

RECICLABILIDAD DE PAPELES DE OFICINA: RESPUESTA A DOS RECICLOS

Autores*:
 Benitez, Julieta B.¹
 Koga, Mariza E.T.²
 Otero D'Almeida, Maria L.²
 Felissia, Fernando E.³
 Park, Song W.⁴
 Area, María C.^{2,5}

RESUMEN

Reciclabilidad es la capacidad de un material de volver a adquirir las mismas propiedades que tenía originalmente. El conocimiento de la reciclabilidad de los papeles comerciales es una herramienta más para las empresas, al momento de tomar decisiones sobre ampliaciones o modificaciones de procesos. El objetivo del trabajo fue verificar la reciclabilidad de cuatro papeles de impresión y escritura a partir de las propiedades mecánicas, físicas y ópticas después de dos ciclos. Se estudiaron 4 papeles bond comerciales de Argentina y Brasil, incluyendo 3 kraft de eucaliptus (A, B, C) y uno a la soda-AQ de bagazo de caña de azúcar (D), con diferentes procesos de blanqueo. Los papeles se repulparon y refinaron aplicando 2 niveles de energía a 2 intensidades diferentes (1er ciclo), se fabricaron hojas de laboratorio y las mismas se volvieron a repulpar y refinar (2do ciclo). Se compararon estadísticamente los resultados del comportamiento de las diferentes pulpas de 2do ciclo, y los resultados del 1er y 2do ciclo para verificar la reciclabilidad de los papeles originales. Se demostró que la reciclabilidad, representada por la evolución de prácticamente todas las propiedades de los papeles repulpados, es diferente en todos los casos, aunque muestra una mayor similitud entre los papeles fabricados a partir de pulpas kraft de eucaliptus que entre éstos y el papel a la soda de bagazo. Esto significa que la aplicación de ajustes finos en los procesos de pulpado y de blanqueo podrían producir diferencias importantes en la reciclabilidad de los papeles finales. El papel de bagazo requirió mucha menor energía de refino para lograr sus máximas propiedades, pero mostró propiedades muy inferiores al resto en los dos ciclos. En general, el uso de condiciones moderadas en el primer ciclo (refino a 30°SR y baja intensidad), permitió lograr un 2do ciclo sin pérdida significativa de propiedades.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar, eucalipto, papeles de oficina, propiedades físicas, reciclabilidad, reciclaje

OFFICE PAPER RECYCLABILITY: RESPONSE TO SECOND RECYCLING OF FIBERS

ABSTRACT

Recyclability is the ability of a material to reacquire the same properties it had originally. Knowledge of the recyclability of commercial paper is a tool for companies, when making decisions on expansions or process modifications. The aim of this work was to verify the recyclability of four printing and writing papers from their physical, mechanical and optical properties after two recycles. Four commercial bond papers were studied, including 3 Eucalyptus kraft from Argentina and Brazil (A, B, C) and a soda-AQ from sugarcane bagasse (D), with different bleaching processes. That papers were repulped and refined using 2 levels of energy at 2 different intensities (1st recycle). Laboratory sheets were produced, and then repulped and refined again (2nd recycle). The behavior of the 2nd cycle pulps and the results of the 1st and 2nd recycles were statistically compared to verify the recyclability of the original papers. It was shown that recyclability, represented by the evolution of properties of the repulped papers, is different in all cases, although it shows a greater similarity among the papers made from eucalyptus kraft pulps than between them and the paper made from soda-AQ pulp from bagasse. This means that the application of fine adjustments in the pulping and bleaching processes may produce substantial differences in the recyclability of the final papers. The bagasse paper required less refining energy to reach its highest level of properties, but they were always poorer than those of the other papers and decreased markedly with recycles. As a general rule, the use of mild conditions in the first recycle (refining at 30° SR with low intensity), allows to achieve a 2nd recycle without significant loss of properties.

Keywords: sugarcane bagasse, eucalyptus, office paper, physical properties, recyclability, recycling

*Referencias de los autores:

1. Maestría en Ciencias de Madera, Celulosa y Papel – FCEQyN-FCF – Universidad Nacional de Misiones. Argentina
2. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Brasil
3. Programa de Celulosa y Papel - FCEQyN – Universidad Nacional de Misiones – Félix de Azara 1552 (3300) Posadas, Misiones. Argentina.
4. Escola Politécnica, Universidade do Estado de São Paulo (USP). Brasil
5. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina

Autor correspondiente: María C. Areas. E-mail: m_c_area@fceqyn.unam.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El papel reciclado se convirtió en una valiosa materia prima para la industria del papel a principios del siglo 20. En las últimas décadas, la recuperación y utilización de papel y cartón ha aumentado en todo el mundo, y esta tendencia continua [1]. El volumen de papel recuperado y utilizado a nivel mundial es casi igual al volumen de pulpa química virgen o cuatro veces el de la pulpa mecánica. Uno de los factores más importantes a tener en cuenta es la conciencia de las personas sobre la limitación de las fuentes de fibra y sus consecuencias ambientales. Sin embargo, el costo de manejo de residuos, la disponibilidad de tecnología de reciclado y el rol de la legislación nacional o internacional para el uso de fibra reciclada no debe ser subestimado. Con el creciente uso de fibra reciclada ha mejorado la comprensión de las características de las fibras recicladas, así como la tecnología de reciclado y del destintado, haciendo esta materia prima competitiva con la pulpa virgen [2].

El papel de desecho puede reciclarse 5 o 6 veces (en laboratorio), pero en cada reciclo pierde del 15 al 20 por ciento de las fibras largas. Las fibras repulpadas kraft tienden a ser menos porosas a escala sub-microscópica, menos flexibles y menos capaces de hincharse en agua frente a las que no han sido secadas, siendo también menos capaces de formar enlaces entre las fibras [3]. Por lo antedicho, las fibras recicladas deben siempre mezclarse con pulpa virgen para obtener papeles de resistencias apropiadas. Como consecuencia, la relación teórica entre el consumo de fibra virgen y la utilización de papel recuperado es no lineal [4].

El refinado ha sido estudiado como una de las formas de recuperar en parte la resistencia perdida de las pulpas recicladas [2, 5]. Si bien es sabido que los distintos refinadores industriales tienen diferentes efectos sobre las fibras, y que, además, estos efectos son difíciles de reproducir en laboratorio, el uso del molino PFI se encuentra relativamente estandarizado y aporta datos repetibles por lo cual es adecuado con fines comparativos [6].

La reciclabilidad ha sido definida como la capacidad de un material para volver a adquirir las propiedades que tenía en su estado virgen, donde estado virgen se refiere a la materia en su forma más pura antes de ser procesada para un uso específico [7]. Uno de los indicadores que caracteriza a una fábrica de pulpa con mínimo impacto ambiental es el que produce pulpa para elaborar papel de alta calidad fácilmente reciclable [8]. La reciclabilidad de un papel puede basarse en el rendimiento del proceso de reciclado, así como en las resistencias mecánicas, ópticas y superficiales de las fibras recicladas. Esto va a depender de las materias primas y los procesos de fabricación, ya que diferentes tecnologías de pulpado y blanqueo generan pulpas de diferentes calidades, las cuales a su vez se utilizarán para producir papeles con diferente reciclabilidad.

El objetivo del trabajo fue verificar la reciclabilidad de cuatro papeles de impresión y escritura a partir de las propiedades mecánicas, físicas y ópticas después de dos reciclos y refinación.

METODOLOGÍA

Se estudiaron 4 papeles bond comerciales de Argentina y Brasil, tres de los cuales fueron fabricados con pulpa kraft de *Eucalyptus grandis* blanqueada ECF (A, B, C) de gramaje nominal 75 g/m² y uno de pulpa a la soda-AQ de bagazo de caña de azúcar con secuencia de blanqueo tradicional, de gramaje nominal 80 g/m² (D). Se realizó un reciclo de los papeles en un pulper de laboratorio a 5% de consistencia, depurando por ranuras de 0,15 mm. Las pulpas obtenidas se refinaron con molino PFI aplicando 2 niveles de energía a 2 intensidades diferentes (medidas por número de revoluciones y presiones de refinado, 3,33 N/mm y 1,77 N/mm). Se formaron hojas en laboratorio en formadora redonda TAPPI y se caracterizaron. A esta etapa se la denominó 1er reciclo. La metodología detallada se presenta en un artículo anterior [9].

Sobre la base de los resultados obtenidos se seleccionaron las condiciones de refinado que dieron las mejores propiedades en cada uno de los papeles (baja intensidad y refinado moderado). Se repitió la metodología del 1er refinado de los puntos seleccionados, se formaron hojas de laboratorio, y luego se repulparon con la misma metodología del 1er reciclo. Las pulpas (denominadas 2do reciclo) se refinaron a diferente número de revoluciones hasta alcanzar similar grado de refinado (entre 35 y 42°SR aproximadamente). Debido a que la intensidad más baja produjo los mejores resultados en el 1er reciclo [9], se utilizó solo ésta en el refinado del 2do reciclo. Las condiciones de refinado inicial del 2do reciclo tuvieron como objetivo la obtención de un °SR similar al de las hojas recicladas en el 1er reciclo. Las pastas del primer reciclo utilizadas y las condiciones del 2do reciclo se presentan en la **Tabla 1**. La diferencias en drenabilidad entre las muestras seleccionadas del primer reciclo (A, B, C y D) con los puntos sin refinado del 2° reciclo (A0, B0, C0 y D0) son debidas a que las hojas del primer reciclo fueron secadas al aire y vueltas a repulpar.

Tabla 1. Condiciones de refinación del 1er y 2do reciclo (presión de refinado 1,77 N/mm)

Muestras del 1er reciclo utilizadas			Condiciones del 2do reciclo		
Muestra	Nº rev. PFI	°SR	Muestra	Nº rev. PFI	°SR
A	1500	34	A0	--	29
			A1	1300	36
			A2	2000	42
B	2000	32	B0	--	28
			B1	800	34
			B2	1500	41
C	500	35	C0	--	31
			C1	500	35
			C2	1400	43
D	200	34	D0	--	29
			D1	200	35
			D2	400	41

Con la pulpa del 2do reciclo se formaron hojas de laboratorio y se evaluaron: Índice de Tracción y Elongación (ISO 1924-2:2008), Índice de Rasgado (ISO 1974:1990) Índice de Explosión (ISO 2758:2001), Resistencia Zero Span (ISO 15361:2000), Densidad (ISO 534:2005), Aspereza Bendtsen (ISO 8791 - 2:1990), Permeabilidad al Aire (ISO 5636-5:2003), Blancura (ISO 2470-1:2009), Opacidad (ISO 2471:2008), Whiteness (ISO11475:2004), Color (ISO 5631-1:2009), Coeficientes de Absorción y Dispersión de la Luz (ISO 9416:2009).

El análisis estadístico de los resultados se realizó mediante pruebas de Análisis de la Varianza Multifactorial y Pruebas de Múltiple Rango, al 95% de significación ($p < 0,05$), utilizando el software Statgraphics Centurion. Se compararon los resultados del comportamiento de las diferentes pulpas de 2do reciclo y los resultados del 1er y 2do reciclo a los diferentes grados de refino, para verificar la reciclabilidad de los papeles originales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Tabla 2** presenta los resultados de las propiedades mecánicas de los papeles originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo, y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo [9]. Se busca ver como varían las propiedades con el refino para intentar encontrar condiciones en que las propiedades sean similares a los valores originales, independientemente del °SR.

Debemos considerar que es difícil la comparación de propiedades de los papeles originales con las hojas fabricadas en laboratorio (recicladas) ya que además los primeros contienen mayor contenido de cargas y de aditivos. Considerando las propiedades mecánicas de los papeles originales y de los papeles repulpados y refinados del 2do reciclo (Tabla 2), se observa que el rasgado, el TEA, la explosión y el zero span aumentan con los reciclos y refinados, mientras que la tracción y elongación disminuyen. Esto puede deberse a que la resistencia a la tracción del papel depende tanto de la resistencia individual de fibras (que se ve representada por la resistencia zero span) como de la resistencia de unión entre las fibras (ecuación de Page), por lo cual la disminución en los índices de resistencia a la tracción de papeles reciclados parecería depender de la disminución de la adhesión interfibras debido al tratamiento [10]. También existe un efecto debido a la orientación de las fibras en los papeles originales, producida por la velocidad de la máquina de papel. Si bien las propiedades disminuyen con el 2do reciclo, tienden a recuperarse con el refino.

En la comparación de los repulpes de 1er reciclo utilizados para el 2do reciclo (Tabla 2), se produce una pequeña pérdida del índice de rasgado con el repulpe, que se recupera con el primer refino del segundo reciclo en los papeles A, B y C. Este no es el caso del papel D, ya que sigue perdiendo rasgado con el refino.

El índice de tracción del papel A presenta diferencias significativas entre las hojas repulpadas sin refinar del 2do reciclo (A0) y el resto. El valor de la resistencia original del 1er reciclo se recupera con el refino y mejora con aumento del grado de refino ($A = A1 < A2$). Por el contrario, en el papel B la caída de la resistencia a la tracción no

se recupera con el primer refino del 2do reciclo, y apenas se iguala con el refino más intenso ($B = B2 > B1$). El papel C muestra el mismo comportamiento que el papel A, incrementando significativamente la resistencia con el refino más intenso del 2do reciclo ($C = C1 < C2$). El papel D recupera el valor del papel inicial del 1er reciclo con el refino inicial y no mejora significativamente con un aumento del refino ($D = D1 = D2$).

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los papeles originales de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo

Muestra	Índice Rasgado (mN m ² /g)	Índice Tracción (N m/g)	Elongación (%)	Índice TEA (J/g)	Índice Explosión (kPa m ² /g)	Zero Span ([N/m]/g)
Papel A MD	5,97	93,6	2,45	1,40	3,39	133
Papel A CD	8,49	22,7	6,62	1,14		56
A	9,02	74,6	4,95	2,24	5,80	125
A0	8,72	61,0	3,93	1,53	3,77	139
A1	9,04	77,0	5,29	2,65	5,64	133
A2	8,50	79,7	5,50	2,70	5,93	140
Papel B MD	6,93	70,0	2,15	0,78	2,76	116
Papel B CD	8,04	33,1	5,14	1,23		79
B	9,25	76,0	5,25	2,47	5,33	132
B0	8,55	60,2	3,62	1,37	3,89	138
B1	9,09	71,5	4,74	2,12	4,95	141
B2	8,92	75,43	4,94	2,32	5,39	135
Papel C MD	6,64	80,1	2,49	1,24	3,13	119
Papel C CD	7,43	32,6	4,98	1,21		69
C	8,69	62,0	4,28	1,59	4,46	116
C0	7,97	54,4	3,67	1,26	3,28	134
C1	8,39	64,2	4,53	1,87	4,37	131
C2	8,21	73,5	4,81	2,30	6,00	136
Papel D MD	3,69	55,6	1,49	0,46	1,98	76
Papel D CD	4,06	29,0	3,30	0,72		51
D	4,85	49,9	3,38	0,93	3,01	78
D0	4,69	42,3	2,72	0,74	2,62	81
D1	4,51	49,4	3,52	1,13	3,10	84
D2	4,33	50,6	2,99	0,96	3,18	85

a) Ej: **Papel A:** papel original; **A:** datos de las pulpas base del 1er reciclo; **A0:** pulpa de 2do reciclo sin refinar; **A1:** pulpa de 2do reciclo refinada a 1300 rev.; **A2:** pulpa de 2do reciclo refinada a 2000 revoluciones

La elongación y el índice TEA de los papeles A, B y C muestran el mismo comportamiento que la tracción. En el caso del papel D, disminuye al aumentar el refino en el 2do reciclo ($D = D1 > D2$). El índice de explosión de todos los papeles se comporta en forma idéntica al índice de tracción.

Todos los papeles mostraron un aumento del zero span con el repulpe (ej. $A < A0$). Los papeles A y C se comportaron de igual forma, manifestando un aumento del zero span con el mayor refino de la pulpa de 2do reciclo (ej. $A2 > A1$), mientras que en el caso del papel B esta propiedad disminuye con el mayor refino ($B0 < B1 > B2$). El zero span del papel D aumenta incrementalmente con el repulpe y el refino ($D < D0 < D1 < D2$). Estos resultados coinciden con los encontrados por otros autores para el repulpe y el refino de pulpas kraft blanqueadas de latifoliadas [10, 11]. Esto podría deberse a un acomodamiento cristalino de la celulosa, lo que permitiría un mayor empaquetamiento por el desarrollo de nuevas uniones hidrógeno internas en la fibra, o bien, al aumento de la cristalinidad debido a la pérdida de hemicelulosas con el reciclo.

La evolución comparativa de los índices de tracción y rasgado y de la resistencia zero span con el refino de las hojas de laboratorio del 1er [9] y 2do reciclo se muestran en las **Figuras 1 a 3**.

Según el análisis estadístico (datos observados en la Figura 1), pese a haber sido secados, las resistencias a la tracción del repulpe de 2do reciclo sin refinar son superiores a las iniciales del 1er reciclo en el caso de los papeles de eucaliptus. El repulpe de A logra alcanzar similar índice de tracción en el 2do reciclo que en el 1er reciclo, a igual grado de refino ($^{\circ}SR$), pero aplicando menor energía (cerca de 80 N m/g con 2000 rev.). Por el contrario, B no alcanza el valor máximo del 1er reciclo. El comportamiento más interesante lo muestra C, que en el segundo reciclo alcanza similar nivel de índice de tracción que el papel B siendo que originalmente su resistencia era muy inferior. El papel de bagazo D no presenta diferencias significativas entre el 1er y el 2do reciclo con el refino.

La elongación, TEA y resistencia a la explosión muestran un comportamiento similar. A igual grado de refino, A y D no presentan

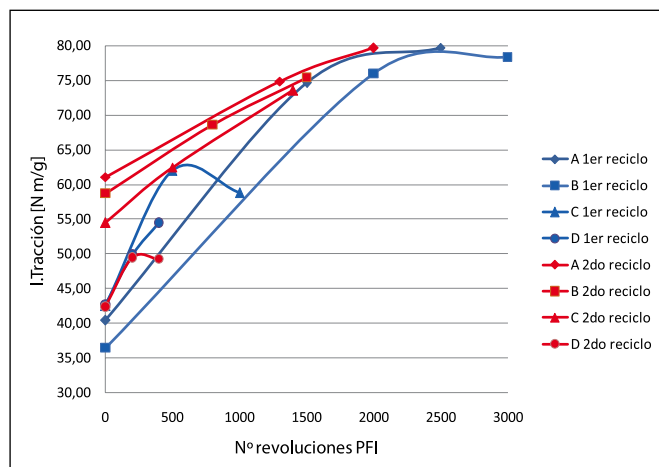


Figura 1. Comparación del índice de tracción vs. n° revoluciones PFI del 1er y 2do reciclo

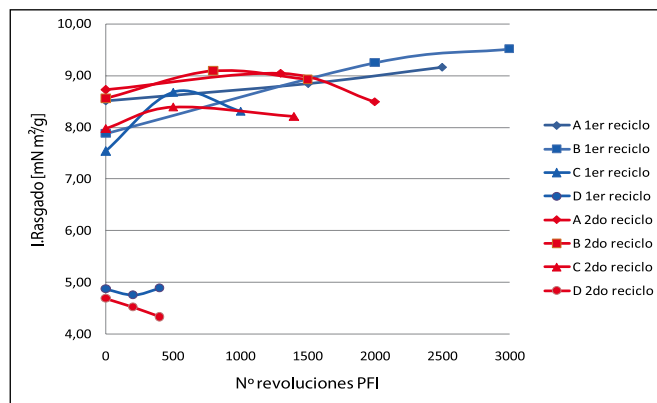


Figura 2. Comparación del índice de rasgado vs. n° revoluciones PFI del 1er y 2do reciclo

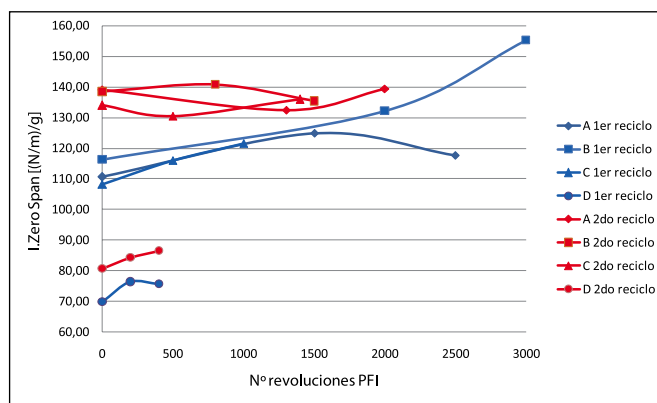


Figura 3. Comparación del índice zero span vs. n° revoluciones PFI del 1er y 2do reciclo

diferencias significativas entre el 1er y el 2do reciclo, mientras que B disminuye y C aumenta de valor.

La evolución de la resistencia al rasgado de A, B y C es similar en el 2do reciclo, no mostrando diferencias significativas con el 1ro, aunque logrando los mayores valores con menor energía de refino (**Figura 2**). El índice de rasgado de D, por el contrario, decrece continuamente con el refino.

El valor del Índice zero span del 2do reciclo es significativamente superior al del 1er reciclo en todos los papeles (**Figura 3**).

La **Tabla 3** presenta los resultados de las propiedades físicas de los papeles originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo, y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo. Según se aprecia, la densidad de las hojas del primer reciclo disminuye significativamente en el segundo reciclo y se recupera con el segundo refino (ej. $A0 < A1 < A < A2$).

La permeabilidad al aire es una medida inversa a la resistencia al paso del aire del papel. Esta propiedad también muestra igual comportamiento en todas las hojas, aumentando significativamente con 2do repulpe (fibras más rígidas, estructura más abierta) y luego disminuyendo con el refino a valores similares a los de las hojas base del 1er reciclo (ej. $A2 < A1 < A < A0$). A igual grado de refino, la permeabilidad de todos los papeles es inferior en el 2do reciclo.

Tabla 3. Propiedades físicas de los papeles originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo, y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo

Muestra	Densidad	Permeabilidad al aire	Aspereza Bendtsen	Aspereza Bendtsen
			lado liso	lado rugoso
	(g/cm ³)	(µm/Pa.s)	(mL/min)	(mL/min)
Papel A	0,80	11,80	172,0	202,0
A	0,75	4,82	78,26	643,3
A0	0,67	12,1	111,2	500,9
A1	0,73	3,41	68,86	509,8
A2	0,76	2,08	57,37	465,4
Papel B	0,79	19,90	232,0	223,0
B	0,73	8,81	100,2	609,9
B0	0,66	18,9	133,1	543,2
B1	0,73	7,17	90,80	609,9
B2	0,77	3,76	77,74	507,6
Papel C	0,80	7,80	127,0	106,0
C	0,73	4,69	90,28	598,8
C0	0,67	9,55	102,5	498,8
C1	0,73	4,45	76,70	483,2
C2	0,75	2,03	55,80	456,5
Papel D	0,79	2,20	210,0	214,0
D	0,74	1,66	93,42	787,8
D0	0,70	4,01	116,9	810,0
D1	0,73	1,68	74,09	854,5
D2	0,75	1,00	67,82	810,0

La aspereza determina las irregularidades superficiales del papel. Estas dependen en cierta medida de la formación (las fibras más cortas y conformables, así como una mayor fibrilación, generan una superficie más lisa, es decir, menos áspera). La aspereza del lado liso se comporta de igual forma en todos los papeles, y al igual que la permeabilidad aumenta significativamente con el 2do reciclo y luego disminuye con el refino a valores similares a los de las hojas bases del 1er reciclo (ej. A2 < A1 < A < A0). Por el contrario, la aspereza del lado rugoso no muestra un patrón. En el caso de las hojas A y C es significativamente mayor en las hojas base del primer reciclo (ej. A > A0 = A1 = A2), mientras que en las hojas B y D no presentan diferencias significativas. A igual grado de refino la aspereza es más baja en el 2do reciclo que en el 1ro (estructura más cerrada y más finos que emparejan la trama). Esto es más evidente en el lado liso.

La **Tabla 4** presenta los resultados de las propiedades ópticas de los papeles originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo, y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo.

La mayor pérdida de propiedades ópticas entre los papeles originales y de 1er reciclo se da en el papel A, seguido por el B, mientras que la menor, en general, en el papel C. Las blancuras (cantidad de luz reflejada por la hoja a 457 nm) del 2do reciclo son inferiores significativamente, en todos los casos, a las del 1er

reciclo. Sin embargo, la pérdida de blancura no es igual para todos los papeles. Por ejemplo, los repulpes de los papeles A y D sufren una disminución aproximada de 3% ISO, mientras que B y C de 5% ISO.

De todas las mediciones ópticas de papel disponibles, el whiteness es un buen predictor del "blanco" del papel. Teóricamente es una mejora sobre el brightness, pero los resultados se desvían si el papel es azulado. Valores de whiteness superiores a 100 generalmente indican la presencia de blanqueadores ópticos. Cuando en whiteness disminuye, la hoja se ve más amarillenta. Esta propiedad muestra un comportamiento similar que la blancura, con una disminución aproximada de 4% en A y de 13%, 9% y 8% en B, C y D respectivamente.

Tabla 4. Propiedades ópticas de los papeles originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas para el 2do reciclo, y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo

Muestra	Blan-cura	White-ness	L*	a*	b*	Opaci-dad	Coef. disp. luz s	Coef. abs. luz k
	(% ISO)	(%)				(%)	(m ² /kg)	(m ² /kg)
Papel A	110	159	95	3,63	-16,2	90,8	52,2	0,80
A	92,3	127	91	2,74	-10	82,3	27,29	0,94
A0	89,9	122	91	2,76	-9,5	85,2	30,68	1,13
A1	89,1	122	90	2,78	-9,2	82,1	25,10	1,07
A2	88,6	123	90	2,70	-9,9	81,1	24,01	1,04
Papel B	108	156	94	3,71	-15,5	90,8	51,10	0,80
B	91,5	126	91	2,65	-10,0	82,7	28,84	0,95
B0	86,6	113	90	2,39	7,8	85,5	29,52	1,16
B1	86,1	113	90	2,32	-7,6	82,9	26,11	1,08
B2	85,8	113	90	2,31	-7,7	82,5	25,12	1,12
Papel C	106	157	93	3,6	-16,4	94,6	59,50	1,45
C	94,4	138	91	2,98	-13	88,9	35,09	1,40
C0	90,0	128	89	2,87	-12	89,8	35,19	1,61
C1	88,6	129	89	2,86	-12	88,3	31,45	1,59
C2	88,4	129	89	2,80	-11	85,5	27,06	1,46
Papel D	106	157	93	3,69	-16,2	92,5	51,60	1,22
D	94,2	138	91	3,62	-13	81,8	24,94	1,02
D0	88,7	128	89	3,65	-11	84,1	25,72	1,33
D1	91,0	135	89	3,69	-13	81,7	23,76	1,18
D2	88,7	130	89	3,67	-12	80,2	21,65	1,18

Tabla 5. Cenizas de las hojas originales, de las hojas del 1er reciclo utilizadas en el 2do reciclo y de las hojas de pulpa refinada del 2do reciclo

	% cenizas papeles originales	% cenizas 1er reciclo s/ refinar	% cenizas 1er reciclo refinadas	% cenizas 2do reciclo s/ refinar	% cenizas 2do reciclo refinadas
Muestra A	19,1	3,73	2,04	0,48	0,40
Muestra B	17,8	3,58	1,67	0,36	0,30
Muestra C	15,8	3,83	2,08	0,55	0,45
Muestra D	14,7	4,25	3,45	1,30	1,01

La disminución de estas propiedades se produce por la disminución del blanqueador óptico y de la cantidad de carga mineral en los sucesivos reciclos (**Tabla 5**).

El parámetro de color L^* muestra un comportamiento similar a la blancura, mientras que el a^* disminuye con el 2do reciclo (se neutraliza el rojizo) en B y C y no se modifica significativamente en A y D. El parámetro de color b^* aumenta en el 2do reciclo (más amarillento) en A, B y C y no varía en D.

En todos los casos, el refino genera una cierta recuperación de opacidad y scattering. La opacidad de los papeles A y B no se modifica significativamente con el reciclo y el refino, mientras que C y D sufren una ligera pérdida.

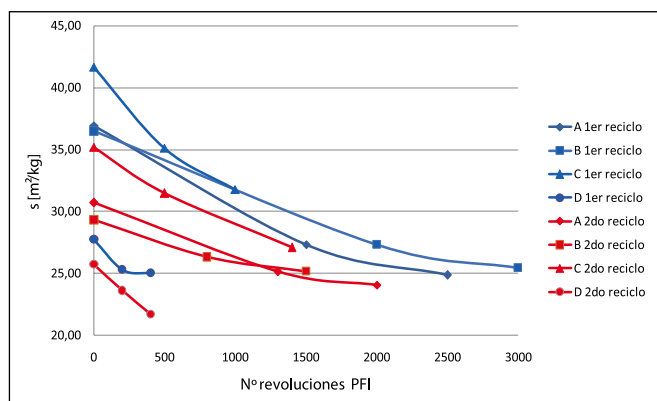


Figura 4. Comparación del coeficiente de dispersión de la luz (s) vs. nº revoluciones PFI del 1er y 2do reciclo

El coeficiente de dispersión de la luz (light scattering, s) desciende significativamente con los refinados a valores inferiores que los del 1er reciclo, debido al aumento de *bonding* producido por el refino (**Figura 4**). El coeficiente de absorción de la luz (k) aumenta ligeramente, en todos los casos, con el 2do reciclo.

CONCLUSIONES

La reciclabilidad, representada por la evolución de prácticamente todas las propiedades de los papeles repulpados, es diferente en todos los casos, aunque muestra una mayor similitud entre los papeles fabricados a partir de pulpas kraft de eucalipto que entre éstos y el papel a la soda de bagazo.

En el caso de los papeles kraft de *Eucalyptus grandis* blanqueados ECF, pese a la similitud de materia prima y procesos de pulpado y blanqueo, puede considerarse que el papel A presenta la mayor reciclabilidad luego de 2 reciclos y refinados. Por su parte, el C mantuvo o mejoró propiedades importantes y el B es el que más propiedades perdió con los tratamientos.

Esto significa que la aplicación de ajustes finos en los procesos de pulpado y de blanqueo podrían producir diferencias importantes en la reciclabilidad de los papeles finales.

El papel de bagazo requirió mucha menor energía de refino, pero mostró propiedades muy inferiores al resto en los dos reciclos.

En general, el uso de condiciones moderadas en el primer reciclo (refino a 30°SR y baja intensidad) permitió lograr un 2do reciclo sin pérdida significativa de propiedades. ■

REFERENCES

1. Iosip A., Nicu R., Ciolacu F. y Bobu E. *Influence of recovered paper quality on recycled pulp properties*. Cellulose Chem. Technol., 44 (10), 513-519 (2010)
2. Nazhad M. M. *Recycled Fiber Quality- A Review*. J. Ind. Eng. Chem., 11 (3) 314-329, (2005)
3. Hubbe, M. A., and Zhang, M., *Recovered Kraft Fibers and Wet-End Dry-Strength Polymers*, Proc. TAPPI Practical Papermakers Conf., TAPPI Press, Atlanta (2005).
4. Schenk, N.J., Moll, H.C., Potting, J., *The Nonlinear Relationship between Paper Recycling and Primary Pulp Requirements. Modeling Paper Production and Recycling in Europe*. Journal of Industrial Ecology. 8 (3), 141-164 (2004).
5. Hubbe, M. A., Venditti, R. A., and Rojas, O. J. *What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review*, BioRes. 2(4), 739-788 (2007).
6. Yasumura, P. K., D'almeida, M. L. O., Park, S. W. *Ações de refino em moíno PFI e em refinador industrial de disco*, O Papel 69, 63-72 (2008).
7. Villalba G.; Segarra M.; Fernandez A.I.; Chimenos J.M.; Espiell F. *A proposal to quantify the recyclability of materials*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 37, Issue 1, 39-53 (2002).
8. Axegård, P., J. Carey, J. Folke, P. Gleadow, J. Gullichsen, D. Pryke, D. Reeve, B. Swan, and V. Uloth. *Minimum-impact mills: Issues and challenges. In Environmental impacts of pulp and paper waste streams*, ed. T. Stuthridge, M.R. van den Hueval, N.A. Marvin, A.H. Slade, and J. Gifford. Pensacola, FL: SETAC Press (2003).
9. Benitez, J., Otero de Almeida, M.L., Felissia, F., Park, S.W., Koga, M.E.T., and Area, M.C., *Office Paper Recyclability - Fibrous Characteristics*, O Papel vol. 75, num.7, pp. 48-53, July (2014).
10. Benitez, J., Otero de Almeida, M.L., Felissia, F., Park, S.W., Mariza Eiko T. Koga, Area, M.C. *Office Paper Recyclability: First Recycling*, O Papel vol. 75, num. 7, pp. 54-61 July (2014).
11. Khantayanuwong, S. *Effects of Beating and Recycling on Strength of Pulp Fibers and Paper*. Kasetsart Journal. 36 (2) 193-199 (2002).
12. Ellis R.L., Sedlachek, K.M. *Recycled versus virgin fiber characteristic comparison in secondary fiber recycling* Tappi, 76 (2) 143-146 (1993).