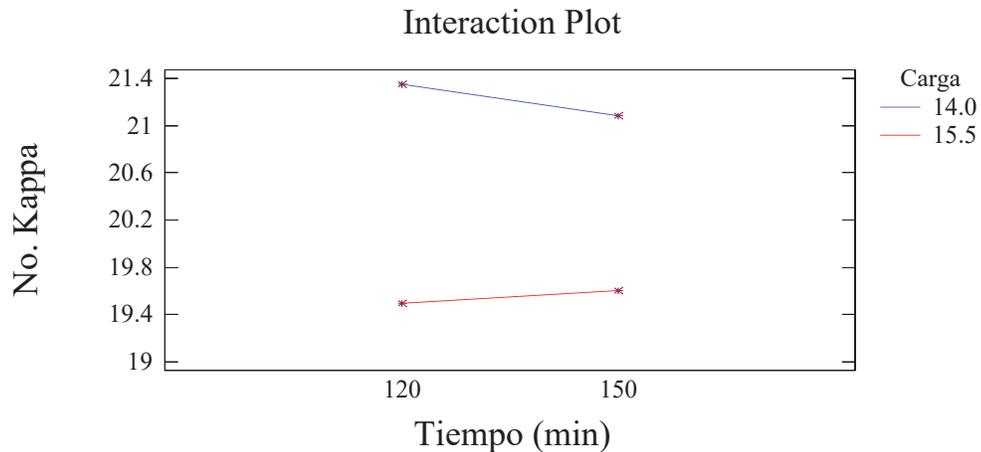


Figura 40. Efecto de la interacción tiempo-carga sobre el No. de Kappa

En las tablas 16 y 17, para prueba de rangos múltiples referentes al No. de Kappa por zona y por tiempo se puede corroborar lo expuesto en la ANOVA (tabla 15), así como con las gráficas de medias correspondientes (figs. 32 y 33) y lo mismo sucede para la carga, tabla 18, donde se ratifica que existe una diferencia estadística significativa.

Tabla 16. Prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por zona

Multiple Range Tests for Kappa by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Abajo	8	19.8438	X
Arriba	8	20.9237	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	-1.08	1.27746

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 17. Prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por tiempo

Multiple Range Tests for Kappa by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
150	8	20.345	X
120	8	20.4225	X

Contrast	Difference	+/- Limits
120 - 150	0.0775	1.27746

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 18. Prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por carga

Multiple Range Tests for Kappa by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
15.5	8	19.5487	X
14.0	8	21.2188	X

Contrast	Difference	+/- Limits
14.0 - 15.5	*1.67	1.27746

* denotes a statistically significant difference.

Rechazos

La tabla 19, presenta el análisis de varianza (ANOVA) realizado para los rechazos, en la columna *P-Value* se observa que todos los valores son mayores al valor fijado (0.05), por lo que la hipótesis se acepta, no habiendo efectos significativos de los factores zona, tiempo y carga, así como tampoco de sus interacciones.

Tabla 19. Análisis de varianza (ANOVA) para la variable rechazos

Analysis of Variance for Rech - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.0946593	1	0.0946593	0.45	0.5199
B:Tiempo	0.208148	1	0.208148	0.99	0.3467
C:Carga	0.131782	1	0.131782	0.62	0.4498
INTERACTIONS					
AB	0.396607	1	0.396607	1.88	0.2037
AC	0.111211	1	0.111211	0.53	0.4864
BC	0.08816	1	0.08816	0.42	0.5343
RESIDUAL	1.90013	9	0.211126		
TOTAL (CORRECTED)	2.9307	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Las figuras 41, 42 y 43, muestran las gráficas de medias para los rechazos con respecto a la zona, tiempo y carga. En estas figuras se puede ver que no existe diferencia estadística significativa corroborando así lo expuesto en la tabla 19.

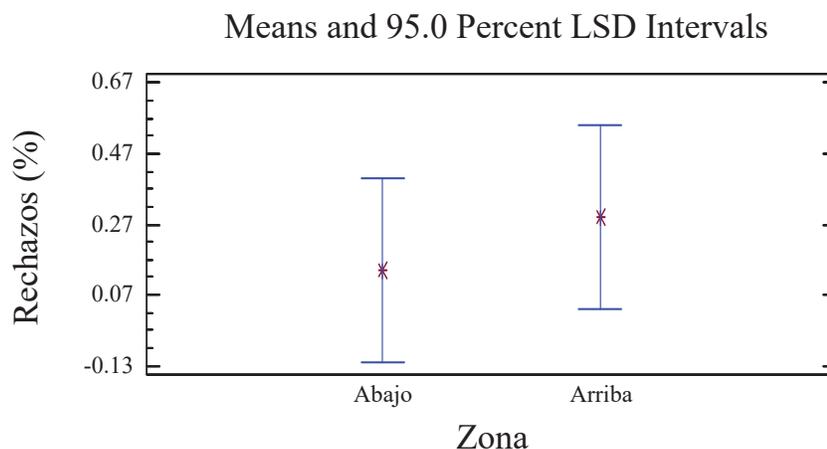


Figura 41. Gráfica de medias para los rechazos con respecto a la zona

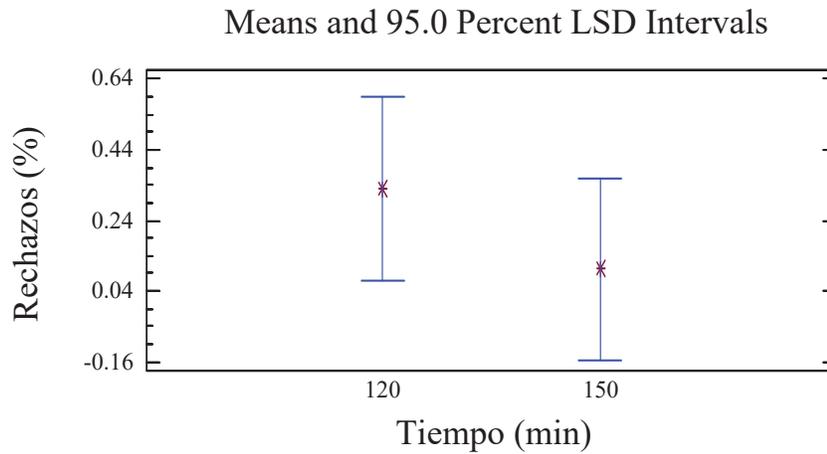


Figura 42. Gráfica de medias para los rechazos respecto al tiempo

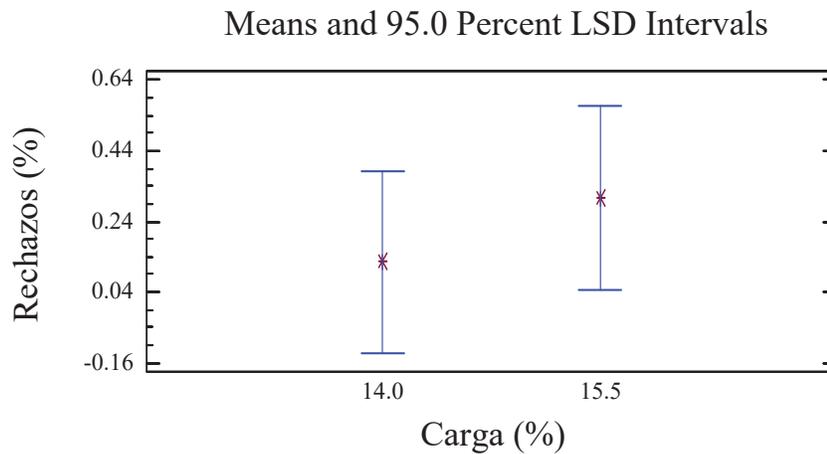


Figura 43. Grafica de medias para los rechazos con respecto a la carga

En la gráfica del efecto que tienen la interacción entre los factores zona-tiempo (fig. 44,) se puede ver que a 120 min los rechazos son mayores en la zona de arriba y que a 150 min existen más rechazos en la zona de abajo, la interacción zona-carga (fig. 45) nos muestra que con carga de 15.5% se obtienen más rechazos de la zona de arriba y con carga de 14.0% por el contrario los rechazos son mayores en la zona de abajo y respecto a la interacción tiempo-carga (Fig. 46), los rechazos son mayores con un tiempo de 120 min.

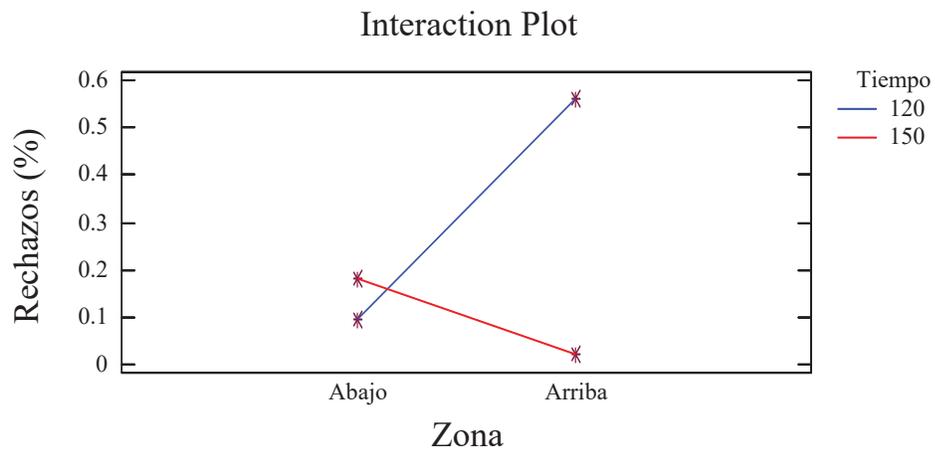


Figura 44. Efecto de la interacción zona-tiempo sobre los rechazos

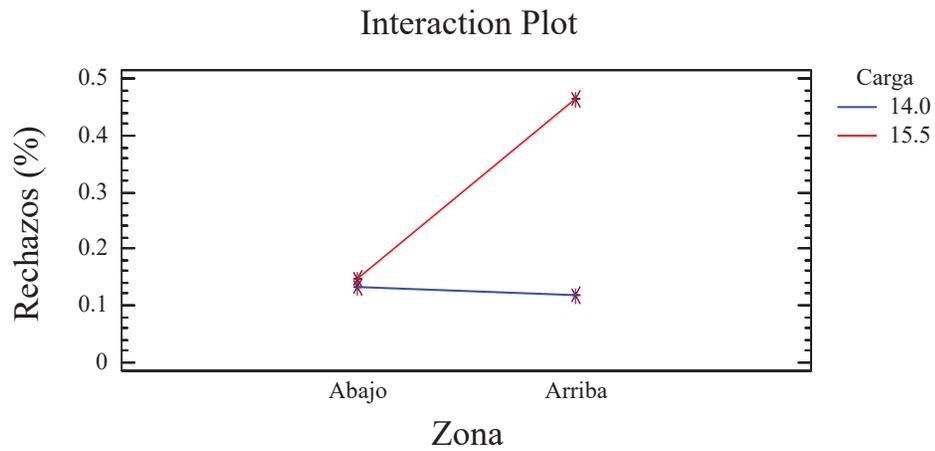


Figura. 45. Efecto de la interacción zona-carga sobre los rechazos

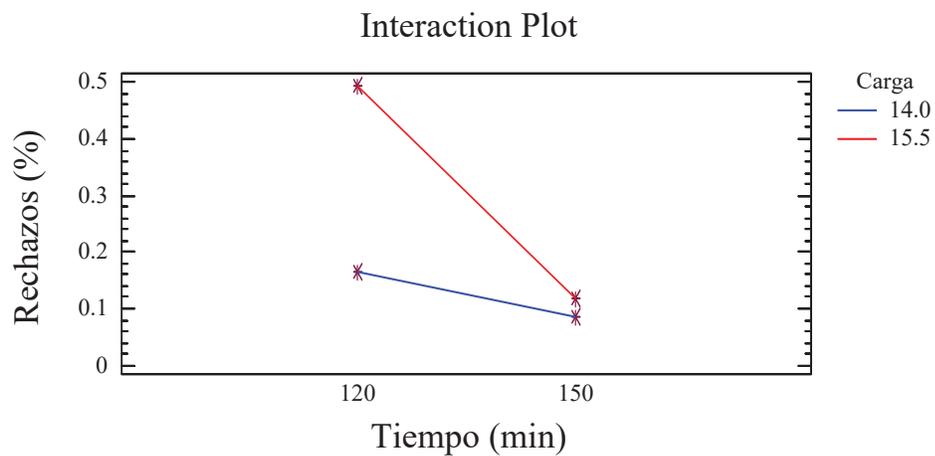


Figura 46. Efecto de la interacción tiempo-carga sobre los rechazos

En las tablas 20, 21 y 22, se ilustran las pruebas de rango múltiple, efectuadas para los rechazos por zona, por tiempo y por carga, mismas que corroboran lo expresado en la tabla 19, donde se observa que no existe diferencia significativa.

Tabla 20. Prueba de rangos múltiples para los rechazos por zona

Multiple Range Tests for Rech by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Abajo	8	0.138441	X
Arriba	8	0.292275	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	-0.153834	0.519714

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 21. Prueba de rangos múltiples para los rechazos por tiempo

Multiple Range Tests for Rech by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
150	8	0.1013	X
120	8	0.329416	X

Contrast	Difference	+/- Limits
120 - 150	0.228116	0.519714

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 22. Prueba de rangos múltiples para los rechazos por carga

Multiple Range Tests for Rech by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
14.0	8	0.124604	X
15.5	8	0.306113	X

Contrast	Difference	+/- Limits
14.0 - 15.5	-0.181509	0.519714

* denotes a statistically significant difference.

Pulpeo Kraft (segunda etapa)

Rendimiento

La tabla 23, contiene el análisis de varianza (ANOVA), para el rendimiento, y se observa que los valores de la columna *P-Value*, son mayores al valor de significancia fijado, por lo que la hipótesis es aceptada, no habiendo efecto significativo de los factores, ni de su interacción sobre la variable de respuesta.

Tabla 23. Análisis de varianza (ANOVA) para la variable rendimiento

Analysis of Variance for Rend					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Tiempo	0.0120333	1	0.0120333	0.00	0.9492
B:Carga	0.418133	1	0.418133	0.15	0.7089
AB	0.700833	1	0.700833	0.26	0.6302
blocks	10.8357	2	5.41786	1.99	0.2176
Total error	16.3564	6	2.72606		
Total (corr.)	28.3231	11			

R-squared = 42.2508 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 20.5948 percent

En la figura 47, se puede observar que la gráfica de Pareto muestra claramente cual de los factores tiene mayor influencia sobre la variable de respuesta, aunque esta no sea significativa.

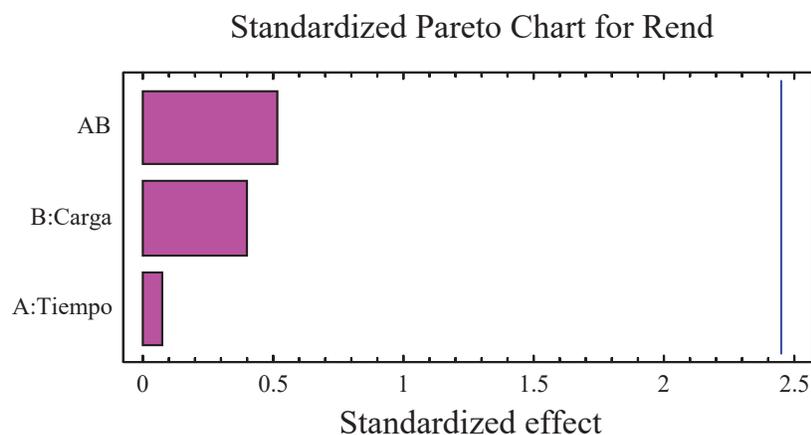


Figura 47. Gráfica de Pareto para el rendimiento

En la figura 48, se observa el efecto que presentan los factores tiempo y carga sobre el rendimiento, apreciándose que con 14.0% de carga de reactivos el rendimiento es mayor, al igual que con 150 min de tiempo.

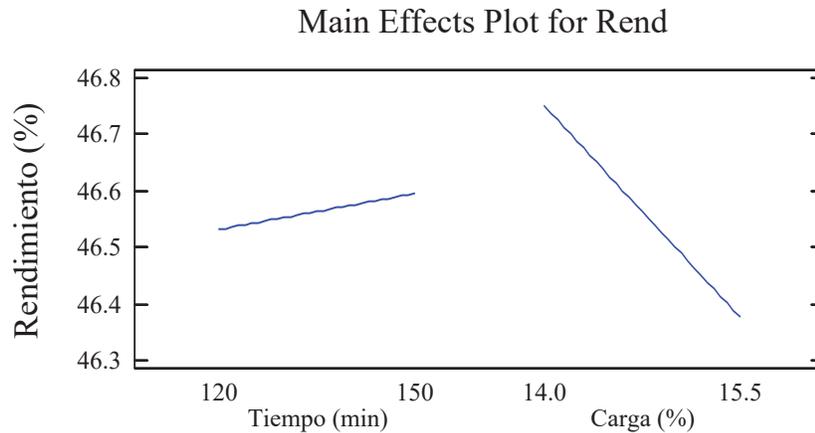


Figura 48. Efecto de los factores (tiempo y carga) sobre el rendimiento

La figura 49, muestra que a un tiempo de 120 min y carga de 14.0%, el rendimiento es mayor, lo cual se confirma con los resultados de la optimización (tabla 25) y con la gráfica de superficie de respuesta (fig. 50), donde se puede ver que los mejores resultados se obtienen con los valores para carga y tiempo ya mencionados, obteniendo un rendimiento de 46.96 %.

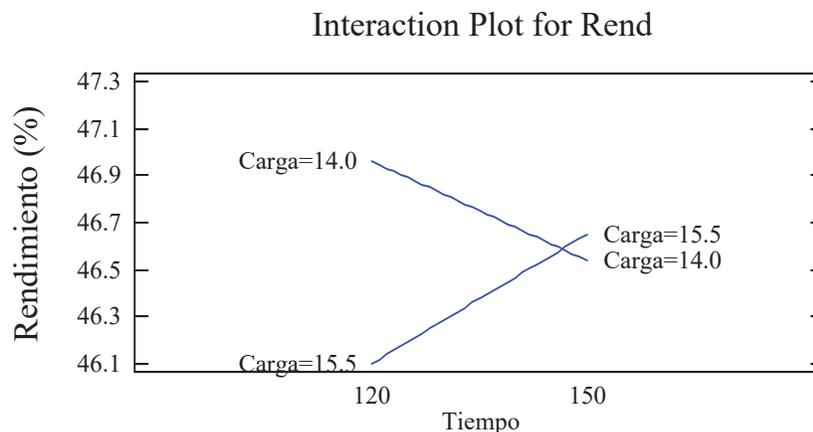


Figura 49. Efecto de la interacción de los factores sobre el rendimiento

La tabla 24, contiene el análisis de regresión aplicado para el rendimiento, el cual indica que la ecuación que define al rendimiento esta en función de tiempo y

carga, en este caso el coeficiente de determinación R^2 (Montgomery 1991) presenta un valor de 42.25% (tabla 23), que esta muy por debajo del aceptable (70%), lo que nos indica que el efecto de variabilidad que se le atribuye a los factores carga y tiempo es pequeña.

Tabla 24. Análisis de regresión para la variable rendimiento

Regression coeffs. for Rend

constant = 92.7244
 A:Tiempo = -0.314741
 B:Carga = -3.14889
 AB = 0.0214815

The StatAdvisor

This pane displays the regression equation which has been fitted to the data. The equation of the fitted model is

$$\text{Rend} = 92.7244 - 0.314741 * \text{Tiempo} - 3.14889 * \text{Carga} + 0.0214815 * \text{Tiempo} * \text{Carga}$$

Tabla 25. Optimización de la variable de respuesta rendimiento

Optimize Response

Goal: maximize Rend

Optimum value = 46.96

Factor	Low	High	Optimum
Tiempo	120.0	150.0	120.0
Carga	14.0	15.5	14.0

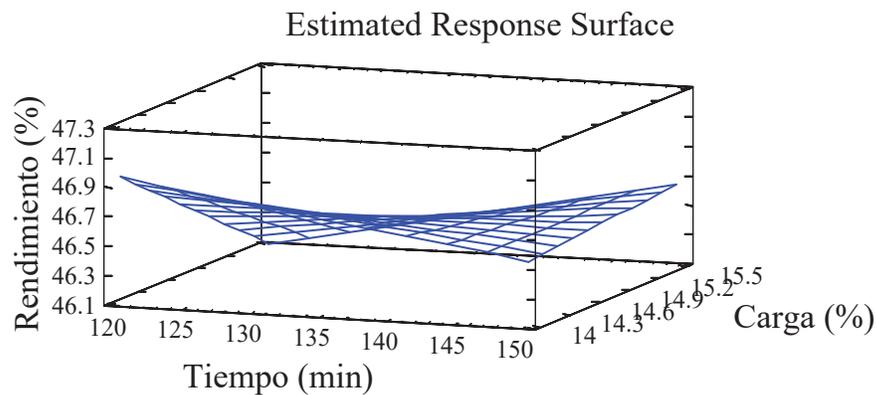


Figura 50. Superficie de respuesta para el rendimiento en función del tiempo y la carga

No. de Kappa

En la tabla 26 (análisis de varianza), se puede ver en la columna *P-Value* que el factor tiempo y la interacción tiempo-carga no son significativos ya que su valor es superior al fijado, en cambio el factor carga presenta un valor menor a este, siendo el único que tiene significancia sobre el No. de Kappa, lo que se ve claramente reflejado en la gráfica de Pareto (fig. 51).

Tabla 26. Análisis de varianza (ANOVA) para el No. de Kappa

Analysis of Variance for Kappa					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Tiempo	0.0161333	1	0.0161333	0.02	0.9001
B:Carga	6.75	1	6.75	7.18	0.0366
AB	1.8723	1	1.8723	1.99	0.2079
blocks	2.32252	2	1.16126	1.23	0.3555
Total error	5.64302	6	0.940503		

Total (corr.)	16.604	11			

R-squared = 66.014 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 53.2693 percent

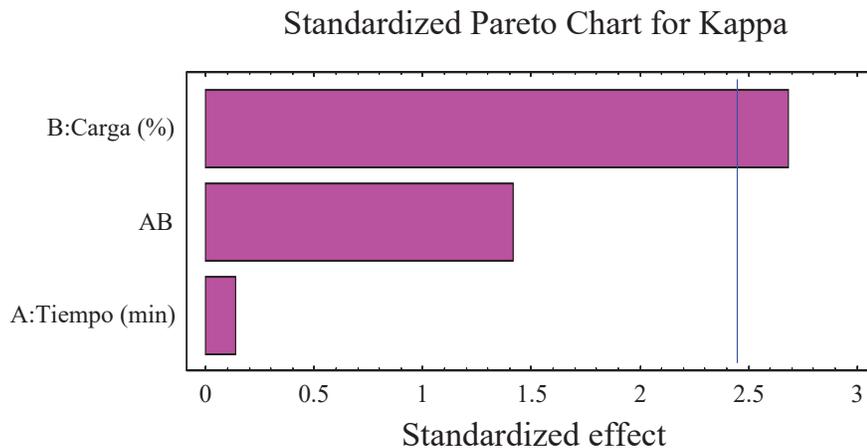


Figura 51. Gráfica de Pareto, para el efecto de los factores y su interacción sobre la variable de respuesta (No. de Kappa)

La información que arroja la gráfica de los efectos que tienen los factores sobre la variable (fig. 52), nos indica que el menor No. de Kappa se obtiene cuando la

carga de reactivos es de 15.5 % y el tiempo de cocción de 120 min, información que se corrobora claramente en la gráfica de interacción de los factores sobre la variable de respuesta (fig. 53).

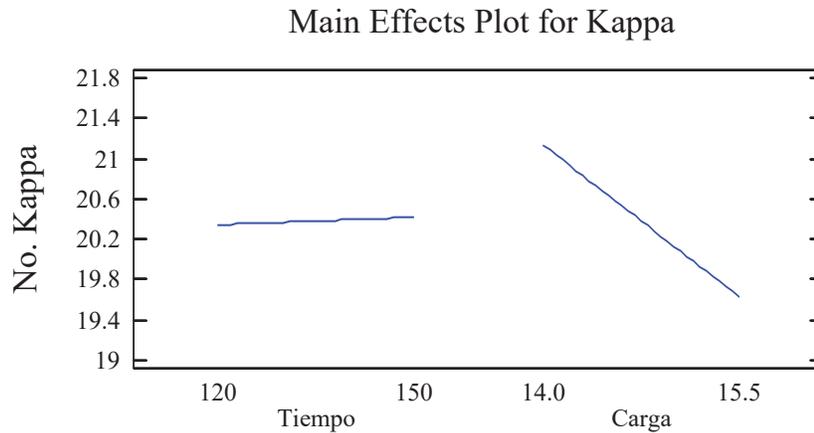


Figura 52. Efectos de tiempo y carga sobre el No. de Kappa

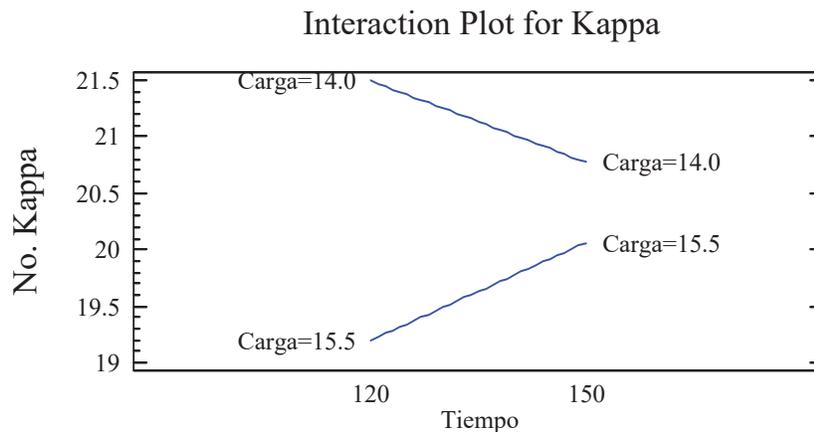


Figura 53. Interacción tiempo-carga sobre el No. de Kappa

En la tabla 27, se presenta la ecuación de regresión para el No. de Kappa, en función del tiempo de cocción y la carga de reactivos, para este caso, el coeficiente de determinación estadística R^2 (Montgomery, 1991) presenta un valor cercano (66.01%) (Tabla 26), al aceptable que mínimo debe ser de 70%.

Los resultados que se presentan en la tabla 28, señalan las condiciones óptimas para minimizar el No. de Kappa (tiempo igual a 120 min y carga de 15.5%), esta

información se confirma en la gráfica de superficie de respuesta (fig. 54), donde se puede ver que los mejores resultados se obtienen con los valores para carga y tiempo ya mencionados, alcanzándose un valor para el No. de Kappa de 19.2.

Tabla 27. Análisis de regresión para el No. de Kappa

Regression coeffs. for Kappa

```

constant = 104.717
A:Tiempo = -0.515444
B:Carga = -5.74
AB       = 0.0351111
    
```

The StatAdvisor

This pane displays the regression equation which has been fitted to the data. The equation of the fitted model is

$$\text{Kappa} = 104.717 - 0.515444 \cdot \text{Tiempo} - 5.74 \cdot \text{Carga} + 0.0351111 \cdot \text{Tiempo} \cdot \text{Carga}$$

Tabla 28. Condiciones optimas para minimizar el No. de Kappa

Optimize Response

Goal: minimize Kappa

Optimum value = 19.2

Factor	Low	High	Optimum
Tiempo	120.0	150.0	120.0
Carga	14.0	15.5	15.5

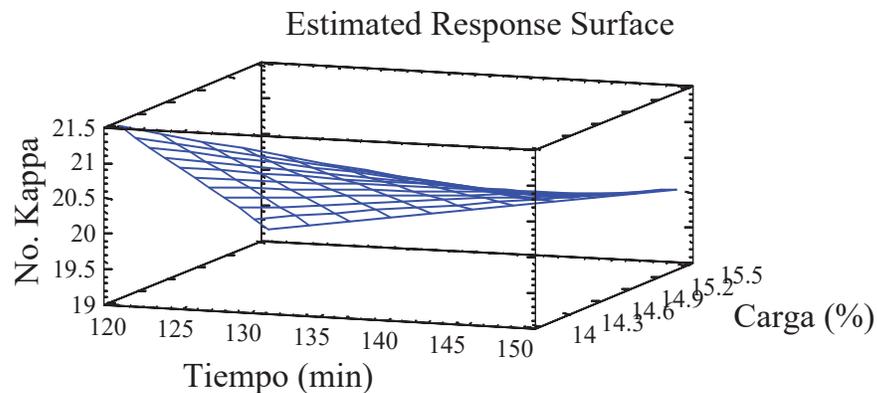


Figura 54. Superficie de respuesta para el No. de Kappa en función de la carga de reactivos y el tiempo de cocción

Rechazos

En la tabla 29, se puede ver en la columna *P-Value* del análisis de varianza (ANOVA) que los valores para los factores tiempo, carga así como la interacción de los mismos no son significativos ya que su valor es superior al fijado, lo cual, se ve claramente en la gráfica de Pareto (fig. 55).que además nos indica que el tiempo es el factor que mayor influencia tiene.

Tabla 29. Análisis de varianza (ANOVA) para los rechazos

Analysis of variance for Rech					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Tiempo	0.393277	1	0.393277	1.91	0.2157
B:Carga	0.0228813	1	0.0228813	0.11	0.7499
AB	0.0267152	1	0.0267152	0.13	0.7307
blocks	0.0975183	2	0.0487591	0.24	0.7957
Total error	1.23224	6	0.205374		
Total (corr.)	1.77264	11			

R-squared = 30.4852 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 4.41714 percent

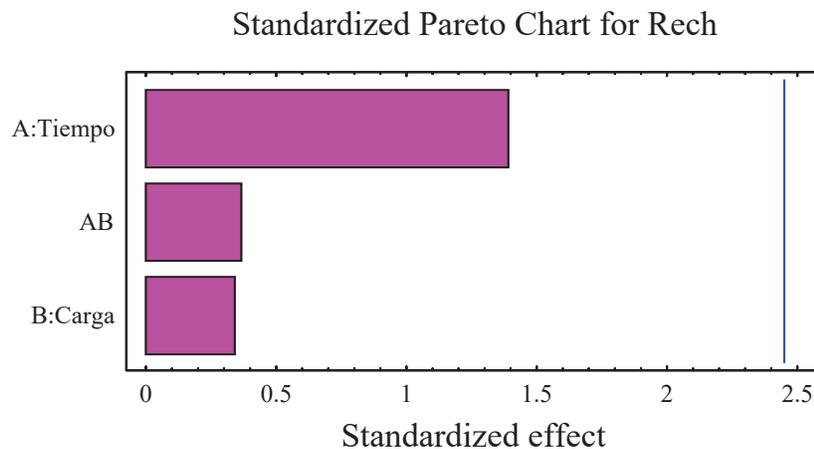


Figura 55. Gráfica de Pareto, para el efecto que tienen los factores y su interacción sobre los rechazos

La información que representa la gráfica del efecto que tienen el tiempo y la carga sobre el rendimiento (fig. 56), expresa que con 150 min de tiempo y carga de

15.5% se obtiene el menor porcentaje de rechazos, información que contradice lo que muestra la figura 57 donde se puede ver que la carga que menor cantidad de rechazos arroja es 14.0% aunque el tiempo si es el mismo (150 min), datos que e además se demuestran con los resultados de la optimización (tabla 31) y que los confirma la gráfica de superficie de respuesta (fig. 58), donde se observa nuevamente como la menor cantidad de rechazos se obtiene con carga de 14.0% y tiempo de 150 min.

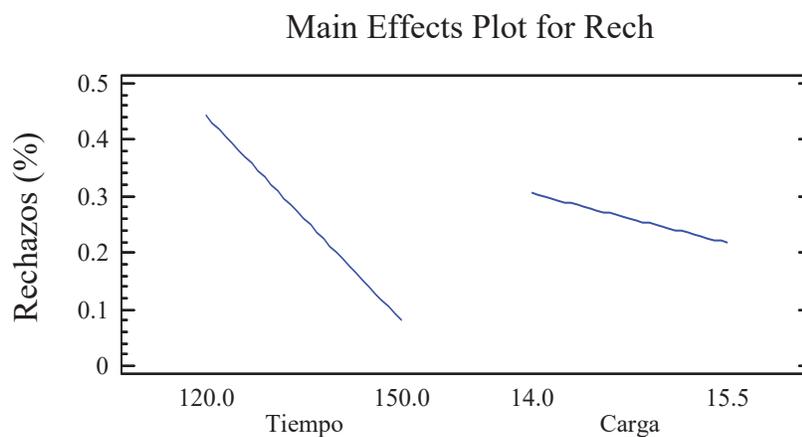


Figura 56. Efectos de tiempo y carga sobre los rechazos

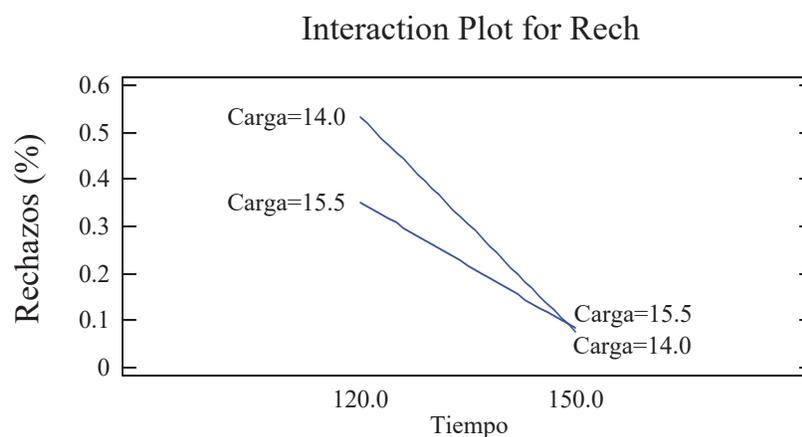


Figura 57. Interacción tiempo-carga vs rechazos

La tabla 30, muestra la ecuación de regresión para los rechazos, en función del tiempo de cocción y la carga de reactivos, donde, el coeficiente de determinación

estadística R^2 (Montgomery, 1991) da un valor de 30.48 % (tabla 29), que se encuentra muy por debajo del aceptable (70 %), lo que nos indica que el efecto de los factores carga y tiempo es mínima.

Tabla 30. Análisis de regresión para los rechazos

Regression coeffs. for Rech

```

constant = 11.1006
A:Tiempo = -0.0739315
B:Carga = -0.624422
AB       = 0.00419407
    
```

The StatAdvisor

This pane displays the regression equation which has been fitted to the data. The equation of the fitted model is

$$\text{Rech} = 11.1006 - 0.0739315 \cdot \text{Tiempo} - 0.624422 \cdot \text{Carga} + 0.00419407 \cdot \text{Tiempo} \cdot \text{Carga}$$

Tabla 31. Condiciones optimas para minimizar la cantidad de rechazos

Optimize Response

Goal: minimize Rech

Optimum value = 0.0765

Factor	Low	High	Optimum
Tiempo	120.0	150.0	150.0
Carga	14.0	15.5	14.0

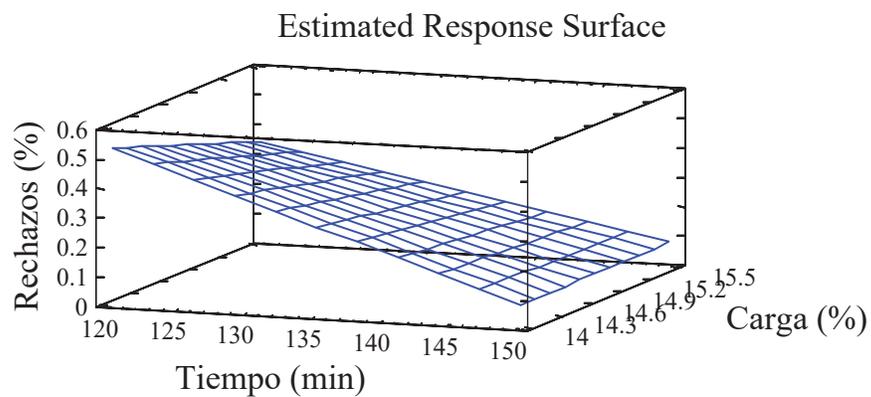


Figura 58. Superficie de respuesta para los rechazos en función de la carga de reactivos y el tiempo de cocción

Pulpeo a la sosa

Rendimiento

La tabla 32, Expone el análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento y como los valores de la columna *P-Value*, para tiempo y carga, así como para la interacción de estos, son menores al valor fijado (0.05), las hipótesis planteadas se rechazan, ya que los efectos de estos factores son significativos estadísticamente hablando, sobre la variable de respuesta.

Tabla 32. Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento

Analysis of Variance for Rend - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tiempo	8.4672	1	8.4672	19.08	0.0047
B:Carga	167.714	2	83.8569	188.97	0.0000
INTERACTIONS					
AB	11.6917	2	5.84583	13.17	0.0064
RESIDUAL	2.6625	6	0.44375		
TOTAL (CORRECTED)	190.535	11			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

En las figuras 59 y 60, correspondientes a la gráfica de medias para el rendimiento vs tiempo y rendimiento vs carga, respectivamente, se puede corroborar lo mencionado en el análisis de varianza (tabla 32), en la gráfica de interacción tiempo-carga con respecto al rendimiento (fig. 61) se observa que con carga de 18 % y tiempo de 120 min se obtiene el mayor rendimiento. Las pruebas de rangos múltiples para el rendimiento por tiempo (tabla 33) y rendimiento por carga (tabla 34), ratifican que existe diferencia estadística significativa entre estos factores.

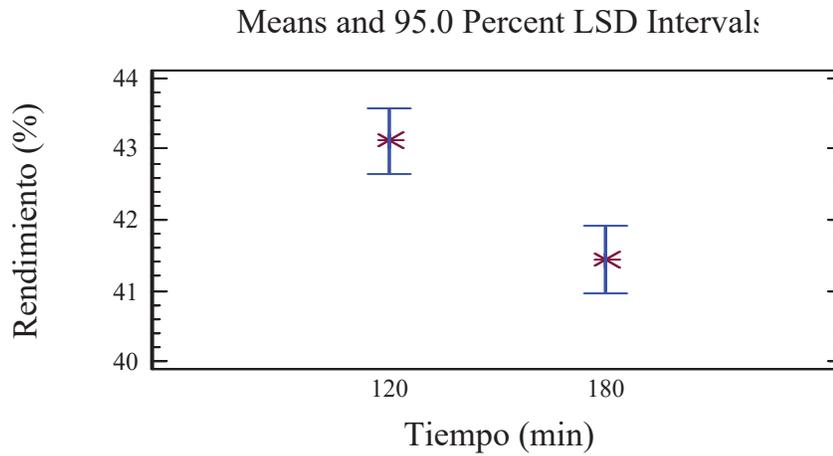


Figura 59. Gráfica de medias para el rendimiento vs tiempo de cocción

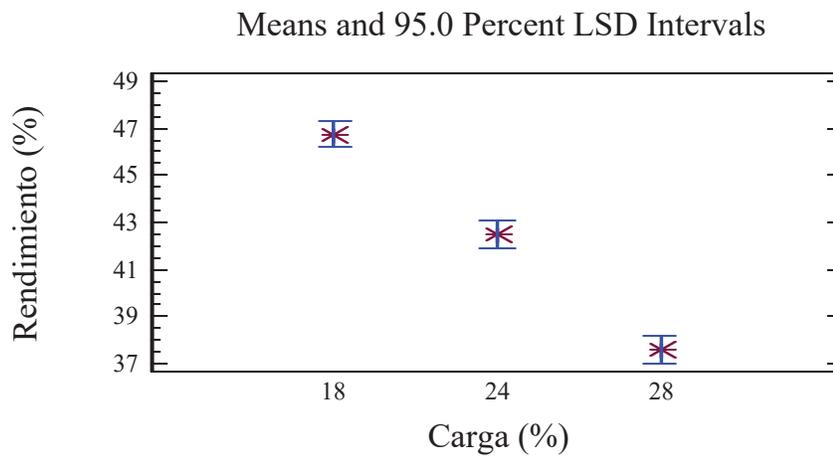


Figura 60. Gráfica de medias para el rendimiento vs carga de reactivos

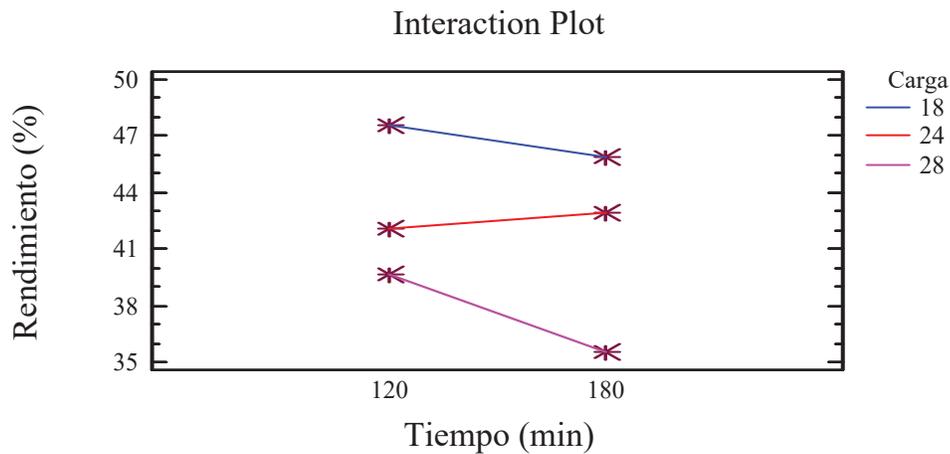


Figura 61. Efecto sobre el rendimiento de la interacción tiempo-carga

Tabla 33. Prueba de rangos múltiples para el rendimiento por tiempo.

Multiple Range Tests for Rend by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
180	6	41.4383	X
120	6	43.1183	X

Contrast	Difference	+/- Limits
120 - 180	*1.68	0.941083

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 34. Prueba de rangos múltiples para el rendimiento por carga

Multiple Range Tests for Rend by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
28	4	37.5975	X
24	4	42.49	X
18	4	46.7475	X

Contrast	Difference	+/- Limits
18 - 24	*4.2575	1.15259
18 - 28	*9.15	1.15259
24 - 28	*4.8925	1.15259

* denotes a statistically significant difference.

No. de Kappa

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para la variable de respuesta No. de Kappa se presenta en la tabla 35, donde se observa que los valores de la columna *P-Value* correspondientes al factor tiempo y a la interacción de los factores tiempo-carga no presentan diferencia estadística significativa ya que son mayores que el valor de significancia establecido (0.05), no así el factor carga, ya que su valor es menor, por lo tanto este factor si tiene un efecto significativo sobre el No. de Kappa.

Tabla 35. Análisis de varianza (ANOVA) para el No. de Kappa

Analysis of Variance for Kappa - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tiempo	1.34001	1	1.34001	0.37	0.5650
B:Carga	181.46	2	90.7299	25.10	0.0012
INTERACTIONS					
AB	0.348017	2	0.174008	0.05	0.9534
RESIDUAL	21.6895	6	3.61492		
TOTAL (CORRECTED)	204.837	11			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

La figura 62, muestra la gráfica de medias para el tiempo con respecto al No. de Kappa y se puede ver, al igual que en la tabla 36 (prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por tiempo), que no existe diferencia significativa entre los dos tiempos manejados, aunque a 180 min el No. de Kappa es un poco más bajo, la gráfica de medias respecto a la carga de reactivos (fig. 63), por el contrario si presenta una diferencia significativa cuando la carga es 18 %, lo cual también se observa en la tabla 37, donde se denota una diferencia estadística entre el valor de carga más bajo y los otros dos valores, esto se corrobora con la interacción tiempo-carga sobre el No. de Kappa (fig. 64), observándose que a 180 min y 28 % de carga, el No. de Kappa es menor.

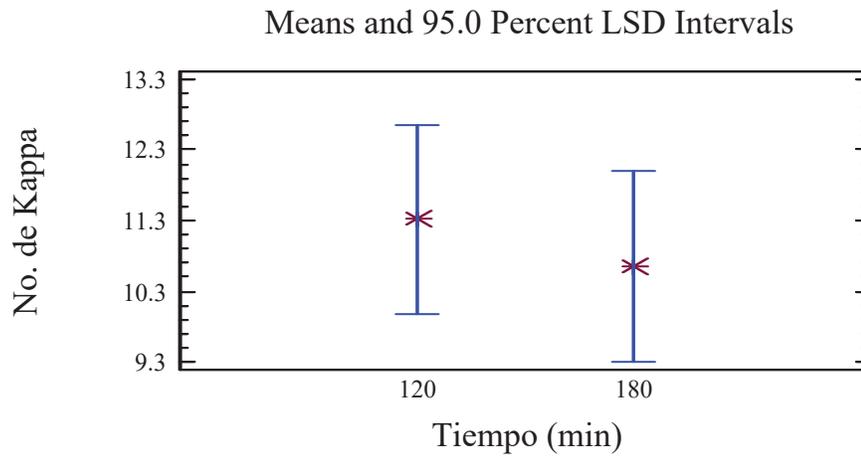


Figura 62. Gráfica de medias para el No. de Kappa respecto al tiempo

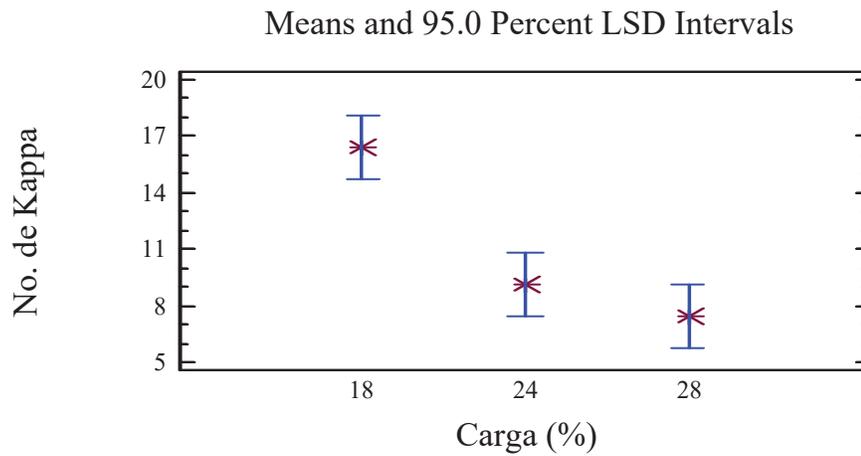


Figura 63. Gráfica de medias para el No. de Kappa respecto a la carga de reactivos

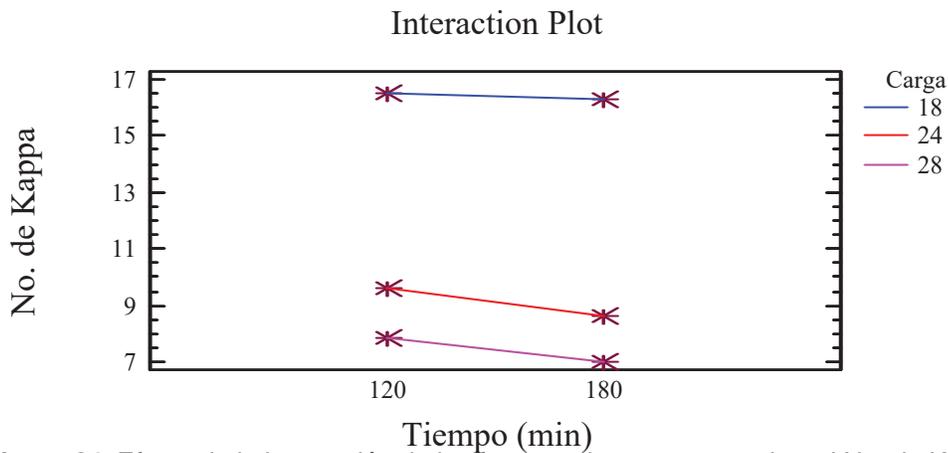


Figura 64. Efecto de la interacción de los factores tiempo-carga sobre el No. de Kappa

Tabla 36. Prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por tiempo

Multiple Range Tests for Kappa by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
180	6	10.65	X
120	6	11.3183	X

Contrast	Difference	+/- Limits
120 - 180	0.668333	2.68602

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 37. Prueba de rangos múltiples para el No. de Kappa por carga

Multiple Range Tests for Kappa by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
28	4	7.4275	X
24	4	9.13	X
18	4	16.395	X

Contrast	Difference	+/- Limits
18 - 24	*7.265	3.28968
18 - 28	*8.9675	3.28968
24 - 28	1.7025	3.28968

* denotes a statistically significant difference.

Rechazos

El análisis de varianza (ANOVA) para los rechazos (tabla 38), arroja valores para *P-Value*, que demuestran que no hay diferencia significativa entre los factores manejados, como tampoco lo hay para la interacción de los mismos, información que se puede apoyar con las gráficas de medias (figs. 65 y 66), la gráfica de interacción tiempo-carga (fig. 67) señala que con carga de 24% a un tiempo de 180 min se puede obtener el menor porcentaje de rechazos. Con las tablas 39 y 40 (prueba de rangos múltiples par los rechazos por tiempo y rechazos por carga, respectivamente) se pude corroborar que no hay diferencia estadística significativa.

Tabla 38. Análisis de varianza (ANOVA) para los rechazos

Analysis of Variance for Rechazos - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tiempo	1.36013	1	1.36013	1.63	0.2493
B:Carga	1.05452	2	0.527258	0.63	0.5641
INTERACTIONS					
AB	1.05282	2	0.526408	0.63	0.5646
RESIDUAL	5.0157	6	0.83595		
TOTAL (CORRECTED)	8.48317	11			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

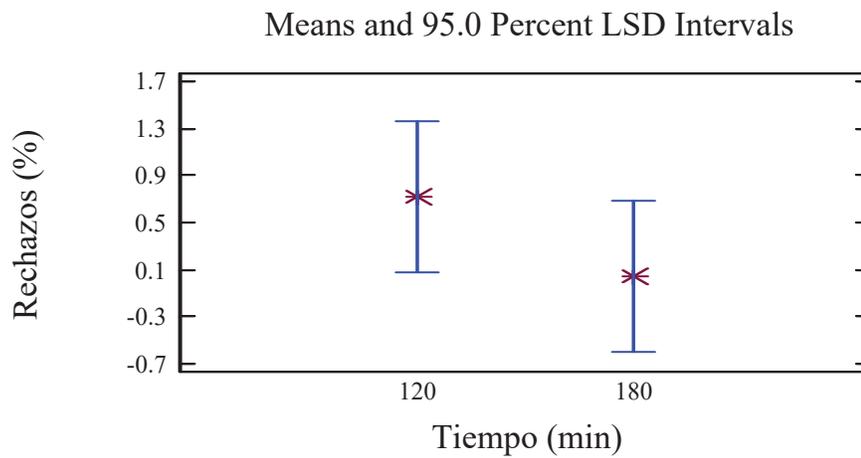


Figura 65. Gráfica de medias para los rechazos vs el tiempo de cocción

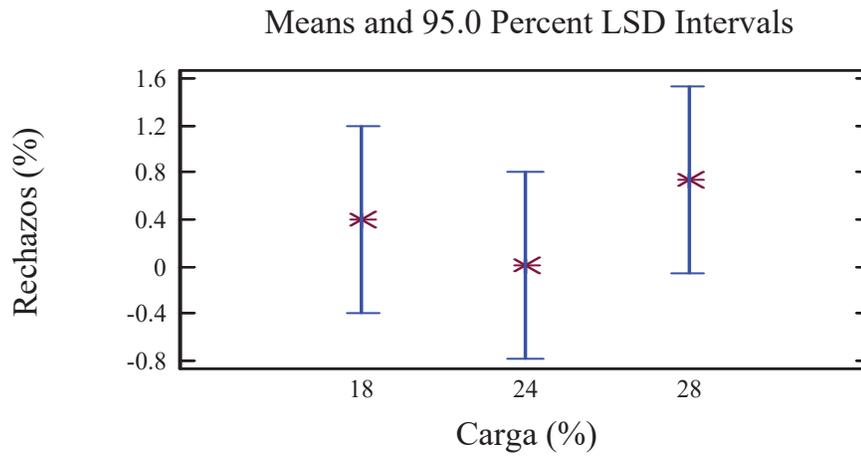


Figura 66. Gráfica de medias para los rechazos vs la carga de reactivos

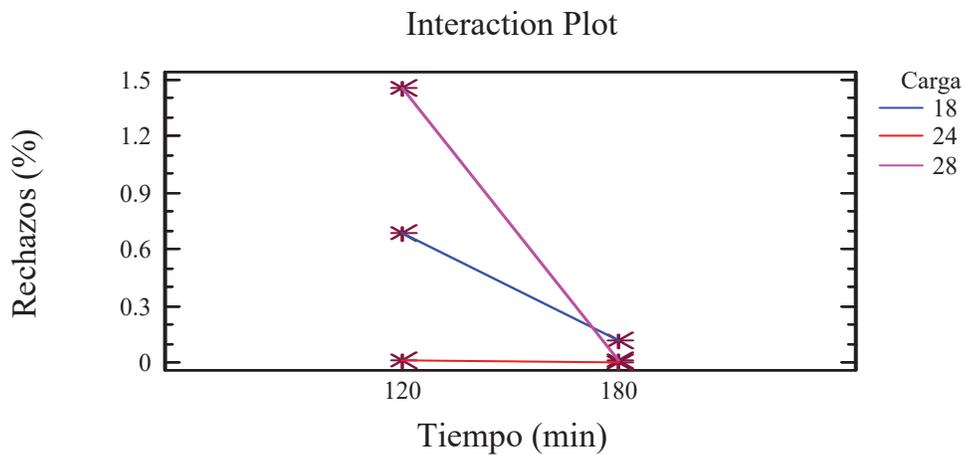


Figura 67. Efecto de la interacción tiempo-carga sobre los rechazos

Tabla 39. Prueba de rangos múltiples para los rechazos por tiempo

Multiple Range Tests for Rechazos by Tiempo

Method: 95.0 percent LSD

Tiempo	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
180	6	0.045	X
120	6	0.718333	X

Contrast	Difference	+/- Limits
120 - 180	0.673333	1.29166

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 40. Prueba de rangos múltiples para los rechazos por carga

Multiple Range Tests for Rechazos by Carga

Method: 95.0 percent LSD

Carga	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
24	4	0.0075	X
18	4	0.405	X
28	4	0.7325	X

Contrast	Difference	+/- Limits
18 - 24	0.3975	1.58196
18 - 28	-0.3275	1.58196
24 - 28	-0.725	1.58196

* denotes a statistically significant difference.

8.1.2 Blanqueo de la pulpa Kraft y a la Sosa

Pulpa Kraft

Secuencia que incluye cloro y secuencia TCF

Las tablas 41 y 42, contienen los resultados del blanqueo y el consumo final de los reactivos que se utilizaron para blanquear pulpa obtenida mediante el proceso Kraft con No. de Kappa inicial de 20.31, contenido de humedad de 61.92% y blancura inicial de 25.38% ISO.

En la tabla 41 se presentan los resultados de la secuencia que incluye cloro y se puede apreciar como en la primera etapa clorada los reactivos fueron consumidos totalmente, lo que nos indica que las condiciones aplicadas (tabla 7) fueron adecuadas, aunque tal vez pudiera reducirse el tiempo de reacción.

En cambio se puede observar que en la etapa de extracción los reactivos no se consumieron ni siquiera al 50%, lo que quiere decir que las condiciones manejadas no fueron las mejores, pudiéndose reducir la cantidad de reactivo usado y/o aumentar la temperatura y/o el tiempo, aunque cabe destacar que el No. de Microkappa resultante en esta etapa disminuyó de forma muy considerable en relación al No. de Kappa inicial, lo que posiblemente se debió a la aplicación de ClO_2 en la primera etapa, ya que la velocidad de reacción de este reactivo con la lignina es mayor que con otros compuestos presentes en la pulpa, favoreciendo así su deslignificación y posterior blanqueo (Eiras y Colodette, 2003).

En las etapas posteriores de esta secuencia los reactivos no se consumieron satisfactoriamente, lo que nos indica que las condiciones aplicadas no fueron las más adecuadas.

La blancura final que se alcanzó mediante la aplicación de esta secuencia fue del 86.36% ISO.

Tabla 41. Consumo de reactivos y resultados de blanqueo para la secuencia CDEpPD

PARAMETRO	ETAPA			
	CD	Ep	P	D
pH final	1.22	11.68	10.79	7.04
% Cl ₂	100.00			
% ClO ₂	100.00			21.66
% NaOH		46.00	70.60	100.00
% Álcali total		31.08	39.89	100.00
% H ₂ O ₂		45.16	88.50	
No. de Microkappa	N D	0.96	0.49	0.26
% de Blancura	86.36			

En la tabla 42 se muestran los resultados obtenidos cuando se aplicó la secuencia totalmente libre de cloro y se puede observar que en general el consumo de reactivos en las diferentes etapas no fue el deseado (100%), por lo que se deduce que las condiciones empleadas (tabla 9) no fueron las más apropiadas, aunque tal vez pudiera deberse a que esta pulpa no presentó la misma reactividad a los agentes oxigenados que la mostrada con los agentes clorados, lo que se ve reflejado en el No de Microkappa de cada etapa, alcanzándose una blancura final de 79.77% ISO.

Tabla 42. Consumo de reactivos y resultados del blanqueo con la secuencia OAZEopPP

PARAMETRO	ETAPA					
	O	A	Z	Eop	P	P
pH final	10.39	3.10		13.04	10.70	10.01
% NaOH	92.80			53.4	88.90	100.00
% Álcali total	60.70			42.54	35.65	100.00
% H ₂ O ₂				100.00	93.70	71.28
% Z			92.50			
No. de Microkappa	5.56	N D	3.44	2.10	1.97	1.77
% de blancura	79.77					

Pulpa a la Sosa

Secuencia que incluye cloro y secuencia TCF

En las tablas 43 y 44, se exponen los resultados de blanqueo y el consumo final de los reactivos que se utilizaron para blanquear la pulpa obtenida mediante el proceso a la sosa, la cual presentó un No. de Kappa inicial de 22.1, contenido de humedad de 64.33 % y una blancura inicial de 23.49% ISO.

Los resultados producidos al blanquear pulpa proveniente del proceso a la sosa usando la secuencia clorada, se registran en la tabla 43, apreciándose que el consumo de reactivos en las etapas que incluyen cloro fue del 100%, probando con ello que las condiciones empleadas (tabla 8) fueron adecuadas, aunque también con este resultado es recomendable disminuir la cantidad de reactivo y/o el tiempo y/o la temperatura, sin embargo en las etapas alcalinas el consumo de reactivos no es el adecuado, lo que denota que las condiciones manejadas no fueron las optimas, por ello es recomendable reducir la cantidad de reactivo y/o aumentar la temperatura y/o el tiempo, aunque el No. de Microkappa resultante si disminuyo de forma significativa (hasta 1.29) y se alcanzo una blancura final del 84.45% ISO, lo que puede atribuirse a la aplicación del dióxido de cloro en la primera etapa (Eiras y Colodette, 2003).

Tabla 43. Consumo de reactivos y resultados de blanqueo de la secuencia CDEpPD

PARAMETRO	ETAPA			
	CD	Ep	P	D
pH final	1.27	11.28	10.82	4.23
% Cl ₂	100			
% ClO ₂	100			100
% NaOH		86.81	80.12	
% Alcali total		50.48	27.93	
% H ₂ O ₂		84.95	68.73	
No. de Microkappa	7.9	2.46	1.92	1.29
% de Blancura	84.45			

En la tabla 44 se exponen los resultados obtenidos cuando se aplicó la secuencia totalmente libre de cloro, con la cual se consiguió incrementar la blancura hasta un valor final del 78.11% ISO, así como disminuir el No. de Microkappa de 10.2 en la primera etapa a 3.75 en la etapa final, el consumo de los reactivos en las diferentes etapas fue aceptable, aunque es recomendable hacer un ajuste de las condiciones (tabla 10) para tratar de obtener mejores resultados.

Tabla 44. Consumo de reactivos y resultados de blanqueo aplicando la secuencia OAZEopPP

PARAMETRO	ETAPA					
	O	A	Z	Eop	P	P
pH final	9.86	3.08	N D	9.67	11.19	10.98
% NaOH	100.00			100.00	88.41	80.38
% Álcali total	70.44			82.67	56.92	69.76
% H ₂ O ₂				100.00	100.00	100.00
% Z			99.49			
No. de Microkappa	10.22		7.72	5.39	3.86	3.75
% de blancura	78.11					

8.1.3 Evaluación físico-mecánica de la pulpa

La clasificación de las fibras en pulpa, forma parte de la caracterización físico-mecánica de la misma. Para este estudio solamente se realizó la clasificación de fibras en la pulpa Kraft y a la Sosa, sin blanquear y sin refinar.

Pulpa Kraft

Clasificación de fibras (Buer Mcnet)

En la figura 68, se plasman los resultados obtenidos de la clasificación de la pulpa kraft sin blanquear por el método Bauer McNett, la cual indica que el mayor porcentaje de la fibra se retuvo en la malla 200 e incluso le siguió en porcentaje la fibra no retenida (finos), con lo que considerando las altas proporciones de fibra corta y de finos, se espera que se obtengan resultados bajos en las propiedades de resistencia.

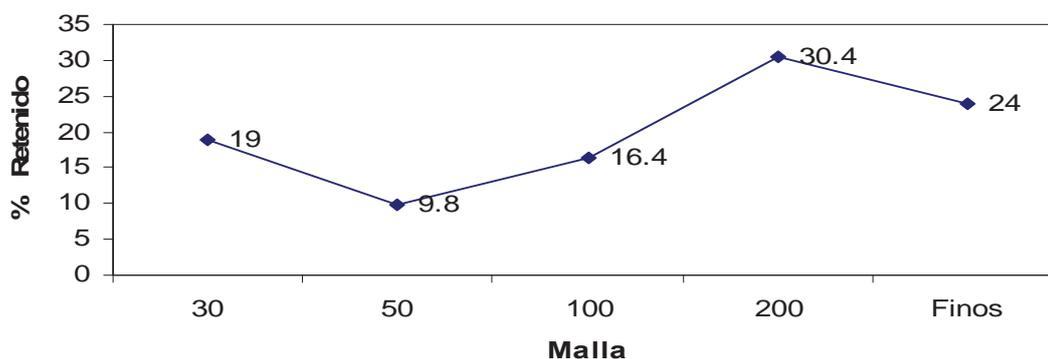


Figura 68. Clasificación de fibras por el método Bauer McNett de la pulpa Kraft sin blanquear y si refinar

Resultados de las pruebas físico-mecánicas

Los resultados de las diferentes pruebas realizadas en las hojas estándar formadas con la pulpa Kraft sin blanquear, sin refinar y refinada a distintos grados, se exponen en la tabla 45, donde se puede observar que el largo de ruptura, el índice de explosión, la porosidad y el número de dobleces, aumentaron con la refinación, e incluso en el caso de la porosidad los valores que se presentan reflejan claramente esta tendencia ya que en la pulpa sin refinar ni siquiera fue posible hacer la determinación de la porosidad debido a que el tiempo empleado para desplazar los 100 cc de aire a través de las hojas

no fue el necesario para poder medirse, caso muy parecido al de la medición del número de dobleces, donde la probetas de la pulpa sin refinar no resistieron un solo doblez, la refinación en las pruebas mencionadas parece no haber llegado a su punto máximo, pues como puede verse el valor no decreció aún a los 82 °SR que fue la máxima refinación que se le dió a esta pulpa; el índice de rasgado también aumentó con la refinación, alcanzando su valor máximo a los 66 °SR y después de este punto decrece, pues el obtenido a los 82 °SR es inferior que el obtenido a los 66 °SR; la blancura se ve disminuida con la refinación, pues su valor es inverso a la refinación, es decir, que la blancura disminuye a medida que se incrementa el grado de refinación como se puede apreciar en los valores de la tabla 45.

Tabla 45. Resultados de las pruebas físico-mecánicas, realizadas en hojas estándar de pulpa Kraft sin blanquear

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	15	30	45	60
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	16	32	49	66	82
GRAMAJE (g/m ²)	59.66	62.36	63.51	62.21	61.83
CALIBRE (mm)	0.174	0.118	0.112	0.108	0.084
LARGO DE RUPTURA (m)	103.75	559.31	1021.86	1180.22	1205.19
DEFORMACIÓN (mm)	1.1	3.6	4.5	4.8	5.8
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.12	2.24	3.00	3.14	3.98
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	2.12	35.91	47.23	50.46	64.36
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.20	3.52	4.63	4.94	6.31
RASGADO (gf)	13.33	45.33	53.33	56.00	48.00
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	22.34	72.68	83.96	90.00	77.62
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	2.19	7.12	8.23	8.82	7.61
BLANCURA FR 457 nm (%)	25.38	26.47	24.98	23.26	21.95
POROSIDAD (s/100ml)	-----	3	11.77	24.33	435.88
DOBLEZ (No.)	-----	51.37	230.87	326.75	716.50

La tabla 46, ilustra los resultados que se obtuvieron de las pruebas físico-mecánicas hechas en hojas estándar de pulpa sin refinar y refinada a diferentes puntos, blanqueada mediante una secuencia clorada (CDEpPD), en esta tabla se observa que la resistencia al largo de ruptura alcanza su máximo valor alrededor de los 24 °SR y después de este punto decrece, dando valores inferiores en los siguientes puntos de refinación; respecto al índice de explosión, el índice de rasgado, la porosidad y el número de dobleces, se ve claramente como su resistencia fue beneficiada con la refinación, especialmente en las pruebas de porosidad y doblez, no llegando a su punto máximo pues los valores obtenidos a 45 °SR (máximo punto de refinación) no disminuyeron con respecto a los valores de los otros puntos de refinación; la blancura al igual que en la pulpa sin blanquear, decrece inversamente proporcional al grado de refinación.

Tabla 46. Resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas en hojas estándar de pulpa Kraft blanqueada con la secuencia clorada

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	15	30	45	60
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	14	19	24	33	45
GRAMAJE (g/m ²)	61.25	63.61	61.27	62.31	62.75
CALIBRE (mm)	0.15	0.12	0.11	0.11	0.10
LARGO DE RUPTURA (m)	181.90	646.50	785.72	761.64	695.62
DEFORMACIÓN (mm)	2.4	3.2	4.6	4.8	4.0
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.28	1.50	1.99	2.03	2.11
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	4.67	23.68	32.55	32.66	33.71
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.45	2.32	3.19	3.19	3.30
RASGADO (gf)	16.00	33.33	40.00	45.33	49.33
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	26.11	52.40	65.28	72.74	78.61
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	2.56	5.13	6.40	7.13	7.70
BLANCURA FR 457 nm (%)	86.36	84.32	84.52	83.38	82.78
POROSIDAD (s/100ml)	-----	-----	1.00	2.44	5.22
DOBLEZ (No.)	1	7.22	20.50	29.62	44.85

En la tabla 47, se plasman los resultados que se obtuvieron al realizar las pruebas físico-mecánicas a las hojas formadas con pulpa Kraft blanqueada mediante una secuencia totalmente libre de cloro sin refinar y refinada a dos puntos, en esta tabla se puede ver que a diferencia de la pulpa sin blanquear y blanqueada con la secuencia clorada, solo se refino a dos puntos y en tiempos muy bajos con relación a la refinación de las pulpas mencionadas, esto debido a que la pulpa después de ser blanqueada con la secuencia OAZEopPP, presento una considerable degradación lo que se comprobó al hacer la medición de los grados SR en la pulpa sin refinar. En general los resultados de las pruebas para esta pulpa fueron bajos, a excepción de la porosidad donde la resistencia al paso del aire fue alta.

Tabla 47. Resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas en hojas estándar de pulpa kraft blanqueada con la secuencia TCF

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	7	14
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	49	92	98
GRAMAJE (g/m ²)	61.93	67.87	63.59
CALIBRE (mm)	0.10	0.08	0.08
LARGO DE RUPTURA (m)	251.62	175.13	262.11
DEFORMACIÓN (mm)	2.2	1.8	1.9
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.38	0.53	0.44
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	6.17	7.88	6.94
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.605	0.77	0.68
RASGADO (gf)	16.00	14.40	9.33
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	25.83	21.21	14.67
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	2.53	2.08	1.43
BLANCURA FR 457 nm (%)	79.77	75.09	73.94
POROSIDAD (s/100ml)	1.11	152.37	457.37
DOBLEZ (No.)	-----	1	1

Pulpa a la Sosa

Clasificación de fibras (Buer Mcnet)

Los resultados de la clasificación de las fibras por el método Bauer McNett para la pulpa a la Sosa sin blanquear y sin refinar, se exponen en la figura 69 indicándonos que esta pulpa esta compuesta en gran proporción de finos, ya que inclusive el porcentaje fue mayor que para cualquiera de las mallas, le siguieron en proporción las mallas para fibra corta (200 y 100 en su orden), con lo que nos da una idea de que la pulpa presenta un alto porcentaje de fibra corta. Por lo tanto será muy difícil que se obtengan buenos resultados en las pruebas de resistencia.

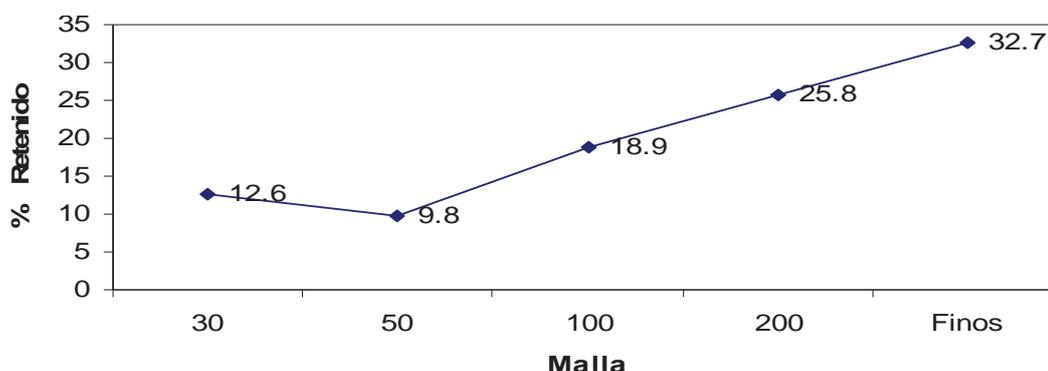


Figura 69. Clasificación de fibras por el método Bauer McNett de la pulpa a la Sosa sin blanquear y sin refinar

Resultados de las pruebas físico-mecánicas

En la tabla 48, se presentan los resultados de las pruebas físico-mecánicas practicadas a las hojas estándar formadas con pulpa a la Sosa sin blanquear, sin refinar y refinada a 15, 30, 45 y 60 minutos, en los resultados para esta pulpa se observa que la refinación afecto positivamente la resistencia de la misma reflejándose en valores más altos, conforme se va refinando, excepto en la blancura que con la refinación disminuyo, comportamiento completamente normal de esta prueba.

Tabla 48. Resultados de las pruebas físico-mecánicas, realizadas en hojas estándar de pulpa a la Sosa sin blanquear

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	15	30	45	60
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	14	24	33	61	70
GRAMAJE (g/m ²)	63.97	63.64	64.98	64.02	64.08
CALIBRE (mm)	0.18	0.12	0.11	0.11	0.09
LARGO DE RUPTURA (m)	94.36	654.08	734.67	807.72	920.93
DEFORMACIÓN (mm)	1.2	3.5	3.5	4.0	4.5
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.12	1.28	1.73	2.26	2.71
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	1.99	20.22	26.67	35.32	42.36
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.19	1.98	2.61	3.46	4.15
RASGADO (gf)	12.00	26.00	34.00	40.00	40.00
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	18.75	40.85	52.32	62.47	62.41
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	1.83	4.00	5.13	6.12	6.12
BLANCURA FR 457 nm (%)	23.49	21.86	20.80	19.96	18.82
POROSIDAD (s/100ml)	-----	1.15	4.03	16.72	62.29
DOBLEZ (No.)	-----	4.33	13.70	64.25	194.00

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas físico-mecánicas, hechas a las hojas formadas con pulpa a la Sosa blanqueada mediante una secuencia clorada se reportan en la tabla 49, donde se observa como las propiedades aumentan con la refinación, en el caso del largo de ruptura e índice de explosión, alcanzan su máximo valor alrededor de los 36 °SR y después de este punto existe una caída en su resistencia, dando valores inferiores en los siguientes puntos, respecto al índice de rasgado, la porosidad y el número de dobleces, se nota claramente como su resistencia fue beneficiada con la refinación, al máximo punto de refinación (43 °SR) sin que los valores

obtenidos disminuyeran en referencia al valor de los puntos de refinación anteriores; la blancura se comporta de forma normal, decreciendo con el aumento de la refinación.

Tabla 49. Resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas en hojas estándar de pulpa a la Sosa blanqueada con la secuencia clorada

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	15	30	45	60
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	15	22	27	36	43
GRAMAJE (g/m ²)	63.72	64.87	64.53	63.79	63.27
CALIBRE (mm)	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
LARGO DE RUPTURA (m)	251.62	629.01	628.16	706.31	678.77
DEFORMACIÓN (mm)	2.50	4.00	4.00	4.5	4.00
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.19	1.50	1.68	2.01	1.97
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	3.11	23.14	26.22	31.25	30.98
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.30	2.26	2.57	3.06	3.03
RASGADO (gf)	10.00	34.00	38.00	44.00	44.00
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	15.69	52.40	59.23	68.18	68.96
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	1.53	5.13	5.80	6.68	6.76
BLANCURA FR 457 nm (%)	84.45	82.68	82.45	81.64	81.53
POROSIDAD (s/100ml)	-----	0.84	1.43	3.27	4.65
DOBLEZ (No.)	1.00	8.33	13.11	24.88	23.50

La tabla 50, muestra los resultados que se obtuvieron al llevar a cabo las diferentes pruebas físico-mecánicas en las hojas formadas con pulpa a la Sosa blanqueada con una secuencia totalmente libre de cloro, en ella se observa que solo se reportan los resultados a dos puntos de refinación (15 y 30 min), ya que

esta pulpa no se pudo refinar a mas puntos pues al hacer la medición de los grados SR en el primer punto de refinación (15 min), se obtuvo un valor de 73 °SR, indicando con esto que la pulpa se refinaba muy rápidamente, debido tal ves a una degradación sufrida durante el proceso de blanqueo. Los resultados de las pruebas para esta pulpa, en general fueron bajos a excepción de la porosidad donde la resistencia fue aumento en gran medida con la refinación, aun así las propiedades se comportaron de forma normal aumentando con la refinación y en el caso de la blancura disminuyendo.

Tabla 50. Resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas en hojas estándar de pulpa la Sosa blanqueada con la secuencia TCF

TIEMPO DE REFINACIÓN (min)	0	15	30
GRADO DE REFINACIÓN (°SR)	15	73	90
GRAMAJE (g/m ²)	64.75	65.13	65.59
CALIBRE (mm)	0.13	0.09	0.08
LARGO DE RUPTURA (m)	244.56	308.93	601.66
DEFORMACIÓN (mm)	2.50	3.00	4.00
EXPLOSIÓN (kg/cm ²)	0.54	1.00	1.31
FACTOR DE EXPLOSIÓN (gf*m ² /cm ² *g)	8.46	15.45	20.11
INDICE DE EXPLOSIÓN (kPa*m ² /g)	0.83	1.51	1.97
RASGADO (gf)	16.00	20.00	14.00
FACTOR DE RASGADO (100*gf*m ² /g)	24.71	30.70	21.34
INDICE DE RASGADO (mN*m ² /g)	2.42	3.01	2.09
BLANCURA FR 457 nm (%)	78.11	76.72	72.23
POROSIDAD (s/100ml)	-----	23.55	383.20
DOBLEZ (No.)	1.33	1	1

8.2 Discusión

8.2.1 Pulpeo Kraft y a la Sosa

Pulpeo Kraft (primera etapa)

Rendimiento

Estadísticamente el *Eucalyptus robusta* Sm, cuando se pulpea con cargas de 14.0 y 15.5%, tiempos de 120 y 150 min y a dos alturas del árbol (zona), no presentó diferencia en el rendimiento por efecto de la zona del árbol de donde fueron tomadas las trozas, el tiempo de cocción y la carga de reactivos, así como tampoco con las interacciones de estos factores, aunque se presenta una tendencia a obtener mejor rendimiento en la zona de abajo, con tiempo de 120 min carga de 14.0%, Rutiaga *et al.* (2005) al pulpear madera de *E. saligna*, con las mismas condiciones tampoco encontraron diferencia estadística, aunque la tendencia que ellos observaron fue a obtener mayor rendimiento en la zona de arriba, a un tiempo de 120 min y carga de 15.5%, en cambio Ortega *et al.* (2005) mencionan que cuando pulpearon *E. camaldulensis* Dnhh, en condiciones semejantes, encontraron una diferencia estadística por efecto de la zona obteniendo mayores resultados de la zona de arriba, en cuanto al tiempo y la carga tampoco encontraron diferencia estadística, Rodríguez (2006) pulpea madera de *E. citriodora*, bajo las mismas condiciones, reporta que los factores zona, carga, y tiempo, así como la interacción carga-zona si tuvieron efecto significativo sobre esta especie obteniendo rendimientos más altos en la zona de arriba, con tiempo de 120 min y carga de 14.0%.

No. de Kappa

Al pulpear madera de *Eucalyptus robusta* Sm, bajo las condiciones que se presentan en al tabla 4 de la metodología, esta especie no presenta diferencia estadística respecto a los factores tiempo y zona sobre el No. de Kappa, en cambio el factor carga si presenta diferencia estadística, ya que con carga de 15.5 se obtienen valores más bajos para el No. de Kappa, coincidiendo con lo

que reportan Rutiaga *et al.* (2005) para *E. saligna*, Ortega *et al.* (2005) para *E. camaldulensis* Dehnh y Rodríguez (2006) para *E. citriodora* que bajo las mismas condiciones de pulpeo, refieren que la carga presentó un efecto significativo sobre el No. de Kappa, en el caso de *E. camaldulensis* Dehnh y *E. citriodora* (Ortega *et al.* 2005 y Rodríguez, 2006) además de la carga también encontraron que la zona presentó diferencia estadística, lo cual no fue el caso para *Eucaliptos saligna* (Rutiaga *et al.* 2006). Para *E. citriodora* (Rodríguez 2006) además de los factores carga y zona, también encontró diferencia estadística para el factor tiempo y la interacción tiempo-carga

Rechazos

Los rechazos producidos en la obtención de pulpa celulósica a partir de la madera de *Eucalyptus robusta* Sm, con las condiciones de la tabla 4, no presentaron ningún efecto estadístico de los factores zona, carga y tiempo, así como tampoco de sus interacciones, sobre la cantidad de rechazos producidos, estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rutiaga *et al.* (2005) para *E. saligna* que tampoco encontraron diferencia en los rechazos por efecto de los factores mencionados. Por el contrario Ortega *et al.* (2005), si encontró una diferencia en los rechazos respecto a la zona y la carga, resultados similares a los reportados por Rodríguez (2006), para el *E. citriodora*, quien encontró una diferencia solamente para el factor carga, mencionando que solo con este factor se podría reducir la cantidad de rechazos.

Pulpeo Kraft (segunda etapa)

Rendimiento

Cuando se llevo a cabo la segunda etapa de pulpeo Kraft, con madera de *Eucalyptus robusta* Sm, de acuerdo a las condiciones que se presentan en la tabla 5 de la metodología, manejando los factores tiempo de cocción y carga de reactivos, se obtiene que dichos factores no presentan efecto significativo con respecto al rendimiento, resultados semejantes a los obtenidos por Rodríguez

(2006) para *E. citriodora* (pulpeado en las mismas condiciones), ya que tampoco encontró diferencia de los factores con respecto al rendimiento estadísticamente hablando. Las condiciones para maximizar el rendimiento en el *Eucalyptus robusta* Sm, fueron 120 min y 14.0%, dando un rendimiento de 46.96%, que comparado con el obtenido por Albarrán (2004) para madera de *Q. conspersa* pulpeada por el proceso Kraft, con estas condiciones de tiempo y carga y a una temperatura de 164 °C (36.12%) es más alto. Las condiciones para maximiza el rendimiento de *E. robusta* Sm fueron diferentes a las obtenidas por Rutiaga *et al.* (2005), que consiguieron los mejores resultados de rendimiento para el pulpeo de *E. saligna* a 120 min y carga de 15.5%, alcanzando un rendimiento de 39.7%, porcentaje que se encuentra por debajo del obtenido para *E. robusta* Sm, Rodríguez (2006), determinó que las mejores condiciones para maximizar el rendimiento al pulpear *E. citriodora*, fueron 120 min de tiempo y 15.5% de carga, produciendo con estas condiciones un rendimiento de 47.9%, condiciones semejantes a las que reportan Rutiaga *et al.* (2005) para *E. saligna*.

No. de Kappa

Cuando el *Eucalyptus robusta* Sm se pulpeo con las condiciones especificadas para la segunda etapa tabla 5, el No de Kappa, no se vio afectado estadísticamente por el tiempo de cocción, ni por la interacción tiempo-carga. Para el factor carga si presento un efecto estadístico sobre los valores obtenidos para el No. de Kappa los cuales se minimizaron con un tiempo de 120 min y carga de 15.5%, dando un valor optimo de 19.2, el cual es menor al reportado por Albarrán (2004) para *Q. conspersa*, ya que menciona que al pulpear esta especie con 14.0% y 120 min a una temperatura de 164 °C, obtuvo un No. de Kappa de 33.94. Rutiaga *et al.* (2005) reportan que las mejores condiciones para minimizar el No. de Kappa (23.2) en el pulpeo de *E saligna* fueron 150 min y 15.5 % de carga, y con estas condiciones el No. de Kappa que ellos reportan es mayor al obtenido para *E. robusta* Sm, Rodríguez (2006) reporta que solo el tiempo presento significancia sobre el No. de Kappa, el cual es menor a 150 min, disminuyendo hasta 17.8, valor mas bajo que el obtenido para *E. robusta* y mas bajo aún que el reportado para *E. Saligna*.

Rechazos

Los factores tiempo y carga y su interacción no fueron significativos cuando se hicieron pulpeos de *Eucalyptus robusta* Sm en la segunda etapa, bajo las condiciones expresadas en la tabla 5, obteniéndose la menor cantidad de rechazos, cuando las condiciones utilizadas fueron 150 min y 14.0% de carga, alcanzándose un valor de 0.07% (condiciones optimas), el cual esta mucho más bajo que el obtenido por Albarrán (2004), al realizar cocciones con madera de *Q. conspersa*, a 120 min, con carga de 14.0% y a 160 °C, obteniendo el 11.22% de rechazos. Rodríguez (2006) reporta para *E. citriodora* que la carga si tiene un efecto significativo sobre los rechazos, minimizando la cantidad de rechazos con un tiempo de 120 min y carga de 15.5%, obteniendo solo un 0.13% de rechazos, valor que es superior a la cantidad de rechazos obtenidos de *E. robusta* Sm.

Pulpeo a la sosa

Rendimiento

El rendimiento que se obtiene al pulpear madera de *E. robusta* Sm, bajo las condiciones de tiempo y carga mostrados en la tabla 6 de la metodología, mediante el proceso a la Sosa, se ve afectado por los factores carga y tiempo, alcanzándose el mayor rendimiento con un tiempo de 120 min y carga de 18.0% (46.74), muy parecido a lo que reporta Rodríguez (2006) para el *E. citriodora* ya que menciona que en esta prueba tanto el tiempo como la carga presentan un efecto estadístico sobre el rendimiento, alcanzando su máximo rendimiento (50.3%), con un tiempo de 120min y carga d 18.0%.

No. de Kappa

Cuando se realiza pulpeo por el proceso a la Sosa, de la madera de *E. robusta* Sm, según las condiciones de la tabla 6, el No. de Kappa, no presenta ningún efecto estadístico significativo, producido por el factor tiempo, pero si se ve afectado por la carga de reactivos, obteniendo el No. de Kappa mas bajo con

180 min y carga de 28% (7.42), esto difiere de lo que reporta Rodríguez (2006), cuando pulpea *E. citriodora*, ya que menciona que tanto el factor carga como el factor tiempo, tienen influencia sobre el No. de Kappa, por lo que este disminuye con el aumento de dichos factores, las condiciones que reporta para la obtención del menor No. de Kappa, fueron 180 min y carga de 28%, que son las mismas que se obtuvieron para el *E. robusta* Sm.

Rechazos

Los rechazos que se obtiene al pulpear *E. robusta* Sm, por el proceso a la Sosa, no se ven afectados significativamente por los factores tiempo y carga ya que no existe diferencia estadística significativa de ellos sobre los rechazos obtenidos, ya que con una carga de 28% y carga de 24% a un tiempo de 180 min se puede obtener el menor porcentaje de rechazos, el comportamiento de esta especie en cuanto a los rechazos se refiere es muy semejante al que presenta el *E. citriodora*, de acuerdo con lo que reporta Rodríguez (2006) ya que menciona que los factores tiempo y carga no presentan ningún efecto significativo sobre los rechazos.

8.2.2 Blanqueo de la pulpa Kraft y a la Sosa

Pulpa Kraft

Secuencia que incluye cloro y secuencia TCF

En general esta pulpa presento una respuesta muy favorable al blanqueo con la secuencia clorada, lo que se ve reflejado en la rápida disminución de su número de Microkappa (tabla 41). Esta pulpa un presento mejor comportamiento con la secuencia clorada (CDEpPD), que cuando se le trato con la secuencia libre de cloro (OAZEopPP), alcanzando para la secuencia clorada una blancura de 86.36% ISO y una disminución en el número de Microkappa hasta 0.26, en cambio con la secuencia TCF, solo alcanzo una blancura de 79.77% ISO y una disminución en el número de Microkappa hasta 1.77. Este comportamiento parece ser generalizado para los eucaliptos, ante este tipo de secuencias de blanqueo, pues comparando con los resultados que obtuvieron Ortega *et al.* (2005) para *E. camaldulensis* Dehnh, 87.3% ISO, para

secuencia clorada y 82% ISO para la secuencia libre de cloro, Gabriel *et al.* (2005) para *E. saligna* Smith 85.5% ISO y 86.9% ISO respectivamente, y Rodríguez (2006) para *E. citriodora* Hook 87.2% ISO y 71.3% ISO para secuencia clorada y libre de cloro, cuando aplicaron las mismas secuencias, todos coinciden en que la pulpa reacciona mejor a la secuencia clorada que a la libre de cloro, alcanzando blancuras más altas y números de Microkappa mas bajos para la secuencia clorada, que para la secuencia libre de cloro.

Pulpa a la sosa

Secuencia que incluye cloro y secuencia TCF

Al blanquear pulpa proveniente del proceso a la sosa, se observa que al igual que la pulpa Kraft su respuesta es mucho más favorable a la secuencia clorada, que a la libre de cloro, alcanzándose una blancura de 84.5% ISO, para la secuencia clorada y 78.11 para la secuencia libre de cloro, resultados muy similares a los obtenidos por Rodríguez (2006) para *E. citriodora* Hook 85.09% ISO para la secuencia clorada y 78.4% ISO para la secuencia libre de cloro, quien también señala que la pulpa, se comporto de la misma manera.

8.2.3 Evaluación físico-mecánica de la pulpa Kraft y a la Sosa

Efecto del grado de refinación de la pulpa sobre sus propiedades

Algunas propiedades de resistencia aumentan con la refinación hasta llegar a un punto máximo y después de ese máximo se produce poco efecto, y con frecuencia trae una reducción en la resistencia. Las propiedades más importantes de la fibra que controlan su resistencia son quizá la superficie específica, la flexibilidad y en algunos casos la eliminación de la pared primaria ya que estas son las propiedades que ocasionan la unión entre las fibras, por lo general la reducción de resistencia después de un batido prolongado se atribuye a una reducción en el largo de la fibra (Casey 1991a).

Largo de ruptura

El largo de ruptura aumenta con el grado de refinación, este aumento en el largo de ruptura se debe a que con la refinación aumenta el área de contacto de las fibras (Swanson, Steber 1959), ya que se produce una separación de capas concéntricas en el interior de la pared de la fibra (Page 1967; McIntosh 1967), pero si la pulpa es batida en exceso hay una caída en la resistencia atribuido generalmente al acortamiento en el largo de la fibra (Page 1967; Casey 1991a) (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Índice de explosión

El valor correspondiente al índice de explosión va en aumento con la refinación, esto gracias a que el refinado de la pulpa, le confiere al papel resistencia en todos los rangos (Casey 1991b) al promover una separación de capas concéntricas del interior de la pared de la fibra aumentando con ello el área de contacto (Swanson, Steber 1959; Page 1967) (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Índice de rasgado

La resistencia al rasgado aumenta con la refinación (Rodríguez 1970), hasta llegar a un punto en que su valor empieza a descender, esto sucede como consecuencia de un exceso de refinación lo que provoca que en la hoja exista un aumento en su unión y rigidez, tendiendo a concentrar la resistencia en una zona más pequeña, dando como resultado valores de rasgado más bajos (Casey 1991b) (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Blancura FR 457

La blancura se afecta con la refinación, disminuyendo a medida que esta aumenta, siendo este uno de tantos factores que la afectan, debido a que al producirse una mayor área de contacto se reduce el número de veces que la luz pasa de una fibra al aire y viceversa, así como de una fibra a otra, disminuyendo su refracción (Casey 1991b) (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Porosidad

Las fibras de la pulpa sin refinar son rígidas y no se flexionan, por lo que no se conforman entre si dejando un gran volumen abierto en la hoja (Casey 1991a),

motivo por el cual esta se comporta como un material poroso, en cambio la porosidad aumenta con la refinación, esto se debe a que al aumentar el grado de refinación la resistencia al paso del aire también aumenta gracias a que la superficie de contacto entre las fibras es mayor (Swanson, Steber 1959), ya que se produce un fibrilado interno o también llamado aplastamiento de la fibra lo que aumenta la flexibilidad de las fibras, aumentando el contacto entre ellas (Casey 1991a), formando así una superficie más cerrada y densa, que opone mayor resistencia al paso del aire (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Doblez

La resistencia al dobléz nos indica la aptitud del papel para ser doblado sin que sufra roturas o enmendaduras (Sanjuán 1997), es decir el número de dobleces que el papel soporta antes que su resistencia a la tensión decaiga por debajo del valor estándar. Siendo pues una prueba que mide la resistencia y la flexibilidad provocando una pérdida gradual en la unión de las fibras (Casey 1991a) esta resistencia aumenta con el refinado gracias a que con ello se produce un aumento en la superficie específica y flexibilidad de las fibras provocando una mejor unión entre ellas (Casey 1991) (tablas 45, 46, 47, 48, 49 y 50).

Evaluación físico-mecánica de la Pulpa kraft

Clasificación de fibras (Buer Mcnet)

Al hacer la clasificación de las fibras en la pulpa sin blanquear y sin refinar, los resultados que se obtuvieron, indican que la pulpa contenía una gran cantidad de fibra corta y de finos, siendo estas dos fracciones las que componían en su gran mayoría a la pulpa, lo que nos hace suponer que la fibra sufrió una degradación en el proceso de pulpeo, ya que de acuerdo a los índices de calidad de pulpa para papel (anexo 1), esta fibra presenta una relación de Runkel (buena), coeficiente de rigidez (media), coeficiente de flexibilidad (media) e índice de esbeltez (87.53) según NS Martínez Ríos (comunicación personal, agosto 22, 2006; tesista de licenciatura, FITECMA-UNSNH, inédito).

Pruebas físico-mecánicas en pulpa sin blanquear

Los resultados de las diferentes pruebas realizadas en las hojas estándar formadas con la pulpa Kraft sin blanquear, sin refinar y refinada a distintos grados, muestran un aumento en la resistencia con la refinación, gracias al aumento que se produce en el área de contacto de las fibras (Swanson, Steber 1959), más sin embargo los resultados conseguidos son demasiado bajos al ser comparados con datos reportados en la literatura, lo que puede deberse como se menciona en la clasificación de fibras a que esta pulpa presenta un alto grado de acortamiento fibrilar, si comparamos estos resultados con los reportados por Rutiaga *et al.* (2005) (largo de ruptura 10212.10 m, índice de explosión 7.60 kPa*m²/g, índice de rasgado 7.54 mN*m²/g) para *E. saligna* y Rodríguez (2006) (largo de ruptura 9677 m, índice de rasgado 9.8 mN*m²/g) para *E. citriodora* a 45 °SR y 52 °SR, respectivamente, nos damos cuenta como a excepción del índice de ruptura, los valores para *E. robusta* Sm (largo de ruptura 1021.86 m, índice de explosión 4.63 kPa*m²/g, índice de rasgado 8.23 mN*m²/g) a 49 °SR, están muy por debajo, sobre todo la resistencia al largo de ruptura, lo que se comprueba también, si se comparan los resultados de esta especie, con los obtenidos por Albarrán (2004), para el *Q. conspersa* (especie igualmente de fibra corta), que al ser probada en pulpa sin refinar presentó los siguientes valores, 9.65 Nm/g para el índice de tensión, 3.10 mN*m²/g para el índice de rasgado y 2.71 kPa*m²/g para el índice de explosión.

Pruebas físico-mecánicas en pulpa blanqueada con la secuencia clorada

Esta pulpa presentó con la refinación, un desarrollo típico de sus propiedades, ya que estas mejoraron al ser refinada, aunque, sus valores están muy bajos, sobre todo los de tensión. Los valores de largo de ruptura reportados en la literatura para pulpas de otras especies de eucaliptos blanqueadas con la misma secuencia, son mucho más altos que los valores determinados para *E. robusta* Sm, al respecto, Rodríguez (2006) reporta un largo de ruptura en pulpa de *E. citriodora* blanqueada con la secuencia CDEpPP de 7419.00 m a 82 °SR que fue su punto de refinación óptimo y *E. robusta* Sm, que a 24 °SR alcanzó su refinación óptima, obtuvo un largo de ruptura de apenas 785.72 m. Los resultados obtenidos para *E. robusta* Sm de índice de explosión e índice de

rasgado a 45 °SR, son equiparables a los reportados por Gabriel *et al.* (2005) y Ortega *et al.* (2005), para pulpa de *E. saligna* Smith a 45 °SR y *E. camaldulensis* Dehnh a 41 °SR respectivamente, en pulpa blanqueada con la misma secuencia, los resultados para estas especies son: índice de explosión 6.43 kPa*m²/g, para *E. camaldulensis* Dehnh, 3.88 kPa*m²/g, para *E. saligna* Smith y 3.19 kPa*m²/g para *E. robusta* Sm; índice de rasgado 7.84 mN*m²/g, 2.80 mN*m²/g y 7.13 mN*m²/g respectivamente, en cambio el número de dobleces (44) que soportaron las probetas hechas con pulpa de *E. robusta* Sm fue muy inferior al reportado por Gabriel *et al.* (2005) y Ortega *et al.* (2005), 373 para *E. camaldulensis* Dehnh y 445 para *E. saligna* Smith, respectivamente.

Pruebas físico-mecánicas en pulpa blanqueada con la secuencia libre de cloro

Como ya se mencionó en los resultados esta pulpa sufrió una fuerte degradación durante el proceso de blanqueo, lo que se refleja en los bajos resultados obtenidos para todas las pruebas físico-mecánicas realizadas, a excepción de la resistencia al paso del aire (porosidad) y además también se refleja en la cantidad de °SR medidos, para la pulpa sin refinar (tabla 47). Esta degradación se debe a que el ozono presenta un gran problema de selectividad, ya que tiene tendencia a reaccionar con los hidratos de carbono, causando una degradación importante de la celulosa (Patt *et al.* 1991), para evitar esta degradación se debe de aplicar un tratamiento adecuado a la pulpa anterior al blanqueo con ozono, que sea capaz de prevenir la reacción del ozono con los hidratos de carbono (Liebergott *et al.* 1992, Colodette *et al.* 1993), además las pulpas tratadas con oxidantes fuertes como el ozono, se vuelven más sensibles a la degradación en un posterior tratamiento alcalino, (Fuhrmann *et al.* 1997), por ello se debe aplicar un postratamiento a la etapa con ozono, ya que este puede influenciar en la eficiencia y selectividad del proceso (Roncero *et al.* s/f). En este sentido, se encontró en la literatura que Roncero *et al.* s/f) aplicaron pre y pos tratamientos a la etapa con ozono en pulpa industrial de *E. globulus*, y reportan que puede obtenerse pulpa blanqueada TCF con propiedades finales similares a las de las pulpas blanqueadas con secuencias convencionales, aplicando un pretratamiento con

ácido oxálico y un postratamiento con borohidruro sódico. La pulpa de *E. robusta* Sm, blanqueada con la secuencia TCF, comparada con lo reportado para la pulpa sin refinar de otras especies de eucaliptos blanqueadas con la misma secuencia (OAZEopPP), presenta valores de resistencia mucho más bajos. El largo de ruptura determinado, para *E. robusta* Sm fue de 251.52 m, mientras que, Rodríguez (2006) reporta un largo de ruptura en pulpa de *E. citriodora* de 2120.00 m; con respecto a los valores de explosión Gabriel *et al.* (2005) reportan un índice de explosión para pulpa de *E. saligna* Smith de 6.02 kPa*m²/g y Ortega *et al.* (2005) determinaron para *E. camaldulensis* Dehnh un índice de explosión de 1.39 kPa*m²/g, en tanto que el índice de explosión obtenido para *E. robusta* Sm tan solo fue de 0.60 kPa*m²/g, en la prueba de doblez *E. robusta* no arrojó ningún dato, comparado con 7 dobleces para *E. saligna* Smith y 5 para *E. camaldulensis* Dehnh, reportados por Gabriel *et al.* (2005) y Ortega *et al.* (2005), respectivamente.

Evaluación físico-mécanica de la pulpa a la Sosa

Clasificación de fibras (Buer Mcnet)

Al llevar a cabo la clasificación de fibras en la pulpa sin blanquear y sin refinar, obtenida mediante un proceso de pulpeo a la Sosa, se determinó que la pulpa presenta gran cantidad de finos y fibra corta, siendo estas dos fracciones las más abundantes, resultados que nos indican que la pulpa presenta una degradación producida por efecto de las condiciones del pulpeo, pues como se menciona en la clasificación de fibras de la pulpa kraft, esta pulpa es buena de acuerdo a sus índices de calidad (anexo 1).

Pruebas físico-mecánicas en pulpa sin blanquear

Esta pulpa presentó un comportamiento normal en los resultados de la refinación, ya que sus valores crecen, al incrementar el grado de esta, efecto producido con la refinación, por el aumento en el área de contacto y en la flexibilidad de las fibras lo que permite una mejor unión entre ellas (Swanson,

Steber 1959; Casey 1991). Aún con este comportamiento los resultados presentados por esta pulpa son bajos, ya que si se comparan con datos encontrados en la literatura, los resultados obtenidos para *E. robusta* Sm siempre son inferiores a los reportados para otras especies, en este sentido, se encontró que Rodríguez (2006) realizó pruebas en hojas formadas con pulpa proveniente de un proceso a la sosa sin blanquear de *E. citriodora* Hook obteniendo un largo de ruptura de 545.00 m, en pulpa sin refinar, contra 94.36 m de largo de ruptura que se obtuvieron para *E. robusta* Sm, también en pulpa sin refinar.

Pruebas físico-mecánicas en pulpa blanqueada con la secuencia clorada

Las hojas formadas con pulpa a la Sosa blanqueada mediante una secuencia clorada, al ser sometidas a las diferentes pruebas físico-mecánicas, presentaron resultados bajos, respecto a lo reportado en la literatura para pulpa a la sosa de otras especies de Eucaliptos, sobre todo en lo que se refiere a la prueba de tensión, ya que para el *E. robusta* el valor de largo de ruptura fue de 251.62 m, para pulpa sin refinar y Rodríguez (2006) reporta un largo de ruptura de 1068.00 m en pulpa sin refinar de *E. citriodora* Hook, de esta especie fue de la única que se encontraron datos en pulpa a la sosa obtenida bajo las mismas condiciones que la de *E. robusta* Sm.

Pruebas físico-mecánicas en pulpa blanqueada con la secuencia libre de cloro

Al igual que la pulpa Kraft, la pulpa a la Sosa blanqueada con la secuencia libre de cloro (OAZEopPP) sufrió una fuerte degradación durante el proceso de blanqueo, ya que esta secuencia utiliza una etapa con ozono, el cual tiene una tendencia a reaccionar con los hidratos de carbono, causando una reducción importante en la viscosidad de la pulpa y por lo tanto en la selectividad del proceso (Patt *et al.* 1991, Kishimoto *et al.* 1998), dando como resultado propiedades finales de la pulpa por debajo de los valores normales (Roncero *et al.* s/f), además las pulpas tratadas con oxidantes fuertes como el ozono son pulpas más sensibles a la degradación en un tratamiento alcalino posterior (Fuhrmann *et al.* 1997), lo que se observa con los bajos resultados obtenidos

en todas las pruebas físico-mecánicas. Comparados los resultados obtenidos por el *E. robusta* Sm, con lo reportado por Rodríguez (2006) para pulpa a las sosa de *E. citriodora*, obtenida bajo las mismas condiciones, sin refinar y blanqueada con la misma secuencia (OAZEopPP), esta pulpa presenta valores de resistencia mucho más bajos, por ejemplo, el largo de ruptura determinado, para *E. robusta* Sm fue de 244.56 m, mientras que, Rodríguez (2006) reporta un largo de ruptura para *E. citriodora* de 1196.00 m.

Los resultados de las diferentes pruebas realizadas en las hojas estándar formadas con la pulpa Kraft sin blanquear, sin refinar y refinada a distintos grados, muestran un aumento en la resistencia con la refinación, gracias al aumento que se produce en el área de contacto de las fibras (Swanson, Steber 1959), más sin embargo estos resultados son demasiado bajos al ser comparados con datos reportados en la literatura, lo que puede deberse como se menciona en la clasificación de fibras a que esta pulpa presenta un alto grado de acortamiento fibrilar, si comparamos estos resultados con los reportados por Rutiaga *et al.* (2005) (largo de ruptura 10212.10 m, índice de explosión 7.60 kPa*m²/g, índice de rasgado 7.54 mN*m²/g) para *E. saligna* y Rodríguez (2006) (largo de ruptura 9677 m, índice de rasgado 9.8 mN*m²/g) para *E. citriodora* a 45 °SR y 52 °SR, respectivamente, nos damos cuenta como a excepción del índice de ruptura, los valores para *E. robusta* Sm (largo de ruptura 1021.86 m, índice de explosión 4.63 kPa*m²/g, índice de rasgado 8.23 mN*m²/g) a 49 °SR, están muy por debajo, sobre todo la resistencia al largo de ruptura.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Pulpeo kraft (primera etapa)

El rendimiento y los rechazos no presentaron diferencia estadística, con respecto a ninguno de los factores manejados (zona del árbol (altura) de donde se extrajo la troza, carga de reactivos y tiempo de cocción).

La carga de reactivos, tiene un efecto estadístico, sobre el No. de Kappa, por lo que a 15.5% y 150 min, se obtuvo el menor No. de Kappa, con la parte baja del árbol.

La parte baja de árbol (zona), arrojó mejores resultados que la parte alta, (mayor rendimiento, menor No. de Kappa y menor cantidad de rechazos).

Pulpeo kraft (segunda etapa)

Ninguno de los factores (tiempo de cocción, carga de reactivos), presentó efecto estadístico sobre el rendimiento o sobre los rechazos.

La carga de reactivos presentó efecto estadístico sobre el No. de Kappa, a mayor carga de reactivos se obtiene menor No. de Kappa.

El rendimiento se maximizó con un tiempo de cocción de 120 min y una carga de reactivos de 14.0%.

El No. de Kappa se minimiza si se pulpea con una carga de reactivos de 15.5 % y durante 120 min de cocción.

Los rechazos se minimizan realizando la cocción con una carga de reactivos de 14.0% y por un tiempo de 150 min.

Pulpeo a la sosa

La carga de reactivos y el tiempo de cocción tienen un efecto estadístico significativo sobre el rendimiento, a menor carga y menor tiempo se obtiene un mayor rendimiento.

El No. de Kappa se afecta estadísticamente con el factor carga, a mayor carga menor No. de Kappa.

Los rechazos no presentan ninguna diferencia estadística, por efecto de los factores, la menor cantidad de rechazos se alcanza con 180 min de cocción y 24.0% de carga de reactivos.

Blanqueo

Pulpa kraft (secuencia clorada y secuencia TCF)

La pulpa blanqueada con la secuencia clorada presentó una buena reacción a los reactivos, respuesta que se ve reflejada en la rápida disminución del No. de Microkappa, alcanzándose un 86.36% ISO de blancura.

La pulpa al ser sometida a una secuencia de blanqueo totalmente libre de cloro no reaccionó tan favorablemente a los reactivos de blanqueo, alcanzándose sólo un 79.77% ISO de blancura.

La pulpa presentó una respuesta más rápida y favorable al blanquearse con una secuencia que incluye cloro, que cuando se blanquea con una secuencia libre de este elemento.

Pulpa a la sosa (secuencia clorada y secuencia TCF)

Esta pulpa reaccionó de forma muy favorable al consumo de reactivos, cuando se le aplicó la secuencia clorada, logrando disminuir considerablemente el No. de Microkappa y alcanzando una blancura de 84.45% ISO.

La pulpa no mostró una buena respuesta a los reactivos cuando se blanqueo con la secuencia totalmente libre de cloro, efecto que se ve reflejado en la poca disminución del No. de Microkappa, alcanzándose solo un 78.11% ISO de blancura.

Evaluación físico-mecánica

Pulpa kraft

Clasificación de fibras en pulpa sin blanquear y sin refinar

Esta pulpa presentó en su mayoría gran cantidad de fibra muy corta (malla 200) y finos.

Pruebas físico-mecánicas en pulpa sin blanquear y blanqueada con secuencia clorada y libre de cloro

El comportamiento que estas pulpas registraron en las pruebas físico-mecánicas con respecto a la refinación, fue normal.

Las hojas estándar formadas, presentaron bajos valores de resistencia, con respecto a los valores promedio reportados en la literatura para algunas especies de *Eucalyptus*, sobre todo los de las pruebas de tensón.

Pulpa a la sosa

Clasificación de fibras en pulpa sin blanquear y sin refinar

En esta pulpa se encontró la presencia de un alto porcentaje de finos, seguido por el de fibra muy corta (malla 200).

Pruebas físico-mecánicas en pulpa sin blanquear y blanqueada con secuencia clorada y libre de cloro

Al realizar las pruebas físico-mecánicas, en las hojas formadas con estas pulpas, se observó un comportamiento típico de sus propiedades con respecto a la refinación.

Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas practicadas, fueron bajos, con respecto a los valores promedio reportados en la literatura para algunas otras especies del género *Eucalyptus*, acentuándose en los valores obtenidos para las pruebas de tensión.

Recomendaciones

Efectuar pulpeos por los procesos Kraft y a la Sosa con madera de *Eucalyptus robusta* Sm, ampliando los niveles de carga y tiempo, para optimizar las condiciones de pulpeo.

Hacer una clasificación de fibras en cada una de las cocciones, con las diferentes condiciones de pulpeo, para conocer en cual de estas, se da una mayor o menor degradación de la fibra celulósica.

Llevar a cabo el blanqueo totalmente libre de cloro (TCF), aplicando un pre-tratamiento con ácido oxálico a la etapa Z y un post tratamiento con borohidruro sódico, después de esta etapa, para tratar de prevenir la degradación de la pulpa..

Realizar blanqueo de pulpa de *E. robusta* Sm, obtenida mediante los procesos Kraft y a la Sosa, con una secuencia de tipo ECF.

10. LITERATURA CITADA

Albarrán Alvarado D (2004). Biopulpeo Kraft de pino y encino con hongos de pudrición blanca. Tesis profesional. FITECMA-UMSNH. Morelia, Michoacán, México.

Carrera R, Lohmann L (s/f). WRM Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales. Campaña Plantaciones. El papel del sur. Plantaciones forestales en la estrategia papelera internacional. [Internet]. Montevideo-Uruguay. Disponible en: <<http://www.wrm.org.uy/plantaciones/material/papel1.html>> [Consulta: 29 de Abril de 2004]

Casey JP (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Volumen I. LIMUSA. México.

Casey JP (1991a). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Volumen II, LIMUSA. México.

Casey JP (1991b). Pulpa y Papel Química y Tecnología Química, Volumen III. LIMUSA. México.

Catálogo web de especies forestales (s/f). [Internet]. Disponible en: <<http://www.agr.una.py/cgi-cef/cef.cgi?rm=detalle&ID=196>>. [Consulta: 24 de Mayo de 2006].

Chávez Quintero H (1996). Evaluación del etanol en procesos de pulpeo utilizando eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill). Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. México.

CNICP (2001). Cámara Nacional de las Industrias de Celulosa y Papel. Memoria estadística. México.

Coello Ruiz I (2006). Composición Química de la Madera de tres Especies de Eucalipto. Tesis de Maestría. Morelia, Mich.

Colodette JL, Singh UP, Gosh AK, Singh RP (1993). Ozono bleaching research focuses on reducing high cost, poor selectivity. *Pulp and Paper*. 67 (6): 139-147.

Eiras KM, Colodette JL (2003). Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at high temperature. *Journal Pulp and Paper Science*. 29 (2): 64-69.

Escoto García T. (2003). Manual Maestro para la Evaluación de Pulpas (Curva de Refinación). Departamento de Madera, Celulosa y Papel "Ing. Karl Augustin Grellmann", Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, División de Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.

Escoto García T. (2004). Evaluación de la Calidad en Pulpa, Papel y Cartón. El Concepto de Calidad Total. Departamento de Madera, Celulosa y Papel "Ing. Karl Augustin Grellmann", Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, División de Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.

Eufores (s/f). El género *Eucalyptus*. [Internet]. Uruguay. Disponible en: <<http://www.eufores.com.uy/varios/eucalipto.php>> [Consulta: 24 de Abril de 2006]

FAO (1956). El Eucalipto en la Repoblación Forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. No. 11. FAO. Roma, Italia.

FAO (1981). El eucalipto en la repoblación forestal. Colección FAO: Montes. No. 11. Roma.

FAO (1990). El dilema del eucalipto. Roma.

Fernández Lavezzo E (1998). Investigaciones en pulpas kraft de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* y *Eucalyptus dunnii*. Maderas de bosques técnicos, tendientes a mejorar sus propiedades ópticas y mecánicas. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. México.

Fuhrman A, X-L Li, Rautonen R (1997) Effects of ECF bleaching sequences on the properties of softwood kraft pulp. *Journal of Pulp and Paper Science*. 23 (10): 487-492.

Gabriel Parra R, Rivera Prado JdeJ, Vargas Radillo JdeJ, Sanjuán Dueñas R, Castillo Maciel LG, Rutiaga Quiñones JG (2005). Blanqueo de Pulpa Celulósica de *Eucalyptus saligna* Smith, utilizando secuencias clorada y libre de cloro. VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, Chihuahua, Mèx. 560-563.

Guardado JM. (Ed) (2004). Información de 61 especies forestales. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección general de ordenamiento forestal cuencas y riegos. Área forestal. [Internet]. Nueva Sansalvador. Disponible en: <http://www.mag.gob.sv/admin/publicaciones/upload_file/1121116215_48.pdf>.

[Consulta: 24 de Abril de 2006].

IHDCA, (2004). Instituto Hórus de Desenvolvimento e Conservação Ambiental [Internet]. Disponible en: <http://www.institutohorus.org.br/download/fichas/Eucalyptus_robusta.htm>.

[Consulta: 14 de Julio de 2006].

INEGI (2004). El municipio en cifras. Aspectos geográficos. Morelia, México.

ITIS report (s/f). *Eucalyptus robusta* Sm. [Internet]. Disponible en: <http://www.itis.usda.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=502484&source=from_print>. [Consulta: 14 de Julio de 2006].

King JP, Skolmen RG. (1990). *Eucalyptus robusta* Sm. Robusta. Traducción de: King, James P.; Skolmen, Roger G. 1990. *Eucalyptus robusta* Sm. Robusta eucalyptus. En: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. Silvics of North America: 2. Hardwoods. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 313-317. [Internet]. Disponible en: <<http://www.fs.fed.us/global/iitf/Eucalyptusrobusta.pdf>> [Consulta: 27 de Abril de 2004]

Kishimoto T, Nakatsubo F (1998). Non-Chlorine bleaching of Kraft pulp. *Holzforschung*. 52 (2): 185-190

Liebergott N, van Lierop B, Skothos A (1992). A survey of the use of ozone in bleaching pulps. Part. 1. *Tappi Journal*. 75 (1): 145-152.

Macías Díaz JE (1993). Alternativas para el establecimiento de plantaciones comerciales forestales para la producción de material celulósico en el Estado de Michoacán. Tesis profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Mangieri HR, Dimitri MJ (1961). Los Eucaliptos en la silvicultura. ACME. Buenos Aires, Argentina.

Martínez Suárez JG (1988). Los Eucaliptos en la producción de Madera con fines industriales para Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. UMSNH. Morelia, México.

McIntosh DC (1967). The effect of refining on the structure of the fiber wall. *Tappi*. 50 (10): 482-488.

Montgomery DC (1991). Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. México.

Montoya Oliver JM (1995). El eucalipto. Ediciones Mundi-Prensa. España.

Orea Igarza U, Cordero Machado E. (s/f). [Internet]. Pinar del Río, Cuba. Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos15/eucalipto/eucalipto.shtm>> [Consulta: 29 de Abril de 2004].

Ortega Mora JR, Rivera Prado JdeJ, Vargas Radillo JdeJ, Sanjuán Dueñas R, Castillo Maciel LG, Rutiaga Quiñones JG (2005). Blanqueo de Pulpa kraft de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, utilizando las secuencias (CD)EpPD y OAZEopPP. VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, Chihuahua, Mèx. 555-559.

Ortega Mora JR, Vargas Radillo J de J, Vega Elvira R, Castillo Maciel LG, Sanjuán Dueñas R, Rutiaga Quiñones JG (2005). Proceso de Pulpeo kraft utilizando madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. XXVI Encuentro Nacional AMIDIQ. Acapulco, Gro. Memorias en CD. 1-5.

Page DH (1967). The collapse bahavoir of pulp fibers. Tappi. 50 (9): 449-455.

Patt R, Hammann M, Kordsachia O (1991). The role of ozone in chemical pulp bleaching. Holzforschung. 45(Suppl.): 87-92.

Pedraza Bucio FE (2006). Composición Química de la Corteza de 4 Especies de Eucalipto y Evaluación de las Propiedades de sus Extractos Tánicos. Tesis de Maestría. Morelia, Michoacán.

Rodríguez García V (1971). Estudio cinético de un proceso a la sosa con madera de eucalipto para obtención de celulosa. Tesis profesional. Universidad de Guadalajara. México.

Rodriguez Jiménez J (1970). Los controles en la fabricación del papel. Blume. Madrid.

Rodríguez Olalde NE (2006). Obtención de Pulpa por los Procesos Kraft y a la Sosa y su Blanqueo, a partir de Madera de *Eucalyptus ctriadora* Hook. Tesis de Maestría. Morelia Michoacán.

Roncero MB, Colom JF, Vidal T (s/f). Incremento de la eficacia del blanqueo con ozono de pastas de eucalipto. [Internet]. España. Disponible en: <<http://cicidicy.unam.edu.ar/trabajos/blanqueo/PAULIN~1.pdf>> [Consulta: 19 de mayo de 2005].

Rutiaga Quiñones JG, Gabriel Parra R, Castillo Maciel LG, Vargas Radillo JdeJ, Sanjuán Dueñas R (2005). Pulpeo kraft en Madera de *Eucalyptus saligna*. DEFORS 2005. Comisión No. 1. Trabajo No. 23. II Taller de Tecnología de la Madera y Productos Forestales. La Habana, Cuba. Memorias en CD. 1-6.

Sanjuán Dueñas R. (1993). Estándares de laboratorio para la industria de la celulosa. Instituto de Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

Sanjuán Dueñas R. (1994). Guía práctica para la especialidad en Celulosa y Papel I, Departamento de Ingeniería Química, Departamento de Madera, Celulosa y Papel "Ing. Karl Augustin Grellmann", Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, División Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

Sanjuán Duñas R. (1997). Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, celulosa y papel CUCEI. Agata Editores, S. A. de C. V., Guadalajara, Jalisco, México.

SEMARNAT (2000). Anuario estadístico de la producción forestal 2000 [Internet]. Disponible en: www.cofemermir.gob.mx/uploadtests/2578.66.59.3.plantaciones%20de%20eucalipto%202000.doc [Consulta: 24 de abril de 2006].

Swanson JW, Steber AJ (1959). Fiber surface area and bonded area. Tappi. 42 (12): 986-994.

TAPPI Test Methods (2000). TAPPI Press. Atlanta.

Taques Weckerlin ML (1999). TA.E.D. como activador de compuestos peroxigenados para la deslignificación de pulpa kraft de eucalipto. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. México.

Villalvazo Naranjo J (1973). Obtención de pulpa celulósica soluble, de alta pureza a partir de eucalipto. Tesis profesional. Universidad de Guadalajara. México.

11. ANEXOS

Anexo 1 Índices de calidad de pulpa para *Eucalyptus robusta* Sm.

INDICE DE CALIDAD	ZONA (ALTURA DEL ARBOL)		CLASIFICACIÓN
	ABAJO	ARRIBA	
COEFICIENTE DE RIGIDEZ	0.41	0.40	MEDIA
COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD	0.58	0.60	MEDIA
INDICE DE ESBELTEZ	86.08	87.53	
RELACION RUNKEL	0.71	0.66	BUENA