

**OBTENCION Y EVALUACION DE PULPAS SEMIQUIMICAS AL SULFITO
NEUTRO A PARTIR DE LA HOJA DE PALMA AFRICANA**

**EMILSE ROJAS MAYORGA
DIDIER GOMEZ BECERRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

**OBTENCION Y EVALUACION DE PULPAS SEMIQUIMICAS AL SULFITO
NEUTRO A PARTIR DE LA HOJA DE PALMA AFRICANA**

**EMILSE ROJAS MAYORGA
DIDIER GOMEZ BECERRA**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director
GUILLERMO GONZALEZ SIERRA
Químico M.Sc**

**Codirector
CLEMENTE RETAMOSO
Ingeniero Químico M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

Dios: gracias.

A mis padres, a quienes debo todo lo que soy; por su amor, sus esfuerzos y dedicación. A toda mi familia por su constante apoyo.

A quienes contribuyeron al desarrollo de este trabajo de investigación, amigos.

Emilse

Dedico este triunfo a mis padres Dora Estela y José del Carmen por el apoyo diario, por su comprensión y ayuda en los momentos mas difíciles, a mis hermanos Javier y Marcela por el respaldo y ayuda para alcanzar mis metas.

Y a todas aquellas personas sinceras que me apoyaron y que significaron mucho en mi vida estudiantil.

Didier

CONTENIDO

1.1 ANTECEDENTES EN LA INDUSTRIA PAPELERA	3
1.2 PALMA AFRICANA	4
1.2.1 Clasificación Botánica	5
1.2.2 Descripción de la planta	5
1.3 QUÍMICA DE LOS MATERIALES FIBROSOS	9
1.3.1 Celulosa	10
1.3.2 Hemicelulosa	13
1.3.3 Lignina	13
1.3.4 Extraíbles	15
1.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FIBROSO	15
1.5 INTRODUCCION A LOS PROCESOS DE PULPEO	17
1.5.1 Definiciones	20
1.5.2 Blanqueo	21
1.6 EQUIPOS EMPLEADOS EN LOS PROCESOS DE PULPEO	22
1.6.1 Refinador de discos	22
1.6.2 Pilas de batido	23
Factores que afectan el batido	24
1.7 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOMECAICAS DE LAS HOJAS HECHAS A MANO	25
1.7.1 Pruebas de resistencia	26
▪ <i>Resistencia a la tensión</i>	28

•Resistencia al rasgado	28
•Resistencia al dobléz	29
1.8 PROCESOS DE PULPEO	29
1.8.1 Pulpas semiquímicas	29
Principios del proceso de obtención de pulpas semiquímicas	30
1.8.2 Otros procesos de pulpeo (BRICEÑO, 1985)	33
Proceso químico	33
Proceso mecánico	34
Pulpa Kraft o pulpa al sulfato	34
Proceso a la soda	35
Proceso al sulfito	35
Concentración de reactivos	37
Efecto de la temperatura	38
Efecto del tiempo de digestión	39
Otros aspectos	39
PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA FIBROSA	41
2.2 ANÁLISIS QUÍMICO	43
2.3 ANÁLISIS BIOMÉTRICO DEL MATERIAL	43
2.4 PREPARACIÓN DEL LICOR DE COCCIÓN	45
2.5 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES, SULFITO RESIDUAL Y PH FINAL PRESENTE EN EL LICOR NEGRO	48
2.6 TRATAMIENTO MECÁNICO	48
<i>Desfibrado</i>	48
<i>Refino o Batido</i>	49
3. ANALISIS DE RESULTADOS	50
3.1 RESULTADOS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	54
Pulpas sulfito de sodio – carbonato de calcio	54
RESISTENCIA AL RASGADO	55
RESISTENCIA A LA EXPLOSION	56
RESISTENCIA A LA TENSION	57

RESISTENCIA AL DOBLEZ.....	58	
Pulpas sulfito de sodio - hidróxido de sodio		60
RESULTADOS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS.....	64	
RESISTENCIA AL RASGADO	65	
RESISTENCIA A LA EXPLOSION	66	
RESISTENCIA A LA TENSION		68
RESISTENCIA AL DOBLEZ.....	69	
BIBLIOGRAFÍA.....	78	

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Areas de cultivo de palma africana en Colombia	8
Tabla 2. Departamentos con cultivo de palma africana en el año de 1999	8
Tabla 3. Métodos para el análisis químico de materiales fibrosos	16
Tabla 4. Rendimiento de algunos procesos de obtención de pulpas	19
Tabla 5. Normas para la determinación de pruebas fisicomecánicas	27
Tabla 6. Preparación del licor y programación de las digestiones	47
Tabla 7. Comparación de los resultados del análisis químico de la palma africana y bagazo de caña	51
Tabla 8. Condiciones y resultados de los procesos de digestión realizados en la investigación	52
Tabla 9. Comparación de longitud de la fibra con diferentes materiales	54
Tabla 10. Propiedades fisicomecánicas de las pulpas semiquímicas sulfito – carbonato a partir de la hoja de palma africana	59
Tabla 11. Especificaciones generales de las digestiones realizadas.	63
Tabla 12. Especificaciones generales de los análisis de los licores de cocción	63
Tabla 13. Nomenclatura de las pulpas semiquímicas sulfito – soda	64
Tabla 14. Propiedades fisicomecánicas de las pulpas semiquímicas sulfito-soda	64

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cultivo de palma africana	4
Figura 2. Partes de la planta de palma africana	5
Figura 3. Estructura externa de la hojas de la palma africana	6
Figura 4. Mapa Departamentos con áreas significativas de palma de aceite	9
Figura 5. Constituyentes químicos de la madera	10
Figura 6. Unidad estructural de la celulosa α -D-glucosa	10
Figura 7. Formación química de la celulosa	12
Figura 8. Refinador de discos Sprout Waldron	22
Figura 9. Fotografías de la Pila Holandesa; equipo empleado en la etapa de batido.	24
Figura 10. Diagrama de bloques de la metodología de la investigación	46
Figura 11. Resistencia al rasgado vs. CSF	55
Figura 12. Resistencia a la Explosión vs. CSF	56
Figura 13. Resistencia a la Tensión vs. CSF	57
Figura 14. Resistencia al Doblez vs. CSF	58
Figura 15. Resistencia al rasgado vs. CSF	65
Figura 16. Resistencia a la explosión vs. CSF	67
Figura 17. Resistencia a la tensión vs. CSF	68
Figura 18. Resistencia al doblez vs. CSF	69

RESUMEN

TITULO: OBTENCIÓN Y EVALUACION DE PULPAS SEMIQUIMICAS AL SULFITO NEUTRO A PARTIR DE LA HOJA DE PALMA AFRICANA.*

**AUTORES : Emilse Rojas Mayorga
Didier Gómez Becerra****

PALABRAS CLAVES: Desechos agrícolas, Pulpas semiquímicas, cocción, digestiones.

DESCRIPCIÓN

La presente investigación sobre la obtención de pulpas semiquímicas al sulfito neutro y su evaluación a partir de la hoja de palpa africana fue realizada en el centro de investigaciones en celulosa pulpa y papel (CICELPA) de la Universidad industrial de Santander.

El objetivo propuesto está dirigido a la utilización de la hoja de palma en la obtención de pulpas semiquímicas al sulfito neutro, buscando el aprovechamiento de este residuo agrícola.

La materia prima se acondicionó al desarrollo del proceso semiquímico al sulfito neutro, la fibra fue sometida a un proceso de reducción de tamaño y una clasificación a través de mallas utilizando el material con menor contenido de parénquima. Se determinó la composición química y se hizo el análisis biométrico de la fibra obtenida.

El licor de tratamiento de las fibras consiste en una mezcla de sulfito de sodio y carbonato de calcio o hidróxido sodio. Se realizaron estudios comparativos entre el efecto de los dos licores con diferentes variables de proceso para cada una de las digestiones.

Para las digestiones sulfito carbonato se emplearon concentraciones de sulfito de 20 y 25 % en peso b. f .s., tiempos de digestión de 60, 120 y 180 minutos y temperatura de 160 °C. Para las digestiones sulfito soda se mantuvo constante la concentración de reactivos y se variaron las temperaturas de digestión entre 140 y 160 °C y tiempos de digestión de 60, 90 y 120 minutos.

Las pulpas con mejores propiedades para las digestiones sulfito carbonato fueron las obtenidas a mayor tiempo de cocción y para las digestiones sulfito soda las obtenidas a mayor temperatura y menor tiempo de cocción.

Los resultados obtenidos presentan ala hoja de palma como un material con excelentes características para reemplazar a otros materiales celulósicos en la elaboración de papeles y cartones.

* Proyecto de grado

** Facultad de ciencias. Química, Msc. Guillermo González Sierra

SUMMARY

TITLE: THE OBTENTION AND EVALUATION OF NEUTRAL SULFITE SEMICHEMICAL PULPS USING PALM OIL LEAVES.*

**AUTHOR : Emilse Rojas Mayorga
Didier Gómez Becerra ****

KEY WORDS: Agricultural waste products, semichemical pulps, cooking, digestions.

DESCRIPTION

The research about the obtention of neutral sulfite semichemical pulps and its evaluation was realized in the pulp and paper cellulose researches center at the Universidad Industrial de Santander.

The main purpose to study the of obtention of neutral sulfite semichemical pulps from palm oil leaves, thus, was to use this agricultural waste product.

The raw material were conditioned to develop the neutral sulfite semichemical process; the leaves were subjected to size reduction process and passed through a screen for pith separation. The material with the less quantity of pith was used. The fibers chemical and biometric analysis were made.

The cooking liquor was a mixture of sodian sulfite and calcium carbonate or sodium hidroxide. Comparative research were made between the pulps made with different cooking liquors. The effects of temperature and time of cooking were also studied.

For sulfite-carbonate digestions were used sulfite concentration between 20 and 25 %, digestion times were 60, 120 and 180 minutes and the temperature was 160 °C. For sulfite-soda digestion the reactivs concentrations were kept constant, the cooking temperatures were used between 140 and 160 °C and cooking times of 60, 90 and 120 minutes.

The pulp with the best properties from sulfite-carbonate cooking were obtained with the higher temperature and lower cooking time.

The obtained results indicated that the palm oil leaves is a material with excellent characteristics for replacing others cellulosic materials in the productions of paper and board.

* Project of grade

** Faculty of science. Chemical. Msc Guillermo González Sierra

INTRODUCCION

En los últimos años la producción mundial del aceite de palma ha ido en aumento. En la actualidad el 90% de la producción está dedicada solamente a uso alimenticio y el 10% a otras aplicaciones. El desarrollo de la industria de la palma de aceite hace necesario que se promuevan las labores de investigación y desarrollo de procesos industriales ya establecidos y nuevos, con el fin de optimizar los productos y subproductos del cultivo.

Para mantener la ventaja competitiva de la industria se han adoptado varias estrategias, una de las cuales es la estrategia cero desechos. Esto involucró la conversión de los residuos de la palma de aceite, los cuales en realidad son biomasa; en productos de valor agregado, tales como pulpa, papel y cartón de mediana densidad entre otras aplicaciones.

En Colombia, la materia prima mas empleada en la fabricación de papel es el bagazo de caña, subproducto de la industria azucarera presente en el Valle del Cauca; el cual hace posible que la empresa Propal produzca 220 000 toneladas de papel de escritura e impresión anualmente.

Actualmente en las plantaciones de palma africana colombianas se desarrollan procesos de descomposición de subproductos vegetales con incorporación continua de materia orgánica y nutrientes minerales en donde los subproductos sólidos como tusa o raquis, en un 100% van a los cultivos como abono orgánico.

Una de las desventajas de la implementación de estos subproductos como fuentes de nutrientes para el suelo por medio de descomposición es la generación de problemas de contaminación y el impedimento del libre drenaje de agua a las raíces de las plantas y el paso a través de estas.

El centro de investigaciones en celulosa, pulpa y papel (CICELPA), ha propuesto este tipo de investigación con base en ensayos preliminares realizados con el objeto de demostrar que la fibra obtenida del raquis de la hoja de palma africana posee una longitud promedio superior a la de materias primas celulósicas utilizadas tales como el bagazo de caña en la elaboración papel, por lo que se puede concluir que esta materia prima no maderable hace factible la elaboración de pulpas y papel con propiedades fisicomecánicas muy aceptables, comparadas con las obtenidas mediante el empleo de otras fuentes y en adición contribuiría a la gran demanda de fibras celulósicas que se presenta actualmente permitiendo la generación de industria o empresa.

Desde el punto de vista económico se amplían las posibilidades de aceptar el uso de la hoja de la palma de aceite como materia prima en procesos alternativos en la industria papelerá, de cartones corrugados y medios, papeles para embalaje entre otros mediante el mecanismo de obtención de pulpas semiquímicas al sulfito neutro, ya que muestra una evidente baja en los costos de producción al encontrar que la materia prima es un residuo vegetal abundante en nuestro país equivalente aproximadamente a 147 mil toneladas que corresponden a fibras largas de las 873.600 toneladas cortadas en época de poda en las plantaciones existentes en la región oriental.

1. MARCO TEORICO

1.1 ANTECEDENTES EN LA INDUSTRIA PAPELERA

Hasta finales del siglo XVIII la fabricación de papel no pasó de ser una labor artesanal, siguiendo la técnica de los chinos de formar hojas en bastidores. Con la revolución industrial hubo verdaderos avances en la fabricación de papel, pero aún no se podía satisfacer la demanda, por lo que seguían investigándose nuevas materias primas fibrosas.

Para el año de 1840, se intensifican los experimentos con madera y es cuando ésta se convierte en la materia prima por excelencia para la fabricación de papel. Entre las razones para usarla se tenían la relativa disponibilidad, bajo costo, conveniencia en el manejo y almacenamiento, obtención de pulpa de buena calidad y la versatilidad de las propiedades de la fibra de las diferentes especies existentes (SANJUAN, 1997).

En 1925 se desarrolla el proceso semiquímico (parte químico y parte mecánico) con base en el proceso al sulfito neutro; denominándose NSSC (siglas de **Neutral Sulfite Semichemical**).

Con el paso de los años y gracias a las investigaciones en materiales resistentes a la corrosión y a condiciones elevadas de operación (presión y temperatura) se perfeccionaron los equipos empleados en los procesos de obtención de pulpas y se instalaron plantas con mayor capacidad de producción.

En el presente siglo se han hecho numerosas modificaciones a los procesos al sulfito y kraft, lo que llevó al rápido crecimiento y adaptación del papel no solo para escritura e impresión, sino también para embalaje y una gran variedad de productos (SANJUAN, 1997).

El consumo mundial de papel y cartón creció de 168.8 millones de toneladas en 1980 a 238.9 millones de toneladas en 1990. Se espera que la demanda aumente de 239 a 306 millones de toneladas para el año 2005; pero es muy importante tener en cuenta algunos factores que en la actualidad cobran un importante valor en el análisis del aumento de la demanda: el incremento del uso de plantas no maderables y fibras recicladas, la eliminación del cloro en el proceso de blanqueo, la tendencia a la utilización de empaques de uso múltiple y el crecimiento del interés del consumidor por el medio ambiente.

La situación por la que atraviesa la industria de pulpa y papel a nivel mundial es difícil ya que nunca antes tuvo tantos problemas por enfrentar como la escasez de capital, de materias primas y el impacto que la industria tiene sobre el ambiente.

1.2 PALMA AFRICANA

La palma de aceite fue introducida al país en el año de 1932 por el doctor Florentino Claes, director del jardín botánico de Brúcelas (Bélgica). Las primeras palmas se plantaron en la estación experimental de Palmira en el Valle del Cauca. La siguiente fotografía ilustra una plantación de palma africana:

Figura 1. Cultivo de palma africana



1.2.1 Clasificación Botánica

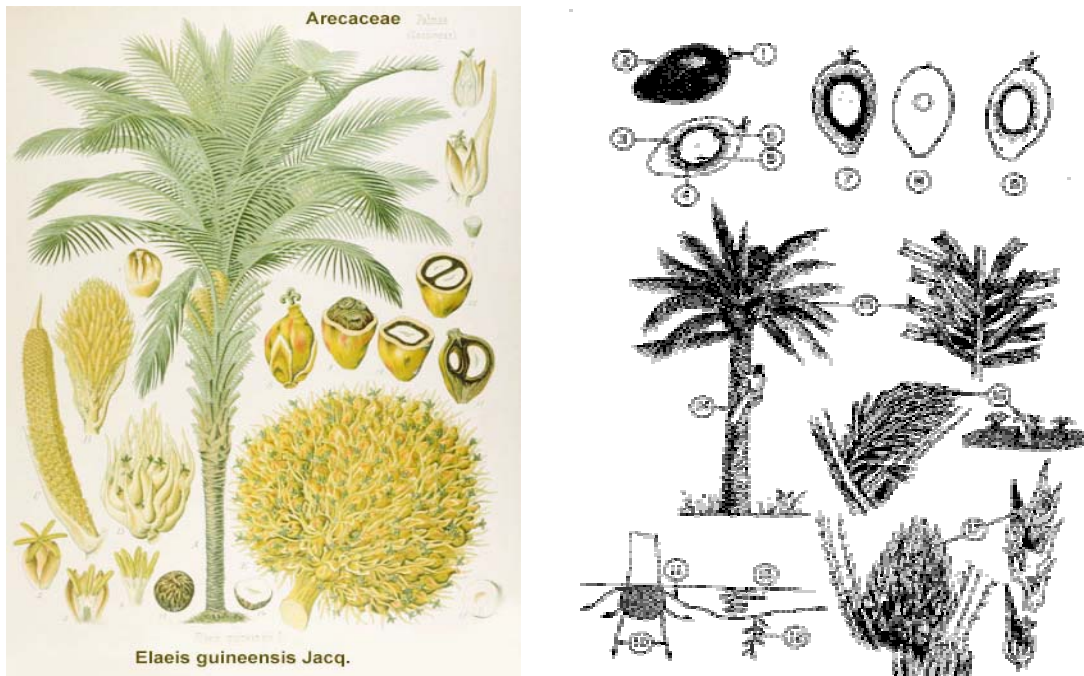
El científico Hutchinson ha clasificado la palma aceitera como sigue:

Tipo: Angiosperma Clase: Monocotiledóneas
Orden: Palmales Familia: Palmaceae
Tribu: Coccoinea Género: *Elaeis* (*guineensis* y *oleífera*)

1.2.2 Descripción de la planta

La clasificación de la palma de aceite en variedades se basa principalmente en la forma, color y composición del fruto y de las hojas. Las principales partes de la planta se presentan en la figura 2.

Figura 2. Partes de la planta de palma africana

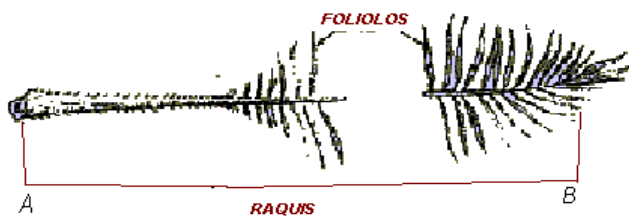


- (1) Estigma, (2) Exocarpo o epicarpo, (3) Mesocarpo, (4) Endocarpo o cuesco, (5) Endospermo o almendra, (6) Embrión, (7) Palma de aceite dura, (8) Palma de aceite pinífera, (9) Palma de aceite tenera, (10) Raíces de anclaje, (11) Raíces primarias, (12) Raíces secundarias, (13) Raíces terciarias, (14) Tronco o estípote, (15) Hojas.

Los principales componentes vegetativos de las palmas adultas son los frutos, el tronco, el follaje, las raíces e inflorescencias. La morfología de la palma de aceite es la característica de las monocotiledóneas, de las raíces primarias salen progresivamente sistemas de raíces más finas que forman los sistemas secundarios.

Bajo condiciones normales, el tronco sostiene entre cuarenta y cincuenta y seis hojas. Si éstas no son podadas o cortadas durante la cosecha y actividades de mantenimiento, el número sobrepasa las sesenta hojas (produce entre 20 a 30 hojas por año). Las hojas son de color verde y tienen un largo de 6 a 8m y están arregladas en espirales sobre el tronco; de manera similar a la presentada en la siguiente ilustración:

Figura 3. Estructura externa de la hojas de la palma africana



El número de palmas por hectárea debe calcularse con el objetivo claro de alcanzar el máximo rendimiento (máxima producción). Dado que la palma es una planta de geometría simétrica, la mayor distribución que se logra entre ellas es el triángulo equilátero. Estudios preliminares han demostrado que esta distribución garantiza la menor competencia entre las palmas para favorecer los siguientes factores: fertilidad del suelo, pluviosidad e insolación. Se recomienda entonces una densidad de 130 y 160 palmas por hectárea (FEDEPALMA, 1989).

El rendimiento del cultivo está relacionado directamente con la producción de las hojas que se cortan una o dos veces al año. Para una densidad de 143 palmas por

hectárea que es lo que comúnmente se maneja en los cultivos Colombianos, se producen 24 toneladas de racimos por año.

Para el caso antes mencionado el número de racimos es de 10 palma / año con una producción de 22 hojas por palma / año; además, para mantener el cultivo limpio y sano, trimestral o semestralmente se hace una poda sanitaria en donde se retiran hojas secas y enfermas.

En general solo se le dejan 33 hojas a cada palma. Una vez cortadas, las hojas son colocadas sobre la calle de los lotes (líneas entre las palmas) para que se decompongan y actúen como abono en adición a las grandes cantidades de biomasa producidas durante el proceso de extracción de aceite de palma las cuales permiten una mayor autosuficiencia nutricional al cultivo; ya que aportan cantidades significativas de nitrógeno, fósforo y potasio principales componentes de los fertilizantes (una tonelada de hojas producto de la poda periódica aporta al suelo un equivalente de 7.5kg de N, 1.06kg de P, 9.1kg de K, 2.79kg de Mg) (OCAMPO, 2002).

A continuación se presentan los datos publicados por FEDEPALMA (Federación nacional de cultivadores de palma africana) en el año 2002 con referencia a la cantidad de hectáreas sembradas en el país en los años 1999, 2000, 2001 y el porcentaje de participación (p) de estos cultivos con respecto las áreas sembradas en cada región.

Cantidad de hectáreas cultivadas de palma africana en el país

Debido a la importancia del cultivo de la palma africana en Colombia y gracias a la diversidad climática presente en todo el territorio nacional, las zonas aptas para el desarrollo de los cultivos de palma han sido clasificadas por su ubicación en zona central, norte, occidental y oriental; las cuales tienen un área de siembra, producción y en desarrollo como se presenta en la tabla 1. La tabla 2 presenta los departamentos en los cuales hay mayor cantidad de hectáreas sembradas con palma africana.

Tabla 1. Areas de cultivos de palma africana en Colombia

Año	Área	Central		Norte		Occidental		Oriental		Hectáreas
		Ha	P (%)	Ha	P (%)	Ha	P (%)	Ha	P (%)	
2000	Sembrada	39126	24.9	42817	27.2	21602	13.7	53783	34.2	157327
	En producción	30498	22.6	35700	26.5	18249	13.5	50325	37.3	134772
	En desarrollo	8628	38.3	7117	31.6	3353	14.9	3458	15.3	22555
2001	Sembrada	43773	26.0	46843	27.8	22794	13.5	55030	32.7	168440
	En producción	32172	23.2	37117	26.8	18381	13.3	50787	36.7	138457
	En desarrollo	11601	38.7	9726	32.4	4413	14.7	4243	14.2	29983

Tabla 2. Departamentos con cultivos de palma africana en el año de 1999

DEPARTAMENTO	Ha	(%)
Atlántico	279	0.2
Caquetá	435	0.3
Casanare	8 800	5.9
Cauca	95	0.1
Cesar	27 319	18.2
Cundinamarca	1 826	1.2
La Guajira	73	0.09
Magdalena	24 754	16.5
Meta	41 237	27.5
Nariño	20 996	14.0
Norte Santander	289	0.2
Santander	23 818	15.9
Valle del Cauca	132	0.1
Total Nacional	150 053	100

Cultivos de palma africana en Colombia

Figura 4. Mapa Departamentos con áreas significativas de palma de aceite

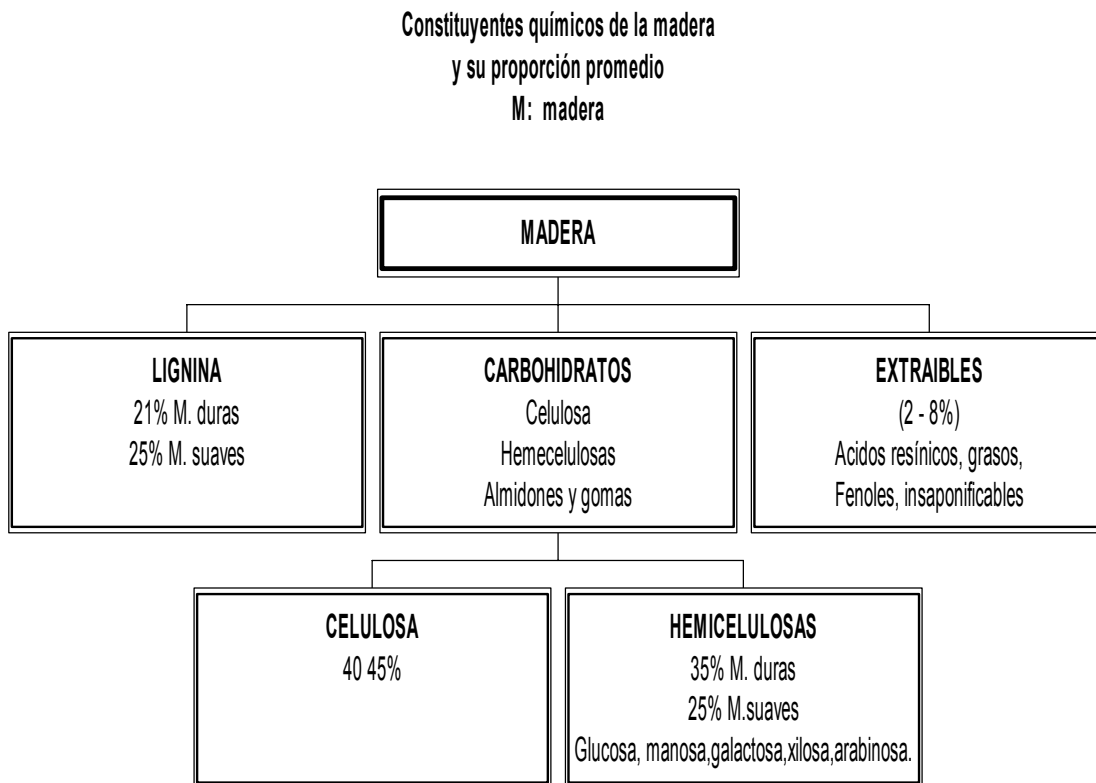


1.3 QUÍMICA DE LOS MATERIALES FIBROSOS

Desde el punto de vista teórico casi cualquier material fibroso puede utilizarse en la producción de pulpa para papel; pero solo pueden aprovecharse unos cuantos. El hecho de que un material vegetal pueda convertirse en pulpa y papel no indica que la planta de donde proviene pueda crecer, colectarse, almacenarse y procesarse de manera económica para hacer viable la operación (SANJUAN, 1997).

La madera es el material lignocelulósico más utilizado en la obtención de pulpas (fibras) para los procesos de fabricación de papel. Está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos en menor proporción como se ilustra en la figura N°5:

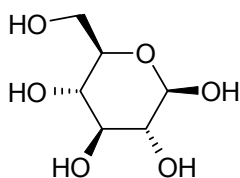
Figura 5. Constituyentes químicos de la madera



1.3.1 Celulosa

La celulosa es la materia prima mas importante en la elaboración de papel. Se encuentra presente en muchas plantas dentro de sus fibras; asociada con cantidades determinadas de lignina, hemicelulosa y otras constituyentes menores. La madera es la principal fuente de este carbohidrato; en donde la α -D-glucosa es considerada como su unidad estructural.

Figura 6. Unidad estructural de la celulosa α -D-glucosa



La insolubilidad tanto en agua fría como en caliente, en solventes orgánicos neutros, la resistencia a la oxidación, su alta afinidad con el agua, la solubilidad en ácido sulfúrico al 75%, la alta resistencia a la tensión y su coloración blanca algo translúcida son sus principales características.

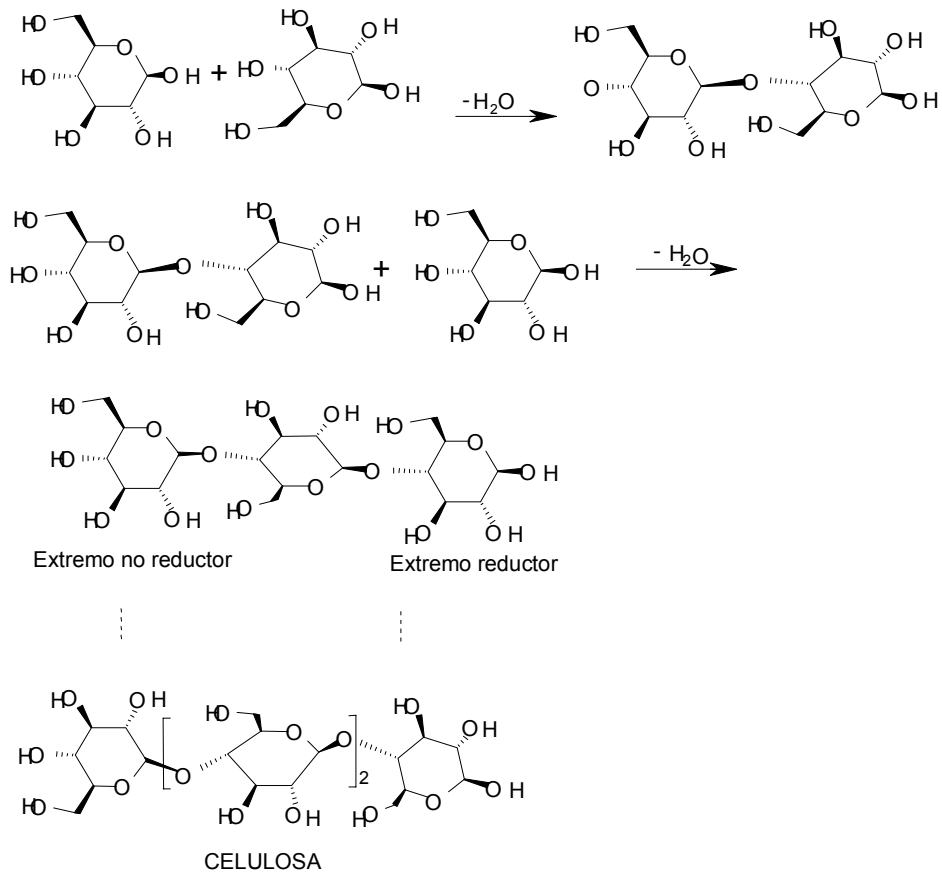
Químicamente está catalogada como un polisacárido integrado por unidades monoméricas de glucosa; las cuales se ajustan perfectamente y forman segmentos largos que dan origen a fuerzas asociativas del tipo puente de hidrógeno responsables de la resistencia de los materiales celulósicos; cuya fórmula química condensada es $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde n es el grado de polimerización y la unidad fundamental es la celobiosa la cual contiene tres grupos hidroxilo alcohólicos.

La figura 7 ilustra el mecanismo de formación química de la celulosa; a partir de sus unidades estructurales.

En la formación de la molécula de celulosa, acontecen reacciones sucesivas entre el grupo hidroxilo del carbono 1 de α -D- glucosa y el grupo hidroxilo del carbono 4 de otra α -D-glucosa, dando origen al polímero formado exclusivamente por unidades de α -desoxiglucosa.

Existen diversos tipos de celulosa. La α -celulosa es la fracción de la pulpa celulósica insoluble en 17.5% de NaOH a 20°C bajo determinadas condiciones como contenido real de celulosa en términos de solubilidad en álcali; la β -celulosa, fracción soluble en 17.5% de NaOH la cual precipita cuando ésta es acidulada como producto del rompimiento de la α -celulosa durante el pulpeo indicando el grado de degradación de la celulosa y la γ - celulosa, fracción soluble en álcali que no precipita en la neutralización denominada hemicelulosa natural.

Figura 7. Formación química de la celulosa



La α -celulosa se determina por método gravimétrico; la β y γ -celulosa pueden ser determinadas por el mismo mecanismo pero su manejo es mas difícil pues su naturaleza es gelatinosa (CASEY, 1966).

Debido a su alta afinidad con el agua, existe una profunda influencia de ésta en las propiedades físicas de las fibras de celulosa. El hinchamiento se define como la característica de un sólido a embeber líquidos, resultando en un aumento de sus dimensiones sin pérdida de su homogeneidad aparente con una disminución de su cohesión interna. La reactividad de una fibra de celulosa mejora a medida que aumenta el grado de hinchamiento en el medio de reacción; incrementando la velocidad de difusión del reactivo dentro de la fibra, lo cual se verá representado en

un notable mejoramiento de las propiedades de elasticidad, plasticidad, tensión; pero en una disminución en su rigidez (LIBBY, 1976).

El hinchamiento depende del tipo de solvente empleado en la disolución y de la naturaleza de la muestra de celulosa, presentándose en forma intercrystalina (en regiones desordenadas o amorfas) e intracrystalina (en regiones ordenadas o cristalinas) dando características de flexibilidad y resistencia a las fibras respectivamente (SANJUAN, 1997).

1.3.2 Hemicelulosa

Los carbohidratos no celulósicos están constituidos fundamentalmente por azúcares del tipo pentosa y hexosa (monosacáridos). Los diferentes azúcares polimerizan entre sí y forman polisacáridos heterogéneos como la glucomana; lo mismo ocurre con las pentosas. Los polímeros formados por las pentosas se denominan pentosanos y los de hexosa hexosanos. A éstos polímeros en conjunto se les conoce como hemicelulosas.

Las hemicelulosas generalmente son insolubles en agua pero solubles en álcali. No son fibras y están ramificadas. Sus cadenas poliméricas son cortas y están formadas por monómeros de carbohidratos, acetilo, metóxilo y ácidos urónicos (Química de carbohidratos, 1978).

1.3.3 Lignina

La lignina es un polímero termoplástico aromático heterogéneo, el cual está constituido principalmente por unidades de fenilpropano enlazadas en tres dimensiones. En estado natural es de color claro; pero se oscurece debido a la condensación que sufre en pulpas alcalinas.

Las ligninas se clasifican por el contenido proporcional que tenga cada uno de los monómeros que la forman. A partir de este criterio es posible distinguir tres tipos de ligninas: ***lignina de coníferas*** (tipo guayacil - G: 80% de unidades guayacilpropano, 14% de p-hidroxifenilo y 6% de siringilo presente en maderas blandas), ***lignina de latifoliadas*** (tipo guayacil-siringil – S: porcentaje mayor al 50% de unidades guayacil, siringilo mayor del 40% y aproximadamente 4% en unidades de p-hidroxifenilo presentes en maderas duras) y la ***lignina tipo gramíneas*** (H), caracterizada por contener una gran cantidad de unidades del tipo p-hidroxifenilo (alrededor del 30%) con contenidos de grupos guayacilo del 50% y de grupos siringilo del 20% aproximadamente (CESPEDES, 1999).

Las reacciones químicas que se presentan en los procesos de pulpeo consisten en la disolución de materiales incrustantes en las fibras como la lignina para obtener un producto sólido: la pulpa química (como es sabido, formada por celulosa y hemicelulosa). Por tanto el objetivo primordial de estos procesos es transformar la lignina (materia insoluble en fase acuosa) en una sustancia soluble en el licor de cocción, mediante la reacción química que presenta al contacto con reactivos inorgánicos como soluciones de álcali, sulfito o hidrosulfitos de diferentes metales de calcio, sodio o de magnesio y a veces de amonio o soluciones de hidróxido de sodio e hidrosulfuro de sodio.

Una de las principales funciones que cumple la Lignina en la conformación de maderas es la de brindar estabilidad dimensional; lo cual se refleja en la mejora de los procesos de manufactura de pulpa y papel. La lignina disuelta se emplea para la recuperación de su valor térmico mediante procesos de combustión.

Actualmente se realizan investigaciones en todo el mundo para tratar de obtener productos de valor comercial a partir de la lignina, mediante su degradación a compuestos de bajo peso molecular con el objeto de darles usos en la producción de resinas fenol-formaldehído, obtención de combustibles líquidos por hidrogenación, como fuente de reactivos químicos tales como fenol – benceno, metanol, ácido acético, vainillina entre otros, dispersante para colorantes y pigmentos y como sustitutos para adhesivos y aglutinantes.

1.3.4 Extraíbles

Son compuestos solubles en agua o en solventes orgánicos (principalmente etanol, acetona, éter y diclorometano) que representan una pequeña fracción en la composición de materiales fibrosos; principalmente en el tejido parenquimatoso y en los canales resiníferos. Se les atribuye algunas propiedades de la madera como el color, olor y flamabilidad (SANJUAN, 1997). Este tipo de compuestos puede clasificarse en 3 grupos:

Terpenos y terpenoides: compuestos volátiles o de aceites esenciales responsables del olor característico de la planta junto con las secreciones de la madera llamada oleorresina.

Compuestos alifáticos (grasas y ceras): cantidades pequeñas de alcanos y alcoholes (araquinol, behenol y lignocerol), ésteres de glicerol normalmente presentes como triglicéridos, ácidos grasos saturados e insaturados los cuales se oxidan rápidamente.

Compuestos fenólicos: taninos hidrolizables, estilbenos, flavonoides entre otros. Estas sustancias tienen propiedades fungicidas, por lo que protegen a la planta contra el ataque de microorganismos.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FIBROSO

Para evaluar una materia prima como fuente de pulpa celulósica, los principales análisis químicos que determinan su potencialidad de utilización están encaminados en cuantificar el contenido de lignina, la cantidad de solubles en agua fría (o caliente), los extraíbles en alcohol benceno, en soda al 1% y algunas propiedades como el contenido de humedad y de cenizas; mediante la aplicación de métodos descritos en la **Technical Association of the Pulp and Paper Industry**, conocidos con la sigla TAPPI; descritos en la tabla N°3.

Tabla 3. Métodos para el análisis químico de materiales fibrosos

Ensayo	Método
Contenido de lignina	Klason
Contenido de celulosa	K. Seifert
Solubles en agua fría	TAPPI Tm-59
Extraíbles en alcohol – benceno	TAPPI T6m-59
Extraíbles en soda al 1%	TAPPI T4m-59
Contenido de cenizas	TAPPI T15m-59

El empleo de cada uno de los ensayos mencionados en la tabla anterior se pueden resumir como sigue:

Contenido de lignina: permite conocer el grado de flexibilidad o dureza que posee una materia prima y la cantidad del principal componente no celulósico. Su determinación constituye una posible orientación para el desarrollo de un sistema de pulpeo. El método Klason se basa en la eliminación de todos los componentes celulósicos y hemicelulósicos con ácido sulfúrico al 72% .

Contenido de celulosa: Es la determinación mas importante que se le hace a una materia prima fibrosa, indica la cantidad de material aprovechable en la fabricación de pulpa para la elaboración de papel y otros. Esta determinación se lleva a cabo por el método K. Seifert cuyo procedimiento se basa en la eliminación de hemicelulosas y lignina de la muestra mediante hidrólisis con ácido clorhídrico concentrado.

Solubles en agua fría: indica la cantidad de sales orgánicas, taninos, gomas, carbohidratos, pectinas y pigmentos que afectan el rendimiento y consumo de reactivos.

Extraíbles en alcohol – benceno: determina el contenido de ceras, grasas, aceites, resinas, colorantes orgánicos; cuando la cantidad de solubles en este medio

es muy alta se presentan en la pulpa espumas, precipitaciones o manchas indeseables.

Extraíbles en soda al 1%: son un indicativo del ataque por microorganismos ocasionado al material fibroso, la presencia de productos de degradación de la celulosa, lignina solubilizada y resinas.

Contenido de humedad: las fibras tienen un contenido de humedad que es necesario conocer para así poder expresar los resultados en porcentaje base material seco. El peso seco se define como aquel que se obtiene al calentar una porción del material a 105 °C en una estufa hasta peso constante. Los resultados se expresan como porcentaje de humedad producto de tres determinaciones.

Cenizas: representa el porcentaje de sales minerales presentes en la materia prima, indicando la posible corrosión que se puede esperar en los equipos que tendrán contacto con la misma. Esta determinación se define como el residuo remanente después de la ignición del material a 575 +/- 25°C durante tres horas.

1.5 INTRODUCCION A LOS PROCESOS DE PULPEO

La madera está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosas, lignina, material mineral y extraíbles. El material fibroso del cual se obtienen las pulpas está constituido por parénquima, tejido fundamental en el cual se llevan a cabo funciones vitales para las plantas tales como la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento de nutrientes, secreción y excreción de sustancias entre otras funciones (ESAU, 1972).

La médula o parénquima está presente en grandes cantidades en plantas como la caña de azúcar, la palma africana y en cantidades muy pequeñas en la mayoría de las maderas; es la causante del aumento en el consumo de reactivos durante los procesos de pulpeo y a su vez genera inconvenientes en la etapa de batido durante

los procesos mecánicos. Por tales razones es necesaria la realización de una etapa de adecuación de la materia prima. Se han desarrollado diversos métodos de desmedulado entre los cuales se destacan:

Desmedulado en seco: aproximadamente con 80% de humedad.

Desmedulado en húmedo: aproximadamente con 50% de humedad.

Desmedulado en suspensión acuosa: aproximadamente 85% de humedad.

Desmedulado bacteriológico.

Cuando la materia prima a procesar lleva de 2 a 3 días de cortada (para el caso de la palma africana), es aconsejable adecuar dicho material mediante el método de desmedulado en seco; el cual consiste en pasar el material seco por un molino de martillo o de discos donde la acción mecánica favorece la separación de la medula de la fibra. El producto de la molienda se lleva a un tambor separador o tamiz donde la fibra separada es clasificada para su posterior uso en el proceso de digestión.

En Colombia existen dos grandes clases de papel: papel para uso industrial y papeles finos. El primer tipo corresponde al papel empleado en la elaboración de envolturas, bolsas, cajas y como material de relleno. El segundo tipo tiene como uso la escritura, impresión, elaboración de etiquetas entre otros, para los cuales se utilizan fibras celulósicas provenientes de madera, residuos vegetales, papeles y cartones de desechos nacionales e importados.

Las fibras provenientes de la madera poseen alrededor de un 50% de celulosa, 30% de lignina y 20% de carbohidratos y resinas. Es por ello que son la principal materia prima en los procesos de pulpage y elaboración de papel; para lo cual se requieren dos etapas de transformación de dicho material: obtención de diversas clases de pulpa (kraft, sulfito, mecánica, semiquímica, mecánica, quimimecánica, sulfato, soda, blanqueada); seguida por el cambio de la misma a papel. La medición de dicho cambio se expresa en porcentaje de rendimiento; el cual varía dependiendo del método de pulpage como se muestra en la tabla 4:

Tabla 4. Rendimiento de algunos procesos de obtención de pulpas

Proceso	Rendimiento %
Mecánico (Pasta mecánica)	90 – 95
Químico-mecánico (pasta mecánica)	85 – 90
Quimimecánico: A la sosa en frío, al sulfito de sodio, al bisulfito	85 – 95
Semiquímico: Al sulfito neutro, al bisulfito, kraft, a la sosa	65 – 85
De fibras corrientes: Con vapor, con tratamiento químico moderado	70 – 90
Químico, de alto rendimiento: Kraft, al sulfito	50 – 65
Químico: Al sulfato, a la sosa, al sulfito, al bisulfito	40 – 50
Al sulfato, con prehidrólisis	35 – 40

El objetivo del proceso de obtención de pulpas es separar las fibras de celulosa de la madera en condiciones tales que en la fibra se produzcan propiedades comercialmente deseables solubilizando la capa de lignina que rodea a las fibras.

La lignina existe en grandes cantidades en la capa intermedia del tejido situado entre fibras o células adyacentes. También está distribuida en la matriz de las fibras celulósicas que comprende la pared celular secundaria.

La penetración de las soluciones ácidas en la madera se lleva a cabo principalmente en la dirección longitudinal; paralelamente al eje del árbol. Después de que los reactivos de deslignificación llegan a las áreas de lignina, tienen lugar las reacciones ligadas al proceso de deslignificación en donde los productos son derivados de lignina y hemicelulosas que en tales condiciones son solubles en la solución del medio.

Una vez que el proceso de obtención de pulpa se ha completado, las astillas suavizadas pueden requerir acción mecánica para liberar las células individuales de las fibras. Los licores gastados que contienen en forma ya soluble los derivados de lignina y de hemicelulosas se eliminan por drenado y entonces las fibras se lavan

con agua. Después de estar libres de reactivos (licor final de cocción) la pulpa obtenida es sometida al proceso de elaboración de papel. Existe un proceso posterior de deslignificación total denominado blanqueo, el cual permite mejorar la coloración y la pureza química de la pulpa. Esta etapa puede ser un tratamiento posterior al lavado final de la pulpa (RYDHOLM, 1965).

1.5.1 Definiciones

Pasta o mezcla de materiales. La pasta es la mezcla en determinadas proporciones, de materiales fibrosos y de otro tipo que se están acondicionando o preparando para la formadora de papel.

Suspensión fibrosa. Material que ha sido diluido a la consistencia apropiada y que está en proceso de preparación para la fabricación de papel.

Consistencia. Por consistencia se entiende el porcentaje, en peso, de fibra de cualquier combinación de fibra y agua. Puede expresarse en términos de porcentaje sobre fibra seca a la estufa o seca al aire. Fibra seca al aire, significa la condición en la que una muestra de 100 kg de fibra de una pulpa dada, contiene 90 kg de fibra seca a la estufa y 10 kg de agua.

Pulpa. La pulpa o fibra o material intermedio, como algunas veces se le llama en la industria del papel, es el material fibroso preparado y listo para el proceso de preparación de la pasta; puede ser sin blanquear o blanqueado, en forma de hojas o rollos secos, de paquetes húmedos, a granel o cualquiera otra forma apropiada para fines comerciales.

Batido. El batido es el mas antiguo de los procesos de preparación de la pasta y consiste en mezclar al mismo tiempo, en suspensión acuosa, los diferentes materiales y en impartirles, mediante una acción mecánica las propiedades que determinan las características del producto final.

Refinación. Es un proceso mecánico al cual se sujetan las fibras, algunas veces después del batido o a veces independientemente de él. En la refinación, las fibras se “peinan” y con frecuencia se reducen de longitud por corte, con objeto de adaptarlas mejor para la formación sobre la formadora de papel o cartón.

Freeness. Este término se relaciona con la facilidad con la que el agua drena de la fibra a través de una tela metálica o de una placa perforada.

1.5.2 Blanqueo

La celulosa es de color blanco por naturaleza, pero las pulpas que se obtienen de procesos químicos son oscuras. El color de la pulpa se debe principalmente a la lignina residual del proceso de deslignificación en la fibra, y no es posible eliminarla hasta que el grado de blancura sea satisfactoria en esta etapa. Si toda la lignina se eliminara en el pulpeo, tanto el rendimiento como la resistencia de la pulpa se reducirían de manera notable por la dificultad de controlar la reacción de deslignificación en los digestores.

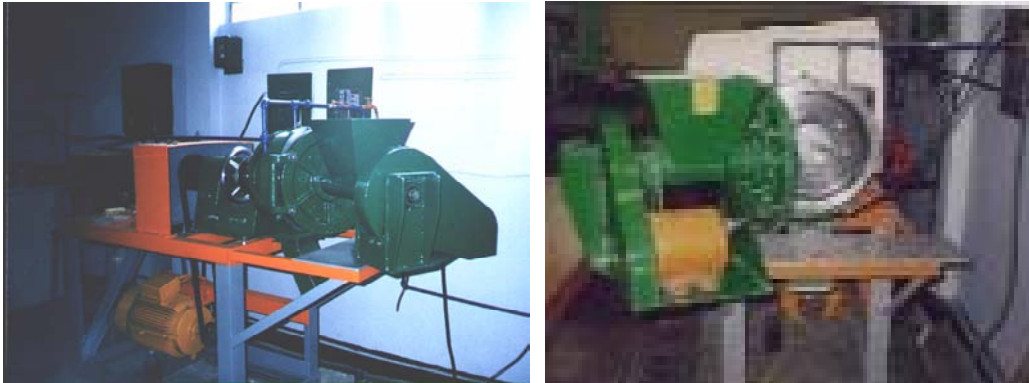
El objetivo primordial del proceso de blanqueo es la eliminación de la lignina residual de las pulpas oscuras, así como de otros compuestos indeseables, por lo que es necesario continuar el proceso de deslignificación llevado a cabo en la etapa de pulpeo. Hasta hace algunos años la etapa de blanqueo se realizaba haciendo reaccionar la lignina con cloro, dióxido de cloro e hipoclorito, entre otros compuestos. Actualmente se tiende a no usar compuestos clorados y si promover el uso de oxígeno en medio alcalino, ozono y peróxido en medio alcalino.

1.6 EQUIPOS EMPLEADOS EN LOS PROCESOS DE PULPEO

1.6.1 Refinador de discos

Consiste de un disco rotatorio montado sobre una flecha que está apropiadamente soportada en chumaceras que descansan en un cuerpo que está colocado sobre una pesada base de hierro fundido, y de un disco estacionario en forma conveniente montado en la estructura de la máquina, que está del lado opuesto al disco rotatorio. La figura 8 muestra una fotografía del refinador de discos Sprout Waldron.

Figura 8. Refinador de discos Sprout Waldron



Bajo la presión de la bomba, la pasta entra por la abertura que hay al lado de los discos (en la tolva receptora), hacia la cámara de descarga, en donde sale de la máquina.

El ajuste del claro del disco se logra mediante un cilindro hidráulico que, por medio de una culata fundida integralmente con el cuerpo de la chumacera, hace que la flecha con el disco rotatorio se acerque o aleje del disco estacionario.

Los discos son paralelos en todos los puntos de sus caras. Los espacios entre las barras son mas profundos en el centro que en la periferia para proporcionar un grado creciente de acción refinadora a medida que disminuye esta profundidad.

1.6.2 Pilas de batido

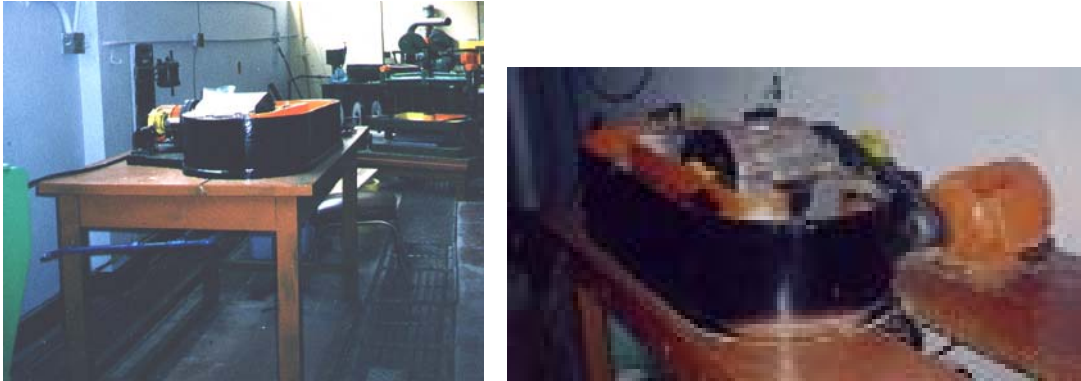
Desde el punto de vista de la fabricación del papel, las propiedades importantes son: la morfología de la fibra, la cantidad y distribución de los constituyentes químicos de las fibras de la pulpa y la forma – tamaño – distribución y características físicas de las fibras de la pulpa. Las dos primeras propiedades depende de la materia prima utilizada para obtener la pulpa, así como del tipo del proceso de digestión. La tercera propiedad, está determinada posteriormente por medio del proceso de preparación o tratamiento de la fibra.

El batido es probablemente el proceso fundamental más importante en la fabricación de papel; puesto que el papel hecho a partir de pasta batida es resistente, denso y de textura rígida.

Los principales efectos del batido son físicos y entre los más importantes están los siguientes: fractura y separación parcial de la pared primaria de la fibra, disminución en la longitud de la fibra, aumento en flexibilidad, formación de fibrillas (fibrilación), y un aumento en la superficie específica externa de la fibra. El tiempo óptimo de batido difiere del tipo de fibra y de la clase de papel en que se va a usar.

La pila holandesa es el equipo empleado en el proceso de batido de pulpas. Fue inventado a mediados del siglo XVIII en Holanda y resultó ser uno de los avances más significativos en éste tipo de procesos. Consiste en una cuba que puede ser construida de diversos tipos de materiales (hierro fundido, concreto, acero manufacturado o cerámica forzada. La cuba es de forma alargada, con extremos redondeados para facilitar la circulación de la pasta, y está provista de un elemento longitudinal, conocido con el nombre de muro central, el cual divide la cuba en dos canales. Dispuesto a través de la cuba se encuentra el rodillo de la pila, formado por unos cabezales de acero fundido, acuñados a un vástago de acero forjado que está soportado por chumaceras en sus extremos (LIBBY, 1976). A continuación se muestra una pila Holandesa en la figura 9.

Figura 9. Fotografías de la Pila Holandesa; equipo empleado en la etapa de batido.



Factores que afectan el batido

Existen muchos factores que afectan la velocidad y el tipo de batido. La pulpa batida lentamente en una pila holandesa por lo general tiene mayor resistencia que la batida rápidamente. Otros factores de importancia son la condición de la barras del rodillo y de la platina, la consistencia de la pasta y la presión ejercida por el rodillo.

El secado de la pulpa produce un cambio en las propiedades de batido porque, una vez que ésta ha sido secada el aflojamiento de las fibras se vuelve mas difícil debido a que se seca parte del material hemicelulósico residual u ocurre una contracción de la estructura celulósica (LIBBY, 1976).

La temperatura es una variable importante en el batido de la pulpa. La celulosa está probablemente mas próxima a lo soluble en agua fría que en caliente; por lo tanto una temperatura baja favorece mas el batido y la unión entre las fibras. Si las fibras celulósicas se calientan a altas temperaturas, al parecer se deshidratan en mayor o menor grado, lo cual hace que se encojan y se vuelvan quebradizas.

El alcance de las etapas de batido y refinación se estima por medio de métodos como el **Canadian Standard Freeness** (CSF), que es el más utilizado en todo el mundo, y el **Schopper-Riegler** (°SR), que se utiliza en algunas partes de Europa.

El probador CFS está conformado por un recipiente con capacidad de un litro, en el que tiene lugar el drenado. La hoja se forma en una placa perforada situada en la parte baja del recipiente. El agua que se drena de la hoja mientras ésta se forma se acumula en un receptor en forma de embudo. Este receptor tiene un orificio estándar en el fondo y un rebosador al lado, que crea una presión constante en el orificio. Parte del agua que se drena de la hoja mientras se forma (agua con carrera lenta), pasa por el orificio con una velocidad fija de flujo. El agua que se drena a una velocidad más elevada fluye por la salida lateral y se acumula en una probeta de un litro. El volumen de esta agua de carrera rápida, medida en mililitros se denomina **Canadian Standard Freeness** o grados CSF.

En condiciones estándar, para efectuar la medición se utiliza un litro de pulpa cuya consistencia es del 0.3% y temperatura de 20°C, para formar una hoja de 3 gramos de fibra seca a la estufa. Si la prueba se realiza a otras condiciones deberá medirse la temperatura y el peso de la hoja secada a la estufa, lo que se encontrará si se quita la hoja de drenado, secándola y pesándola. La técnica TAPPI 227 contiene tablas para corregir las mediciones realizadas en condiciones que difieren del estándar (condiciones de la realización de ésta investigación).

A medida que avanzan el batido o el refinado, el volumen del agua rápida disminuye y baja la libertad de drenado. Un valor de 200 o 300 más o menos es un valor típico para el caso de una pulpa de madera refinada (SANJUAN, 1997).

1.7 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOMECAICAS DE LAS HOJAS HECHAS A MANO

Después de obtener una determinada clase de pulpa por medio de procesos químicos, mecánicos o por los ya mencionados, éstas pulpas se someten a refino o

batido. Cuando se ha alcanzado el grado de refino deseado se procede a la etapa de elaboración de hojas hechas a mano (en el equipo formador de hojas) como se describe en la técnica TAPPI 205.

Para realizar las pruebas físicas que permitan establecer las propiedades características de las hojas es necesario que se encuentren secas y con un contenido de humedad determinado.

Las pruebas que mas comúnmente se realizan son peso base, calibre, resistencia a la explosión, resistencia al rasgado y resistencia al dobléz. Las pruebas en las hojas hechas a mano están sujetas a todas las variaciones, debidas a la formación, prensado, secado y a la acción del batido; dichas hojas son muy sensibles a los cambios de humedad relativa, sólo deben probarse después de haber sido acondicionadas. Cuando las hojas se están haciendo se debe tener una buena formación. Para esto se necesita tener una tela formadora limpia y agitar adecuadamente la suspensión diluida de pulpa. Una formación pobre dará amplias variaciones en las mediciones individuales de resistencia y un valor promedio demasiado bajo. Al prensar las hojas hechas a mano, la presión nunca debe ser mayor a la especificada. Una presión excesiva durante un tiempo muy corto, aumentará los valores de la prueba de resistencia a la explosión, resistencia al dobléz y resistencia a la tensión. La cantidad de pulpa y agua en la pila deben ser lo más correcta posible; ya que un error en la consistencia cambiará la velocidad de circulación con un apreciable efecto en la cantidad de batido en un tiempo dado, también afectará el peso de la hoja manual producida. (LIBBY, 1976).

1.7.1 Pruebas de resistencia

Las pruebas mas comunes de resistencia que se efectúan en el papel se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Normas para la determinación de pruebas fisicomecánicas

PROPIEDAD FISICOMECHANICA	NORMA
Peso base	T410 os -68
Espesor o Calibre	T411 os76
Resistencia al estallido (explosión)	T403 ts-63
Resistencia a la tensión	T404 ts-66
Resistencia al rasgado	T414 ts-65
Resistencia al dobléz	T423 su-68

A continuación se presentan las especificaciones generales de cada uno de los ensayos para la determinación de propiedades fisicomecánicas mencionadas en las normas TAPPI presentadas en el cuadro anterior.

- ***Peso base***

El peso es una de las especificaciones mas comunes relativas al papel. Debido a que éste se utiliza en forma de hoja y su área tiene mas importancia que su volumen, el peso del papel se expresa por unidad de área, en gramos por metro cuadrado (gramaje).

- ***Calibre***

El espesor o calibre del papel se mide con un micrómetro, como la distancia perpendicular entre dos superficies paralelas, planas y circulares con diámetro aproximado de 16 mm.

- ***Resistencia a la explosión***

Este ensayo determina la presión hidrostática en kilogramos por centímetro cuadrado requerida para producir reventamiento del material cuando la presión se aplica a una velocidad creciente controlada transmitida a través de un diafragma elástico, a un área circular de 3.048cm de diámetro del material bajo ensayo.

La prueba se realiza en un equipo Mullen. La propiedad medida es una combinación de la resistencia a la tensión y de la elongación del papel. En general esta resistencia depende del tipo y cantidad de fibras presentes en la hoja.

- ***Resistencia a la tensión***

Las propiedades que están ligadas íntimamente a la resistencia a la tensión son principalmente la carga de ruptura y la absorción de la energía de tensión. Este ensayo se realiza con el objeto de determinar la resistencia límite de una muestra de papel sometida a una fuerza creciente de tensión en cada extremo, esta resistencia límite se denomina carga de ruptura; al mismo tiempo puede determinarse el estiramiento de la hoja de pulpa o papel, medidas en kilogramos Newton por metro. El equipo empleado para tal fin recibe el nombre de aparato probador.

- ***Resistencia al rasgado***

La resistencia al rasgado es una propiedad de la hoja de pulpa o papel relacionada directamente con la resistencia al doblado, ya que en ambas la longitud de las fibras influye en gran medida en el valor final de la resistencia. Estas propiedades, junto con la resistencia a la explosión y tensión, configuran un criterio importante en la calidad para las pulpas y los papeles destinados a la fabricación de bolsas, sacos y empaques (SANJUAN, 1997).

Este ensayo se realiza con el objeto de determinar la fuerza promedio en gramos requerida para rasgar una sola hoja de papel después de haberle hecho un corte inicial. El principio del método consiste en rasgar una o más hojas juntas a lo largo de una distancia fija por medio de un péndulo, usando un aparato del tipo Elmendorf. El trabajo hecho durante el rasgado es medido por la pérdida de energía potencial del péndulo al encontrar una resistencia en el papel que se rasga; esta resistencia se traduce en gramos fuerza requeridos para el rasgado ya que la escala del equipo está calibrada para indicar la fuerza promedio ejercida.

Esta propiedad junto con la resistencia a la tensión y explosión, proporciona un criterio claro para establecer las condiciones de operación y manejo, por ejemplo, del papel para sacos que se emplean como embalajes.

- ***Resistencia al dobléz***

Está diseñada para indicar la resistencia a dobleces repetidos. La muestra se somete a un doblamiento continuo hasta que se rompe, mediante un aparato denominado probador MIT que le imprime un movimiento oscilatorio. El número de dobleces efectuado sobre la muestra se expresa como plegabilidad. No mide la tendencia del papel a quebrarse después de un solo dobléz, indica la aptitud de un papel para ser doblado o arrugado sin sufrir roturas o enmendaduras por un buen período de tiempo. La prueba de resistencia al dobléz es muy sensible a los cambios de humedad relativa. Normalmente, hay un gran aumento en resistencia al dobléz con cualquier incremento apreciable de humedad relativa.

Para el reporte de esta propiedad es aconsejable tener en cuenta el valor promedio de diez pruebas.

1.8 PROCESOS DE PULPEO

1.8.1 Pulpas semiquímicas

El proceso de obtención de pulpas se estableció por primera vez en los Estados Unidos, en 1925. La industria de pulpas semiquímicas se inició éste mismo año y ha mostrado un crecimiento espectacular desde 1945. La primera fábrica tenía la capacidad diaria de 10 toneladas. Hacia el año de 1929, la industria se había expandido a una capacidad diaria de 355 ton, correspondiendo la mayor parte del producto al histórico cartón corrugado. En 1945 la capacidad diaria se aproximaba

a la cantidad de 100 toneladas y esta cifra había aumentado a 8000 ton hacia el año 1961.

Debido a la importancia que éste proceso ha tomado, en casi todos los países productores de papel se disponen de abastecimientos de maderas duras que conllevan a la construcción y montaje de un gran número de fábricas destinadas para tal fin.

Principios del proceso de obtención de pulpas semiquímicas

En la fabricación de pulpas se emplean varias operaciones unitarias tales como absorción, evaporación, extracción y filtración (LIBBY, 1976). El proceso de obtención de pulpas semiquímicas es un método clásico de fabricación de pasta mecánica y de pulpa química que consta de dos etapas: un tratamiento químico moderado de la materia prima fibrosa para separarla parcialmente o en cierto modo degradar o afectar las uniones entre las fibras seguido de un tratamiento mecánico denominado desfibración.

La experiencia ha demostrado que los materiales fibrosos utilizados para pulpas semiquímicas se pueden clasificar en orden de su empleo, de acuerdo con sus características botánicas, como sigue (LIBBY, 1976; D'ALMEIDA, 1988):

Dicotiledóneas o angiospermas: árboles de hojas caducas - maderas duras.

Gimnospermas: árboles de hojas perennes - maderas suaves.

Monocotiledóneas: cañas, gramíneas y carrizos.

Los factores que se deben tener en cuenta en los procesos semiquímicos son principalmente:

- Propiedades físicas y características químicas del material fibroso.

- Composición y concentración del licor de cocción (cantidad de reactivos aplicados).
- Temperatura y tiempo de cocción.
- Presión
- pH (para los licores alcalinos la relación sulfito de sodio y NaOH pueden variar sin afectar el pH).

La primera etapa o etapa química de los procesos semiquímicos en la cual el material fibroso es sometido a la acción de reactivos con o sin aplicación de calor tiene como objeto principal el debilitamiento químico del complejo lignina-carbohidrato de la unión entre las fibras. Las variables que se estudian en esta etapa corresponden a:

- Propiedades químicas del material fibroso (el contenido de α -celulosa o celulosa verdadera en el material no altera directamente su facilidad de cocción pero mientras mayor sea su valor mayor será el rendimiento de la pulpa semiquímica blanqueada completamente deslignificada.
- Disminución o aumento en el rendimiento de la pulpa (debido al grado de deslignificación).
- Condiciones de operación (un aumento de temperatura acelera las reacciones semiquímicas alcalinas).

En la segunda etapa o etapa mecánica el material fibroso parcialmente convertido en pulpa, es sometido a un proceso de separación de fibras (desfibración) para obtener una pulpa que posteriormente es batida quedando así con unas propiedades adecuadas para el desarrollo de etapas posteriores en la fabricación de papel por medio de una acción mecánica de una máquina desfibradora-refinadora.

Las acciones mecánicas de la etapa de desfibración son principalmente las de fricción entre las fibras y haces de fibras, contra las placas del molino y de

compresión del material fibroso en suspensión a medida que éste es forzado entre las placas por efecto de la fuerza centrífuga del disco o discos rotatorios. La primera acción corresponde a un calentamiento de la unión entre las fibras y su posterior debilitamiento hasta el punto de abrirla; posteriormente ocurre una desintegración real de los agregados de fibras y su separación en fibras individuales; finalmente, la refinación individual de las fibras permite el acondicionamiento del material para la formación de papel.

Existen varios factores que deben tenerse en cuenta durante la etapa mecánica:

- Tamaño de astilla o de partícula. Las astillas o partículas pequeñas de tamaño uniforme pueden alimentarse y desfibrarse mas homogéneamente que el material grande o de tamaño variable.
- El contenido de humedad del material fibroso. Los materiales secos o con poca humedad dan pulpas voluminosas de baja resistencia y el consumo de energía es relativamente alto.
- El claro entre las placas. Mientras más cerca estén las placas en un molino de discos mayores serán las acciones de desfibración y de refinación. Con una disminución del claro entre las mismas se aumenta el consumo de energía y la resistencia a la explosión; pero disminuyen la resistencia al rasgado y el freeness.
- El número de pasos. Hay un aumento en la resistencia y una disminución simultánea en el número de freeness cuando el material fibroso se desfibra en una sucesión de pasos.

La preparación y el manejo del material fibroso, la preparación del licor de cocción, la reacción material - licor de cocción, la refinación y la adecuación final son las etapas que preceden la elaboración de hojas en el proceso semiquímico. Es posible llevar a cabo una etapa de recuperación de reactivos, evaporando el licor gastado y

acidificándolo con ácido sulfúrico para desprender los ácidos acético y fórmico; recuperándolos por extracción con solvente (metil cetona) y separándolos mediante una destilación azeotrópica.

Las pulpas semiquímicas tienen propiedades específicas que las hacen utilizables en productos de papel y de cartón debido a las propiedades químicas que poseen, tales como altos contenidos de lignina y hemicelulosas; factor que afecta directamente el rendimiento de la pulpa como se mencionó anteriormente (teóricamente el rendimiento del proceso semiquímico se encuentra entre los puramente químicos y puramente mecánicos del 55 al 92%).

Si la lignina residual de unión entre las fibras es eliminada por medio del proceso de blanqueo, se aumentará apreciablemente la resistencia de la pulpa.

1.8.2 Otros procesos de pulpeo (BRICEÑO, 1985)

Proceso químico

El proceso químico de pulpeo consiste principalmente en la realización de una mezcla entre la materia prima fibrosa con una solución acuosa de sustancias inorgánicas (reactivo) denominado licor de cocción.

Las variables importantes en este proceso tienen que ver con la cantidad de reactivos inorgánicos que se empleen en la digestión, el tiempo y la temperatura de cocción (ya que a mayor temperatura el tiempo de cocción disminuye); de la relación licor madera (llamada hidromódulo, relación en peso entre la cantidad de licor como líquido total y el material fibroso base seca añadida al digestor) y el tipo, tamaño y cantidad de materia prima empleada en la cocción.

Durante el proceso de cocción están presentes una serie de pasos que conllevan a la obtención de pulpas químicas. Primero, el material fibroso entra en contacto con

los reactivos inorgánicos en solución mediante mecanismos de difusión, adsorción, desorción y extracción en un proceso denominado impregnación.

La adición de ciertos químicos en la etapa de impregnación produce determinados efectos, los álcalis por ejemplo son recomendados para eliminar resinas; también con el objeto de reducir el consumo de energía. Posteriormente se lleva a cabo la reacción de deslignificación, mediante la penetración del licor en las cavidades porosas de la materia prima fibrosa por difusión de los reactivos disueltos en el licor. Esta etapa se hace visible físicamente mediante cambios en la coloración del licor debido a la degradación de la lignina. También ocurre una adsorción de los iones de reactivo en la superficie de los constituyentes químicos del material fibroso.

Proceso mecánico

Se utiliza principalmente con especies madereras no resinosas y de fibra larga mediante la molienda de astillas con longitud de 65cm en sistemas de operación puramente mecánica, con pequeño o ningún tratamiento químico; por lo que las fibras varían en longitud y composición (excepto por la eliminación de los compuestos solubles en agua); por lo tanto, la pulpa mecánica es una mezcla de haces fibrosos (unidos con lignina), fibras individuales y fibras rotas. El rendimiento de la pulpa es superior al 90% con base al peso de la madera seca; pero la pulpa es inferior en calidad y se utiliza únicamente como complemento de fibras químicas o semiquímicas. Así en el caso del papel periódico se emplea de un 80 a 85% de ésta pulpa y 15 al 20% de pulpa al sulfato (LIBBY, 1976 y RYDHOLM, 1965).

Pulpa Kraft o pulpa al sulfato

Este proceso se ha desarrollado con el objeto de remover la mayor cantidad posible de aceites y resinas de las especies madereras sometidas a la acción de una solución de soda (NaOH), sulfuro de sodio (Na₂S) y carbonato de sodio (Na₂CO₃) conocido como licor blanco.

Las reacciones químicas involucran la hidrólisis de la lignina mediante el cocimiento del material lignocelulósico en una serie de digestores que generalmente trabajan por períodos no continuos en una operación de aproximadamente 2 ó 3 horas, con temperaturas entre 160 y 180°C con una presión de 7 a 9 atmósferas.

La hidrólisis produce alcoholes, ácidos, algunos mercaptanos y sulfuros que son los responsables del olor característico de los centros de producción de las pulpas Kraft. Los reactivos residuales son conocidos como licor negro el cual puede ser sometido a procesos de recuperación de reactivos.

Las características de estas pulpas son su color pardo oscuro, su dificultad para ser blanqueadas, resistencia a la refinación mecánica. Como productos típicos se obtienen bolsas y papeles de envoltura, sacos multipliego, papeles blancos de alta resistencia, cajas de cartón corrugado entre otras aplicaciones.

Proceso a la soda

Este proceso se ha destinado para la obtención de pulpa de fibras cortas (especies suaves como el algodón, pino, álamo, sauce). El rendimiento es menor del 45%. El producto químico utilizado es la soda cáustica. Esta pulpa se emplea como complemento para fibras largas pues proporciona suavidad y buen terminado al papel, pero no resistencia. Las etapas de producción son muy semejantes a las seguidas en la obtención de pulpa kraft.

Proceso al sulfito

El proceso de sulfito permite procesar especies de madera no resinosas y de fibra larga. El rendimiento es del 45%. Los bisulfitos de calcio, sodio y amonio son los reactivos químicos utilizados. La pulpa obtenida mediante este proceso puede blanquearse fácilmente hasta un alto grado de blancura.

El proceso de producción de pulpa semiquímica al sulfito neutro SQSN consiste en tratar la materia prima con una solución de sulfito de sodio que contiene una cantidad de agentes alcalinos. La fibra digerida se refina, se lava y luego se convierte en papel o cartón.

Debido a la gran variedad de productos que se pueden obtener tales como cartón corrugado para el caso de pulpas sin blanquear o papeles para impresión para pulpas blanqueadas, el proceso se ha convertido en uno de los más importantes permitiendo la elaboración de pulpas de altos rendimientos, con buenas propiedades fisicomecánicas.

Otra característica importante del proceso SQSN, es que produce una deslignificación selectiva, con un máximo de retención de hemicelulosa (RYDHOLM, 1965). Las pulpas presentan por lo general un elevado contenido de lignina y celulosa que le comunican una característica especial: alta rigidez, que la hacen apta para la elaboración de papel corrugado medio.

Se conoce que el mecanismo de ataque del sulfito sobre las uniones de las fibras implica primordialmente, la sulfonación en estado sólido de una parte de la lignina seguida de una hidrólisis parcial. De esta manera se debilita la unión entre las fibras. El grado de disolución, depende de la severidad de las condiciones de digestión.

El valor del sulfito de sodio como agente de digestión es ampliamente reconocido. Este reactivo químico no es usado en los procesos químicos de producción de pulpa por su baja velocidad de reacción, además de las dificultades que presenta la recuperación de licor; y el excesivo consumo de reactivos que se requiere al tratar de conseguir un alto grado de deslignificación.

Para procesos semiquímicos en virtud de que no se requiere un alto grado de deslignificación el reactivo es adecuado, siendo una de sus mayores bondades el amplio rango de aplicación en cuanto al tipo de pulpa resultante que se desee.

Concentración de reactivos

Se ha encontrado que el agente químico más satisfactorio en el proceso SQSN es una solución de sulfito de sodio con suficiente tampón, como para mantener el pH sobre 7.

El mecanismo de ataque del reactivo sobre las uniones de las fibras se produce a través de la sulfonación de la lignina que es solubilizada y parcialmente alterada, lo que genera una debilitación de la interfibra (BRITT, 1964). Es así como un incremento en la cantidad de reactivos causa un decrecimiento en el rendimiento.

Como guía se recomienda una relación de 1.2 gr. de sulfito de sodio por cada gramo de lignina existente en la fibra (SCHIED, 1955).

La cantidad de reactivos aplicados, la concentración del licor y la relación licor-fibra son variables dependientes entre si (BRITT, 1964).

La relación licor-fibra es una variable de poca importancia en el proceso SQSN (KÉELER, 1955). Solo se debe considerar en el sentido de la recuperación del licor y cuando se trate de obtener pulpas de alta calidad.

Se debe tener en cuenta que la fibra debe quedar totalmente sumergida para permitir una buena impregnación. Además es conveniente no usar relaciones licor-fibra muy elevadas, a fin de disminuir los costos de calentamiento (KEELER, 1955).

La concentración de sulfito de sodio en el licor no tiene efecto sobre la velocidad de reacción, afectando levemente las propiedades mecánicas de la pulpa cuando la cantidad de reactivos es insuficiente. En todo caso, la concentración esta determinada por la cantidad de reactivos a usar y la relación licor / madera.

En cuanto al tampón, se utiliza para neutralizar los ácidos orgánicos que se forman cuando la fibra es calentada a más de 120 °C. La cantidad de tampón agregado al licor inicialmente debe ser tal que el pH final del licor después de la digestión, esté sobre 7 (manteniendo el pH en la zona alcalina se disminuye la corrosión).

Por otro lado un exceso de tampón que eleve demasiado el pH no es conveniente, debido al efecto de disolución de los carbohidratos a alta temperatura (RYDHOLM, 1965). En general, la cantidad de tampón a usar depende de la cantidad de ácidos en la fibra y de la cantidad de reactivo (sulfito de sodio) usado, ya que el sulfito de por si actúa como tampón cuando esta presente en cantidades apreciables.

Efecto de la temperatura

El proceso SQSN actúa fundamentalmente a través de sulfonación e hidrólisis de la lignina, debilitando la unión interfibra. Ya que la sulfonación es sumamente lenta se requieren elevadas temperaturas de digestión para complementar la reacción dentro de un tiempo razonable. El rango de temperatura más usado esta entre 160 y 190°C (MAC DONALD, 1969).

Dentro de este rango, una variación de temperatura tiene significativo efecto sobre la velocidad de reacción. Se ha encontrado que un aumento de 10°C en la temperatura de digestión duplica la velocidad de reacción (CASEY, 1966). La temperatura de digestión depende fundamentalmente de tipo de pulpa que se desee.

Como se sabe, el licor SQSN es relativamente específico para lignina, sustancia que es removida a temperatura de 170°C. También se ven afectadas las fracciones de hemicelulosas fácilmente solubles, permaneciendo en la pulpa la mayor parte de la alfacelulosa y las hemicelulosas más resistentes. A temperaturas superiores a 180°C, la reacción no es tan selectiva hacia la lignina, y la mayor parte de la que

queda en la pulpa es menos susceptible a los agentes de blanqueo (CASEY, 1966), porque se produce una excesiva degradación de carbohidratos y recondensación de la lignina (RYDHOLM, 1965).

Con respecto a las propiedades físicas, el factor de rasgado y la opacidad aumentan un poco, mientras que la resistencia a la tracción y la blancura disminuyen levemente cuando se aumenta la temperatura.

Efecto del tiempo de digestión

El tiempo de tratamiento está en función de la velocidad de penetración del licor en las fibras. Esta variable afecta las características de la pulpa de manera muy similar que la temperatura y la concentración de los reactivos ya que está estrechamente ligada a la temperatura de digestión y al tipo de pulpa deseada.

Debido al aumento excesivo de la velocidad de reacción frente a un incremento de temperatura, el tiempo de digestión va a determinar finalmente el tipo de pulpa que resulte en una digestión a determinadas condiciones de temperatura. Para fijar el tiempo de digestión se deben estudiar cuidadosamente las características específicas de la pulpa deseada, como las otras condiciones del proceso.

Otros aspectos

En los procesos semiquímicos se requieren astillas mas pequeñas que en el proceso químico, por razones de penetración de reactivo en la etapa química y uniformidad de alimentación al desfibrador en la etapa mecánica. Cuando la penetración en la etapa química no ha sido completa, se obtienen pulpas con un cierto contenido de haces de fibra de color negro, a causa de una digestión

incompleta y no uniforme. La penetración depende, tanto de las propiedades físicas de la fibra, como de su naturaleza botánica.

Cuando se trata del proceso SQSN, dada la elevada temperatura de trabajo, la difusión del licor a través de la astilla mejora notablemente, con lo que el problema de la penetración disminuye.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGIA

Para determinar la viabilidad o no de una materia prima como fuente de pulpa celulósica es posible hacer uso de dos herramientas: realización de ensayos tipo procesos comerciales a escala laboratorio y mediante el estudio de características básicas de dicho material. El primero de ellos es el que ha encontrado mayor aceptación; ya que permite simular los comportamientos reales en la industria (LIBBY, 1976).

El método consiste en preparar una serie de pulpas diferentes en condiciones de temperatura, concentración de reactivos, tiempo de digestión y someterlas a la evaluación de propiedades según pruebas prescritas en métodos internacionales (NORMAS ICONTEC, TAPPI).

En la figura 10 se muestra un diagrama de bloques sobre la metodología desarrollada en la investigación. Se partió desde una revisión bibliográfica en donde se consultaron los posibles mecanismos existentes de obtención de pulpas; continuando con una selección de alternativas que permitieron la variación en las condiciones del proceso. Se escogió la temperatura y el tiempo de cocción como las variables independientes del proceso; manteniendo constante la concentración de reactivos.

Preparación de la materia prima fibrosa

La materia prima empleada en el desarrollo de la presente investigación fue suministrada y entregada en la sede de CICELPA (Centro de Investigaciones en celulosa, pulpa y papel) de la Universidad Industrial de Santander, por la empresa Palmas del Cesar (San Alberto). Las hojas fueron cortadas en el momento de retirar

el fruto de la planta, se retiraron los foliolos y las espinas. A éstas se les denomina raquis; las cuales tenían una longitud promedio de 8m y un peso aproximado de 10kg. El cultivo trabajado es de la clase tenera y tiene una edad de seis años aproximadamente.

Se tomaron 2630 kg de raquis para tener una cantidad representativa del residuo vegetal existente en la plantación después de la poda (50 raquis aleatoriamente), sometidos posteriormente al proceso de reducción de tamaño, en el cual los raquis fueron astillados y molidos en un desintegrador y picador de cuchillas y martillos marca Cremasco modelo DP-4 de 16HP cuyo combustible es gasolina. En este proceso se logró separar la parte fibrosa del raquis y el parénquima.

El material molido fue secado al sol y cribado en mallas de 4, 6 y 15 mesh (o 1.5, 2.3 y 7 poros por centímetro lineal, respectivamente). El material fibroso retenido por la malla de 4 mesh se denominó como muestra N°1, al retenido por la malla de 6 mesh como muestra N°2 y así sucesivamente hasta el material que pasa por la malla de 15 mesh conocida como muestra N°4.

Este proceso de clasificación se hizo con el objeto de eliminar la mayor cantidad de parénquima (residuo que consume reactivos y disminuye el rendimiento). Los materiales clasificados fueron almacenados en bolsas de poliestireno para ensilaje tratando de mantener constantes sus propiedades. Para el proceso se escogió el material N°1 por ser el que presentó los haces fibrosos mas voluminosos.

La materia prima escogida se llevó al 10 % de humedad para evitar su degradación. La humedad fue determinada tomando una porción de la fibra previamente homogenizada colocándola en bandejas de aluminio previamente pesadas y llevándola a la estufa a 105°C hasta peso constante. Después del proceso de desecación se procedió a realizar el pesado determinando la humedad mediante la norma TAPPI (T18m-59).

2.2 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico y biométrico se desarrolló con el material previamente empacado de acuerdo a los métodos recomendados por las normas TAPPI (*Technical Association of the pulp and paper industry*).

El análisis químico se llevó a cabo tomando 1000 g del material cribado y empacado y moliéndolo en un molino de cuchillas y martillos; marca WBG de 12.5HP, 3510 rpm y criba de 0.3 cm. El material resultante fue tamizado en tamices TAPPI # 20, 40, 60, 80 y 100. Tomando lo obtenido entre mallas 40 y 60 para la realización de las pruebas anteriormente mencionadas.

2.3 ANÁLISIS BIOMÉTRICO DEL MATERIAL

El análisis biométrico de las fibras de un material tiene gran importancia debido a que propiedades físico-mecánicas como el dobléz y el rasgado dependen directamente o están relacionadas con la longitud de las fibras.

El análisis se realizó tomando 10 gramos material en bfs (base fibra seca); haciéndolo reaccionar con una mezcla de ácido acético – peróxido por un tiempo para lograr la limpieza total de las fibras, con el objeto de determinar posteriormente la longitud por medio de la elaboración de placas y su visualización en un microscopio según la norma T233 su-54. Se prepararon 7 placas y se les adicionó colorante Safranina en solución alcohólica al 0.25%, para mejorar la visualización en el microscopio.

Una vez escogido el mecanismo a desarrollar (proceso quimimecánico) se realizó el montaje preliminar de cocción; el cual consistió en realizar dos digestiones con materia fibrosa clasificada como N°2: una a 130°C - una hora de cocción y otra a 160°C y 1 hora de digestión; ambas con dosis de reactivos del 6% de hidróxido de

sodio y 10% en peso de sulfito de sodio base fibra seca con respecto a 600g de materia prima b.f.s con el objeto de observar la calidad de la pulpa obtenida; determinando a su vez el rendimiento de la digestión, el consumo de reactivos mediante la valoración del licor residual y la calidad en la formación de hojas de prueba.

De estos ensayos se observó que los rendimientos se encontraron entre el 50 y 55%; lo que indica que el proceso no podía ser catalogado como pulpeo quimimecánico. En adición, en la etapa posterior al refino se notó la presencia de dos pulpas no homogéneas entre sí. Se presentó en menor proporción una pulpa de buenas características a la vista; pero la cantidad de rechazos (fibra que requiere un proceso de refino adicional) fue superior al 60% en peso total de la pulpa obtenida lo cual generó una pasta que no favorecía el proceso de elaboración de hojas por su no uniformidad. Esta característica se hizo visible en la etapa de formación de hojas de prueba ya que generó un taponamiento en la malla del equipo formador de hojas (debido a la presencia de gomas que no reaccionaron en la etapa de digestión y aún se encontraban presentes en la pulpa).

El pH final de estos dos licores de cocción fue de 6 y 6.5. Se concluyó de esa primera etapa la necesidad de someter las pulpas a mayor tiempo de digestión, evaluando la influencia de ésta variable en el rendimiento de la misma y en el cambio en el pH final. Se consideró necesario cambiar las dosis de reactivos empleados en el licor inicial; estableciéndose nuevas condiciones para dos evaluaciones simultáneas (licores sulfito – soda y sulfito – carbonato con el objeto de controlar y mantener el pH final en 7).

Replanteado el problema, y bajo los nuevos lineamientos se establecieron las nuevas condiciones de operación en las dos líneas de observación; con tiempos de digestión entre 1 y 3 horas; dosis de reactivos constantes para las pulpas semiquímicas sulfito – soda y variables para las pulpas semiquímicas sulfito – carbonato.

2.4 PREPARACIÓN DEL LICOR DE COCCIÓN

El licor de tratamiento de las fibras consiste en una mezcla de sulfito de sodio - carbonato de calcio; sulfito de sodio e hidróxido de sodio. El licor se preparó en el laboratorio disolviendo el sulfito de sodio y el carbonato de calcio o hidróxido de sodio en agua. Al licor se le determinó el pH inicial.

Con el objeto de realizar estudios comparativos entre el efecto sulfito-carbonato y sulfito-soda, se realizaron ensayos de pulpaje con diversas condiciones en cada uno de los dos casos. Para los ensayos sulfito – carbonato se emplearon dos concentraciones diferentes de sulfito de sodio correspondientes al 20 y 25% en peso (b.f.s) y una concentración constante de carbonato de calcio de 10% (b.f.s); mientras que para los ensayos sulfito – soda se mantuvo constante la relación de reactivos, siendo ésta equivalente al 18% de sulfito de sodio y 4% de hidróxido de sodio (b.f.s).

La relación licor - fibra se mantuvo constante en un valor de 1 a 9 (por 1 parte de fibra : 9 partes de licor) para ambas líneas de ensayo.

Del análisis hecho a los resultados de los ensayos previos se establecieron las condiciones de operación de la investigación como sigue:

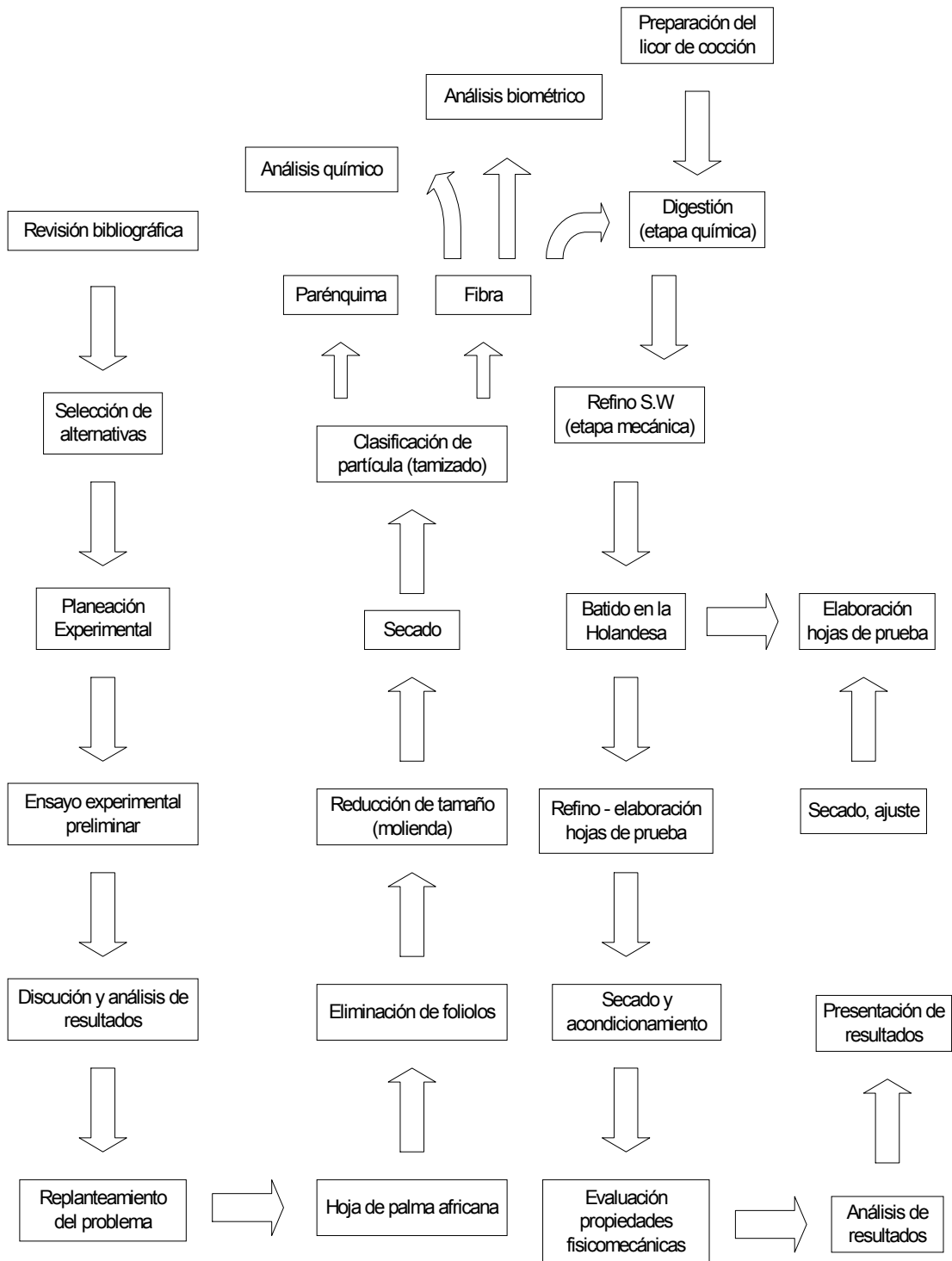
Pulpas sulfito – carbonato:

Porcentaje de sulfito de sodio:	20 y 25
Porcentaje de carbonato de calcio:	10 (constante)
Temperatura de digestión:	160°C (constante)
Tiempo de digestión:	60, 120 y 180 minutos.

Pulpas sulfito – soda:

Porcentaje de sulfito de sodio:	18%
Porcentaje de hidróxido de sodio:	4%
Temperaturas de digestión:	140°C y 160°C
Tiempo de digestión:	60, 90 y 120 minutos

Figura 10. Diagrama de bloques de la metodología de la investigación



En la siguiente tabla se presentan la nomenclatura de las digestiones realizadas con las condiciones de operación de las mismas.

Tabla 6. Preparación del licor y programación de las digestiones

% NaSO ₃ – B.F.S	TIEMPO DE DIGESTION A TEMPERATURA MÁXIMA (h)	DIGESTION
20	1	D1
	2	D2
	3	D3
25	1	D4
	2	D5
	3	D6

Se utilizó un digestor de 6 litros de capacidad que dispone de sistema de recirculación de licor. Los ensayos se llevaron a cabo con 600 g de fibra en base seca. La metodología consistió en impregnar la fibra con agua durante una hora con el fin de facilitar la circulación del licor de cocción lo mas rápidamente entre los conductos capilares de las fibras, por hinchamiento de estas con el agua y luego llevarla al digestor donde se añadió el licor de digestión (mezcla de sulfito de sodio, carbonato de calcio y agua).

Relación licor fibra 1:9. Tapado el digestor se inicia el período de calentamiento y se activa el sistema de recirculación de licor controlando el tiempo de una hora para alcanzar la temperatura máxima. Una vez alcanzada la temperatura máxima se mantuvo, mediante control automático del equipo con un rango de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo previsto como período de digestión.

Terminado el período de digestión se drenó licor negro por medio de una válvula inferior con el fin de detener la reacción y bajar la temperatura de la fibra para luego

retirlarla del digestor y llevarla a bolsas de tela para realizar un lavado durante una hora, el cual permite drenar todo el licor y pasar a la etapa mecánica.

Durante todo el período de digestión se retiraron muestras de licor para el análisis de pH y contenido de sulfito residual.

2.5 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES, SULFITO RESIDUAL Y pH FINAL PRESENTE EN EL LICOR NEGRO

Se homogenizó el licor y se tomó una muestra para determinar sólidos totales; importante determinación que indica el material disuelto en el licor extraído de la fibra en la digestión, que corresponde a gomas, taninos, pigmentos, sales, mucílagos, sulfito residual y carbohidratos solubles que afectan el rendimiento. Se determinó con una muestra de 150 ml a 105°C durante 24 horas: expresándolo como % de sólidos totales presentes, producto de dos determinaciones.

Se evaluó el contenido de sulfito residual total mediante valoración con KIO_3 de concentración conocida expresándola como porcentaje de sulfito residual producto de dos valoraciones y se determinó el pH final del licor.

2.6 TRATAMIENTO MECÁNICO

Desfibrado

La fibra procedente de la etapa química, una vez lavada, fue desfibrada en el molino de discos tipo Sprout Waldron de 12 pulgadas de diámetro (30.48 cm.) bajo las siguientes condiciones: temperatura entre 50 - 60° C; abertura de discos 150 milésima de pulgada (3.81 mm).

La pulpa con el remanente del licor se llevó a una consistencia de 3% después de dejarla enfriar. Se desfibró en un equipo marca SPROUT WALDRON de discos a distancias de 250, 200 y 150 milésimas de pulgada para lograr un material en el cual las fibras se separaran fácilmente.

Se lavó la pulpa con abundante agua para eliminar toda presencia de reactivos. El rendimiento se midió tomando una porción de la pulpa homogenizada: llevándola a 105°C durante 24 horas.

Refino o Batido

Se determinó la humedad de la pulpa a refinar. Esta es necesaria para poder calcular con exactitud la consistencia de la pasta en la holandesa. Se realizó la determinación por duplicado.

Conocida la humedad de la fibra se llevo a cabo el proceso de refino en una holandesa tipo Valey Beater con 360 g b.f.s., consistencia 1.67%. El proceso de refino se realizó teniendo en cuenta la norma NTC 687.

Se controló el grado de refino o grado de drenaje de la pulpa mediante la norma T227m-58, que determina el método para medir la mayor o menor facilidad con que el agua se separa de la pulpa.

Se tomaron puntos de refino a 400, 300, 200 y 100 CSF (***Canadian Standards Frenes***). Por ser los puntos importantes entre los cuales se encuentran las mejores propiedades para la elaboración de papel.

Se elaboraron 12 hojas de prueba por cada punto de refino de acuerdo a la norma NTC 690, y se escogieron las 5 mejores a las cuales se determinaron los resultados de las propiedades fisicomecánicas de las pulpas. Las hojas se acondicionaron durante 24 horas en un cuarto de pruebas con 50% HR y 25 ± 2 °C (NTC 333,T402m49).

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Las hojas sin foliolos fueron astilladas, obteniendo un tamaño adecuado que permitiera la entrada por la abertura del molino. Previamente fueron tomados 20 raquis aleatoriamente y se determino el peso promedio. El resultado fue de 9.084kg por raquis húmedo. El material fue molido y cribado. Se obtuvo un rendimiento en este proceso de 1ton/ hora, utilizando una criba de 2 cm. La humedad del material así obtenido fue de aproximadamente 80%. Se consumió en promedio un litro de gasolina (con dos pasadas por la criba para obtener fibra óptima para ser utilizada) por cada 35.53 kg.

El material se tamizó en zarandas, lográndose una excelente separación de fibra-parénquima. Se obtuvo un 75-80 % de material fibroso retenido en los tamices y un 20 a 25% de parénquima extraído correspondiente a finos.

El material fibroso, se almacenó con un 10% de humedad en bolsas de poliestireno marcadas como muestras 1, 2 y 3 correspondientes a la fibra retenida en los tamices de 4, 6 y 15 mesh respectivamente. Se utilizó la muestra 1 para los procesos de cocción. El material restante correspondiente a muestras 2 y 3 también posee una excelente condición para un proceso de pulpeo similar o un aprovechamiento en otros procesos industriales.

Se llevó a cabo el análisis químico del material utilizando las normas mostradas en la tabla 3. De acuerdo a los resultados obtenidos para el análisis químico, se puedo afirmar que:

El material presenta un alto contenido de solubles en soda al 1%, correspondiente a sustancias susceptibles a ser degradadas por ataque de hongos y microorganismos. Estos solubles corresponden a productos de degradación de gomas, hemicelulosas (pentosanos y hexosanos), lignina, resinas y productos de degradación de la celulosa. Este alto contenido de material degradable da una idea del rendimiento que se logra en un proceso semiquímico al sulfito neutro como el llevado a cabo

en la presente investigación. Los rendimientos de este proceso están por debajo del 70%, debido a que en el proceso se disuelve cerca del 30% de fibra inicial.

En comparación con el contenido de material susceptible a ser degradado del bagazo de caña; la hoja de palma africana se sitúa entre los límites permitidos para materiales utilizados en la industria papelera, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 7. Comparación de los resultados del análisis químico de la palma africana y bagazo de caña

DETERMINACIÓN	PALMA AFRICANA	BAGAZO DE CAÑA
Solubles en Na OH 1%	30.06 %	34.9
Solubles en agua caliente	10.56 %	4.1
Solubles Alcohol- Benceno	2.03 %	2.8
Solubles en alcohol	3.09 %	-----
Lignina	12.63 %	20.7
Celulosa	46.25 %	46.6
Hemicelulosas	39.95 %	26-30
Cenizas	1.17 %	2.6

La palma africana presenta un contenido inferior de celulosa, con respecto al bagazo de caña; pero se encuentra dentro de los límites aceptados para materias primas en la industria. Un contenido de celulosa superior al 40% en peso de la fibra b.f.s libre de extraíbles, indica que ésta puede ser empleada con fines papeleros.

El contenido de lignina presente en la hoja de palma africana es inferior al presente en el bagazo de caña, lo que ofrece una posibilidad de que sea extraída mediante un proceso sencillo y económico.

Comparando el contenido de materiales grasos, mucílagos, sales y carbohidratos solubles de la palma africana y el bagazo de caña; que son determinados

mediante los solubles en alcohol-benceno estos son inferiores a los presentes en el bagazo de caña.

La hoja de palma africana presenta un alto contenido de hemicelulosas que favorece el proceso de refinado y las propiedades de resistencia debido al hinchamiento que sufren las fibras por la hidratación.

El alto contenido de cenizas presente en el material, indica un alto contenido de minerales que es debido a la procedencia de la materia prima. Estos pueden perjudicar la vida útil de los equipos utilizados debido al efecto abrasivo de los minerales.

Se realizaron 6 digestiones con los porcentajes de sulfito determinados. Se evaluó en el licor de cocción: el pH inicial y final, % de Na_2SO_3 inicial y consumido (como % de SO_2) durante el proceso de digestión, sólidos totales y el rendimiento total del proceso después del desfibrado en el molino de discos (Marca Sprout Waldron). Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones y resultados de los procesos de digestión realizados en la investigación

	20% Na_2SO_3			25% Na_2SO_3		
	1 hora	2 horas	3 horas	1 hora	2 horas	3 horas
PH licor inicial	9.6	9.8	9.6	9.6	9.6	9.8
PH licor residual	6.7	6.7	6.8	6.7	6.9	7.0
SO₂ inicial (%)	10.2	10.2	10.2	12.7	12.7	12.7
SO₂ total (%)	4.7	4.0	3.7	7.2	6.5	5.7
SO₂ libre (%)	1.3	0.7	0	1.8	0.9	0.7
SO₂ combinado (%)	3.4	3.3	3.7	5.4	5.6	5.0
SO₂ libre real (%)	2	2.7	3.7	3.6	4.7	4.4
SO₂ consumido (%)	54.0	60.8	63.7	43.3	48.8	55.1
sólidos en el licor	48.0	51.3	54.6	54.6	55.5	54.6
rendimiento (%)	68	67	60	65	60	57

Nota: los porcentajes de sólidos están referidos a sólidos totales que contienen además de los extraídos de la fibra, carbonato y sulfito residual.

De la tabla anterior se observa que el consumo de sulfito aumenta con el tiempo de digestión como se esperaba, debido al mayor ataque químico sobre el material.

Los rendimientos de las digestiones realizadas oscilaron dentro del rango previsto, de acuerdo al análisis químico. Estos variaron de acuerdo a la concentración de sulfito en el proceso y al tiempo de digestión, a mayor tiempo de digestión menor rendimiento.

Se realizó el análisis biométrico de la fibra extraída de la hoja de palma africana de acuerdo a la descripción hecha anteriormente. Se elaboraron 7 placas de las cuales se tomaron 40 fibras por placa preparada; para un total de 280 fibras. Se determinó el promedio de las mediciones por placa y luego el promedio de todas las placas obteniendo los siguientes resultados:

Longitud máxima : 2.896 mm

Longitud media :1.236mm

Longitud mínima : 0.475

Comparando los resultados obtenidos para la longitud media de la fibra de la hoja de palma africana con los obtenidos para otros materiales empleados que son mostrados en la tabla 8 se puede decir que:

En comparación con el bagazo de caña que es un material utilizado en la actualidad, la fibra de la hoja de la palma africana es muy similar, con respecto al resto de materias primas utilizadas en la industria es superior, y muy poco inferior a la fibra obtenida con una mezcla de madera tropical.

Tabla 9. Comparación de longitud de la fibra con diferentes materiales

MATERIA PRIMA	Longitud (mm)
Hoja de palma africana (desmedulado)	2.9-0.47
Bagazo de caña (desmedulado)*	2.5-0.5
Paja de arroz*	1.0-0.5
Paja de trigo*	1.5-1.1
Eucalyptus Saligna*	1.71-0.77
Mezcla de madera tropical*	3.0-0.7
Pino caribe *	2.25

*(RONDON, 1992)

La similitud de la longitud de la fibra de la hoja de palma africana con el bagazo, sugiere que esta puede ser utilizada para la elaboración de papel de impresión, artesanal, envolver (en combinación con fibras largas Kraft) o cartón corrugado medio como en la actualidad es utilizado el bagazo.

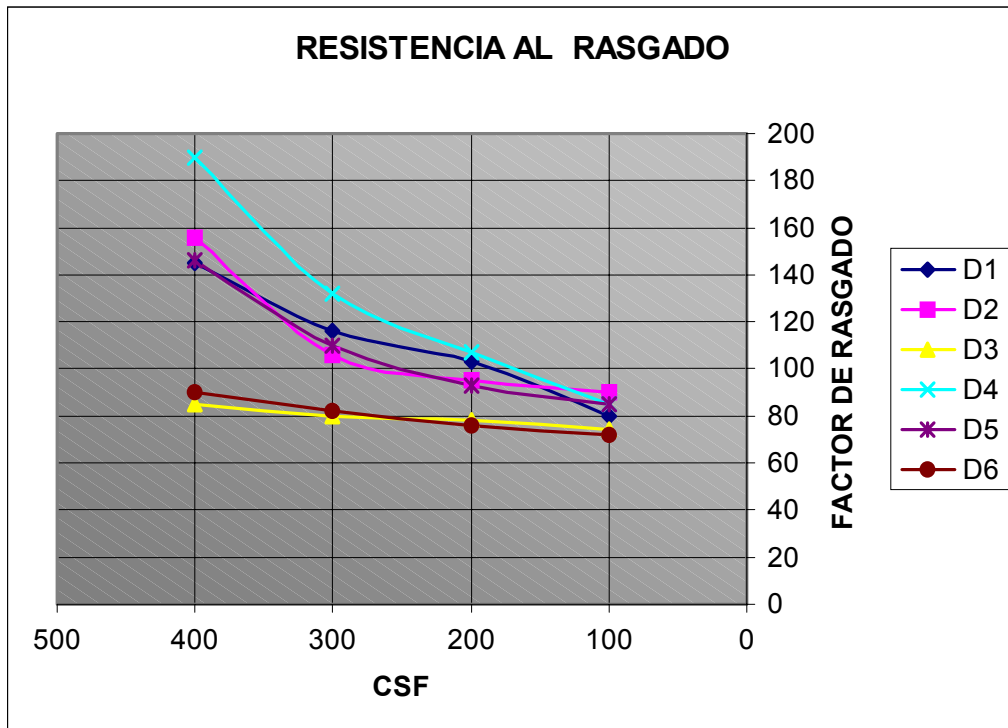
3.1 RESULTADOS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Pulpas sulfito de sodio – carbonato de calcio

Los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades físico-mecánicas de las pulpas a CSF de 400, 300, 200 y 100 se muestran en la tabla 7, para las digestiones realizadas.

RESISTENCIA AL RASGADO

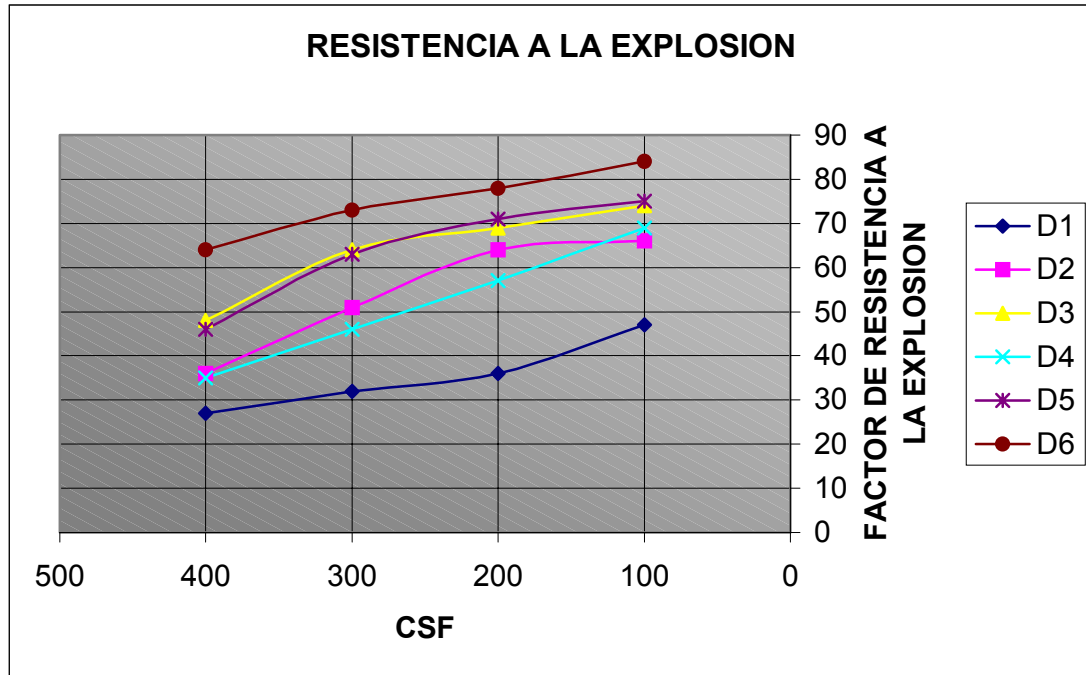
Figura 11. Resistencia al rasgado vs. CSF



- La figura 11 muestra los resultados obtenidos para la resistencia al desgarre. Esta propiedad disminuye al aumentar en el tiempo de refino. El valor máximo fue de 190 (pulpa D4; CSF 400) y el valor mínimo 72 (pulpa D6, CSF 400).
- Se observó que la pulpa D4 presenta mayores factores de resistencia al desgarre, y además para las 6 pulpas obtenidas disminuye el factor con el aumento del tiempo de refino. Las pulpas D3 y D6 presentan los valores más bajos de factor de resistencia al desgarre.

RESISTENCIA A LA EXPLOSION

Figura 12. Resistencia a la Explosión vs. CSF

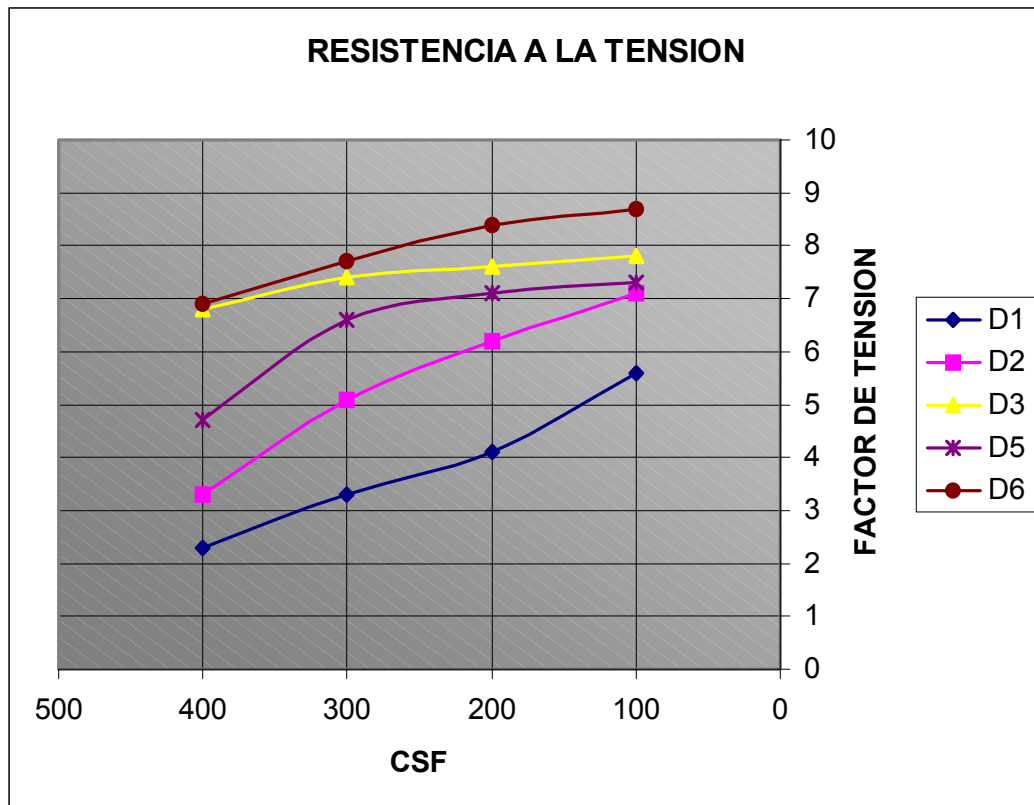


- En la figura 12 se presentan los resultados para la evaluación del factor de explosión para las 6 digestiones donde se observó un aumento en la propiedad a medida que el tiempo de refino es mayor.
- Los resultados de la medida del factor de resistencia a la explosión se encuentran dentro de un valor máximo de 84 (pulpa D6 ; CSF 100) y un valor mínimo de 27 (pulpa D1 ; CSF 100).
- Se observó que la pulpa D6 presentó los valores más altos en cada uno de sus puntos de refino y contrariamente, los valores más bajos los presentó la pulpa D1.
- En general presentaron mejores propiedades fisicomecánicas las pulpas D3 y D6, que corresponden a las de mayor tiempo de digestión, sin embargo

presentaron menor rendimiento en cada una de las concentraciones de sulfito.

RESISTENCIA A LA TENSION

Figura 13. Resistencia a la Tensión vs. CSF

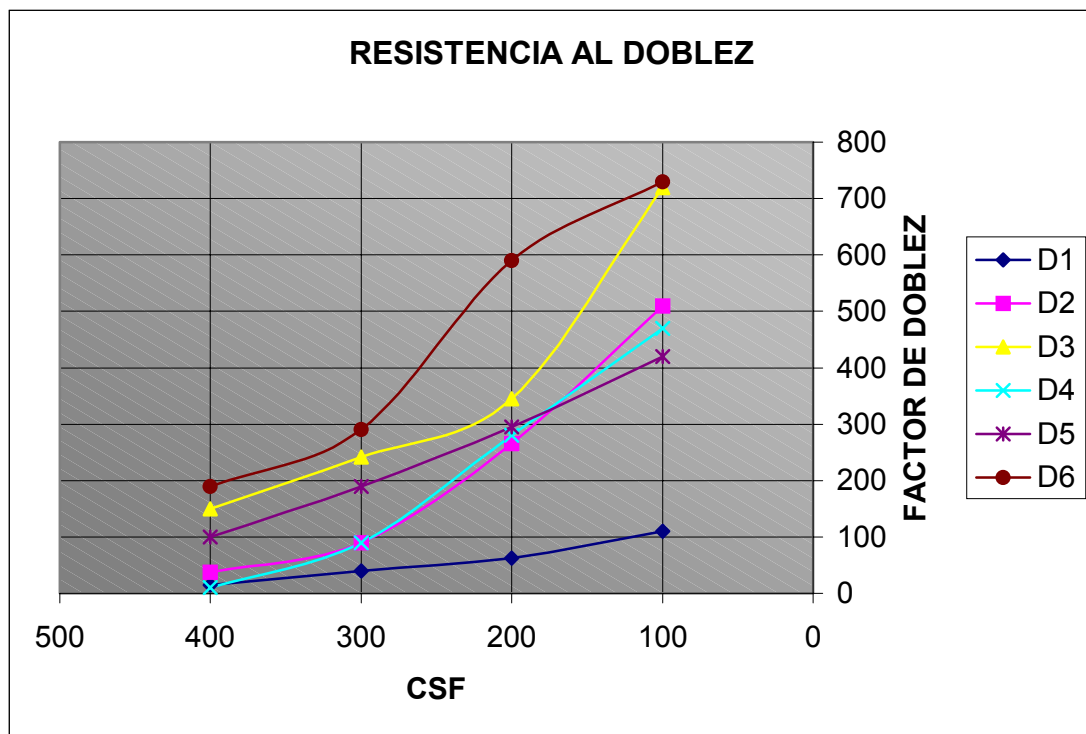


- La figura 13 corresponde a los resultados obtenidos para la longitud de ruptura por tracción para las 6 pulpas. La longitud de ruptura de las pulpas aumenta al aumentar el tiempo de refino; el valor máximo fue de 8.7 (pulpa D6; CSF 100) y el valor mínimo 2.0 (pulpa D4 ; CSF 400).
- Se observó que la pulpa D6, correspondiente a la de mayor concentración de sulfito y mayor tiempo de digestión, presentó las mejores propiedades de resistencia a la tensión para cada uno de los puntos de refino en comparación con las demás pulpas obtenidas.

- La pulpa D1, correspondiente al menor tiempo de digestión y menor concentración de sulfito presentó los valores mas bajos de factor de resistencia a la tensión.

RESISTENCIA AL DOBLEZ

Figura 14. Resistencia al Doblez vs. CSF



- La figura 14 muestra el factor de resistencia al dobléz para las 6 digestiones realizadas. En todas las digestiones el factor de resistencia al dobléz o plegado aumenta con el aumento en el tiempo de refino.
- Los resultados correspondientes al factor de resistencia al dobléz se encuentran entre un valor máximo de 750 (pulpa D6 ; CSF 100) y un valor mínimo de 10 (pulpa D4 ; CSF 400).

- Se observó que los valores máximos de factor de resistencia al doblé los presentaron las pulpas D3 y D6, que corresponden a las pulpas de mayor tiempo de digestión para cada una de las concentraciones de sulfito. Los valores más bajos los presentó la pulpa D1, que corresponde a la de menor concentración de sulfito y menor tiempo de digestión.

TABLA 10. Propiedades fisicomecánicas de las pulpas semiquímicas sulfito – carbonato a partir de la hoja de palma africana

RASGADO						
CSF	20% Na₂SO₃			25% Na₂SO₃		
	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
100	80	90	74	85	85	72
200	103	95	78	107	93	76
300	116	106	80	132	110	82
400	145	156	85	190	146	90
EXPLOSION						
CSF	20% Na₂SO₃			25% Na₂SO₃		
	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
100	47	66	74	69	75	84
200	36	64	69	57	71	78
300	32	51	64	46	63	73
400	27	36	48	35	46	64
TENSION						
CSF	20% Na₂SO₃			25% Na₂SO₃		
	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
100	5.6	7.1	7.8	8.6	7.3	8.7
200	4.1	6.2	7.6	6.6	7.1	8.4
300	3.3	5.1	7.4	4.2	6.6	7.7
400	2.3	3.3	6.8	2.0	4.7	6.9
DOBLEZ						

CSF	20% Na ₂ SO ₃			25% Na ₂ SO ₃		
	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS	1 HORA	2 HORAS	3 HORAS
100	110	510	720	470	420	750
200	62	265	345	280	295	590
300	40	90	242	90	190	290
400	15	38	150	10	100	190

Nota: Todas las pruebas realizadas para todas las pulpas evaluadas están referidas con un peso base de 60 g / m².

Pulpas sulfito de sodio - hidróxido de sodio

La investigación desarrollada con el fin de evaluar pulpas semiquímicas a partir de la hoja de palma africana presentó dos variables en la preparación del licor de cocción y en el establecimiento de las condiciones de operación. Es por ello que se ha presentado la etapa experimental correspondiente a las pulpas semiquímicas sulfito – carbonato. A continuación se presenta la descripción del proceso de obtención y evaluación de pulpas semiquímicas sulfito – soda. Ambas se encuentran catalogadas como de tipo neutro; pues el pH del licor negro (licor residual) se encuentra en valores cercanos o iguales a 7.

La materia prima empleada en este segundo tipo de pulpa es la misma descrita en la primera parte experimental. La fibra catalogada como muestra N°1 fue empleada en la misma proporción (600 g bfs), con una humedad del 10%.

Como se ha mencionado anteriormente, la relación fibra-licor o hidromódulo es 1:9; ya que es necesario la recirculación de licor de cocción durante el proceso de digestión en el equipo escogido para tal fin.

Las condiciones de operación presentan algunas variaciones. Para esta etapa de experimentación, se escogieron como variables del proceso el tiempo de digestión y la temperatura de cocción.

A diferencia de la parte experimental número uno, las dosis de reactivos se mantuvieron constantes; pues se consideró necesaria la evaluación en el cambio de propiedades y rendimiento de la digestión con variables de fácil medición; ya que según evaluación bibliográfica, solo es posible obtener cambios visibles con dosis altas de reactivos.

Los tiempos de cocción establecidos fueron de 60, 90 y 120 minutos. Cada uno de los ensayos realizados tuvieron un tiempo de elevación de 60 minutos (preliminares); correspondientes al tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima de cocción de 140°C y 160°C.

Durante las digestiones se tomaron varias muestras de licor de cocción correspondientes a determinados tiempos con el objeto de evaluar el consumo de reactivos. Un volumen de 30ml fue suficiente para realizar los ensayos que permitieron cuantificar dichos consumos y a su vez estimar el valor del pH del licor tanto inicial como final.

Después de realizado el proceso de cocción y cumplidas las condiciones finales de cada prueba (tiempo y temperatura máxima), se procedió a realizar la descarga del digestor previo apagado del equipo. El licor negro o residual de cada una de las cocciones fue descargado en un recipiente del cual se tomó una muestra representativa equivalente a 300ml en cada una de las digestiones, con las cuales se realizaron ensayos de determinación de sólidos totales (por duplicado para cada cocción); valores que permitieron concluir que los rendimientos presentados al finalizar cada proceso (gramos de bfs de materia prima convertida en gramos de pulpa b.f.s obtenida) tienen concordancia con los calculados mediante el pesado de la muestra de licor final sometido a calentamiento en estufa a 105°C durante 24 horas como índice de la presencia de material disuelto en el licor extraído de la fibra en la digestión.

Como resultado de la etapa química del proceso se obtuvieron las diversas pulpas. Posteriormente éstas fueron llevadas al refinador de discos no sin antes haber sido lavadas, pues es necesaria la eliminación de la mayor cantidad posible de licor

residual de cocción; que podría afectar las propiedades de la materia prima de la etapa mecánica junto con los daños que ocasionaría a los equipos en aspectos como el ataque químico por corrosión. Este lavado se hizo en bolsas de tela y de la misma forma descrita en la primera parte experimental.

Para determinar el rendimiento de las cocciones, se estimó la cantidad de pulpa obtenida en la etapa química y después del refinado a la que fue sometida en el refinador Sprout Waldron. Fue necesario conocer la humedad de dicho producto, (para cuantificar el peso en base fibra seca (b.f.s) del mismo); ensayo realizado por triplicado y bajo las estipulaciones de la norma TAPPI para tal procedimiento.

Conocido el valor del rendimiento de la cocción, de la humedad de la pulpa, de la consistencia necesaria para el proceso de batido en la pila holandesa y con base en las normas TAPPI para la elaboración de hojas de prueba a mano, se concluyó la etapa químico-mecánica.

La consistencia de las pulpas semiquímicas en la pila de batido fue la misma para ambos ensayos (sulfito-carbonato y sulfito-soda); con la cual se estipularon los valores de muestra requeridos para la medición de freeness, elaboración de hojas de consistencia y evaluación de propiedades.

Los puntos de refinado escogidos para la elaboración de hojas fueron: 500, 400, 300 y 200 CSF y la evaluación de las propiedades de dichas hojas se efectuó de la misma forma descrita en la primera parte experimental.

Las siguientes tablas presentan de forma sintetizada los aspectos anteriormente mencionados:

Tabla 11. Especificaciones generales de las digestiones realizadas.

Condición	Descripción
Cantidad de material fibroso (bfs)	600 gramos
Humedad de la fibra	10%
Hidromódulo	1 : 9
Tiempo de elevación	60 min
Tiempo de cocción	60 min
	90min
	120 min
Temperatura de digestión	140°C
	160°C
Concentración de reactivos (relación constante)	Soda: 4% en peso (b.f.s)
	Sulfito: 18% en peso (b.f.s)

Tabla 12. Especificaciones generales de los análisis de los licores de cocción

Ensayo	140°C			160°C		
	60 min	90 min	120 min	60 min	90 min	120 min
pH licor inicial	11.7	12	12.2	11.9	12.3	12
pH licor	6.9	7.0	6.8	7.0	6.8	7.0
SO ₂ inicial (%)	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
SO ₂ libre (%)	3.1	1.4	1.6	1.6	1.2	1.8
SO ₂ combinado (%)	4.2	4.6	4.2	3.3	3.1	2.9
SO ₂ libre real (%)	1.1	3.2	2.6	1.7	1.9	1.1
SO ₂ consumido (%)	18.7	35.2	36.2	46.1	52.7	48.3
Rendimiento (%)	64	61	59	78	64	62

Resultados propiedades fisicomecánicas

En total se realizaron 6 digestiones, con base en la combinación de ensayos temperatura-tiempo de cocción. Las pulpas obtenidas fueron clasificadas y nombradas de la siguiente forma:

Tabla 13. Nomenclatura de las pulpas semiquímicas sulfito – soda

Pulpa	Nomenclatura	Condiciones
Pulpa N°1	P-1	140°C – 60min
Pulpa N°2	P-2	140°C – 90min
Pulpa N°3	P-3	140°C – 120min
Pulpa N°4	P-4	160°C – 60min
Pulpa N°5	P-5	160°C – 90min
Pulpa N°6	P-6	160°C – 120min

Tabla 14. Propiedades fisicomecánicas de las pulpas semiquímicas sulfito-soda

RASGADO						
CSF	140°C			160°C		
	60 min	90 min	120 min	60 min	90 min	120 min
200	61	82	97	66	70	65
300	60	92	100	69	81	76
400	68	-	103	112	94	125
500	78	-	109	135	132	119
EXPLOSION						
CSF	140°C			160°C		
	60 min	90 min	120 min	60 min	90 min	120 min
200	43	34	54	72	62	58
300	36	29	44	53	58	48
400	33	25	34	38	51	39
500	31	22	33	35	41	34

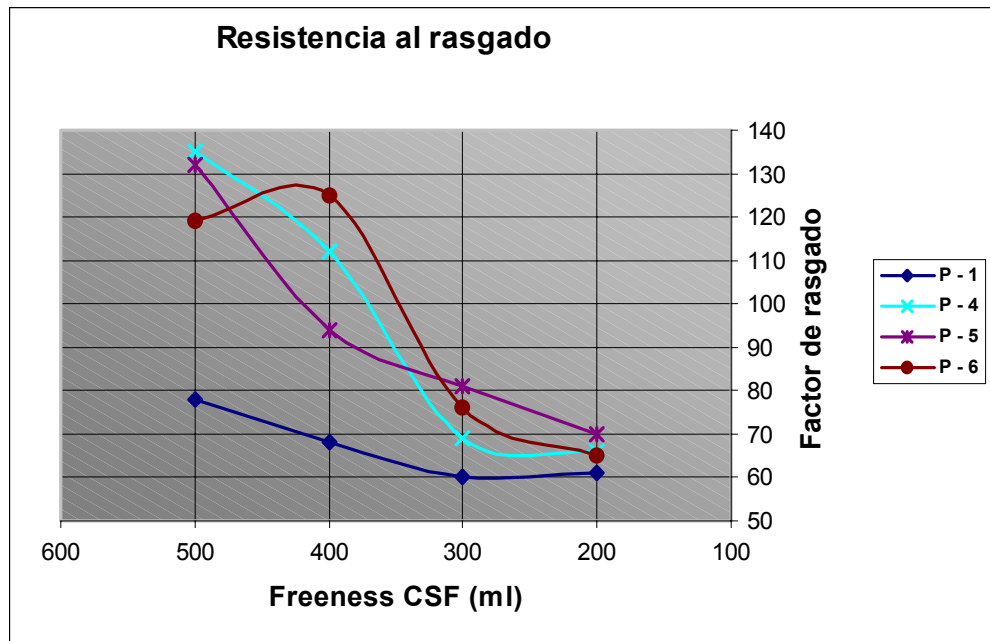
TENSION						
CSF	140°C			160°C		
	60 min	90 min	120 min	60 min	90 min	120 min
200	4.9	3.2	5.1	6.2	5.8	4.9
300	4.0	1.9	3.2	4.3	4.5	4.3
400	3.4	0.9	1.9	2.6	3.3	3.1
500	3.1	0.2	1.0	1.7	2.2	2.0

DOBLEZ						
CSF	140°C			160°C		
	60 min	90 min	120 min	60 min	90 min	120 min
200	39	30	110	270	242	225
300	31	11	48	115	152	90
400	22	-	14	29	97	37
500	17	-	2	19	50	12

Nota: Todas las pruebas realizadas para todas las pulpas evaluadas están referidas con un peso base de 60 g / m².

RESISTENCIA AL RASGADO

Figura 15. Resistencia al rasgado vs. CSF

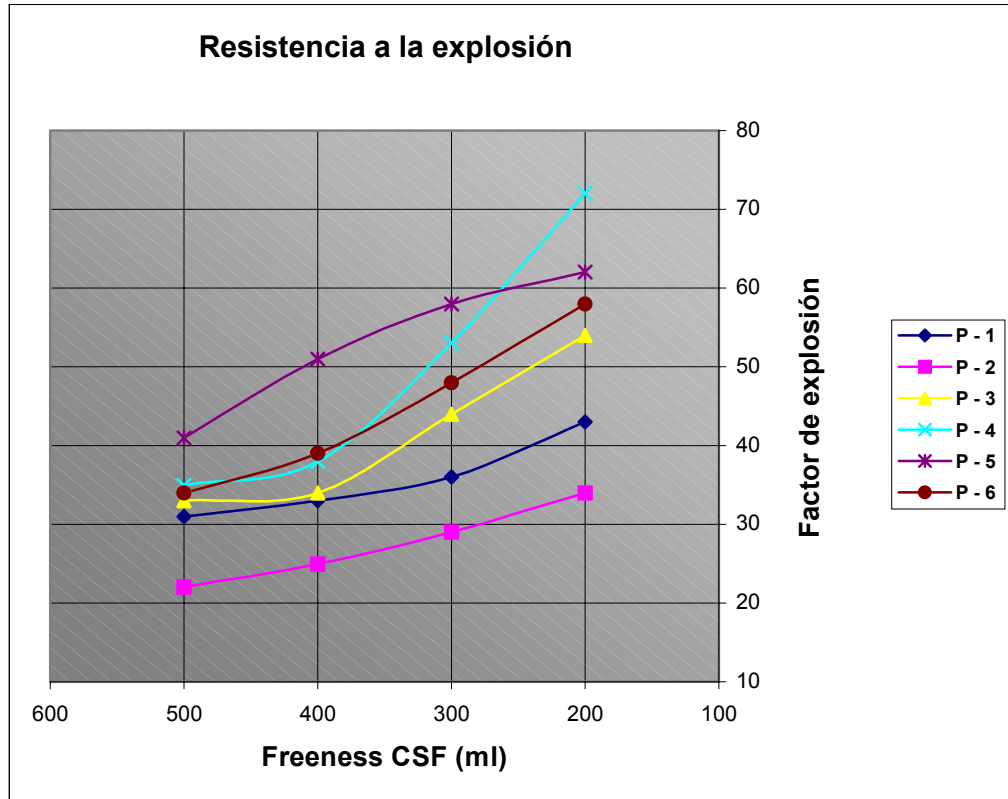


- La pulpa obtenida como resultado del proceso de cocción en condiciones menos drásticas (140°C y 60 min de digestión) P-1, es la que presenta menores valores en la resistencia al rasgado para los diferentes grados de refino en comparación con los resultados de P – 2 y P – 3 los cuales se obtuvieron bajo la misma condición de temperatura a pesar de presentar mejor rendimiento entre ellas.
- Solo fue posible obtener datos de resistencia al rasgado para la pulpa P – 2 en dos puntos de refino, ya que el aspecto y calidad de formación de las hojas a 500 y 400 CSF no permitieron la cuantificación de la propiedad ; pues el dato obtenido no representa el valor de rasgado para la reología de la hoja, pues el corte hecho por el aparato fué de forma lateral y no perpendicular como lo establece la norma.
- A mayor tiempo de refino las pulpas que presentaron mejor resistencia al rasgado tuvieron tiempos de cocción entre 90 y 120 minutos.
- El comportamiento de las pulpas ante los ensayos de resistencia al rasgado corresponden al comportamiento generalizado para pulpas semiquímicas (disminución en el valor de la propiedad con incremento en el grado de refino).

RESISTENCIA A LA EXPLOSION

RESISTENCIA A LA EXPLOSION

Figura 16. Resistencia a la explosión vs. CSF

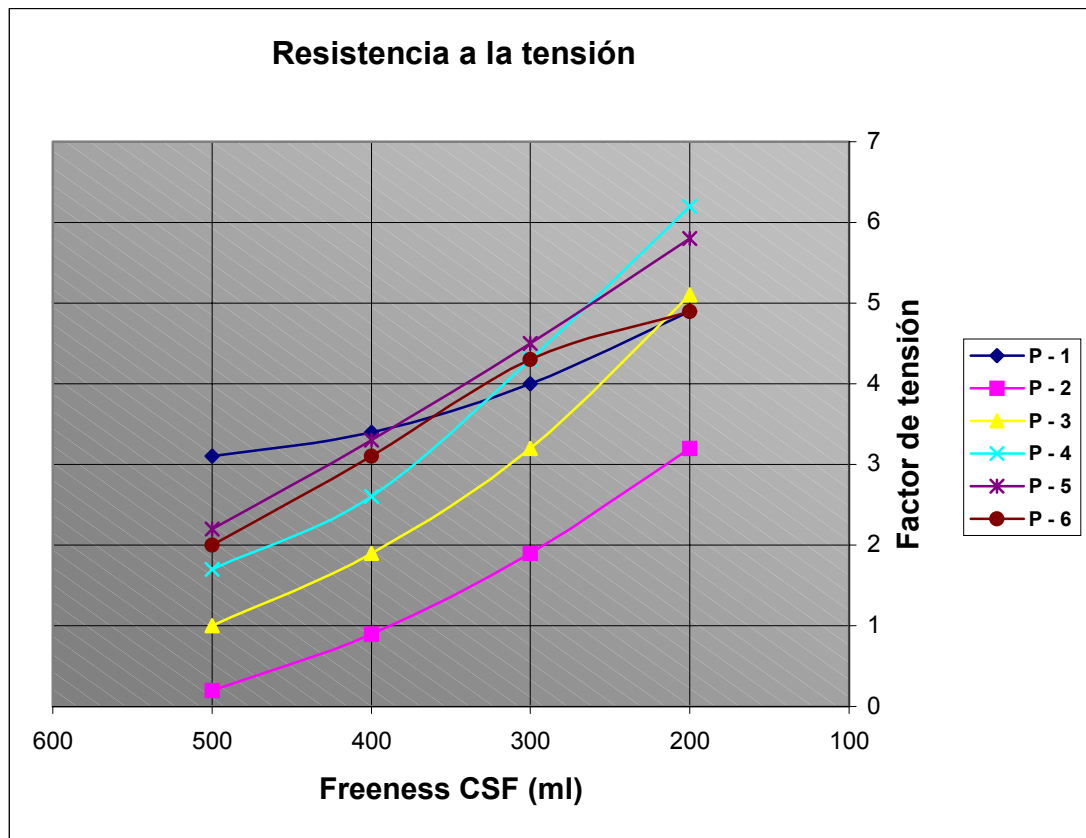


- La pulpa que presentó mayor resistencia a la explosión con aumento en el grado de refinó fue la P – 4.
- La temperatura alta (160°C) permite que la pulpa adquiriera mejores características con respecto a la explosión ; pero a medida que el tiempo de digestión aumentó, el valor de la propiedad se redujo. Los mejores valores de resistencia a la explosión se presentaron en la pulpa P – 2.
- Un aumento en la temperatura de cocción generó los mejores valores de resistencia a la explosión. Los incrementos en el tiempo de reacción causaron la disminución en el valor de dicha propiedad para la misma condición de temperatura.

- El comportamiento en la prueba de resistencia a la explosión se ajusta a la tendencia característica de un incremento en el valor de la propiedad, con aumento en el grado de refino.

RESISTENCIA A LA TENSION

Figura 17. Resistencia a la tensión vs. CSF



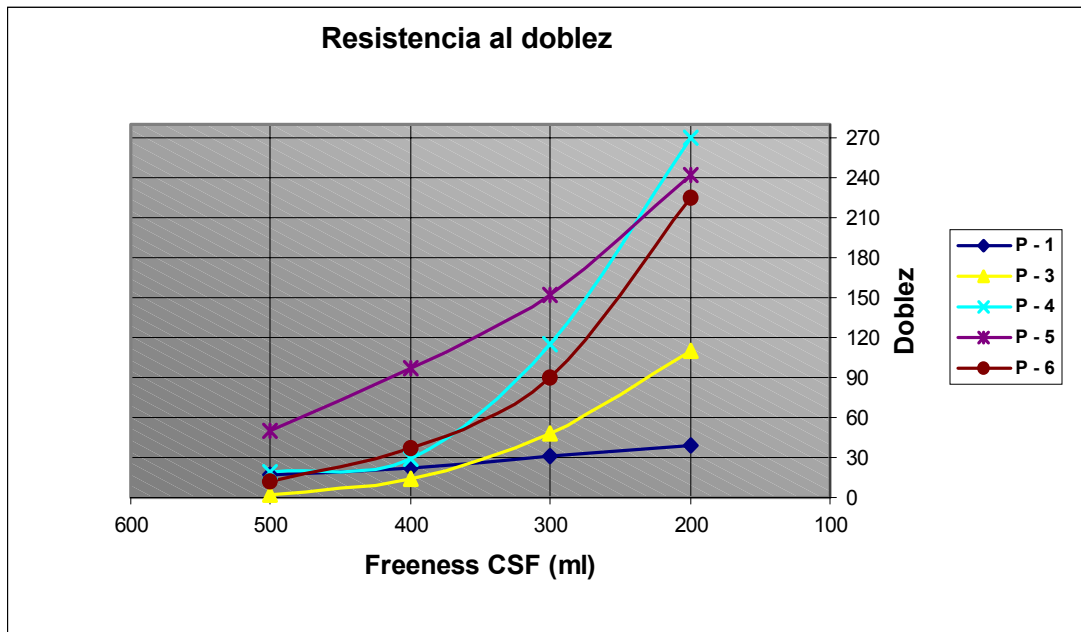
- La pulpa que presenta el comportamiento mas estable a través del proceso de refino respecto a la resistencia a la tensión fue la pulpa P – 1, aunque no tenga los mayores valores en esta propiedad ; ya que un aumento en la

temperatura de digestión y grado de refino conlleva a la tensión en el rango de 300 y 200 CSF.

- Debido a la deficiente calidad en la formación de las hojas correspondientes a la pulpa P – 2, los valores reportados en la medición de ésta propiedad fueron los mas bajos.
- El comportamiento presentado por las pulpas en lo que respecta a la resistencia a la tensión cumple la tendencia característica del incremento en el valor de la propiedad con el aumento en el grado de refino.

RESISTENCIA AL DOBLEZ

Figura 18. Resistencia al doblez vs. CSF



- Al igual que en el ensayo de resistencia al rasgado, para la pulpa dos solo fue posible evaluar la resistencia al dobléz en dos puntos de refino por la condición ya anteriormente mencionada.
- Las pulpas que representan los mejores valores de resistencia al dobléz corresponden a las que fueron sometidas a cocciones con temperatura de 140°C ; donde el aumento en el tiempo de cocción favoreció el mejoramiento de esta propiedad.
- Las pulpas obtenidas en las digestiones a 160°C presentaron los mas altos valores de resistencia al dobléz ; pero por el contrario al comportamiento presentado a 140°C, el aumento en el tiempo de digestión redujo el valor de la propiedad para el último punto de refino.
- El comportamiento ascendente en el valor de la propiedad de resistencia al dobléz presentado por las pulpas semiquímicas sulfito – soda se ajusta a la tendencia característica de aumentar el valor en la propiedad con incremento en el grado de refino.

CONCLUSIONES

Para las pulpas obtenidas mediante el proceso semiquímico al sulfito neutro empleando carbonato de calcio como tampón al 10%, temperatura máxima de 160 °C, tiempos de digestión de 60, 120 y 180 minutos, y tiempo de elevación de 60 minutos se concluyó que:

Las mejores pulpas obtenidas son la de mayor tiempo de cocción (180 minutos) correspondientes a las pulpa para concentraciones de 20 y 25% de sulfito b.f.s. Se obtuvieron rendimientos de 57 y 60%, valores aceptados para las tendencias esperadas en este tipo de pulpas, con porcentaje de sólidos totales para ambas pulpas de 54.6 %. Las pruebas fisicomecánicas para un freeness de 300 ml. varían como sigue: resistencia a la tensión : 7.4 - 7.7 Km., resistencia a la explosión: 6.4 – 7.3 de factor de explosión, resistencia al rasgado 80 – 82 de factor de rasgado, resistencia al dobléz 242 – 290 de factor de dobléz.

Las propiedades fisicomecánicas exceptuando el factor de resistencia al rasgado para las pulpas obtenidas aumentaron con el incremento en la concentración de sulfito, tiempos de digestión y de refino.

Los resultados obtenidos del análisis químico y las propiedades fisicomecánicas de las fibras presentan a la hoja de palma africana como un material con excelentes características para reemplazar a otros materiales celulósicos en la obtención de pulpas para la elaboración de papeles y cartones.

Para las pulpas obtenidas mediante el proceso semiquímico al sulfito neutro mediante el empleo de sulfito de sodio e hidróxido de sodio en proporciones (4% de NaOH y 18% de Na₂SO₃) constantes bajo condiciones de temperatura de 140 y

160°C y tiempo de digestión o cocción de 60, 90 y 120 minutos es posible concluir que:

Las pulpas obtenidas en el desarrollo de esta investigación, bajo las condiciones anteriormente mencionadas presentan un comportamiento característico y propio de materiales celulósicos apropiados para la elaboración de papel y cartones corrugados según los ensayos y pruebas de evaluación de propiedades fisicomecánicas de resistencia.

La tendencia a mejorar la resistencia a la explosión, tensión y doblez con un aumento en el grado de refino (disminución en el freeness) e incremento en la temperatura de digestión de las pulpas es una de las características presentadas por las pulpas semiquímicas sulfito – soda ; la cual se ajusta a las expectativas contempladas en el planteamiento de ésta investigación.

La resistencia al rasgado disminuyó con el aumento en el tiempo de refino en la holandesa para todas las pulpas semiquímicas sulfito – soda.

Los rendimientos que representan la conversión de materia prima base fibra seca b.f.s a pulpa semiquímica oscilaron entre valores del 59% al 78% se encuentran en el rango de porcentajes de rendimiento establecidos para clasificar un proceso como semiquímico al sulfito neutro reportados por la literatura utilizando como materia prima materiales maderables. Este resultado indica que es posible emplear un material fibroso como la hoja de palma africana para fines papeleros con valores aceptables en sus diversas propiedades; tanto de composición química como de valoración física.

Para el mayor grado de refino (200 CSF) y una temperatura de digestión de 140°C los mejores resultados obtenidos como resistencia al rasgado, a la explosión, al doblez y a la tensión; corresponden a las pulpas que estuvieron sometidas al tiempo de cocción mas extenso (120 minutos); contrario a los valores óptimos registrados para las pulpas a 160°C los cuales se presentaron para un tiempo de digestión de

60 minutos.

El tiempo de digestión mas bajo (60min) en los ensayos a 140°C para las pulpas semiquímicas sulfito – soda generó los valores más bajos en las propiedades fisicomecánicas anteriormente mencionadas; mientras que con un aumento en la temperatura de cocción los resultados fueron los mejores bajo esas condiciones

La resistencia al dobléz es la propiedad fisicoquímica que marca una gran diferencia entre las dos partes experimentales debido a la reología en la formación de la hoja en función de las fuerzas de interacción entre las fibras de las pulpas obtenidas, presentando mejores resultados en dicha propiedad aquellas en las que se empleó carbonato de calcio como tampón. En las demás propiedades no se observaron cambios significativos que permitan escoger cual de los dos procesos presenta mayor viabilidad.

Respecto a la etapa mecánica del proceso, los tiempos de refino que antecedian la formación de hojas fueron menores para las pulpas sulfito – carbonato, en comparación con los requeridos para las pulpas sulfito – soda.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la recuperación de los licores residuales en futuras investigaciones, además de realizar un aislamiento de los subproductos de lignina, carbohidratos y hemicelulosas como otras alternativas en la industria de alimentos para animales y derivados químicos.

Ya que se ha determinado que el parénquima de la hoja de palma africana puede ser una materia prima de buenas propiedades para la obtención de pulpas mediante el proceso semiquímico al sulfito neutro en comparación con otras fibras empleadas actualmente, podría desarrollarse un estudio de factibilidad técnico económico del montaje de una planta productora de pulpa y papel que emplee este desecho de la industria palmera, la cual; en la actualidad se encuentra en crecimiento en el ámbito regional y nacional.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRAUNS, Friedrich Emil y BRAUUNS, Dorothy Alexandra. The Chemistry of lignin. Academic Press Inc. London, 1996. p 802.
2. BRITT, K . Handbook of Pulp and paper technology. Reinhold Publishing Co. 1964.
3. CACERES, Lilia de. Métodos de análisis empleados en la industria papelera. 1ed. CICELPA -UIS.1978.
4. CACERES, Lilia de .Influencia de la antraquinona en la producción de pulpas alcalinas a partir de la leucaena leucacephala. CICELPA-UIS.1986. p 10-15.
5. CARTIER,N.,ESCAFFRE,P.,MATHEVET,F.,CHANZY,H. and VUONG,R. Structure and recycling of vegetable parchment: J. Tappi.77(5), (May)1994. p. 95-100.
6. CENIPALMA. Primer curso interamericano de palma de aceite. Bogota-Colombia.1996.p 69-73.
7. CONTRERAS, LOZADA Javier Rodrigo. Obtención de Carboximetil-Celulosa a Partir de la fibra de hoja de piña .Tesis.Escuela de química .2001 p92.
8. COPPER, C.L. y KOUBEK, E. A Kinetics Experiment to demonstrate the role of a catalyst in a chemical reaction. Journal Chemical Education. 75(1), 1998. p 88.
9. CURSO SOBRE QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DE LA LIGNINA INSTITUTO DE MADERA, CELULOSA Y PAPEL. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.1979.

10. D'ALMEIDA, MARIA LUIZA. CELULOSA E PAPEL. Tecnologia de fabricaçã da pasta celulosica. vol I. Centro técnico em celulose e Papel. Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo..Departamento de divulgação do IPT; 2ª edição. São Paulo.1988.p 30-34,45-58,74-75,391-400.
11. GONZALEZ, Guillermo. Evaluación de pulpas al sulfito obtenidas a partir de nueve maderas procedentes de la zona forestal de Caquetá Colombia. CICELPA. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1974.
12. JIMÉNEZ, Rodríguez Juan. Los controles en la fabricación del papel. 1ed Editorial Industrias Graficas.(Madrid) España.1970. p.121-127
13. EARL, Libby C. Ciencia y tecnología sobre pupa y papel. Tomo I: Pulpas. Editorial continental .México.1976. p79-91,175-184, 208, 349-386.
14. _____ . Tomo I: Papel. Editorial continental. México .1976. p465-495.
15. ESAU, Catherine. Anatomia vegetal. 2^{ed}. Casanova Barcelona.1972. p203-211.
16. FEDEPALMA. Abril-Mayo www.fedepalma.org.
17. FEDEPALMA. Revista Palmas. 4 (10).1989.p67-68.
18. _____ .1(10).1989.p13-19.
19. GIL, Nicolas Javier y GUTIERREZ, Marina. Tesis: Obtención y evaluación de pulpas a la soda-oxigeno a partir del bagazo de caña. .Ingeniería Química. Facultad de ciencias físico-mecánicas .1980.p14-36.
20. ICONTEC. Instituto colombiano de normas técnicas y de certificación (NTC).

21. JAPPE, N. A., TAPPI 41 N° 5.p 224-231.1958.
22. KEELER, E. L. TAPPI 38 N°9568. Sep. 1955.
23. OCAMPO, Duran Alvaro. Las Palmas, una Estrategia de Vida Tropical. Universidad de los Llanos. Fundación Horizonte Verde. Villavicencio (Colombia). Abril-Mayo. E-mail: alvarod@hilderstone.ac.uk
www.lead.virtualcentre.org.
24. QUESADA, H. German .Programa nacional de palma africana :Cultivo e industria de la palma aceitera (Helaseis Guineensis).Documento preliminar para la discusión que consiste en una guia preliminar para el productor. Ministerio de agricultura y ganaderia .Direccion de investigaciones. [mailto:%20asagrecia@grecia.infoagro.go.cr](mailto:asagrecia@grecia.infoagro.go.cr)
25. ROJAS, Orlando y SALAGER, Louis. Surface activity of bagasse lignin derivatives found in the spent liquor of soda pulping plants. Universidad de los Andes. .Mérida (Venezuela). Ingeniería química. J. Tappi March.1994.77.3 p 169-174.
26. RONDON, GARCIA Silvio. Fabricación de papeles para empaques a partir de bagazo de caña .Memorias Tomo I. V Congreso Internacional de ACOTEPAC. Medellín.1992.p52.
27. SANJUAN DUEÑAS, Rubén. Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. Guadalajara, Jalisco, México.1997 p 89,293.
28. SARKANEN,K. V.Y LUDWING, G. H. Lignins: Ocurrance, formacion, structure and reactions. Jhon Willey & sons, Inc. EEUU.1971.p 642.
29. SHEVCHENKO, Serger, W. Bailey George. Nanoscale morphology of lignins and their chemical transformation products. J Tappi March.1996.79.3.p227-236.

30. SCHIED, L. J. Paper trade journal 139, N°5. 28-30. Nov. 1955.
31. TAPPI. Standards suggested methods technical association of the pulp and paper industry.
32. VALLEJO, G. ICA. Palma africana: manual de asistencia técnica 22. Programa de oleaginosa perennes. Regional 5: Centro experimental de palmira. 1978. p25-53,67-97.