

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPAS INTEGRADAS DE FIBRA
SECUNDARIA Y RAQUIS DE HOJA DE PALMA AFRICANA A LA SODA PARA
SU INCORPORACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE EMBALAJES

JAVIER DAVID ANGARITA MARTÍNEZ
DIANA ISABEL DÍAZ DURÁN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE LAS INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2008

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPAS INTEGRADAS DE FIBRA
SECUNDARIA Y RAQUIS DE HOJA DE PALMA AFRICANA A LA SODA PARA
SU INCORPORACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE EMBALAJES

JAVIER DAVID ANGARITA MARTÍNEZ
DIANA ISABEL DÍAZ DURÁN

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico

Directora
LUZ AMPARO LOZANO URBINA
Química M.Sc

Codirector
JORGE ENRIQUE PULIDO FLÓREZ
Ingeniero Químico M.Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE LAS INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2008

Al Eterno.

*A Esperanza Martínez Vásquez, mamá.
Por hacerme partícipe de su sueño y no renunciar nunca a él,
a pesar del infinito sacrificio.*

*A Isabel
Por su amor y ayuda idónea.*

*A David Josué y Sara Isabel
Con amor años antes de conocerlos.*

*Con cariño y admiración a la memoria de
Zoraida Vásquez Hallado y Adán Martínez Arias
Luchadores infatigables.*

J.D. Angarita M.

*“Todo hombre es descendiente de todos los
reyes y esclavos que han existido.”*

*Khalil Gibran
(1883-1931)*

*A Dios por estar siempre conmigo.
A mi mami por el amor en cada uno de sus actos.
A mi papi por hacerme parte de su sueño.
A Leidy por escuchar mis ocurrencias y ser mi amiga.
A Monchito por darme su alegría.
A Javier por hacerme feliz.*

Diana Isabel Diaz Durán

“Si lo puedes soñar, lo puedes lograr.”

*Albert Einstein
(1879-1955)*

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Grupo de Investigación en Celulosa, Pulpa y Papel (CICELPA) bajo la dirección de la Doctora Luz Amparo Lozano por su apoyo, confianza y consejo. Al técnico paplero Jorge Alonso Barreto por su ayuda incondicional y enseñanzas no solo técnicas sino políticas y filosóficas. A David Ortiz por contagiarnos de su alegría. Asimismo a los Doctores Guillermo González Sierra y Jorge Enrique Pulido por su valiosa asesoría. A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por la excelente formación profesional.

De la misma manera y no menos importantes a nuestros padres por su respaldo y comprensión no solo durante el desarrollo del proyecto sino a lo largo de nuestra carrera. A nuestros amigos por alentarnos siempre. Y finalmente al primero de todos, a Dios por el camino que por su infinita sabiduría nos ha hecho recorrer.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	4
1.1 PAPEL RECICLADO, ANTECEDENTES Y TENDENCIAS	4
1.2 EFECTOS DEL RECICLAJE SOBRE LAS PROPIEDADES DEL PAPEL	5
1.3 CARTÓN ONDULADO Y EMBALAJES	7
1.4 PALMA DE ACEITE	8
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	10
2.1 MATERIALES	11
2.2 PULPEO	11
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARTÓN CORRUGADO	11
2.4 REPULPEO DEL CARTÓN CORRUGADO	12
2.5 MEZCLAS DE PULPAS Y EVALUACIÓN EN EL LABORATORIO	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13

3.1 CARACTERIZACIÓN DE CARTONES Y PAPELES COMPONENTES	13
3.2 PROPIEDADES DE LA PULPA RHPA	14
3.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE PULPAS	16
3.3.1 Efecto sobre el freeness	16
3.3.2 Efecto sobre la densidad	17
3.3.3 Efecto sobre los índices de tensión, explosión y rasgado	18
3.3.4 Efecto sobre las propiedades del cartón	19
3.4 CORRELACIONES PARA ESTIMAR PROPIEDADES DE CARTONES	21
4. CONCLUSIONES	24
5. RECOMENDACIONES	25
BIBLIOGRAFÍA	26
ANEXOS	32

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama de bloques de la metodología	10
<i>Figura 2.</i> Efecto del freeness sobre la densidad de la pulpa RHPA	15
<i>Figura 3.</i> Efecto del freeness sobre los índices de la pulpa RHPA	15
<i>Figura 4.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA al cartón tipo I sobre el freeness	16
<i>Figura 5.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA al cartón tipo II sobre el freeness	16
<i>Figura 6.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre la densidad en hojas de 60 g/m ²	17
<i>Figura 7.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre la densidad en hojas de 200 g/m ²	17
<i>Figura 8.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo I en hojas de 60 g/m ²	18
<i>Figura 9.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo I en hojas de 200 g/m ²	18
<i>Figura 10.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo II en hojas de 60 g/m ²	19
<i>Figura 11.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo II en hojas de 200 g/m ²	19
<i>Figura 12.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades del cartón tipo I: CLT, CMT, CFC (o CCT) y RCT	20
<i>Figura 13.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades del cartón tipo II: CLT, CMT, CFC (o CCT) y RCT	20

LISTA DE TABLAS

	pág.
<i>Tabla 1.</i> Caracterización de los cartones corrugados tipo I y II y sus papeles componentes	13
<i>Tabla 2.</i> Porcentajes (%) de cambio en las propiedades del cartón tipo I con la adición de pulpa RHPA	21
<i>Tabla 3.</i> Porcentajes (%) de cambio en las propiedades del cartón tipo II con la adición de pulpa RHPA	21
<i>Tabla 4.</i> Estimación de las propiedades de cartón corrugado a partir de las propiedades de sus papeles componentes usando correlaciones	22
<i>Tabla 5.</i> Proyección de las propiedades de un cartón corrugado conformado por los papeles obtenidos en cada porcentaje de mezcla	23
<i>Tabla 6.</i> Porcentaje (%) de cambio del SCT, FCT e índice de explosión estimado a través de correlaciones para los papeles componentes en cada porcentaje de adición respecto a las cajas de cartón originales	23

LISTA DE ANEXOS

	pág.
<i>Anexo A.</i> Descripción y clasificación del cartón corrugado	33
<i>Anexo B.</i> Tipos de cartón corrugado y configuración de las ondas o flautas	34
<i>Anexo C.</i> Pruebas físico-mecánicas aplicadas al cartón corrugado y sus papeles componentes	35
<i>Anexo D.</i> Distribución de áreas sembradas de palma de aceite en Colombia por zonas	37
<i>Anexo E.</i> Caracterización morfológica y taxonómica de la palma africana de aceite (<i>Elaeis guineensis</i>)	38
<i>Anexo F.</i> Capacidad producible de pulpa a la soda de RHPA en Colombia (proyecciones)	39
<i>Anexo G.</i> Lista de métodos estándar TAPPI utilizadas en el desarrollo experimental	40
<i>Anexo H.</i> Análisis químico de la fibra RHPA	41
<i>Anexo I.</i> Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades de las pulpas de cartón tipo I y II	42
<i>Anexo J.</i> Porcentaje de cambio (%) cambio en las propiedades del cartón reciclado con la adición de pulpa RHPA	43
<i>Anexo K.</i> Correlaciones para estimar el comportamiento de cartón corrugado y embalajes a partir de las propiedades de sus papeles componentes	44

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE PULPAS INTEGRADAS DE FIBRA SECUNDARIA Y RAQUIS DE HOJA DE PALMA AFRICANA A LA SODA PARA SU INCORPORACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE EMBALAJES*

AUTORES: Javier David Angarita Martínez
Diana Isabel Díaz Durán**

PALABRAS CLAVES: Cartón reciclado; Mezclas; Fibra virgen; Fibra de raquis de hoja de palma de aceite; Restauración; Propiedades mecánicas; Correlaciones; Cajas corrugadas.

Es bien sabido que las fibras recicladas producen papel con pobres propiedades mecánicas debido a la pérdida irreversible de la capacidad de hinchamiento y por tanto de la flexibilidad en húmedo con los niveles y duración del secado, i.e. *hornification*. Existen varios métodos para restaurar las uniones interfibrilares de la fibra reciclada tales como tratamiento mecánico, aditivos químicos, tratamiento químico, fraccionamiento, modificaciones en el proceso de fabricación y mezclas con fibra virgen.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de pulpa de raquis de la hoja de palma africana (RHPA) sobre las propiedades mecánicas estructurales de cartón comercial colombiano. En el laboratorio fueron hechas y evaluadas hojas estándar de prueba siguiendo los métodos estándar TAPPI con adiciones de 15%, 25%, 35% y 50% de pulpa RHPA. Las propiedades de estos papeles fueron evaluadas y comparadas con los controles de los papeles reciclados (0% RHPA). Las propiedades de resistencia de los papeles obtenidos fueron proyectadas usando correlaciones para estimar el comportamiento como cartón corrugado.

Las más importantes propiedades de resistencia mecánica de cartones RCT, CMT y CFC fueron incrementadas a partir del porcentaje de adición más bajo de pulpa RHPA (15%) debido al incremento de las uniones interfibrilares como resultado de la sustitución de fibra reciclada rígida por fibra virgen. El SCT estimado a partir de correlaciones mostró incrementos hasta del 54% y 22% para el cartón tipo I y II respectivamente respecto a los materiales originales. Por tanto, la pulpa RHPA podría ser mezclada con cartón comercial para mejorar las propiedades de resistencia mecánica del cartón reciclado.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Prof. Luz Amparo Lozano Urbina. Prof. Jorge Enrique Pulido Flórez.

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING AND EVALUATION OF INTEGRATED PULPS FROM SECONDARY FIBER AND AFRICAN OIL-PALM FROND RACHIS SODA PULP TO BE INCORPORATED IN THE PACKAGING PRODUCTION*

AUTHORS: Javier David Angarita Martínez
Diana Isabel Díaz Durán**

KEYWORDS: Recycled paperboard; Blending; Virgin fiber; Oil-palm frond rachis fiber; Upgrading; Mechanical properties; Relationship; Corrugated box.

It is well known that the recycled fibers produce paper with poor mechanical properties due to the irreversible lost of the swelling capacity and therefore in flexibility of wet pulp fibres with the level and duration of drying, i.e., hornification. There are several methods to recover the interfiber bonding of the recycled pulp such as mechanical treatments, chemical additives, chemical treatment, fractionation, papermaking process modification and blending with virgin fiber.

The aim of this study was to evaluate the effect of blending African oil-palm frond-rachis soda pulp (RHPA) and Colombian commercial paperboard on the structural mechanical properties of paper and paperboard. At the laboratory standard handsheets testing were made and evaluated following the TAPPI standard methods at ratios of 15%, 25%, 35% and 50% of RHPA pulp. The properties of these papers were compared to unblended recycled papers (0% RHPA). Strength properties of papers obtained were projected using relationship to estimate its behavior as corrugated board.

The most important mechanical properties of paperboard such as RCT, CMT and CFC were increased since the lowest addition percentage of RHPA pulp (15%) due to increase of interfiber bonding as a result of substitution of hornified secondary fibers with virgin fibers. The SCT estimated by relationship showed increases of up to 54% and 22% for the type I and II paperboard respectively in relation to the original materials. Therefore RHPA pulp could be blended with commercial paperboard to improve the mechanical strength properties of recycling paperboard.

* Degree Project.

** Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Prof. Luz Amparo Lozano Urbina. Prof. Jorge Enrique Pulido Flórez.

INTRODUCCIÓN

El sector de pulpa y papel ha tenido un gran dinamismo a la par con el desempeño de la economía nacional. En 2006 la industria del papel registró crecimientos en consumo y producción de los cuales el rubro más significativo, debido al volumen producido, fue el de papel para envolturas y empaques, que aumentó su producción en un 5% llegando a 458 000 toneladas. Debido al incremento en la necesidad de empaques de empresas nacionales y extranjeras que suplen el mercado nacional y de exportación, se espera un crecimiento aún mayor del sector de pulpa, papel y cartón, mostrando además una clara oportunidad de negocio en el reciclaje de papel, que en 2006 aumentó el 4% respecto al año anterior, recogiendo 581 300 toneladas de papel para reciclar, de las cuales el 60% correspondieron a cartón corrugado [1].

Las cajas fabricadas con cartón corrugado en el país, para el mercado interno, se identifican generalmente con la resistencia a la compresión vertical del cartón, encontrándose productos en un rango de resistencia entre 930 y 450 kgf/m para cartones de cara doble. Los valores más altos de resistencia corresponden a materiales con menor número de reciclados, mientras las resistencias más bajas son producto de la utilización de fibras que se encuentran en el límite de su vida útil después de seis e incluso ocho reciclados.

La materia prima básica para la producción de papel y cartón es la celulosa, la cual se obtiene del papel reciclado o de pulpa de fibras vegetales. El 51% de las fibras utilizadas hoy en Colombia provienen de papel reciclado [2]. Sin embargo el uso de fibra reciclada produce un papel con pobres propiedades mecánicas debido a la disminución de las uniones interfibrilares. La pulpa reciclada entonces, debe ser tratada para restaurar sus uniones de resistencia, para lo cual hay seis

métodos posibles: tratamiento mecánico, aditivos químicos, tratamiento químico, separación de fibras por tamaño, i.e., *fractionation*; modificaciones en el proceso de fabricación y mezclas con fibra virgen [3, 4].

Actualmente para recuperar las propiedades de los materiales la industria utiliza pulpas vírgenes a partir de maderas de bosques plantados, importación de pulpas vírgenes, especialmente de fibra larga o importación de cartones y papeles reciclados de alta calidad, i.e., *Old Corrugated Container* (OCC) [5]. Se plantea entonces la posibilidad de sustituir los materiales utilizados tradicionalmente para restaurar las propiedades mecánicas de las fibras recicladas, por las fibras de los residuos lignocelulósicos del creciente sector palmero.

En Malasia el Malaysian Palm Oil Board (MPOB), ha llevado a cabo investigaciones de producción de papel a partir de los racimos vacíos de la palma africana (EFB) con excelentes resultados. Por su parte en Colombia el Grupo de Investigaciones en Celulosa Pulpa y Papel (CICELPA), ha demostrado que el raquis de la hoja de palma africana (RHPA) tiene gran potencial para ser utilizado con fines papeleros [6-11]. La industria de la palma de aceite genera grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos, no sólo durante el beneficio sino durante el proceso de corte y cosecha. La mayoría de estos residuos son material vegetal como hojas, pedúnculos, raquis, nueces y cuesco [12]. Una hectárea del cultivo de palma africana en Colombia puede producir aproximadamente 3,8 toneladas de material fibroso seco de raquis de hoja. Actualmente los residuos de la palma regresan a los cultivos como abono orgánico, son utilizados como combustible o simplemente quemados en los campos. Sin embargo la implementación de estos subproductos en las plantaciones impide con el tiempo el libre drenaje del agua a las raíces de las plantas [9] y la quema, aunque es una opción económica, es también una fuente de contaminación ambiental [8].

Convertir los residuos lignocelulósicos de la industria palmera a pulpa para papel, sería una ventajosa forma de utilizarlos en aplicaciones de mayor valor agregado, que además de contribuir en la competitividad del sector palmicultor [13], establecería una nueva fuente continua y abundante de materia prima para la industria de pulpa, papel y cartón que contribuiría a aumentar los ciclos de reciclado de la fibra secundaria empleada en la producción de embalajes nacionales.

Este trabajo evaluó los efectos de la adición de pulpa de raquis de hoja de palma de aceite (RHPA), sobre las propiedades de resistencia físico-mecánicas en pulpas obtenidas a partir de cartón reciclado de denominaciones 620 y 720 kgf/m que, por las características de degradación de sus fibras, serían retiradas del mercado para ser dispuestas en rellenos sanitarios. Mejorar o por lo menos mantener las propiedades de resistencia de estos cartones, para su utilización en la producción de embalajes, puede contribuir a reducir el impacto ambiental y los costos de producción del sector papelerero. Además, sabiendo que las propiedades de resistencia de los papeles componentes del cartón son utilizados por la industria para estimar el comportamiento de los embalajes, bajo condiciones normales de carga, se utilizaron correlaciones ampliamente conocidas para proyectar el comportamiento como cartón corrugado de los papeles obtenidos de cada porcentaje de mezcla.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 PAPEL RECICLADO, ANTECEDENTES Y TENDENCIAS

La utilización de fibra secundaria en el proceso de fabricación del papel no es nueva, de hecho durante siglos fue la principal fuente de materia prima. En el siglo XIX la aparición de la pulpa de madera disminuyó su uso, llegando a representar solo el 10% de las fibras utilizadas a comienzos del siglo XX. Solo hasta 1960 la falta de madera en ciertas regiones para abastecer la creciente demanda, la aparición de nuevas tecnologías de depurado, la entonces incipiente preocupación por el tema ambiental y quizás lo más atractivo, el costo de la fibra reciclada, le devolvió a la fibra secundaria la importancia que hoy se le reconoce en la industria papelera como principal producto sustituto de la celulosa a nivel mundial [14, 15].

En 2005 el consumo global de papel reciclado fue de 177 millones de toneladas aproximadamente y para el 2015 se estima que el consumo de papel recuperado crecerá mucho más rápido (3,2% por año) que el consumo de papel de fibra virgen (2,2% por año) [16]. En el caso colombiano en 2006 se recolectaron 581 300 toneladas de papel para reciclar, cifra que aumentó el 4% respecto al año anterior, de las cuales casi 350 000 toneladas correspondieron a cartón corrugado [1]. Al mismo tiempo, el cartón reciclado nacional tuvo la más alta participación en la composición del consumo de fibras de este año con un 42,54% del consumo total en comparación con el 8,92% del papel reciclado importado [2].

A pesar de las grandes perspectivas para el negocio del reciclado, es necesario considerar ciertas ventajas y desventajas que presenta este producto. En cuanto a las ventajas de utilizar papel reciclado se tiene el ahorro de recursos naturales, menores cantidades de consumo de agua y energía en los procesos productivos,

la reducción de la contaminación y prolongación de la vida útil de los rellenos sanitarios*. Sin embargo el potencial de fabricación original de la fibra secundaria es afectado por los procesos de repulpeo, refinado, calandrado y secado [3, 4, 17-19], por lo tanto las propiedades del papel se deterioran a medida que aumentan los ciclos de reutilización.

1.2 EFECTOS DEL RECICLAJE SOBRE LAS PROPIEDADES DEL PAPEL

Para entender los efectos del reciclaje es importante entender que el papel y el cartón están hechos de fibra virgen o fibra reciclada y en muchos casos son una combinación de ambas. El término fibra virgen se refiere a fibra proveniente de árboles o plantas y puede contener hasta 20% de recortes de máquina [20]. No existe una definición mundialmente aceptada sobre papel reciclado, por tanto cada país fija su propia definición, un ejemplo de esto es la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) quien define el papel reciclado (fibra secundaria) como papel que contiene mínimo 30% de papel post-consumo [21].

Ahora bien, el papel es considerado como una estructura de fibras traslapadas en forma de diamante de tal manera que las áreas de cruce o enlace comparten o distribuyen los esfuerzos de tensión o compresión en un mismo plano. Las áreas de contacto entre fibras están orientadas en dirección perpendicular al plano de la hoja de papel, pues las fibras tienden a alinearse paralelamente al flujo de la pulpa en la máquina de papel. Por tanto existen tres direcciones en el papel, dirección máquina o longitudinal (MD), dirección contra máquina o transversal (CD) y dirección Z o espesor. Esta organización de la microestructura del papel y otros factores** hacen de este, un material con alto grado de heterogeneidad multidireccional, tanto así que las resistencias físicas del papel deben ser consideradas en función de su anisotropía [22].

* El espacio que hubiera ocupado en un relleno sanitario el papel reciclado (562 000 ton) durante 2005 en Colombia, sería de 1,5 millones de m³ [4]. Equivalente al volumen de 600 piscinas olímpicas.

** Compresión y tensión en húmedo, contracción durante el secado.

Las condiciones a las cuales las fibras son expuestas durante la producción de papel, almacenamiento, uso y reciclado, pueden inducir cambios en la morfología de la fibra, las características de superficie y la capacidad para ser usada en la formación del papel. Existen varios caminos para explicar estos cambios: rigidez de la fibra, i.e., *hornification*; disminución de los poros en la superficie, disminución en el área superficial externa, rotura y otros daños de las fibras [3, 4, 19].

Aunque no se ha llegado a un acuerdo en relación a su definición exacta el fenómeno conocido como *hornification*, implica una pérdida de conformabilidad y capacidad de hinchamiento, asociado al endurecimiento de las fibras durante el ciclo de humectación y secado del papel* [18, 19]. Una fibra de estas características no solo es más débil sino que también pierde su capacidad de enlace con otras fibras, lo cual reduce la resistencia de la red fibrosa y por tanto la del papel.

La pulpa reciclada entonces debe ser tratada para restaurar sus fuerzas de unión, para lo cual hay seis métodos posibles, uno de ellos es la mezcla con fibra virgen y su capacidad de restauración depende de la interacción entre los tipos de fibras [3, 4]. Las posibilidades de mejorar la resistencia del papel a través de mezcla de pulpas ha sido extensamente estudiada, pero el comportamiento de las mismas no está totalmente entendido [23].

En una mezcla de dos pulpas, existen tres diferentes tipos de uniones: uniones entre cada tipo de fibra y uniones entre los diferentes tipos de fibra. La formación de estas uniones y su impacto sobre la capacidad de carga de la red fibrosa no ha sido aún clarificada [23]. No obstante se sabe que las propiedades de resistencia de pulpas mezcladas no son necesariamente lineales con respecto a las

* Los puentes de hidrógeno que fueron formados entre las cadenas de celulosa en la pared celular durante el proceso de secado, se quiebran durante el proceso de rehumectación.

propiedades de resistencia de sus componentes. Desviaciones positivas o negativas de la linealidad han sido observadas dependiendo de la naturaleza de las pulpas puras y de la propiedad de interés específica [4].

1.3 CARTÓN ONDULADO Y EMBALAJES

Los embalajes son la más importante aplicación del cartón corrugado. Los paneles de cartón corrugado son estructuras tipo sándwich compuestos de dos placas planas llamadas *liners*, separadas por otra placa ondulada llamada corrugado medio o *medium*, por este motivo también se le denomina cartón combinado [24] (véanse los Anexos A y B).

En la industria convertidora de embalajes de cartón corrugado se conoce ampliamente que las propiedades de resistencia de las cajas son fiel reflejo de las propiedades y características de los papeles con que se fabricó su cartón corrugado componente. Cobra entonces crucial importancia el conocimiento detallado de todo comportamiento, respuesta y propiedades de resistencia de los papeles, y de cómo ciertas condiciones y características del ambiente afectan dichas propiedades, pues la consecuencia final será que la caja de cartón corrugado presente las mismas alteraciones de propiedades que experimentó el papel componente [25]. Por tal motivo se encuentran ensayos físicos para papeles componentes, para el cartón corrugado y para las cajas corrugadas (véase el Anexo C).

El comportamiento estructural de los embalajes o contenedores corrugados está, además, en función de numerosos factores que incluyen: la calidad de las fibras celulósicas constituyentes, condiciones de transporte y almacenamiento, i.e., apilamiento, vibraciones e impactos; y condiciones atmosféricas adversas [20, 24].

Para diseñar un empaque existe un gran trabajo de ingeniería, los materiales utilizados en la fabricación de embalajes deben ser aptos para soportar el proceso de fabricación y una vez fabricados desempeñar exitosamente las funciones de protección [26]. A nivel mundial la simplicidad y versatilidad que las cajas corrugadas representan para sus usuarios le han ayudado a mantener su posición como la forma más común de distribución y mercadeo en el mundo.

1.4 PALMA DE ACEITE

Colombia es el primer productor de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en América y el quinto a nivel mundial. Durante 2007 el área sembrada de palma de aceite llegó a 326 033 hectáreas y la superficie de producción fue de 204 648 hectáreas [27]. El gremio palmicultor ha proyectado contar con un área sembrada de 743 000 hectáreas para el año 2020 [28], esta expansión en las plantaciones de palma de aceite (véase el Anexo D) traerá consigo una gran cantidad de residuos vegetales aptos para la producción de papel.

Cada hectárea del cultivo de palma africana cuenta en promedio con 140 palmas, las cuales se podan dos veces por año produciendo en promedio 20 hojas por palma por año. El peso promedio del raquis de la hoja es de 2 kg b.s., de los cuales el 75% corresponde a material fibroso (libre de parénquima) [11, 29], por tanto se tendrían 3,8 toneladas de material fibroso por hectárea por año apto para la fabricación de papel (véanse los Anexos E y F).

Las aplicaciones industriales de los residuos de la industria de palma de aceite constituyen un enorme campo de investigación en el sureste asiático especialmente en Malasia quien es el segundo productor de aceite de palma*. Diferentes procesos de pulpeo y su efecto sobre las propiedades del papel [6, 7],

* Indonesia es el primer productor mundial de aceite de palma seguido por Malasia, Tailandia y Nigeria [30].

tecnologías de blanqueo, fortalecimiento de diferentes tipos de fibra secundaria [31, 32] y producción a escala comercial [33] entre otros temas [34], han sido estudiados extensamente por algunas Universidades Malasias** con el apoyo del gobierno nacional Malasio mediante la Intensificación de la Investigación en Áreas de Prioridad (IRPA) a través del MPOB, el Consejo de Aceite de Palma de Malasia (MPOC) y el Instituto de Investigación Forestal Malasio (FRIM).

Actualmente en China existe tecnología para procesar la fibra de los residuos de la palma de aceite y varios productos son comercializadas (artículos desechables, bandejas de huevos, envases industriales, plantillas para zapatos, toallas sanitarias, gorras y máscaras) [33, 35]. En Malasia se espera que empiece a operar la primera fábrica de pulpa y papel (mediante el proceso a la soda) a partir de racimos vacíos de fruto de la palma de aceite (Empty Fruit Bunch, EFB), la cual tendrá una producción de 30 000 ton.pulpa/año y producirá pulpa química no blanqueada y papel para envoltura [34], sin embargo su localización está aún en estudio [36].

En Colombia los residuos sólidos de la palma de aceite se utilizan para reincorporar nutrientes al suelo de las plantaciones [37], como combustible o simplemente se queman en los campos; las aplicaciones en pulpa y papel se ha limitado a las investigaciones desarrolladas por CICEIPA las cuales han incluido diferentes métodos de pulpeo y blanqueo [9-11, 38] y la posible utilización de este material en bandejas de huevos [39].

** Principalmente *Universiti Sains Malaysia* (Universidad de Ciencias de Malasia).

2.1 MATERIALES

La pulpa RHPA usada en este estudio fue obtenida a partir de raquis previamente reducido de tamaño*, secado y tamizado. Cajas de cartón corrugado doble cara y onda tipo A, en dos denominaciones comerciales (10 kg de cada una), 620 (cartón tipo I) y 720 kgf/m (cartón tipo II), fueron utilizadas para obtener la pulpa de fibra secundaria. Ambos materiales fueron suministrados por CICELPA.

2.2 PULPEO

Para obtener la pulpa RHPA se llevaron a cabo 8 digestiones utilizando en cada una 600 g b.s. de material fibroso. Las condiciones de pulpeo empleadas fueron las siguientes: hidromódulo 1:8,5; tiempo de elevación 60 minutos; tiempo de digestión 90 minutos; temperatura máxima 160 °C; concentración del licor 15% NaOH b.m.s. El material fue pre-impregnado con el licor durante 20 minutos antes de la digestión. Las digestiones fueron llevadas a cabo en un digestor M/K de acero inoxidable estacionario de 6 litros con recirculación externa. Al completar las cocciones, las pulpas fueron lavadas para retirar el licor residual. Una vez integradas las pulpas fueron refinadas a una consistencia (cs) de 3,12% en un desfibrador Sprout-Waldron de disco sencillo utilizando distancias entre discos entre 100 y 2 milipulgadas, hasta alcanzar un grado de refinado de 478 CSF (mL). Finalmente la pulpa integrada fue prensada, homogenizada y almacenada en una bolsa plástica para su posterior evaluación y uso.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARTÓN CORRUGADO

Se tomaron muestras de cartón corrugado de cada tipo (I y II) para evaluar las propiedades: peso básico, calibre, resistencia a la explosión, SCT y FCT. Luego

* Los raquis fueron astillados y molidos en un desintegrador y picador de cuchillas y martillos marca Cremasco DP-4 de 16 HP con gasolina como combustible. Este proceso separa la parte fibrosa del raquis y el parénquima.

se separaron las láminas del cartón para obtener los tres papeles componentes a los que se les evaluó: peso básico, calibre, resistencia a la explosión y a la tensión, RCT, CLT, CFC, y CMT, tanto en sentido transversal (CD) como en sentido máquina o longitudinal (MD).

2.4 REPULPEO DEL CARTÓN CORRUGADO

El cartón corrugado fue reducido de tamaño (3x3cm) y homogenizado, manteniendo separado cada tipo y conservando el porcentaje de cada papel componente del cartón. La etapa de repulpeo constó de una cocción de 30 minutos a 60°C con 0,5% NaOH b.m.s., posteriormente esta mezcla pasó a un pulper cónico (capacidad de 21 L, 3000 rpm) por 5 minutos a 7,5% cs. La pulpa obtenida fue lavada, prensada y homogenizada.

2.5 MEZCLAS DE PULPAS Y EVALUACIÓN EN EL LABORATORIO

En el laboratorio se hicieron mezclas de pulpa RHPA con pulpa de cada tipo de cartón reciclado, tanto tipo I como tipo II, en porcentajes de mezcla en peso de 15%, 25%, 35% y 50% de pulpa RHPA.

En la formadora TAPPI se hicieron hojas de prueba (*handsheets*) de 60g/m² para la evaluación de propiedades de pulpas: resistencia a la explosión, tensión y rasgado, y número Kappa; y 200g/m²* para la evaluación de propiedades de papeles para cartón: RCT, CLT, CCT, CMT e índices de resistencia. Las propiedades de resistencia fueron medidas para la pulpa RHPA pura en tres grados de refino, para los controles de cada tipo de cartón (0% pulpa RHPA) y para cada porcentaje de mezcla de pulpa RHPA con cada tipo de cartón corrugado siguiendo los métodos estándar TAPPI [40] (véase el Anexo G).

* Equivalente al promedio medido de los pesos básicos de cada papel componente de los cartones corrugados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE CARTONES Y PAPELES COMPONENTES

Tabla 1. Caracterización de los cartones corrugados tipo I y II y sus papeles componentes

Propiedad	Cartón corrugado		Papeles componentes						
	Tipo I	Tipo II	Tipo I			Tipo II			
			L ₁ [*]	L ₂	M	L ₁	L ₂	M	
Peso base [*] (g/m ²)	611,14	678,54	189,34	198,99	157,64	217,76	232,59	162,10	
Humedad (%)	7,04	6,90	6,10	5,95	6,06	6,21	6,27	6,08	
Calibre (mm)	3,60	3,68	0,362	0,375	0,297	0,393	0,432	0,296	
Densidad (g/cm ³)	-	-	0,523	0,531	0,531	0,554	0,538	0,548	
Gomas [*] (%)	1,99	1,95	-	-	-	-	-	-	
SCT (N/cm)	42,62	55,33	-	-	-	-	-	-	
FCT (KPa)	133,04	155,76	-	-	-	-	-	-	
Ind. [†] Explosión (KPa.m ² /g)	1,33	1,39	2,15	2,31	1,98	2,10	2,32	2,17	
RCT(KN/m)	MD	-	-	1,01	1,28	0,34	1,26	1,56	0,45
	CD	-	-	1,34	1,68	0,11	1,86	1,90	0,22
CLT(N)	MD	-	-	28,16	34,46	1,16	58,27	84,97	16,85
	CD	-	-	71,88	79,29	0,00	153,27	177,84	2,34
Ind.Tensión (N/m.g)	MD	-	-	34,40	38,29	26,31	34,70	37,80	31,32
	CD	-	-	20,69	22,03	15,37	22,33	23,23	18,54
CFC(N)	MD	-	-	-	-	161,24	-	-	240,66
	CD	-	-	-	-	137,33	-	-	176,05
CMT(N)	MD	-	-	-	-	28,17	-	-	58,06
	CD	-	-	-	-	30,02	-	-	51,27

^{*} L₁: Liner exterior; L₂: Liner interior; M: Medium. ^{*} En base a peso de material seco. [†] Ind: índice*.

Los fenómenos de debilitamiento y fallas en los papeles depende de la composición fibrosa de la pulpa empleada en la fabricación, el tipo de pulpeo, la dirección en que se aplican las cargas o esfuerzos de tensión y el número de reciclos soportados por las fibras.

La caracterización de los tipos de cartón corrugado y sus papeles componentes se muestra en la *Tabla 1*. El papel *medium* mostró propiedades mecánicas más bajas que los papeles *liner* debido principalmente a que después de la separación de los papeles componentes del cartón ondulado, el papel onda pierde significativamente

* Trabajar con índices reduce el efecto sobre las propiedades de resistencia del peso básico de las hojas. En términos generales el índice de una propiedad dada se calcula dividiendo el valor de la propiedad en el peso base del espécimen de prueba.

las resistencias puntuales transferidas por el arreglo senoidal durante la corrugación y la fabricación del cartón ondulado. Asimismo, el *liner* interior presentó mejores propiedades mecánicas que el *liner* exterior. Aunque ambos papeles contienen fibra larga, su concentración puede variar de una pulpa a otra dependiendo del criterio del fabricante. Además el *liner* exterior tiene tratamientos superficiales adicionales para mejora sus propiedades ópticas y desempeño durante la impresión, lo cual puede afectar sus propiedades de resistencia.

Es sabido que el reciclaje del papel reduce la capacidad de hinchamiento de las fibras, su flexibilidad y conformabilidad, así la densidad de los papeles componentes sugiere que las fibras del cartón tipo I se encuentran más “rígidas” que las fibras del cartón tipo II, debido al mayor número de reciclados soportados por la pulpa de fabricación; por tanto el cartón corrugado tipo I y sus papeles componentes presentan menores propiedades de resistencia que el cartón tipo II y sus papeles componentes.

3.2 PROPIEDADES DE LA PULPA RHPA

Estudios preliminares han mostrado las ventajas del pulpeo a la soda en fibras no madereras como RHPA en términos de rendimiento, número Kappa, impacto ambiental* e índices de resistencia del papel [6, 7, 32]; las condiciones de pulpeo empleadas están basadas en un estudio reciente [10] en función de estos últimos.

El rendimiento de la pulpa a la soda RHPA obtenida fue 66,2%, el consumo de NaOH 90,9%, el número Kappa** 63 y el contenido de lignina residual 9,5. El pulpeo disolvió el 37% de la lignina presente en la fibra RHPA. La composición química de la fibra RHPA empleada se encuentra en el Anexo H.

* El pulpeo con NaOH es más amigable con el ambiente que los procesos al sulfito y kraft [32].

** El número Kappa es una medida del contenido de lignina en la pulpa. Lignina (%) = 0,15 x No Kappa [40].

Las Figuras 2 y 3 muestran el efecto del refino sobre las propiedades de la pulpa RHPA. La acción mecánica del refino sobre las fibras húmedas genera cambios en la red fibrosa, promueven cambios en las propiedades de las fibras y por consiguiente en las propiedades de las hojas [41]. Además, los cambios físicos durante el refino permiten que los componentes químicos de la fibra* sean más accesibles afectando la distribución de estos componentes tanto en la superficie como en la pared de la fibra [42].

Figura 2. Efecto del *freeness* sobre la densidad de la pulpa RHPA

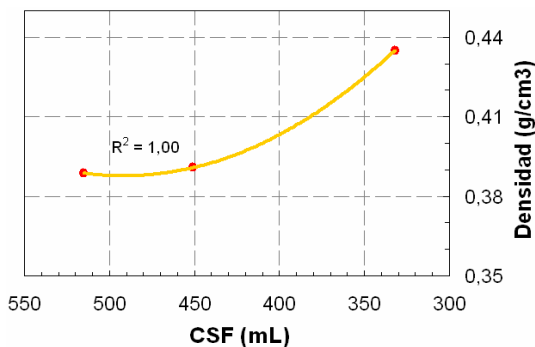
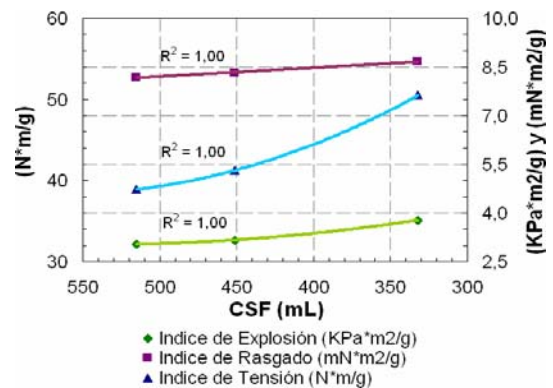


Figura 3. Efecto del *freeness* sobre los índices de la pulpa RHPA



El *freeness*** decrece con el tiempo de refino debido a: el incremento en la fibrilación externa, la fibrilación interna, i.e., hinchamiento; el acortamiento de fibra y la producción de finos [33, 41, 42]; incrementando el área de superficie hidrofílica resultando en más agua absorbida y retenida [32]. La fibrilación interna mejora la flexibilidad de las fibras y por tanto su conformabilidad en la red fibrosa, esto se manifiesta en un incremento de la densidad del papel. La densidad influye sobre casi todas las propiedades mecánicas, físicas y eléctricas [31, 33, 42]. Los índices de explosión, tensión y rasgado aumentaron para la pulpa RHPA debido al aumento de la densidad logrado con el refino.

* Especialmente la hemicelulosa y lignina, las cuales aportan la mayor cantidad de grupos ácidos ionizables.

** *Freeness* es un término sin traducción exacta al español usado ampliamente por papeleros para designar la capacidad de una pulpa para permitir el paso de agua a través de ella (grado de desgote o drenabilidad).

3.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE PULPAS

Los efectos de la adición de pulpa RHPA en pulpas de cartón tipo I y tipo II, son discutidos en función de las propiedades más importantes para papel y cartón.

3.3.1 Efecto sobre el freeness. El *freeness* en las mezclas de pulpas es medido por incrementos en el *Canadian Standard Freeness** (CSF) con la adición de pulpa RHPA. Los cambios pueden ser explicados en términos de las propiedades intrínsecas de la fibra reciclada con respecto a las propiedades de la pulpa virgen. Es sabido que la fibra secundaria pierde su capacidad de hinchamiento y flexibilidad debido a la remoción de la hemicelulosa** con los niveles, duración y ciclos secado-rehumectación, i.e., *hornification* [3, 4, 18, 19]. Después de la adición de fibras vírgenes, cuya estructura interna permanece en gran parte intacta, el hinchamiento podría tener lugar en un mayor grado y como consecuencia el CSF disminuye.

Figura 4. Efecto de la adición de pulpa RHPA al cartón tipo I sobre el *freeness*

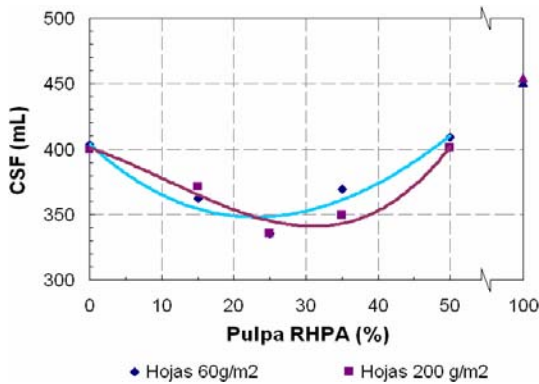
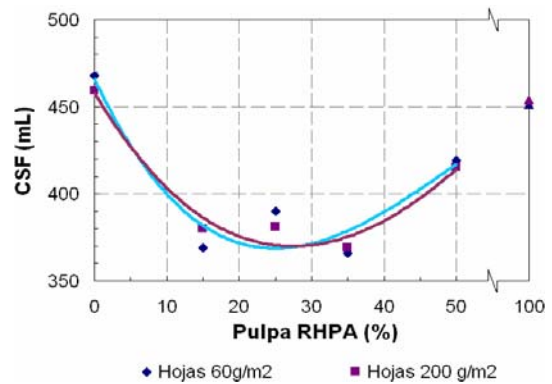


Figura 5. Efecto de la adición de pulpa RHPA al cartón tipo II sobre el *freeness*



Las Figuras 4 y 5 muestran que el CSF decrece con la adición de pulpa RHPA para los dos tipos de cartón, en ambos pesos básicos. El 50% de adición de pulpa

* *Canadian Standard Freeness* (CSF) es el método más utilizado en el mundo para estimar el alcance de la refinación de una pulpa a través de la medición de su capacidad de desgote.

** La capacidad de absorción de agua de las fibras es función del número de iones aportados por los ácidos carboxílicos presentes en la hemicelulosa [32].

RHPA produjo un incremento en el *freeness* debido al mayor número de uniones interfibrilares formadas entre fibras RHPA*, incrementando la fracción de vacíos y afectando el grado de entrecruzamiento de la red fibrosa.

3.3.2 Efecto sobre la densidad. La densidad del papel es una medida indirecta de la flexibilidad de la pulpa y conformabilidad de las fibras en la red fibrosa. Los incrementos en la densidad se asumen como consecuencia del reemplazo de fibras rígidas recicladas por fibras flexibles vírgenes de RHPA [31, 32]. La “rigidez” de las fibras recicladas produce hojas menos densas.

Figura 6. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre la densidad en hojas de 60 g/m²

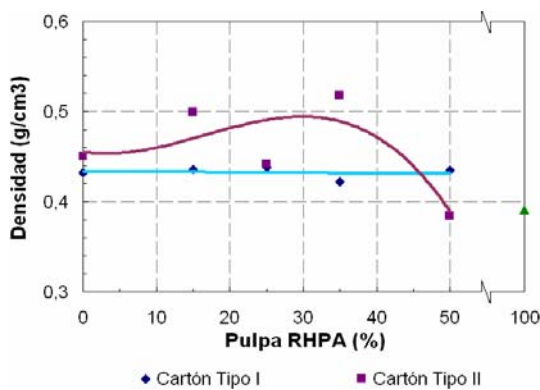
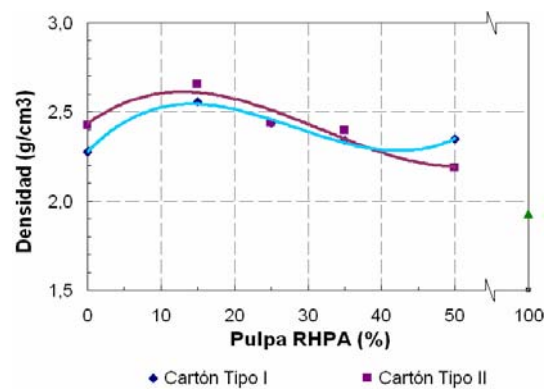


Figura 7. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre la densidad en hojas de 200 g/m²



Las *Figuras 6 y 7* muestran incrementos en la densidad de las hojas con la adición de pulpa RHPA para el cartón tipo I. Porcentajes de mezcla de pulpa RHPA superiores al 25% contribuyen al decrecimiento de la densidad para el cartón tipo II debido al mayor número de uniones interfibrilares** formadas entre fibras RHPA, lo cual reduce el efecto de sustitución de fibras recicladas “rígidas”.

* Tres tipos de uniones interfibrilares pueden ser identificadas para la mezcla de pulpa RHPA y fibra reciclada: RHPA-RHPA, reciclado-reciclado y RHPA-reciclado.

** Aquí las uniones interfibrilares se refiere a la zona donde dos fibras están tan cercanas que enlaces químicos y/o las interacciones de van der Waals ocurren o pueden ocurrir [41].

Las diferencias observadas en la densidad entre los tipos de cartón, el comportamiento de la densidad con la adición de pulpa RHPA y los resultados de la caracterización del cartón, indican que las fibras constituyentes del cartón tipo I han soportado un mayor número de ciclos o que los porcentajes de fibra reciclada en las pulpas de cada cartón son diferentes. Por tanto la adición de pulpa RHPA en el cartón tipo I proporciona un mayor potencial de restauración, por sustitución de fibras, que en el cartón tipo II; permitiendo que la densidad de las mezclas sea más alta que la densidad del control del cartón tipo I en cada porcentaje de adición, incluso 50%.

3.3.3 Efecto sobre los índices de tensión, explosión y rasgado. La resistencia a la tensión, a la explosión y al rasgado son las propiedades mecánicas más importantes del papel [20]. Las Figuras 8 y 9 muestran que los índices de resistencia de la mezcla de pulpas son más altos, en cada porcentaje de adición, que los índices del control del cartón tipo I (0% RHPA).

Figura 8. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo I en hojas de 60 g/m²

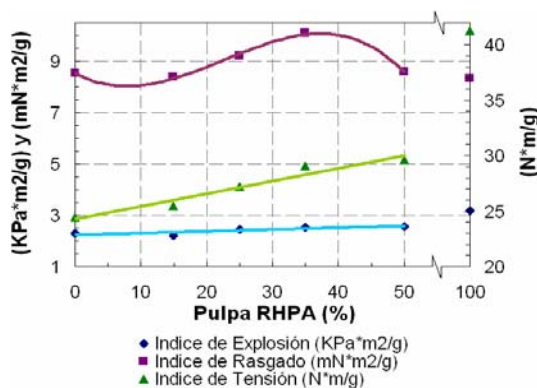
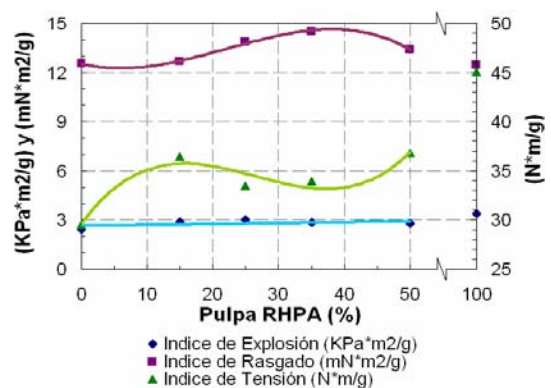


Figura 9. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo I en hojas de 200 g/m²



La resistencia de un papel depende tanto de la resistencia de las fibras individuales como de la resistencia de la red interfibrilar [41]. Una fibra flexible tiene más área superficial para uniones, por lo tanto la red fibrosa formada por este tipo de fibras mostrará mayor resistencia a los esfuerzos. Esto sugiere que

los incrementos en los índices de resistencia están relacionados con los incrementos observados en la densidad de la mezcla de pulpas que es una medida indirecta de la flexibilidad de sus fibras.

Figura 10. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo II en hojas de 60 g/m²

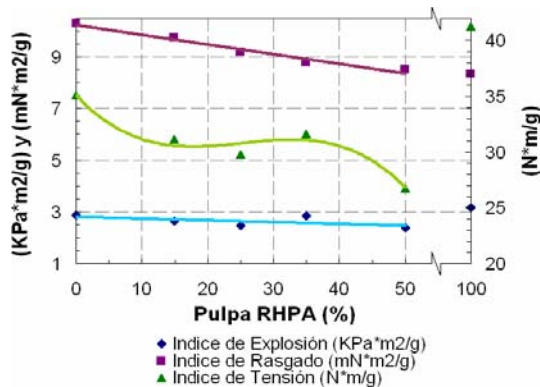
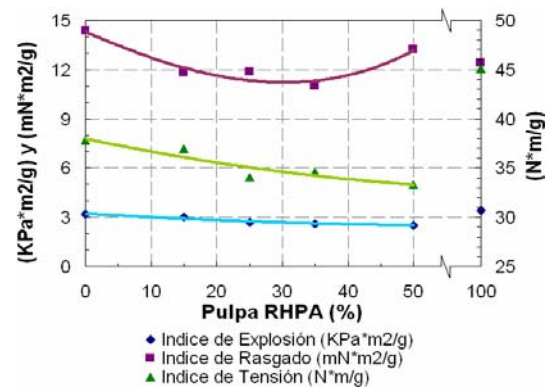


Figura 11. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre los índices del cartón tipo II en hojas de 200 g/m²



Por otro lado, la adición de pulpa RHPA en la pulpa del cartón tipo II no mostró incrementos en los índices de resistencia para ningún porcentaje (*Figuras 10 y 11*). Teniendo en cuenta que el mayor porcentaje de fibras que constituyen el cartón tipo II son relativamente más flexibles que las fibras RHPA (lo cual se vio al comparar tanto la densidad de estas pulpas puras entre sí, como el comportamiento de la densidad en las mezclas), se sugiere que la sustitución de fibra reciclada por fibra virgen RHPA, no produce un arreglo fibrilar en la red que favorezca la resistencia de este cartón.

3.3.4 Efecto sobre las propiedades del cartón. Los embalajes de cartón corrugado bajo efectos de compresión pueden presentar dos tipos de fallas: fallas en la resistencia a la compresión del cartón corrugado y/o fallas en la resistencia de sus papeles componentes [22]. La propiedad más importante de una caja corrugada, es la resistencia a la compresión (BCT), la cual determina el comportamiento de la caja en un medio dinámico [20]. El BCT puede ser estimado

a partir de ensayos en porciones de cartón corrugado (SCT o ECT) y a partir de ensayos en los papeles componentes (RCT, CLT, CFC y CMT).

Las Figuras 12 y 13 muestran que la adición de pulpa RHPA incrementó todas las propiedades estructurales de cartones excepto CLT*. Estos resultados demuestran que la red fibrilar formada por fibra reciclada y virgen ofrece gran resistencia a los esfuerzos de compresión para los dos tipos de cartón**.

Figura 12. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades del cartón tipo I: CLT, CMT, CFC (o CCT) y RCT

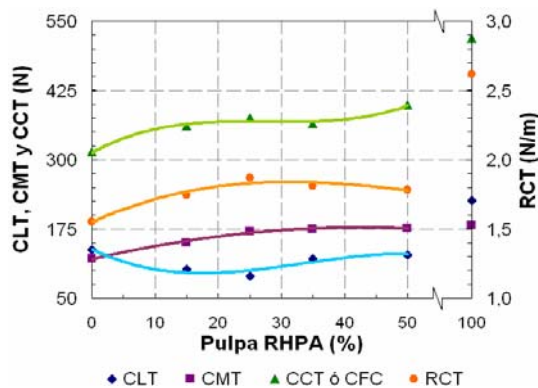
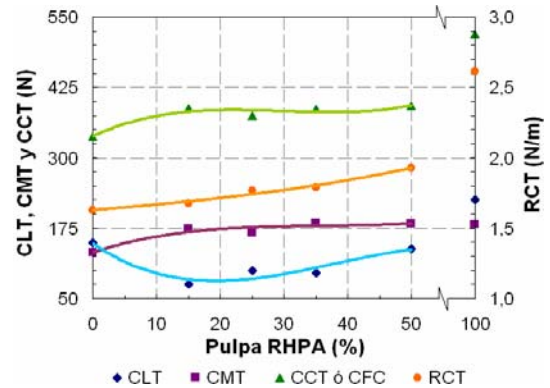


Figura 13. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades del cartón tipo II: CLT, CMT, CFC (o CCT) y RCT



Por otra parte, el mayor porcentaje de cambio en las propiedades del cartón tipo I respecto al cartón tipo II, con la adición de pulpa RHPA, coincide con el mayor potencial de restauración que la fibra virgen tiene sobre la fibra menos flexible del cartón tipo I (Tablas 2 y 3).

Las propiedades RCT, CMT y CFC se restauraron en cada tipo de cartón a partir de 15% de adición de pulpa RHPA. Cada propiedad mostró una máximo en diferentes porcentajes de adición. Estos valores se encuentran subrayados en las Tablas 3 y 4. Una completa información de todos los resultados obtenidos en este

* Debido a la alta dispersión que presentan los valores del ensayo CLT los papeleros prefieren los valores RCT.

** La anisotropía del papel hace necesario que se analice la resistencia de las hojas en función de la dirección en que se aplican los esfuerzos. Así, las pruebas practicadas al papel se dividen en esfuerzos de compresión (RCT, CFC, CMT y CLT) y esfuerzos de tensión (tensión y rasgado).

estudio, incluyendo los porcentajes de cambio de las propiedades respecto a sus controles en cada tipo de cartón, pueden verse en los Anexos I y J.

Tabla 2. Porcentajes (%) de cambio en las propiedades del cartón tipo I con la adición de pulpa RHPA

	Control *		Mezclas		
Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa de palma (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	2,275	<u>12,32</u>	7,16	2,78	3,26
RCT (KN/m)	1,55	12,26	<u>20,34</u>	16,46	14,55
CLT (N)	137,65	-26,00	-34,89	-11,95	-6,61
CMT (N)	120,99	24,08	41,25	44,54	<u>44,93</u>
CCT ó CFC (N)	313,36	14,83	19,87	16,31	<u>27,18</u>

* Corresponde al valor de la propiedad evaluada en la pulpa del cartón tipo I respecto a la cual se calcula el porcentaje de cambio en cada inserción.

Tabla 3. Porcentajes (%) de cambio en las propiedades del cartón tipo II con la adición de pulpa RHPA

	Control**		Mezclas		
Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa de palma (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	2,426	<u>9,36</u>	0,40	-1,34	-9,93
RCT (KN/m)	1,63	2,78	8,26	9,78	<u>18,41</u>
CLT (N)	149,59	-49,60	-33,39	-35,74	-7,67
CMT (N)	131,44	32,34	26,57	<u>40,44</u>	38,75
CCT ó CFC (N)	337,38	14,84	10,94	14,63	<u>16,22</u>

** Corresponde al valor de la propiedad evaluada en la pulpa del cartón tipo II respecto a la cual se calcula el porcentaje de cambio en cada inserción.

3.4 CORRELACIONES PARA ESTIMAR PROPIEDADES DE CARTONES

Existen correlaciones para estimar a partir del RCT, CFC y CLT de los papeles componentes la resistencia a la compresión vertical (ECT o SCT) del cartón corrugado. Asimismo el ECT se relaciona con la resistencia a la compresión dinámica de la caja (BCT) a través de la conocida ecuación de McKee [26, 40] (véase el Anexo K).

La *Tabla 4* muestra que el SCT calculado mediante correlaciones tiene una exactitud del 74% y 99% para las *ecuaciones 1 y 2* respectivamente, mientras el índice de explosión alcanza un 92% con la *ecuación 5*. El FCT calculado aquí, no guarda relación con el experimental debido a la pérdida de propiedades mecánicas sufrida por el papel *medium* después de la separación de las capas del cartón corrugado.

Tabla 4. Estimación de las propiedades de cartón corrugado a partir de las propiedades de sus papeles componentes usando correlaciones

Propiedad	Cartón tipo I		Cartón tipo II	
	Correlación	Experimental	Correlación	Experimental
SCT ⁽¹⁾ * (KN/m)	3,18	4,26	4,11	5,53
SCT ⁽²⁾ (KN/m)	4,31		5,56	
FCT ⁽³⁾ (KPa)	19,44	133,04	40,06	155,76
FCT ⁽⁴⁾ (KPa)	48,96		68,13	
Ind. Explosión ⁽⁵⁾ (psi)	127,68	117,96	148,11	137,97

* Los superíndices junto a la propiedad corresponden a la correlación empleada.

Teniendo en cuenta la exactitud de las correlaciones aquí empleadas y su amplia utilización en la industria, es posible proyectar las propiedades de compresión de los papeles obtenidos en cada porcentaje de mezcla, para estimar el comportamiento que tendrían si se utilizaran como cartón corrugado para la producción de embalajes. Debido al incremento observado en las propiedades para cartones de las pulpas mezcladas, las propiedades proyectadas para cartón superan las propiedades obtenidas experimentalmente para cada tipo de cartón corrugado en la caracterización. Los resultados se muestran en la *Tabla 5*.

La *Tabla 6* muestra que la adición de pulpa RHPA puede incrementar la propiedad SCT para los dos tipos de cartón a partir del 15% de adición de pulpa RHPA. Para el cartón tipo I se alcanzó un incremento hasta de 54% en la propiedad SCT con 25% de pulpa RHPA mediante la *ecuación 1*; porcentaje similar se obtuvo con la *ecuación 2* para el mismo contenido de fibra RHPA. Asimismo el 25% de adición de RHPA mostró el mayor incremento en el índice de explosión con 57%.

Tabla 5. Proyección de las propiedades de un cartón corrugado conformado por los papeles obtenidos en cada porcentaje de mezcla

Cartón	Pulpa RHPA (%)	SCT ⁽¹⁾ (KN/m)	SCT ⁽²⁾ (KN/m)	FCT ⁽³⁾ (KPa)	FCT ⁽⁴⁾ (KPa)	Ind. Explosión ⁽⁵⁾ (psi)
Tipo I	0	5,45	5,61	83,48	108,50	145,78
	15	6,11	6,28	103,58	127,18	175,14
	25	6,56	6,62	117,92	140,50	185,70
	35	6,35	6,42	120,67	143,07	176,54
	50	6,25	6,66	120,98	143,35	166,99
Tipo II	0	5,72	5,92	90,69	115,20	192,80
	15	5,88	6,40	120,02	142,47	184,02
	25	6,20	6,44	114,79	137,59	166,99
	35	6,28	6,57	127,37	149,29	159,05
	50	6,76	6,84	125,84	147,86	156,12

Tabla 6. Porcentaje (%) de cambio del SCT, FCT e índice de explosión estimado a través de correlaciones para los papeles componentes en cada porcentaje de adición respecto a las cajas de cartón originales

Cartón	Pulpa RHPA (%)	SCT ⁽¹⁾ (%)	SCT ⁽²⁾ (%)	FCT ⁽³⁾ (%)	FCT ⁽⁴⁾ (%)	Ind. Explosión ⁽⁵⁾ (%)
Tipo I	0	27,93	31,69	-37,25	-22,62	23,58
	15	43,43	47,42	-22,14	-5,40	48,47
	25	<u>53,99</u>	55,40	-11,37	6,88	<u>57,43</u>
	35	49,06	50,70	-9,30	9,24	49,66
	50	46,71	<u>56,34</u>	-9,06	<u>9,50</u>	41,56
Tipo II	0	3,44	7,05	-27,19	-26,04	<u>39,74</u>
	15	6,33	15,73	-8,36	-8,53	33,38
	25	12,12	16,46	-11,72	-11,67	21,03
	35	13,56	18,81	-3,64	-4,15	15,28
	50	<u>22,24</u>	<u>23,69</u>	-4,62	-5,07	13,16

El cartón tipo II presentó el mayor incremento en el SCT con 50% de pulpa RHPA, el porcentaje de cambio del índice de explosión disminuyó con cada porcentaje de adición de pulpa RHPA superando en todos los casos el valor de referencia. Aunque el FCT proyectado no superó la propiedad medida para el cartón tipo II, el incremento cercano al 7% logrado con 25% de pulpa RHPA en el cartón tipo I no debe ser despreciado.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades de resistencia a la compresión de los cartones reciclados fueron incrementadas con la adición de la pulpa RHPA a la soda. Los cambios sobre las propiedades variaron dependiendo de las propiedades individuales, el porcentaje de adición y el tipo de cartón usado y no estuvieron en todos los casos linealmente relacionados con las propiedades de la pulpa RHPA.

Las propiedades más importantes para cartones: RCT, CMT y CFC, aumentaron para los dos tipos de cartones empleados, a partir del porcentaje de adición más bajo de RHPA (15%). Para el cartón tipo I se lograron incrementos hasta de un 20% en el RCT; 45% en el CMT y 27% en el CFC. El cartón tipo II presentó incrementos máximos en el RCT de 18%, 40% en el CMT y 16% en el CFC.

El SCT estimado a partir de correlaciones indica que la adición de 25% de pulpa RHPA puede incrementar hasta un 54% esta propiedad para el cartón tipo I respecto a las cajas originales. Para el cartón tipo II se puede lograr un incremento hasta del 22% en el SCT con 50% de adición de RHPA.

Es técnicamente factible utilizar la fibra RHPA en inserciones para mejorar las propiedades mecánicas estructurales de cartones de denominación comercial 620 y 720 kgf/m, aumentando así la vida útil de los embalajes y aplazando su disposición final en los rellenos sanitarios. Además, el valor agregado dado a los residuos de la palma africana a través de esta aplicación alternativa, puede contribuir a la competitividad de la cadena productiva del aceite de palma.

5. RECOMENDACIONES

Difundir los resultados obtenidos en este trabajo entre los cultivadores y productores de aceite de palma así como en el sector papelerero colombiano para promover la participación activa de investigadores, empresarios e inversionistas en esta alternativa de utilización de los residuos sólidos de la palma africana.

Fabricar a escala industrial papeles a partir de pulpas mezcladas de RHPA y cartón reciclado, para evaluar su comportamiento como papeles *liner* y *medium*. Asimismo evaluar la conveniencia económica de implementar esta alternativa respecto a las mezclas tradicionales usadas hoy por la industria papelerera en la línea convertidora de cartón corrugado para embalajes.

Realizar un estudio de factibilidad económica del montaje de una planta productora de pulpa RHPA a la soda sin blanquear, en el nororiente Colombiano aprovechando el liderazgo de esta región (zona central) en el cultivo de palma de aceite y las perspectivas nacionales respecto al crecimiento del mercado del papel para embalajes, el uso de fibra reciclada en la industria papelerera y el incremento en las áreas sembradas de palma de aceite para suplir la creciente demanda de biocombustibles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] REVISTA DINERO. Pulpa papel y cartón [en línea]. <http://www.dinero.com/noticias-caratula/pulpa-papel-carton/34885.aspx> [citado en 25 de mayo de 2007]
- [2] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). Documento sectorial, cadena pulpa, papel, cartón, industria gráfica, industria editorial: agenda interna para la productividad y la competitividad. Bogotá: DNP, 2007. p.11.
- [3] HUBBE, M. A., VENDITTI, R. A., ROJAS, O. J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? En: BioResources Online Journal. Vol.2 (4) (November, 2007); [en línea]. http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_02/BioRes_02_4_739_788_Hubbe_VR_Recycling_Cellulosic_Fibers_Review.pdf
- [4] MINOR James L. SCOTT C. Tim, ATALLA Rajai H. Restoring bonding strength to recycled fibers. En: Recycling symposium (February: 1993: New Orleans). TAPPI Press; [en línea] <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1993/minor93a.pdf>
- [5] SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA. Reciclaje [en línea]. <http://www.smurfitkappa.com.co/DropdownMenu/Products/Resources/Recycling/> [citado en 2006]
- [6] WAN ROSLI, W.D., LAW, K.N., ZAINUDDIN, Z., ASRO, R. Effect of pulping variables on the characteristics of oil-palm frond-fiber. En: Bioresource Technology [en línea]. Vol.93 (2004); p.233-240. Disponible en SCIENCE DIRECT Database.
- [7] WAN ROSLI, W.D., ZAINUDDIN, Z., LAW, K.N., ASRO, R. Pulp from oil palm fronds by chemical processes. En: Industrial Crops and Products [en línea]. Vol.25 (2007); p.89-94. Disponible en SCIENCE DIRECT Database.
- [8] LAW, Kwei-Nam, JIANG, Xingfen. Comparative papermaking properties of oil-palm empty fruit bunch. En: Tappi Journal. Vol.84, No.1 (January, 2001); p.95.
- [9] ROJAS MAYORGA, Emilce, GOMEZ BECERRA, Didier, Obtención y evaluación de pulpas semiquímicas al sulfito neutro a partir de la hoja de palma africana. Bucaramanga, 2004, 81 h. Trabajo de grado (Ingeniero

Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química.

- [10] RIOS MALDONADO Sandra M, VESGA RUEDA, Stella. Obtención y evaluación de pulpa a partir del raquis de la palma africana mediante los procesos soda y soda-AQ. Bucaramanga, 2008, 109 h. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.
- [11] VALDIVIESO GELVEZ, Luis Gabriel. Obtención de pulpas a la soda en frío a partir de la hoja de palma africana, blanqueo y evaluación. Bucaramanga, 2003, 91 h. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.
- [12] CONVENIO INTERINSTITUCIONAL DE COOPERACIÓN UPME – INDUPALMA – CORPODIB. Programa estratégico para la producción de biodiesel – combustible automotriz- a partir de aceites vegetales. Bogotá: CORPODIB, 2003. 445 p.
- [13] GARCÍA, Jesús Alberto. Programa de plantas de beneficio. En: CONGRESO NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE (36°: 2008: Bucaramanga). XXXVI Congreso Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite Disponible en línea: http://www.fedepalma.org/congreso/2008/presentaciones/6_Plantas_Beneficio.pdf. Bucaramanga: Fedepalma, 2008.
- [14] SANJUAN D., Rubén. Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. México: Universidad de Guadalajara, 1997. 293 p. ISBN 968-7310-89-8
- [15] SÉMBLER, José I., MELLER, Patricio, VIAL, Joaquín. Un análisis econométrico del consumo mundial de celulosa. Santiago de Chile, 2006, 58 h. Versión resumida de la tesis (Magíster en Economía Aplicada). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Industrial. Disponible en línea: http://www.webmanager.cl/prontus_cea/cea_2006/site/port/portada.html
- [16] KILPI, Soile. Continued growth for recovered paper. En: Tappi and Pima Solutions: for people, processes and paper. Vol. 89, No.7 (July, 2006); p.32.
- [17] WATERHOUSE J.F, OMORI, K. The effect of recycling on the fines contribution to selected paper properties. Georgia, September 1993. Institute of Paper Science and Technology. Disponible en línea: <http://smartech.gatech.edu/dspace/bitstream/1853/2032/1/tps-477.pdf>

- [18] SUTJIPTO, Erik R, LI, Kecheng, PONGPATTANASUEGSA, Saisanee, NAZHAD, Mousa M. Effect of recycling on paper properties. En: Tappsa Journal. (Enero, 2008) [en línea] http://www.tappsa.co.za/archive3/Journal_papers/Effect_of_recycling_on_paper_p/effect_of_recycling_on_paper_p.html
- [19] NAZHAD, Mousa M, PASZNER, Laszlo. Fundamentals of strength loss in recycled paper. En: Tappi Journal. Vol.77, No.9 (September, 1994). p. 171-179
- [20] SCHUENEMAN, Herbert H, CP-P, MH. Paper and corrugated paperboard: The who, what, when, where, why, and how of the most commonly used packaging material. San José, California, 2008. WESTPAK, INC. [en línea] http://www.westpak.com/techpapers/05_paper_corrugated_paperboard_who_what_when_where.pdf
- [21] Environmental Protection Agency. Comprehensive procurement guidelines, definitions, specifications, and other guidance. [en línea] <http://www.epa.gov/cpg/products/define.htm> [citado en Marzo de 2006].
- [22] ESCOTO G, Teófilo. Control de calidad en pulpas, papeles de embalajes y cartones: aspectos fundamentales y el concepto de calidad total. México: Departamento de madera celulosa y papel. Universidad de Guadalajara. 1996. p 283.
- [23] KARLSSON, Hanna. Some aspects on strength properties in paper composed of different pulps. Sweden, 2007, 56h. Licentiate thesis. Karlstad University Studies. Faculty of technology and Science Chemical engineering. [en línea] http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kau_diva-1196-1_fulltext.pdf
- [24] GILCHRIST A.C, SUHLING J.C. Nonlinear finite element modeling of corrugated board. En: Mechanics of cellulosic materials, ASME. AMD-Vol. 231/MD-V85 (1999); [en línea] <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1999/gilch99a.pdf>
- [25] FUENTES ALBORNUZ Alejandro. Comportamiento de cajas según componentes. En: VAS, Revista de envase y embalajes de Chile. No.83 (Septiembre, 2005); p 31-34. [en línea] <http://www.cenem.cl/vas/83/Cartron%20corrugado.pdf>
- [26] TAGLE Solórzano, J.L. Papeles Componentes del Cartón Ondulado. En: Investigación y técnica del papel. Tomo 19, No.73, (Julio, 1982); p. 269-287.

- [27] FEDERACION NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE- (FEDEPALMA). UNIDAD ECONOMICA Y COMERCIO DE FEDEPALMA. Balance económico del sector palmero Colombiano en 2007. FEBRERO DE 2008, p.1.
- [28] FEDERACION NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE- FEDEPALMA. [en línea] <http://www.fedepalma.org>
- [29] ESPITALETA CASAS, Liliana A., RODRIGUEZ SILVESTRE, Andrea D. Obtención de etanol combustible a partir del parénquima de la hoja de la palma africana por hidrólisis oxidativa y fermentación *Zymomonas mobilis*. Bucaramanga, 2004, 73 h. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química.
- [30] MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO, PROEXPORT COLOMBIA. Colombia: una oportunidad de oro en biocombustibles. (Julio 2008) [en línea] <http://www.proexport.com.co/vbecontent/library/documents/DocNewsNo5709D ocumentNo7604.PPT>
- [31] RUSHDAN, Ibrahim. Structural, mechanical and optical properties of recycled paper blended with oil palm empty fruit bunch pulp. En: Journal of oil Palm Research. Vol.15, No.2 (December, 2003); p.28-34.
- [32] WAN ROSLI, W.D., ZAINUDDIN, Z., LAW, K.N., ASRO, R. Upgrading of recycled paper oil palm fiber soda pulp. En: Industrial Crops and Products [en línea]. No.21 (2005); p.325-329. Disponible en SCIENCE DIRECT Database.
- [33] RUSHDAN I., LATIFAH J., HOI W.K., MOHD NOR M.Y. Commercial-scale production of soda pulp and medium paper from oil palm empty fruit bunches. En: Journal of Tropical Forest Science [en línea]. Vol.19, No.3 (Julio, 2007); p.121-126. Disponible en PROQUEST AGRICULTURE JOURNALS Database.
- [34] TANAKA, Ryohei, MORI, Yutaka, KOSUGI, Akihiko. Utilization of oil palm empty fruit bunches as 'solid materials'. En: Biomass-Asia Workshop (3^o: 2006: Tokyo). 3th Biomass-Asia Workshop [en línea] <http://www.biomass-asia-workshop.jp/biomassws/03workshop/material/tanaka.pdf>
- [35] CHINA PULP MOLD WORLD. Palm fibre molding technology [en línea]. <http://www.pulpmould.cn/infDetail.asp?id=59&tn=inf> [citado en 26 Septiembre 2008]
- [36] IBRAHIM, Shamsudin, AL-KARKHI, Abbas F.M., KADIR, Omar A. The location problem for a pulp and paper manufacturing facility in northern

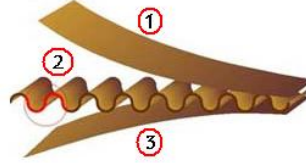
peninsular Malaysia. En: International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT) (2008: Penang). ICERT [en línea] http://www.ppti.usm.my/ICERT_website/Proceeding/ICERT%2008%20PROC EEDINGS-Part%201/4-environmental%20technology%20&%20management/67.pdf

- [37] SANTOS RÍOS, Gloria Inés. Diagnostico y gestión de los residuos sólidos generados por el proceso de extracción de aceite crudo de palma africana en palmas oleaginosas Bucarelia S.A. Bucaramanga, 2007, 84 h. Monografía (Especialista en Química Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.
- [38] CÁCERES, Hernán. Ensayos preliminares sobre la producción de pulpas papeleras a partir del raquis de la palma africana. Bucaramanga: CICELPA, 1978.
- [39] GELVEZ MENDEZ, César Augusto. Obtención y evaluación de pulpas semiquímicas a la soda fría a partir de la hoja de palma africana para su posible incorporación en la elaboración de bandejas para huevos. Bucaramanga, 2003, 48 h. Trabajo de grado (Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.
- [40] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI Test methods. Atlanta: TAPPI Press.1994. 1400 p.
- [41] HILTUNEN, Eero. On the beating of reinforcement pulp. Espoo (Finland), 2003, 65 h. Doctoral thesis (Doctor of Science in Technology). Helsinki University of Technology. Department of Forest Products Technology. Laboratory of Paper Technology.
- [42] NISHI, K. Bhardwaj, VIET, Hoang, KIEN, L. Nguyen. A comparative study of the effect of refining on physical and electrokinetic properties of various cellulosic fibres. En: Bioresource Technology [en línea]. No.98 (2007); p.1647–1654. Disponible en SCIENCE DIRECT Database.
- [43] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Edge crush short column test. En: Technical information sheets. Serie D100-03000, Vol.1 (1991); (TIS 0304-09).
- [44] International Trade Center (UNCTAD/WTO). Technical notes on the use of corrugated paperboard boxes: export packaging, note No 13 (1993). [en línea] <http://www.intracen.org/Tdc/Export%20packaging/EPN/English/ePN13e.pdf>
- [45] RAYGADA, Z., Ruperto. Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera. Lima: Asociación de promoción agraria, 2005. 109 p. ISBN 9972-2715-0-1.

- [46] VILLAR, Juan Carlos, REVILLA, Esteban, *et. al.*, Límites del reciclado del papel. En: VII Congreso Nacional del Medioambiente (2006: Madrid). [en línea] <http://www.conama.org/documentos/140.pdf>
- [47] LAUFENBERG, Theodore L. Packaging and lightweight structural composites. En: ROWELL, Roger M. *et.al.* Paper and composites from agro-based resources. Miami: CRC Press, Inc., 1997. p. 337-349.
- [48] KHANTAYANUWONG, Somwang, KEAWMANEE, Supharp, CHUSRI, Alisa. Relationships between the changed apparent density of recycled handsheets and their mechanical and physical properties. En: Kasetsart Journal (natural Science). Vol.40, No.2. (April-June, 2006). p. 541-548.
- [49] WEIGEL, Timothy G. Modeling the dynamic interactions between wood pallets and corrugated containers during resonance. Blacksburg (Virginia, USA), 2001, 153 h. Doctoral thesis (Ph.D. in Wood Science and Forest Products). Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [50] KORAN, Zoltan. The effect of density and CSF on the tensile strength of paper. En: Tappi Journal. Vol.77, No.6 (June, 1994); p.167-170.
- [51] GURNAGUL, Norayr. Sodium hydroxide addition during recycling: effects on fiber swelling and sheet strength. En: Tappi Journal. Vol.78, No.12 (December, 1995); p.119-124.
- [52] LAW, K.N., WAN ROSLI, W.D., GHAZALI, A.. Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty fruit bunch (OPEFB). En: Bioresources Online Journal. Vol.2, No.3 (August, 2007); [en línea] http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_02/BioRes_02_3_351_362_Law_WG_OilPalm_EmptyFruitBunch.pdf

ANEXOS

Anexo A. Descripción y clasificación del cartón corrugado [25]



Cartón corrugado

El cartón ondulado está compuesto por dos tipos de papeles, el papel liner o caras del cartón y el papel ondulado o médium. Normalmente el papel liner es el que protege la capa de ondulado al cual va adherido por medio de un adhesivo (almidón o silicato de sodio) integrando de esta manera las capas de ondulado y liner necesarias para fabricar los diferentes tipos o clases de cartones (bicapa y/o multicapa).

Papel liner o cara.

Se fabrica fundamentalmente a partir de pulpa Kraft de pino para impartirle buenas propiedades fisicomecánicas, pudiendo componerse de capas de diferente calidad. Las características principales son:

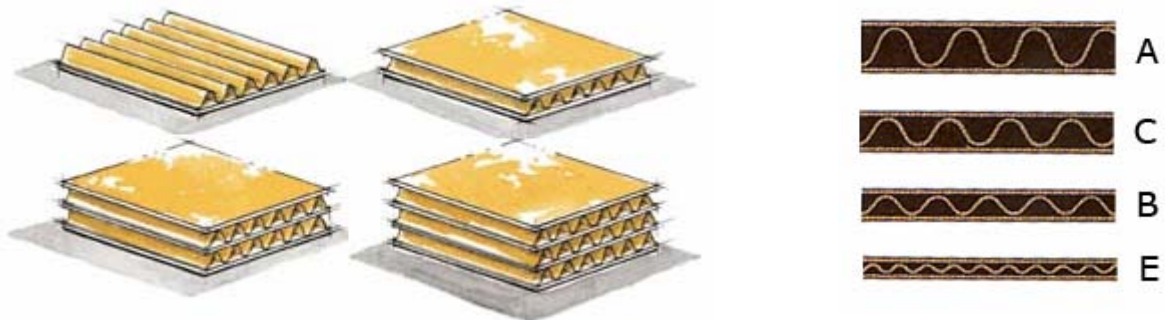
- Alto grado de refinado (fibras compactas).
 - Rigidez y suavidad.
 - Superficie apta para la impresión (Top liner), superficie rugosa y absorbente para recibir el adhesivo (Back liner).
 - Soportar la fabricación a altas velocidades.
 - Fibra larga.
 - Gramajes 125-300g/m².
-

Papel ondulado o médium.

Es la capa intermedia a la cual se adhieren las capas de papel liner, este papel es sometido a ciertas condiciones de humedad para impartirle elasticidad y temperatura y así facilitar el proceso de ondulado en la corrugadora. Las características principales son:

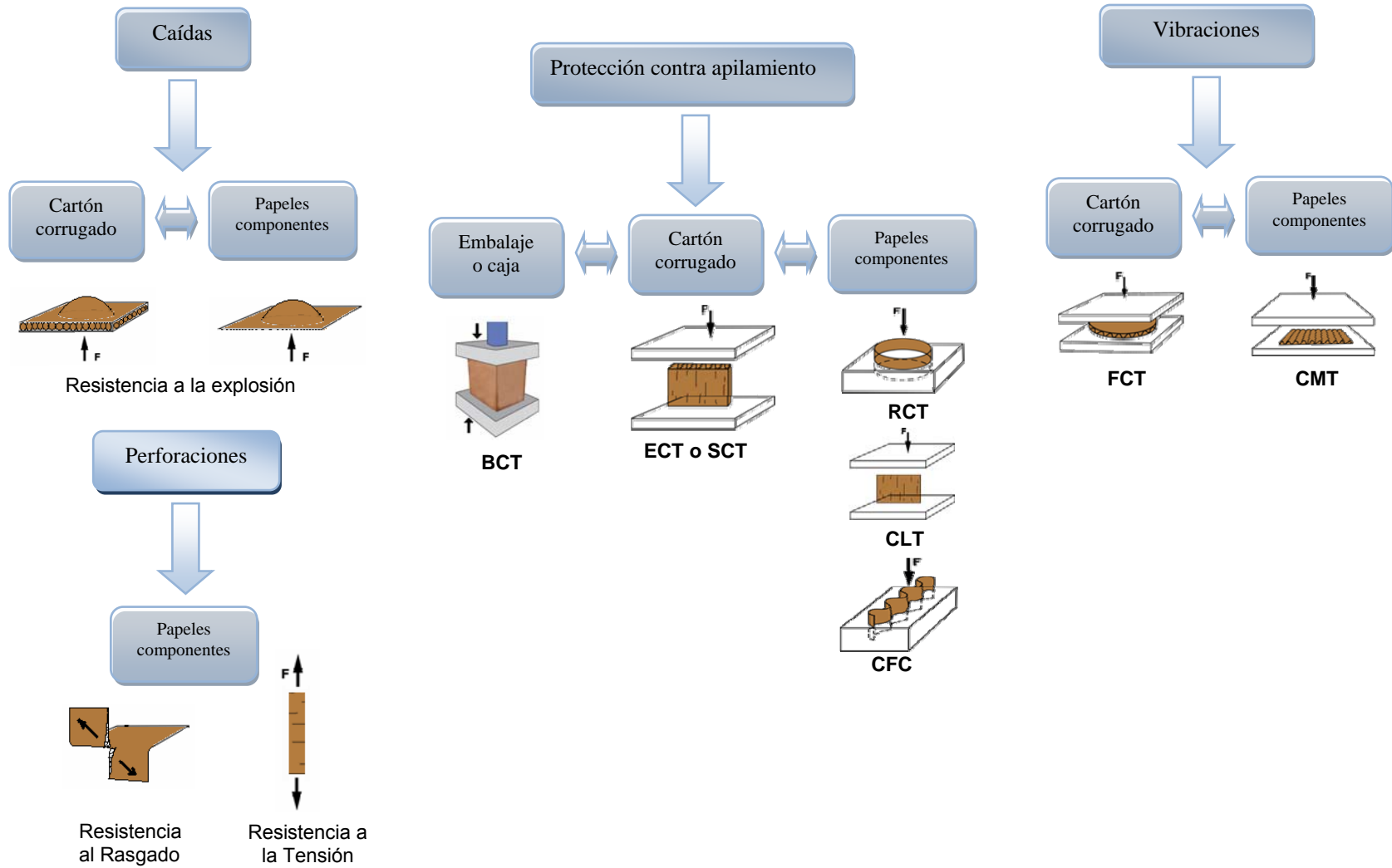
- Elementos viscoelásticos y afinidad higroscópica con los otros materiales constituyentes (adhesivos).
 - Buena formación y rigidez de onda (buena resistencia a la tensión, rasgado y doblez).
 - Gramaje de 85-175 g/m².
 - Combinación de fibra larga (flexibilidad) y corta (rigidez).
-

Anexo B. Tipos de cartón corrugado y configuración de las ondas o flautas [43]



<p>Cara simple (Singed faced board)</p>	<p>Es la unión de una hoja ondulada (papel onda) y una lisa (que mantiene la rigidez). Este material se usa sólo para efectos de embalaje como montajes interiores o relleno amortiguador. No se utiliza para la producción de cajas.</p>
<p>Doble cara (Single-wall or double-faced board)</p>	<p>Resulta de la adherencia de dos hojas de papel liso (liner) y otra ondulada. Más del 90% de todas las cajas corrugadas se fabrican de este tipo de cartón.</p>
<p>Doble pared (Double-wall board)</p>	<p>Está constituido por tres hojas lisas (liner) entre las cuales se encuadran adheridos dos ondulados. Un total de cinco capas de papel. Esta serie se utiliza para aplicaciones pesadas, en particular en embalaje para exportaciones.</p>
<p>Triple pared (Triple-wall board)</p>	<p>Tiene tres corrugados medio y un total de siete capas. Sólo unos pocos fabricantes hacen de este tipo de cartón, que se utiliza para aplicaciones industriales muy pesadas.</p>
<p>Onda A (A-Flute)</p>	<p>La flauta A da una mejor resistencia a la compresión, con aproximadamente 15% más que la onda C y 25% menos para la onda B. 104-125 Ondas/m; 0.47 cm altura.</p>
<p>Onda B (B-Flute)</p>	<p>La onda B, por otro lado tiene el mejor FCT, 50% más que la onda A y 25 % más que la onda C. se usa para cajas troqueladas (Transporte de verduras y frutas). 150-184 ondas/m y altura de 0,24 cm.</p>
<p>Onda C (C- Flute)</p>	<p>La onda C ha venido remplazando a la onda A. con menos acanaladuras (aproximadamente 15%). 120-145 ondas/m y altura de 0,36 cm.</p>
<p>Onda E (E-Flute)</p>	<p>La onda E es de un grado muy fino, sus aplicaciones son empaques que van directo a los consumidores. 275-310 ondas/m y altura de 0,12 cm.</p>

Anexo C. Pruebas físico-mecánicas aplicadas al cartón corrugado y sus papeles componentes



1). Protección contra las caídas	Para evitar que la caja estalle, es necesario que el cartón tenga una buena resistencia al estallido.
2). Resistencia al apilamiento	Para permitir el apilamiento a grandes alturas, la caja debe tener cierta resistencia a la compresión vertical, que se debe determinar conociendo las condiciones de almacenamiento y los distintos factores que afectan la resistencia.
BCT (<i>Box Crush Test</i>)	Una medida directa de la resistencia que presentara la caja cuando esta sea utilizada como contenedor de productos, y sea apilada una sobre otra durante el almacenamiento.
ECT (<i>Edge Crush Test</i>) ó SCT (<i>Short Column Test</i>)	Este ensayo se practica en una porción representativa de los lados del cartón y simula la resistencia a la compresión que pudiera tener una caja.
RCT (<i>Ring Crush Test</i>).	Es la resistencia y rigidez al aplastamiento sobre el canto. La resistencia a la compresión en columna (ECT) se puede deducir de la compresión del anillo (RCT) en ST de los papeles componentes.
CLT (<i>Concora Liner Test</i>).	Es un <i>Useful Method</i> TAPPI, usado para determinar la resistencia a la compresión lateral del papel liner.
CFC (<i>Concora Fluted Crush Test</i>).	Tanto el RCT como el CLT tiene grandes variaciones en los resultados de los ensayos para el corrugado medio y por esta razón, se desarrolló el ensayo de aplastamiento de canto del cartón ondulado CFC. Los ensayos CFC se efectúan tanto en las caras como sobre el ondulado.
3). Protección contra las perforaciones	Cuando la caja choca contra las aristas vivas, el cartón puede ser perforado. Las características de los papeles que más influyen en la resistencia a la perforación son: la rigidez al ondulado; el desgarro y el estallido de las caras.
4). Protección contra las vibraciones	Los papeles de ondular deben mantener las caras equidistantes y paralelas durante las operaciones a las que se ve sometido el cartón, capacidad de amortiguación respecto a golpes externos, y ofrecer mayor resistencia del cartón al aplastamiento, durante la impresión de forma que, por elevada que sea la presión durante la misma no se produzca la rotura del conjunto ondulado-cubiertas.
FCT (<i>Flat Crush Test</i>).	Este ensayo consiste en obtener la resistencia máxima que una superficie de cartón corrugado opone a una fuerza que actúa perpendicular a las dos caras, antes del aplastamiento total de las ondulaciones.
CMT (<i>Concora Médium Test</i>).	El valor de compresión máxima alcanzada en el momento del aplastamiento de las ondulaciones, expresadas en Kgf, representa el valor de CMT. Es una de las más importantes propiedades de calidad practicada a los papeles ondulados, y es el único método que guarda una estrecha correlación con el FCT del cartón ondulado.

Anexo D. Distribución de áreas sembradas de palma de aceite en Colombia por zonas [28]

Año	Área	Central		Norte		Occidental		Oriental		Totales	
		Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
2002	Sembrada	48 825	26,3	54 259	29,3	25 055	13,6	57 025	30,8	185 164	100
	Producción	33 883	24,1	38 065	26,6	19 115	13,4	50 715	35,9	141 778	100
	Desarrollo	14 942	34,3	16 194	39,0	5 940	14,1	6 310	12,6	43 386	100
2003	Sembrada	52 964	25,2	65 192	31,0	26 197	12,5	66 056	31,4	210 408	100
	Producción	35 954	24,6	39 213	26,4	20 736	14,0	51 521	35,0	147 424	100
	Desarrollo	17 010	26,6	25 978	42,5	5 461	8,7	14 535	22,2	62 984	100
2004	Sembrada	59 157	24,4	79 425	32,6	28 199	11,6	76 256	31,4	243 036	100
	Producción	38 243	24,9	42 260	27,1	21 395	13,7	52 576	34,2	154 474	100
	Desarrollo	20 914	23,4	37 165	42,7	6 804	7,7	23 680	26,2	88 563	100
2005	Sembrada	64 724	23,5	90 137	32,7	32 478	11,8	88 480	32,1	275 818	100
	Producción	43 149	26,0	46 012	27,7	22 831	13,8	53 997	32,5	165 988	100
	Desarrollo	21 575	19,6	44 125	40,2	9 647	8,8	34 483	31,4	109 830	100
2006	Sembrada	77 287	25,8	94 312	31,4	33 889	11,3	94 655	31,5	300 142	100
	Producción	46 946	25,9	53 366	29,4	24 769	13,7	56 249	31,0	181 329	100
	Desarrollo	30 341	25,5	40 946	34,5	9 120	7,7	38 406	32,3	118 813	100

NOTAS:

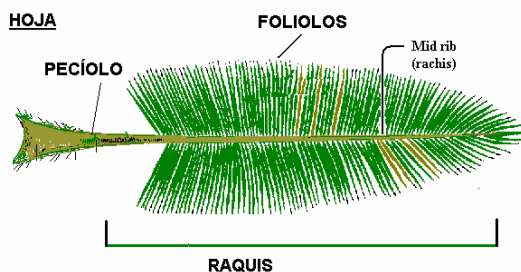
1/ La superficie sembrada en palma de aceite hace referencia al área neta, es decir el espacio ocupado solamente por la palma de aceite y calculado con base en densidades de siembra reportada por los productores. Según el Censo Nacional (1997-1998), la relación entre área neta y área bruta arroja un resultado del 93,3%.

2/ La serie de área sembrada fue corregida descontando la estimación anual de la renovación de áreas.

Anexo E. Caracterización morfológica y taxonómica de la palma africana de aceite (*Elaeis guineensis*) [11, 45]



TIPO	Angiosperma
ORDEN	Palmales
CLASE	Monocotiledóneas
FAMILIA	Palmáceas
GÉNERO	<i>Elaeis</i> (<i>guineensis</i> y <i>oleífera</i>)



DESCRIPCION:

La apariencia es la de un árbol esbelto, cuyo tallo llega a los 25 m. de altura y está coronado por hojas largas y arqueadas. Los principales componentes vegetativos de las palmas adultas son los frutos, el tronco, follaje, las raíces e inflorescencias.

EL TALLO

El **tallo o tronco** de la palma aceitera se desarrolla en tres a cuatro años, una vez que ha tenido lugar la mayor parte del crecimiento horizontal del sistema radicular. Luego de sembrada la palma en campo definitivo se inicia la formación de un órgano voluminoso en la base del tallo que es el **bulbo**, que origina el ensanchamiento en la base del tronco y sirve de asiento a la columna del tallo.

HOJAS

En una planta adulta, el tallo está coronado por un penacho de hojas (45-50) con una longitud entre 5 y 8 metros y un peso de 5 a 8 kilogramos cada una.

Aparenta ser una hoja compuesta, aunque en realidad es una hoja **pinnada**, (con foliolos dispuestos como pluma, a cada lado del pecíolo) y consta de dos partes: el **raquis** y el **pecíolo**. A uno y otro lado del **raquis** existen de 100 a 160 pares de **foliolos** dispuestos en diferentes planos, correspondiendo el tercio central de la hoja a los más largos (1,20 m.).

Después de un período de cosecha van quedando un buen número de hojas sobre la corona de racimos, las cuales deben ser podadas. El objetivo de la poda es la eliminación de las hojas no funcionales. Se considera que para cultivos jóvenes se debe dejar hasta 3 hojas por debajo del último racimo y para los adultos de 1-2 hojas.

Hojas /palma.año	22
Tamaño de las hojas	5-6 m
Kg/raquis	10 kg
% humedad	80

**Anexo F. Capacidad producible de pulpa a la soda de RHPA en Colombia
(proyecciones)**

AÑO	Áreas cultivadas (hectáreas)	Material fibroso (Toneladas)*	Material fibroso (Toneladas)**	Pulpa (Toneladas)†
2008	352 116	1 478 886	739 443	443 666
2009	380 285	1 597 197	798 598	479 159
2010	410 708	1 724 972	862 486	517 492
2011	443 564	1 862 970	931 485	558 891
2012	479 049	2 012 008	1 006 004	603 602
2013	517 373	2 172 968	1 086 484	651 890
2014	558 763	2 346 806	1 173 403	704 042
2015	603 464	2 534 550	1 267 275	760 365
2016	651 741	2 737 314	1 368 657	821 194
2017	703 881	2 956 299	1 478 150	886 890
2018	760 191	3 192 803	1 596 402	957 841
2019	821 007	3 448 228	1 724 114	1 034 468
2020	886 687	3 724 086	1 862 043	1 117 226

Fuente: Elaboración propia con tasas proyectadas por Fedepalma [28]

* Peso en base seca.

** Suponiendo una disposición del 50% del material fibroso (teniendo en cuenta el uso del material como abono y en la generación de energía).

† Peso en base seca.

Palmas/hectárea	140
RHPA/ palma*año	20
Material fibroso RHPA / RHPA _{Total} (% _{peso})	75
Humedad RHPA (%)	80
Rendimiento cocción (%)	60

Fuente: Elaboración con datos propios y de CICELPA [10, 11]

Anexo G. Lista de métodos estándar TAPPI utilizadas en el desarrollo experimental [40]

Norma TAPPI	Nombre
T 205 om-88	Forming Handsheets for Physical Test of Pulp
T 220 om-88	Physical Testing of Pulp Handsheets
T 227 om-94	Freeness of Pulp
T 236 cm-85	Kappa Number of Pulp
T 402 om-93	Standard Conditioning and Testing Atmospheres for Paper, Board Pulp Handsheets and Related Products
T 403 om-91	Bursting Strength of Paper
T 404 cm-92	Tensile Breaking Strength and Elongation of Paper and Paperboard (Using Pendulum – Type Tester)
T 410 om-83	Grammage of Paper and Paperboard (Weight Per Unit Area)
T 411 om-89	Thickness (Caliper) of Paper, Paperboard and Combined Board
T 412 om-94	Moisture in Paper and Paperboard
T 414 om-88	Internal Tearing Resistance of Paper
T 808 om-81	Flat Crush Test of Corrugated Board (FCT)
T 809 os-71	Flat Crush of Corrugating Medium (Corrugating Medium Test; CMT)
T 811 os-79	Edgewise Compressive Strength of Corrugated Fiberboard (Short Column Test; SCT)
T 818 os-76	Ring Crush of Paperboard (RCT)
T 1205 rp-82	Dealing with Suspect (Outlying) Test Determinations
UM 801	Concora Liner Test (Edge) Crush Test (CLT)
UM 811	The Concora Fluted Crush Test (CFC-0) for Corrugating Medium

Anexo H. Análisis químico de la fibra RHPA [8].

Compuesto	%
Extraíbles	12,7
Lignina	15,1
Celulosa	35,4
Hemicelulosa	31,7
Cenizas en extraíbles	3,24
Cenizas libre de extraíbles	1,88
Cenizas totales	5,12
Solubles en agua caliente	7,54
Solubles en alcohol-Benceno	2,80
Solubles en Alcohol	5,63
Solubles totales y cenizas	16,0
Solubles en NaOH al 1%	29,0

Fuente:[8]

Anexo I. Efecto de la adición de pulpa RHPA sobre las propiedades de las pulpas de cartón tipo I y II

Cartón tipo I (60 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50	0
Pulpa de palma (%)	0	15	25	35	50	100
Densidad (g/cm ³)	0,433	0,435	0,438	0,422	0,435	0,391
Calibre (mm)	0,136	0,138	0,133	0,139	0,129	0,151
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,30	2,20	2,45	2,52	2,57	3,16
I.Tensión(N.m/g)	24,40	25,42	27,19	29,06	29,59	41,26
I.Rasgado (mN.m ² /g)	8,54	8,37	9,21	10,08	8,58	8,32

Cartón tipo II (60 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50	0
Pulpa de palma (%)	0	15	25	35	50	100
Densidad (g/cm ³)	0,450	0,499	0,442	0,518	0,384	0,391
Calibre (mm)	0,132	0,118	0,134	0,114	0,151	0,151
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,88	2,66	2,46	2,85	2,37	3,16
I.Tensión(N.m/g)	35,05	31,14	29,79	31,64	26,75	41,26
I.Rasgado (mN.m ² /g)	10,28	9,74	9,17	8,78	8,51	8,32

Cartón tipo I (200 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50	0
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50	100
Densidad (g/cm ³)	2,275	2,555	2,438	2,338	2,349	1,928
Calibre (mm)	0,439	0,392	0,415	0,442	0,423	0,520
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,41	2,89	3,02	2,82	2,78	3,40
I.Tensión (N.m/g)	29,51	36,44	33,49	33,95	36,81	45,07
I.Rasgado (mN.m ² /g)	12,53	12,66	13,86	14,52	13,42	12,42
RCT (KN/m)	1,55	1,74	1,87	1,81	1,78	2,62
CLT (N)	137,65	101,86	89,63	121,21	128,55	226,18
CMT (N)	120,99	150,12	170,90	174,88	175,34	181,63
CFC o CCT (N)	313,36	359,84	375,63	364,47	398,54	518,86

Cartón tipo II (200 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50	0
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50	100
Densidad (g/cm ³)	2,426	2,653	2,436	2,393	2,185	1,928
Calibre (mm)	0,413	0,382	0,420	0,424	0,467	0,520
I.Explosión (KPa.m ² /g)	3,18	2,99	2,69	2,58	2,52	3,40
I.Tensión (N.m/g)	37,78	36,93	34,02	34,57	33,29	45,07
I.Rasgado (mN.m ² /g)	14,36	11,80	11,84	11,01	13,21	12,42
RCT (KN/m)	1,63	1,68	1,76	1,79	1,93	2,62
CLT (N)	149,59	75,39	99,64	96,13	138,11	226,18
CMT (N)	131,44	173,94	166,36	184,59	182,37	181,63
CFC o CCT (N)	337,38	387,44	374,30	386,75	392,09	518,86

Anexo J. Porcentaje de cambio (%) cambio en las propiedades del cartón reciclado con la adición de pulpa RHPA

Cartón tipo I (60 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	0,433	0,64	1,36	-2,38	0,57
Calibre (mm)	0,136	1,30	-2,36	2,08	-5,13
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,30	-4,35	6,42	9,18	11,53
I.Tensión (N.m/g)	24,40	4,18	11,44	19,08	21,25
I.Rasgado (mN.m ² /g)	8,54	-1,92	7,87	18,11	0,49

Cartón tipo II (60 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	0,450	10,87	-1,92	15,02	-14,74
Calibre (mm)	0,132	-11,03	0,99	-13,49	14,11
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,88	-7,91	-14,83	-1,10	-17,83
I.Tensión (N.m/g)	35,05	-11,16	-15,00	-9,72	-23,68
I.Rasgado (mN.m ² /g)	10,28	-5,25	-10,81	-14,64	-17,23

Cartón tipo I (200 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	2,275	12,32	7,16	2,78	3,26
Calibre (mm)	0,439	-10,66	-5,34	0,78	-3,56
I.Explosión (KPa.m ² /g)	2,41	19,93	25,57	16,91	15,42
I.Tensión (N.m/g)	29,51	23,49	13,50	15,07	24,75
I.Rasgado (mN.m ² /g)	12,53	1,06	10,58	15,86	7,10
RCT (KN/m)	1,55	12,26	20,34	16,46	14,55
CLT (N)	137,65	-26,00	-34,89	-11,95	-6,61
CMT (N)	120,99	24,08	41,25	44,54	44,93
CFC o CCT (N)	313,36	14,83	19,87	16,31	27,18

Cartón tipo II (200 g/m²)

Pulpa de reciclado (%)	100	85	75	65	50
Pulpa RHPA (%)	0	15	25	35	50
Densidad (g/cm ³)	2,426	9,36	0,40	-1,34	-9,93
Calibre (mm)	0,413	-7,36	1,68	2,86	13,19
I.Explosión (KPa.m ² /g)	3,18	-5,94	-15,33	-18,87	-20,79
I.Tensión (N.m/g)	37,78	-2,26	-9,95	-8,50	-11,89
I.Rasgado (mN.m ² /g)	14,36	-17,80	-17,53	-23,35	-8,01
RCT (KN/m)	1,63	2,78	8,26	9,78	18,41
CLT (N)	149,59	-49,60	-33,39	-35,74	-7,67
CMT (N)	131,44	32,34	26,57	40,44	38,75
CFC o CCT (N)	337,38	14,84	10,94	14,63	16,22

Anexo K. Correlaciones para estimar el comportamiento de cartón corrugado y embalajes a partir de las propiedades de sus papeles componentes [26, 40, 43]

La prueba Edge Crush Test (ECT) es la propiedad más importante del cartón corrugado para determinar la resistencia a la compresión dinámica de una caja. La fórmula más ampliamente adoptada para predecir la compresión de la caja es llamada la ecuación de McKee:

$$P = K_1 P_m \sqrt{hZ}$$

P = Box compression strength; $K_1 = 5.9$; P_m = Edge Crush Test;

h = Caliper of corrugated board; Z = Box perimeter, $2(L + W)$

La resistencia ECT depende de las materias primas, de los papeles liners y corrugado medio. Por supuesto esta también requiere buena calidad de fabricación, y si la adhesión es adecuada, y no hay una excesiva y el cartón no ha sido aplastado más del 20-30%; el valor de ECT está determinado por los liners y medium. Las relaciones han sido bien conocidas por largo tiempo [43]. Algunas correlaciones empleadas son [22, 26]:

Perfil de onda A: $Y = 1.00 (X_1 + X_2 + 1.51X_3)$

Perfil de onda C: $Y = 1.10 (X_1 + X_2 + 1.48X_3)$ (1)

Perfil de onda B: $Y = 1.10 (X_1 + X_2 + 1.37X_3)$

Y = valor de ECT del cartón, en Kp/cm

X_1, X_2 = valores de RCT de las caras en CM, en Kp/cm,

X_3 = valor de RCT del ondulado en CM, en Kp/cm

Onda A: $Y = 0.8 (X_1 + X_2 + 1.53X_3) + 0.6$

Onda C: $Y = 0.8 (X_1 + X_2 + 1.33X_3) + 0.6$ (2)

Y = valor de ECT del cartón en KN/m

X_1, X_2 = valores de RCT de las caras en CM, en KN/m

X_3 = valor de CFC del ondulado, en KN/m

Para desempeñar las funciones de protección el embalaje debe poseer ciertas cualidades a las que están unidas unas características físicas medibles que, a su vez, dependen de las del cartón, y las de este de las características de los papeles componentes.

El CMT es una de las más importantes propiedades de calidad practicada a los papeles ondulados, y es el único método que guarda una estrecha correlación con el FCT del cartón ondulado. El instituto Finandés de Investigaciones, ha obtenido las ecuaciones de correlación siguiente [26]:

Perfil de onda A: $Y = 0.069X_0$

Perfil de onda B: $Y = 0.082X_0 + 0.57$

Perfil de onda C: $Y = 0.083X_0 + 0.08$

(3)

Y = FCT, en Kp/cm²

X_0 = valor CMT₀ (aplastamiento del acanalado), en Kp

TAPPI en la norma T809 os-71 sugiere:

$$\text{Perfil de onda A: } Y = 44.86 + 4.14X_0 \quad (4)$$

$Y = \text{FCT}$, en Lbf/in²

$X_0 = \text{valor CMT}_0$ (aplastamiento del acanalado), en Lbf

En caso de caída, para evitar que la caja estalle, es necesario que el cartón tenga buena resistencia al estallido. Se puede prever el estallido del cartón, a partir del de sus componentes, como sigue [26]:

$$\begin{aligned} \text{Perfil de onda A: } Y &= X_1 + X_2 + 0.09X_3 \\ \text{Perfil de onda C: } Y &= X_1 + X_2 + 0.01X_3 \\ \text{Perfil de onda B: } Y &= X_1 + X_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$Y = \text{Estallido del cartón ondulado}$, en Kg/cm²

$X_1, X_2 = \text{Estallido de cada una de las caras}$, en Kg/cm²

$X_3 = \text{Estallido del ondulado}$ en Kg/cm²
