

Capítulo 2

Potencialidades de la nanocelulosa y celulosa microfibrilada en la industria celulósico-papelera. Desarrollos con y para el sector industrial de Argentina

*Nanci Ehman
Fernando Esteban Felissia
María Evangelina Vallejos
María Cristina Area¹*

<https://doi.org/10.61728/AE20246037>

¹ Todos los autores de este capítulo: Programa de Celulosa y Papel (PROCYP), Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, UNaM-CONICET), Posadas, Argentina.

Resumen

Las tendencias actuales y el efecto de la globalización continúan marcando puntos de inflexión en el mercado de la celulosa y papel. Es así, que la fabricación de papeles y cartones se dirige hacia un escenario de innovaciones, principalmente en el mercado del embalaje de productos. Esta demanda creciente de materiales celulósico-papeleros con destino a embalaje conlleva a una transformación por parte de las industrias, ya sea en la búsqueda de nuevas formulaciones como en las tecnologías de sus procesos. El cambio ha sido más abrupto para las fábricas de papeles de impresión y escritura, que en muchos casos buscan evolucionar hacia procesos destinados a la fabricación de productos para embalaje. Además, a estos sucesos se añaden otros factores como la búsqueda de excelencia en las propiedades físico mecánicas de papeles y cartones e incluso, en algunos casos, la eliminación parcial o total de fibra virgen en empastes por costos o aspectos ambientales. La importancia del buen diseño de formulaciones radica en el hecho de obtener un material con propiedades físicas y mecánicas óptimas para su aplicación final. Una de las estrategias que ha sido evaluada en los últimos años es la incorporación de celulosa nano y microfibrilada. Se ha demostrado que su adición a pulpas de fibra virgen o reciclada imparte mejoras en las propiedades físico-mecánicas de los papeles y cartones obtenidos. Sin embargo, la mayoría de los casos estudiados han sido referidos a formulaciones desarrolladas en laboratorio. El objetivo de este capítulo es otorgar al lector una visión generalizada acerca de la aplicabilidad directa de la celulosa nano y microfibrilada en la fabricación de papeles y cartones en empastes industriales. El desarrollo del capítulo involucra aspectos relacionados con experiencias de trabajos realizados con y para la industria incluyendo estrategias de aplicación de este aditivo innovador. Asimismo, se dan a conocer los desafíos a solventar para que puedan incorporarse a la línea de procesos.

Introducción

La evolución de la industria celulósico papelera ha sido impulsada principalmente por aspectos económicos, ambientales y sociales, en particular para lograr procesos que permitan una mayor rentabilidad. Este es el caso de la diversificación de las fábricas de papel periódico hacia el sector de embalaje con producciones de papeles onda y liner. Esta transición es debida principalmente a cambios en el consumo (significativamente visibles luego de la pandemia) y que resultan actualmente una tendencia.

Algunos ejemplos de esta diversificación en la Unión Europea son Stora Enso con su planta en Langerbrugge (Bélgica), que actualmente se encuentra analizando la viabilidad de convertir dos líneas de producción de papel periódico y revista en una máquina que produzca alrededor de 700 000 toneladas de liner y onda a partir de fibra reciclada, a partir del 2025 (Mundo Papelero, 2022). En España, Papresa de Rentería planea migrar su proceso de fabricación de 100 % papel periódico hacia un 75 % de papel onda y liner de 65-140 g/m², todo a partir de fibra reciclada, a partir del año 2023 (Maite Martínez, 2022).

En Estados Unidos, una de las fábricas de Domtar en Tennessee productora de papeles de impresión, que ahora pertenece a Paper Excellence, durante el 2022 se reconfiguró a la producción de papeles para embalaje con 100 % de fibra reciclada. A largo plazo también pretende la conversión de las fábricas de Arkansas, Kentucky y Carolina del Sur (Mark R. Hahn, 2022). Por otro lado, Verso Corporation, que actualmente fue adquirida por la firma sueca Billerud AB (antes BillerudKorsnäs), realizará una diversificación secuencial de sus máquinas de papel encapado hacia papeles para el sector de embalaje, con una conversión muy importante de la fábrica de Escanaba para producción de cartón de clase mundial, sostenible y totalmente integrado. Se espera que se conviertan dos máquinas a una capacidad total de alrededor de 1100 kton de papeles destinados a embalaje, para 2025 y 2029 respectivamente (Mark R. Hahn, 2022).

En Argentina, también se visualizó la diversificación hacia la producción en papeles de embalaje. Ledesma, fábrica integrada que produce papeles de impresión y escritura principalmente a partir de bagazo de caña de azúcar, durante la pandemia adaptó sus máquinas para la fabricación de papel de embalaje. Sin embargo, esta fábrica aplica los términos diversifi-

cación en sus papeles en función de la rentabilidad, ya que durante 2022 (debido al retorno presencial en oficinas y escuelas) redujeron la producción de papeles de embalaje para volver a su mercado habitual de impresión y escritura (40 % del total en el país) (Andrés Sanguinetti, 2022). Otra de las fábricas que diversificó su producción desde papel de impresión y escritura a embalaje es Papel Prensa S.A. En los últimos años, sus máquinas de papel migraron hacia la producción de papel onda y liner de bajos gramajes, a partir de fibra quimimecánica con refuerzo de pulpa química (PAPEL PRENSA S.A., n.d.).

Una de las estrategias que ha sido evaluada en los últimos años para mejorar las propiedades de cartones, es la incorporación de celulosa nanofibrilada (CNF) y celulosa microfibrilada (CMF) a los empastes. Se ha demostrado que su adición en pulpas de fibra virgen o reciclada imparte mejoras en las propiedades físico-mecánicas de los papeles y cartones obtenidos (Balea et al., 2019, 2020; Ehman et al., 2020; Sanchez-Salvador et al., 2020; Tarrés et al., 2020).

Actualmente, las tres empresas que comercializan CMF en cantidades aceptables son FiberLean® Technologies (12 000 t/año), FiloCell™ Kruger (6000 t/año) y Exilva de Borregaard (1100 t/año). Estas empresas ofrecen sus productos en húmedo (Borregaard, n.d.; Fiberlean, n.d.; Kruger Inc., n.d.) o incluso en algunos casos, secos por liofilizado o sistemas tipo spray. Sin embargo, los costos del producto se incrementan exponencialmente (Cellulose Lab, n.d.; University of Maine, n.d.).

El objetivo de este capítulo es otorgar al lector una visión generalizada acerca de la aplicabilidad directa de la CNF y CMF en la fabricación de papeles y cartones en empastes industriales. El desarrollo del capítulo involucra aspectos relacionados a experiencias con la industria incluyendo estrategias de aplicación de este aditivo innovador y una síntesis de los desafíos a solventar para que puedan incorporarse a la línea de procesos.

Planteamiento del problema

Los principales factores que definen las propiedades del papel y cartón son la materia prima, el tipo de pulpado y los aditivos añadidos en máquina de papel. Las materias primas que componen los empastes estudiados invo-

lucran pulpas vírgenes (fibras cortas y largas) y recicladas. En la Tabla 1 se indican datos generales de las fábricas participantes. Las mismas producen cartones liner (L), testliner (TL) y onda, también denominado corrugado medio (CM) a partir de empastes que incluyen en sus componentes fibras vírgenes y recicladas.

Los empastes de trabajo incluyeron fibras recicladas, en particular OCC (Old Corrugated Containers), fibra reciclada de alta calidad, DKL (Double Kraft Liner), refles y corrugado. En algunos casos se añade entre un 5-10 % de fibra virgen corta o larga, dependiendo el producto final.

La composición del empaste dependerá de la aplicación final del cartón. Por ejemplo, si se fabrica un cartón liner, se procederá a un empaste con mayor porcentaje de reciclado de alta calidad e incluso, en algunos casos, con incorporación de fibra virgen. Para producir papel onda se puede incluir OCC de calidad media sin incorporación de fibra virgen (empaste de menor costo). La fábrica que produce papel onda a partir de PAR plantea un caso particular: la pulpa es menos resistente, por lo que se añade un porcentaje de fibra larga para solventar problemas de resistencias mecánicas.

Tabla 1. *Datos de las fábricas involucradas en el estudio*

Fábrica	Materias primas	Producto	Gramaje (g/m ²)
Fábrica 1	Reciclado OCC nacional, corrugado y refile interno.	TL	165
		CM	175
Fábrica 2	Reciclado OCC alta calidad.	TL/CM	170
Fábrica 3	Reciclado OCC nacional y refile interno.	TL	130
	Reciclado OCC nacional, cartón de segunda calidad: conos, etcétera.	CM	130
Fábrica 4	PAR con refuerzo de fibra química.	CM	110
Fábrica 5	Reciclado OCC nacional e importado.	CM	170

Los requerimientos específicos recibidos por parte de la industria fueron:

- Incremento de las propiedades mecánicas en papeles test liner sin incremento del gramaje.

- Incremento de las propiedades mecánicas en papeles onda sin incremento de gramaje para evitar problemas durante la impresión, como por ejemplo la marca del cartón corrugado sobre la impresión en capa liner.
- Reducción del porcentaje de fibra virgen adicionada al empaste, en particular en test liner especiales.

Las propiedades críticas mencionadas por las diferentes fábricas fueron CMT (*Cóncora Medium Test*, ensayo cóncora), SCT (*Short Span Compression Test*, ensayo de compresión en corto), RCT (*Ring Crush Test*, ensayo de aplastamiento de anillo), corrugabilidad y porosidad.

Características de los productos involucrados

La comercialización de materiales destinados a embalaje alcanzó los 1015 millones de dólares durante el año 2021, siendo el mercado de papel y cartón un 33 % del total (Metsä Board, n.d.). Uno de los productos más utilizados en embalaje es el cartón corrugado. Este tipo de embalaje se compone de dos partes principales: papel liner como componente plano, y papel onda (*fluting*, corrugado medio o “médium”) en el interior. La estructura del cartón puede dividirse en simple cara (SF: hoja simple liner y ondulado, un módulo), doble cara (o pared sencilla), doble-doble (DD: cuando a la doble cara se le añade un módulo SF), y en algunos casos un DD con un módulo adicional para usos específicos constituyendo un triple ondulado (Cepi Container Board, 2021; Twede et al., n.d.). El liner y onda que componen el cartón aportan propiedades específicas y es así como se definen sus propiedades críticas (Zanuttini et al., 2008).

Las propiedades físicas son de relativa importancia en los papeles de embalaje. El aspecto no es importante en el caso de un papel con destino a onda, sin embargo, sucede lo contrario en el papel liner (Alberto Zumeta, 2008). Las fábricas suelen utilizar colorantes para los test liners e incluso en algunos casos se añade una capa de pulpa blanqueada en la parte externa superior, sobre todo si esa cara requiere impresión.

La humedad es otra propiedad importante, ya que si es muy elevada podría suponer cambios dimensionales o variaciones en las propiedades

mecánicas. Para el procesamiento del papel en la corrugadora la humedad es un factor clave: las corrugadoras se diseñan para trabajar entre 6-8 % de humedad y si la bobina que llega a la corrugadora tiene humedad despareja, la tensión a lo largo de la hoja será diferente. Para una fabricación óptima del cartón, el perfil de humedad del papel liner debe ser entre 7-9 % y para papel onda entre 7-8 %. Por ejemplo, un incremento adicional en 1 % en la humedad disminuye en 8 % la resistencia a la compresión. El gramaje y el espesor del papel liner y onda influyen directamente en la aplicación del adhesivo durante la fabricación del cartón. En el caso del gramaje, se recomienda una variación menor al 3 % a lo largo de las bobinas (G. Mistrorigo, 2020), a mayor gramaje, se requerirá más adhesivo. Los efectos de un perfil inadecuado de gramajes y espesor conllevan a la aparición de arrugas, despegado de capas y arqueado (o comba en S, cartón abarquillado) del cartón formado.

En el caso de papel onda, la permeabilidad es una propiedad crítica en la corrugadora, y se busca un material poroso que facilite la evacuación del aire de la hoja durante el corrugado logrando una mejor formación. Por otro lado, los papeles liner pueden presentar una hoja más cerrada, con menor permeabilidad al aire. La permeabilidad a los líquidos presenta un comportamiento similar, ya que influye en la adhesividad del pegamento durante la formación del cartón y el uso final. Este valor es muy influenciado por la aplicación de encolado (Sergio Ginés Cosín, 2017).

El papel onda requiere altas resistencias al aplastamiento, impacto y compresión. Las propiedades mecánicas más importantes son: tracción, elongación y TEA, resistencia al aplastamiento (que puede medirse a través del CMT), resistencias a la compresión sobre el canto del papel onda (propiedades como el CCT, Corrugated Crush Test o el RCT. En el caso del papel liner, se tendrán como propiedades críticas las resistencias al rasgado, explosión, tracción, elongación, el TEA (energía absorbida a la tracción), plegado, RCT y SCT (Alberto Zumeta, 2008; Zanuttini et al., 2008). A pesar de la frecuencia con que se realiza el ensayo de RCT, en la actualidad la industria está migrando hacia ensayos de SCT para determinar la calidad del corrugado y esto se debe a que el RCT es un ensayo que se ve afectado por la rigidez a la flexión y por el gramaje de la muestra (Popil, n.d.).

De acuerdo con la lista de calidades de la Asociación de la industria europea de productores de materiales para cajas de cartón ondulado (CCB) es posible identificar las propiedades críticas de los papeles liner y onda (Cepi Container Board, 2014). El testliner crudo se compone de un mayor porcentaje de fibra reciclada y sus dos propiedades críticas son la resistencia a la explosión y el SCT-DT (DT: medido en la dirección transversal de la máquina de papel), (Tabla 2). Otras de las propiedades mecánicas de importancia son la resistencia a la tracción y elongación (Cepi Container Board, 2014).

Tabla 2. Calidades críticas testliner de acuerdo a la lista de CCB (Cepi Container Board, 2014)

Calidad	Gramaje (g/m ²)	Índice de explosión (kPa m ² /g)		SCT-DT (Nm/g)
		ISO 2758	ISO 2759	
Testliner 1	< 200	≥ 2,80	≥ 3,00	≥ 17,5
	≥ 200	≥ 2,80	≥ 2,90	
Testliner 2	< 200	≥ 2,20	≥ 2,50	≥ 15,5
	≥ 200	≥ 2,20	≥ 2,40	
Testliner 3	< 95	≥ 1,60	≥ 1,90	≥ 13,5
	≥ 95	≥ 1,70	≥ 2,00	
	≥ 120	≥ 1,80	≥ 2,00	
	≥ 200	≥ 1,80	≥ 1,80	
Testliner 4	≥ 90	≥ 1,30	---	≥ 11,5

Dentro de la misma lista de calidades es posible encontrar al papel onda con opciones de papeles de fibra virgen o reciclada. El papel onda semi-químico se compone de más de un 80 % de fibra virgen semiquímica. Las propiedades críticas en este tipo de calidad serán CMT, CCT y SCT-DT para expresar la rigidez de los esfuerzos de compresión (Tabla 3). Este tipo de onda es un grado de papel cartón para cajas de alta calidad y alto rendimiento que se utiliza como componente clave de las bandejas y cajas de frutas y verduras frescas.

Tabla 3. Calidades críticas de papel onda de acuerdo a la lista de CCB (Cepi Container Board, 2014)

Calidad	Gramaje (g/m ²)	Índice CMT 30 (Nm ² /g)	Índice SCT-DT (Nm/g)
Semiquímico 1	--	≥ 2,20	≥ 20,0
Semiquímico 2	--	≥ 1,90	≥ 16,0
Medium de altas prestaciones 2	≥ 100	≥ 2,00	≥ 19,0
Medium de altas prestaciones 3	≥ 100	≥ 1,80	≥ 17,0
Medium 1	≥ 100	≥ 1,60	≥ 15,0
Medium 2	≥ 100	≥ 1,45	≥ 13,5
Medium ligero reciclado (LWM)	95	--	≥ 1,35
	90	--	≥ 1,30
	85	--	≥ 1,30
	80	--	≥ 1,15
	75	--	≥ 1,00

El papel onda con mayor porcentaje de fibra reciclado se denomina *fluting medium* reciclado para un gramaje >100, mientras que su denominación será *medium* ligero reciclado LWM para gramajes <100. En ambas calidades las propiedades críticas son CMT y SCT-DT (Cepi Container Board, 2014)

Trabajo realizado

Descripción general

En este trabajo, las actividades involucran la producción de CMF y CNF y su caracterización e incorporación en cada uno de los empastes industriales, simulando las acciones en cada sección de la máquina de papel. Las etapas de trabajo realizado se indican en la Figura 1.

El primer contacto con las fábricas involucró el planteo del problema, generalmente buscando el incremento de alguna propiedad para cierta aplicación específica o simplemente para cumplir con los mínimos estándar.

dares de calidad establecidos en el mercado. Entre los planteos más frecuentes encontramos:

- Reducción en el consumo de fibra virgen, este es un típico caso en fabricantes que utilizan materia prima reciclada.
- Maximización de alguna propiedad específica, siendo recurrente la solicitud del incremento en las propiedades mecánicas.
- Reducción en la intensidad de refino de las pulpas.
- Reducción en las dosis aplicadas de los aditivos, especialmente los agentes de refuerzo mecánico en seco.

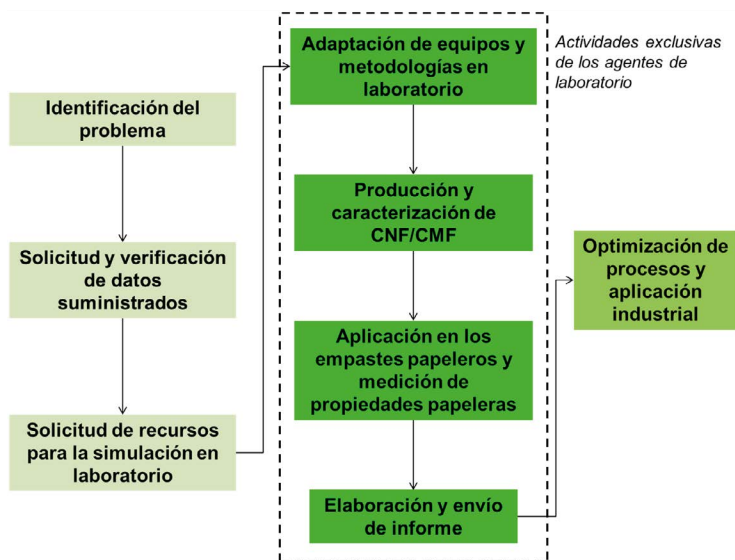


Figura 1. Resumen de la metodología aplicada con cada fábrica

El segundo paso involucró una acción conjunta entre los investigadores y los responsables de cada fábrica para identificar los detalles de materias primas, proceso y producto. Una vez recopilada la información, los investigadores realizaron una visita a fábrica con el objetivo de identificar puntos posibles para la adición de CMF/CNF, además de identificar los eventuales cuellos de botella. Este paso de familiarización con el proceso productivo es importante debido a que permite replicar los procesos en laboratorio con alta similitud al proceso en fábrica. Además de la infor-

mación detallada de los procesos y controles de calidad, se solicitan los elementos necesarios para lograr la simulación en laboratorio: materias primas, aditivos, aguas de proceso, etcétera.

A partir de este punto los investigadores buscan adaptar las metodologías en laboratorio tal de simular, lo más ajustadamente posible al proceso de fabricación industrial.

Primeramente, se lleva a cabo el proceso de producción de CNF y CMF. La CNF fue producida utilizando la metodología de (Saito y Isogai, 2004), mientras que la CMF se obtuvo con refinador de discos simple adaptando un sistema de recirculación. Las materias primas empleadas para la producción de CNF y CMF fueron pulpas comerciales (kraft blanqueado y no blanqueado de chips de pino) y en algunos casos los empastes suministrados por las fábricas. Luego, se elaboran en el laboratorio las hojas de igual gramaje al producido en fábrica, utilizando una formadora de hojas estándar. La formadora incluye un sistema de recirculación donde además se utilizan aguas blancas del sector máquina. Se caracterizan los productos obtenidos y se aplican estos en los empastes suministrados, simulando los procesos de fábrica (orden de agregado de los aditivos con las mismas dosis, aguas de proceso, sistemas de recirculación, etc.). Además, en el laboratorio de calidad se ensayan los papeles producidos en planta y se comparan con los valores suministrados por el responsable de fábrica con el fin de evaluar la variabilidad de las mediciones entre ambos laboratorios. Las propiedades papeleras se miden de acuerdo con normas estandarizadas y con los resultados se realiza el análisis estadístico. Finalmente, se envía un informe por planta con los resultados evaluados. En algunos casos, los investigadores, además de indicar los resultados, añaden algunas recomendaciones. En el caso de la incorporación de CMF o CNF, la recomendación más frecuente es una evaluación del sistema de retención previa aplicación industrial. La última etapa involucra la optimización de procesos y la aplicación industrial. Esta etapa depende de la fábrica, aunque la identificación y planteo de los desafíos del escalado puede incluir la participación de los investigadores involucrados en el proyecto.

Resultados de la incorporación de CMF/CNF en los empastes industriales

Propiedades críticas

En la Figura 2 se observan los valores de propiedades críticas para liner y su clasificación en los estándares de calidad según CCB (Cepi Container Board, 2014). En general, se observa un incremento en los valores de índice de explosión y SCT-DT cuando se añade CMF o CNF. En la Fábrica 2, la adición de CMF y CNF permitió subir de un testliner de segunda a primera calidad, incluso utilizando un gramaje menor ($G < 150 \text{ g/m}^2$). Los valores de SCT-DT y explosión se ubican por sobre los valores de los empastes crudos, sin agregados de CMF y CNF, de las fábricas 1 y 3, donde los gramajes que se utilizan son mucho mayores ($G > 150 \text{ g/m}^2$). Esto permite demostrar la capacidad de las CNF y CMF de incrementar las propiedades para alcanzar estos estándares de calidad, incluso con gramajes más bajos (sin incorporar fibra virgen).

En el caso del empaste con PAR (Fábrica 4) se logra un incremento de hasta 23,1 % en el índice de explosión con adición de CMF, mientras que el índice en SCT-DT aumenta en hasta un 14,0 % con adición de CNF. Para el gramaje que actualmente produce esta fábrica, la PAR no alcanza el valor mínimo requerido en el índice de explosión si se compara con kraftliner o testliners de primera calidad. La incorporación de CNF y CMF no mejora el bajo índice de explosión, el liner fabricado se asimila a un testliner de tercera calidad. No sucede lo mismo con los valores de SCT-DT, donde el liner del empaste con o sin adición de CNF o CMF alcanza índices dentro de los rangos habituales kraftliner de primera calidad ($\text{SCT-DT} \geq 18,0 \text{ Nm/g}$).

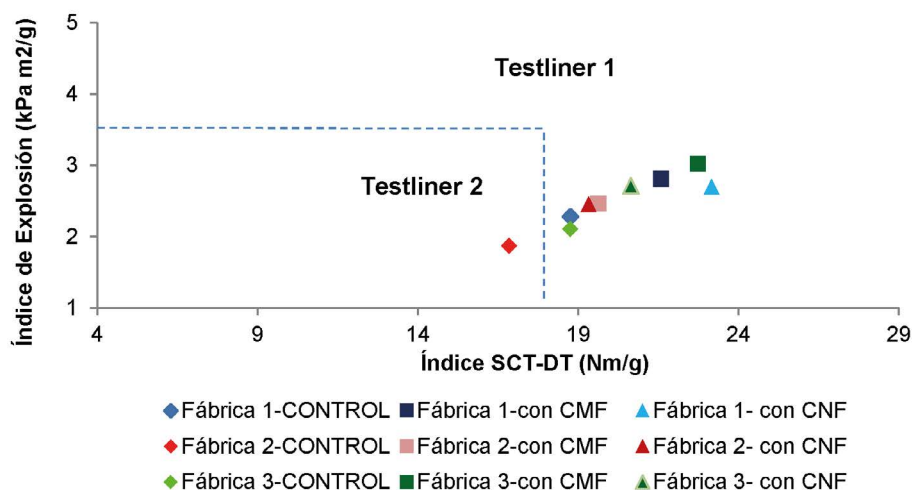


Figura 2. *Calidades e incrementos alcanzados en liner*

En estos casos, si se buscara un incremento en el índice de explosión, deberá evaluarse cuales de los siguientes factores que afectan a la explosión podrían variarse sin que sea necesario modificar los componentes del empaste: gramaje y densidad del liner, grado de refino de la pulpa componente, formación y defectos en la hoja, presencia de agentes de encolado o tratamientos superficiales sobre el liner, y distribución de finos. Más adelante, en la sección de aditivos se mencionará la influencia de los aditivos de retención en el índice de explosión de los liners.

Para los testliner producidos, la adición de CNF y CMF incrementó la resistencia a la tracción, elongación y TEA, siendo mayor el incremento con la adición de CNF en los empastes con mayor porcentaje de fibra reciclada, y de CMF, en el empaste con PAR.

Las propiedades críticas en un papel onda son el ICMT y el ISCT-DT. En este trabajo se evaluó el índice CMT0. En la Figura 3 se muestran los cambios alcanzados con las formulaciones. Se observa que la fábrica 1 con la adición de CNF y CMF mejora significativamente los índices evaluados.

En el caso del papel onda obtenido con el empaste de la fábrica 2, la adición de CNF y CMF mejora los índices CMT0 y SCT-DT respecto del control, produciendo el mismo cambio el agregado de CNF y CMF. Con

el empaste de la fábrica 3 la adición de CNF/CMF mejora significativamente el índice SCT-DT con una ligera mejora en el índice CMT0.

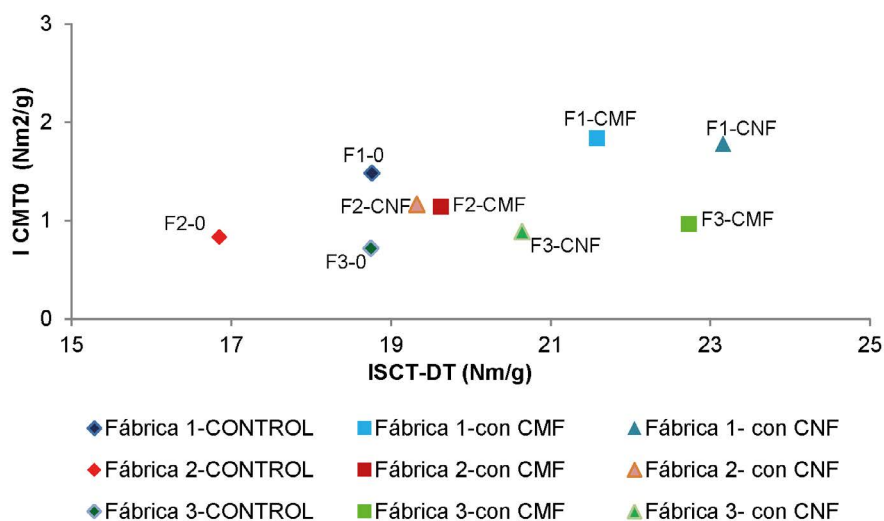


Figura 3. Evolución de los I. CMT0 e I. SCT-DT en papeles onda de 3 fábricas

Los valores de SCT del papel onda de PAR con adición de CMF y CNF fueron comparables con calidades de onda semiquímico (19,6 Nm/g y 20,5 Nm/g cuando se adicionan CMF y CNF respectivamente). Si se compara con papel onda derivado de reciclado, esta muestra podría incluirse en la calidad medium de altas prestaciones 2.

Finalmente, la fábrica 5 solo determina RCT y CMT0 como parámetros de calidad. La adición de CMF incrementó en un 21,4 % el valor de RCT, superando el valor máximo dentro de las especificaciones para corrugado doméstico que comercializa esta empresa. Sin embargo, los valores de CMT0 se mantuvieron en la calidad más baja incluso con la adición de CMF (1,36 Nm²/g), lo que podría estar indicando un problema de retención.

Inconvenientes en los sistemas de retención

Los aditivos son la clave del éxito cuando se busca maximizar alguna propiedad específica o simplemente mantener el papel dentro de los estándares del mercado. Por lo tanto, a pesar de ser un complemento en la máquina de papel, tienen gran influencia en dos aspectos fundamentales: productividad y calidad.

Los aditivos más comunes en las líneas de proceso estudiadas incluyeron almidón catiónico, agentes de retención y drenado, coagulantes, flocculantes, encolantes, agentes de resistencia en seco y aditivos adicionales como colorantes y auxiliares. El punto de dosificación varía de acuerdo con los diferentes sistemas empleados en máquina de papel. En la Figura 4 se observa un esquema general para la fabricación de papel onda con todos los puntos de aplicación (1 al 6) (Gullichsen y Paulapuro, 2000).

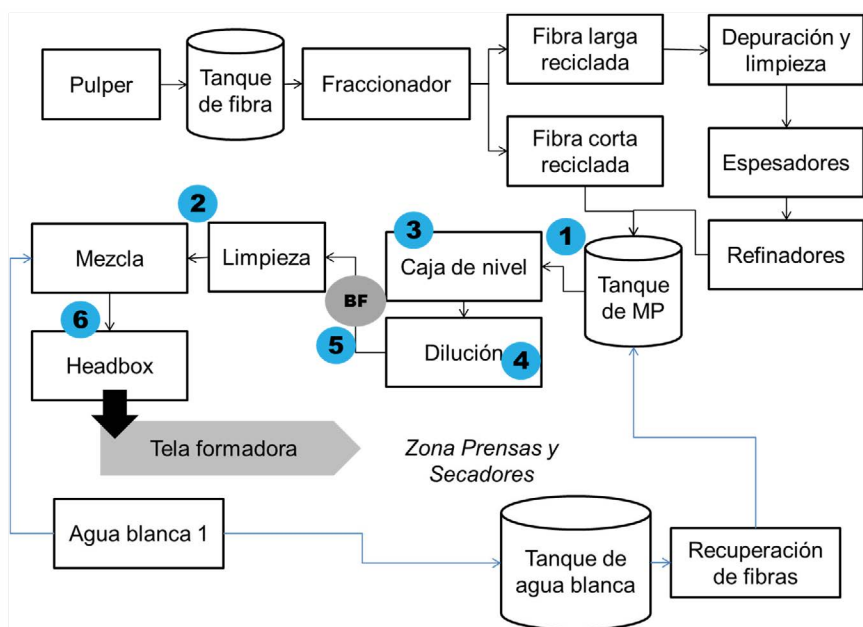


Figura 4. Puntos para dosificación adaptada de (Gullichsen y Paulapuro, 2000)

En todos los casos, la adición de CNF y CMF fue realizada en el tanque de materia prima (Tanque de MP), previa incorporación de los aditivos

funcionales. El agregado de CNF y CMF reduce el drenado de agua en la tela formadora. Los incrementos observados en el grado Schopper Riegler ($^{\circ}\text{SR}$) para los diferentes empastes se indican en la Figura 5.

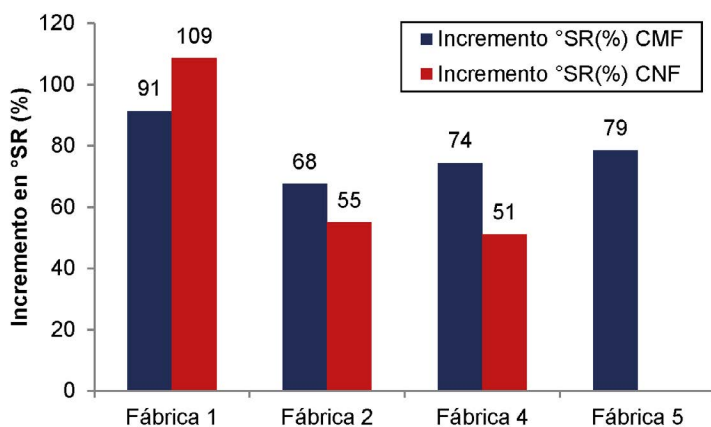


Figura 5. Incrementos en el $^{\circ}\text{SR}$ por adición de CNF y CMF en los empastes

A excepción de la Fábrica 3, se observaron incrementos mayores al 50 % en el $^{\circ}\text{SR}$ cuando CNF y CMF se incorporaron al empaste. Estos altos porcentajes indican que la velocidad de drenado se reduce a más de la mitad. El efecto del tiempo requerido para eliminar el agua en la formadora de hojas fue otro indicativo de los problemas de drenado al adicionar CNF y CMF a los empastes. A modo de prueba, se realizó una evaluación de sistemas de retención en uno de los empastes (Fábrica 1), donde se utiliza 100 % fibra reciclada y se adiciona CNF (Tabla 4).

Tabla 4. *Evaluación de sistemas de retención*

Tipo de sistema de retención		Incremento en tiempo de drenado (%)
C	Sistema utilizado en planta actualmente	318
R1	Simple (Polímero catiónico de densidad de carga media)	161
R2	Simple (Polímero catiónico de densidad de carga media): dosis duplicada a R2	84,8
R3	Dual: Polímero catiónico de alta densidad de carga + Sílice coloidal	75,8
R4	Simple (Polímero catiónico con alta densidad de carga)	57,6
R5	Simple (Polímero catiónico con alta densidad de carga): dosis duplicada	3,03

Esto demuestra la importancia de la optimización en la utilización de agentes de retención previa etapa de escalado a máquina de papel. En este sentido, se debe realizar un análisis de costos para los aditivos empleados y la influencia de su incorporación en las propiedades físico-mecánicas.

Comparación con acciones de refino industrial en pulpas

Una de las operaciones que se busca evitar adicionando CNF y CMF es el refino de las fibras recicladas que componen un empaste. Tradicionalmente, la mayoría de las fábricas que utiliza fibra 100 % reciclada refina la fibra larga, luego de una etapa de fraccionamiento y limpieza. Los ciclos de refino involucran la fibrilación externa e interna de la fibra logrando una mayor área de enlace que permite el incremento en algunas propiedades mecánicas, acciones que tienden a mejorar la calidad de la fibra reciclada reducida por los efectos y hornificación de la misma.

Sin embargo, los ciclos de refino para fibras recicladas no son infinitos: el uso de varios ciclos de refino causa daños irreversibles a la fibra, disminuyendo su vida útil (Ehman et al., 2020). En la Figura 6 se observa un ejemplo de la variación de dos parámetros críticos de los papeles onda y liner con la utilización de diferentes empastes donde se refina la pulpa de fibra corta (FC), de fibra larga (FL) y de ambas. Como ensayo de control simplemente se añade CNF o CMF a un empaste 100 % sin refino.

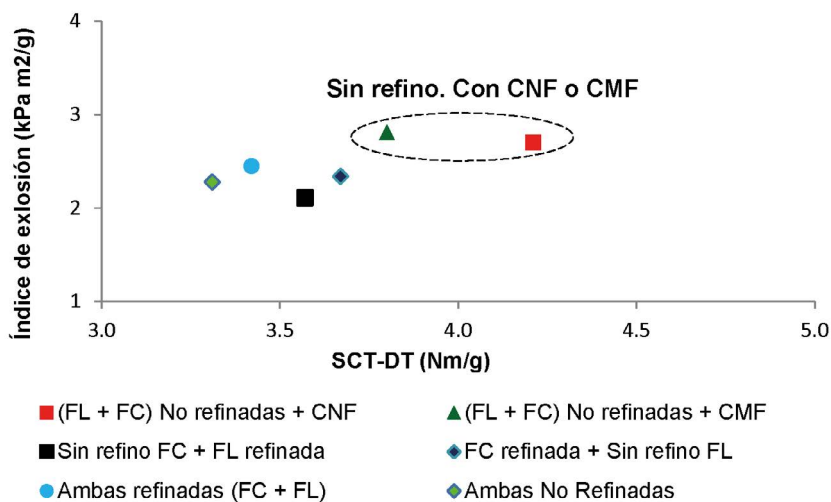


Figura 6. Comparación de efectos de refino en el empaste

Se observa que las propiedades resultan mejoradas en aquellas muestras donde solo se añade CNF y CMF sin refinar las fibras que componen el empaste.

Desafíos

La producción industrial de CMF y CNF presenta dos desafíos tecnológicos de alto impacto. El primer desafío es el elevado consumo energético de la microfibrilación. Numerosos estudios han evaluado el efecto de aplicar pretratamientos en las pulpas con el fin de reducir estos costos, los que pueden incluir acciones químicas y enzimáticas.

Por otro lado, el segundo desafío es el elevado contenido de agua en el producto final, lo que incrementa el costo de transporte. En este caso se recomienda la microfibrilación in situ (en la planta de papel) utilizando refinadores de discos del sector máquina o la instalación de la planta en cercanías de estos mercados posibles. En este caso se deberá realizar una evaluación de localización, teniendo en cuenta factores como costos energéticos, disponibilidad de mano de obra, servicios de agua en la zona, etc. (Tabla 5).

Tabla 5. Factores para la toma de decisiones en la instalación de una fábrica de CMF

Nivel de Influencia	Alto	Medio	Bajo
Medio y costo de transporte			
Disponibilidad y costo de mano de obra			
Costo de insumos			
Disponibilidad de materias primas			
Cercanía del mercado			
Factores ambientales			
Eliminación de residuos			
Costo, disponibilidad y topología del terreno			
Estructura impositiva y legal			
Disponibilidad y costos energéticos			
Disponibilidad y costos de servicios de agua			
Condiciones sociales y culturales			
Sistemas de apoyo (seguridad, calles, redes, etcétera)			

La fabricación in situ de CMF puede llevarse a cabo con las mismas pulpas utilizadas en el empaste o utilizando pulpas comerciales. Otra de las estrategias de obtención de CMF es a través de biorrefinerías lignocelulósicas (Clauser et al., 2021). En estos establecimientos se aprovecha integralmente la materia prima, por lo tanto, además de obtener CMF es posible la producción de una amplia gama de productos.

Conclusiones

La aplicación en masa de CNF o CMF incorpora mejoras en las propiedades mecánicas de papeles de embalaje, tales como papeles onda o liner fabricados de fibras con bajas resistencias como fibras recicladas o quimimecánicas. El empleo de estos nano/micro aditivos permite utilizar empastes libres de fibra virgen, eliminar las acciones de refino y lograr mejores calidades utilizando menores gramajes. Sin embargo, a pesar de que estos materiales resultan altamente beneficiosos para ser incorporados en la línea de proceso, aún se presentan numerosos desafíos a resolver para alcanzar la producción industrial, como la mejora en el drenado y los costos de energía y transporte.

Referencias

- Alberto Zumeta. (2008). *Manual de Elaboración del Cartón Ondulado. 1.*
- Andrés Sanguinetti. (2022, April 19). Grupo Ledesma anticipa un año “desafiante” para sus negocios. <https://www.iprofesional.com/negocios/360947-grupo-ledesma-anticipa-un-ano-desafiante-para-sus-negocios>
- Balea, A., Fuente, E., Concepcion Monte, M., Merayo, N., Campano, C., Negro, C., & Blanco, A. (2020). Industrial Application of Nanocelluloses in Papermaking: A Review of Challenges, Technical Solutions, and Market Perspectives. *Molecules* 2020, Vol. 25, Page 526, 25(3), 1–30. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25030526>
- Balea, A., Sanchez-Salvador, J. L., Monte, M. C., Merayo, N., Negro, C., & Blanco, A. (2019). In Situ Production and Application of Cellulose Nanofibers to Improve Recycled Paper Production. *Molecules*, 24(9). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24091800>
- Borregaard. (n.d.). *Cellulose fibrils - Borregaard*. Retrieved January 29, 2024, from <https://www.borregaard.com/product-areas/cellulose-fibrils/>
- Cellulose Lab. (n.d.). *Cellulose Lab | Nanocellulose, Cellulose NanoCrystal (CNC or NCC), Cellulose Nanofibrils (CNF) and Bacterial Cellulose (BC) Supplier – Provide the most diversified nanocellulose products / cellulose nanomaterials in the market*. Retrieved January 29, 2024, from <https://www.celluloselab.com/>
- Cepi Container Board. (2014). *Lista europea de papeles para cartón ondulado*. <http://cepi-containerboard.org>
- Cepi Container Board. (2021). *European Database for Corrugated Board Life Cycle Studies*.
- Clauser, N. M., Felissia, F. E., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2021). Design of nano and micro fibrillated cellulose production processes from forest industrial wastes in a multiproduct biorefinery. *Chemical Engineering Research and Design*, 167, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.CHERD.2020.12.003>
- Ehman, N. V., Felissia, F. E., Tarrés, Q., Vallejos, M. E., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., & Area, M. C. (2020). Effect of nanofiber addition on the physical–mechanical properties of chemimechanical pulp

- handsheets for packaging. *Cellulose*, 27(18), 10811–10823. <https://doi.org/10.1007/S10570-020-03207-5/FIGURES/6>
- Fiberlean. (n.d.). Fiberlean. Retrieved January 29, 2024, from <https://www.fiberlean.com/>
- G. Mistrorigo. (2020). *Curso de Proceso de Fabricación de Cartón Corrugado*. CA-FCO: Cámara Argetnina de Fabricación de CARTón Corrugado. 1–182.
- Gullichsen, J., & Paulapuro, H. (2000). Book 8 Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End Series editors Foreword.
- Kruger Inc. (n.d.). *The FiloCell advantage - Biomaterials - Kruger Inc.* Retrieved January 29, 2024, from <https://biomaterials.kruger.com/products/the-filocell-advantage/>
- Maite Martínez. (2022, February 14). *Quantum completa la conversión de Papresa hacia el papel de embalaje*. https://www.eleconomista.es/pais_vasco/noticias/11614124/02/22/Quantum-completa-la-conversion-de-Papresa-hacia-el-papel-de-embalaje.html
- Mark R. Hahn. (2022, June 7). *Paper Industry in Transition – May 2022 M&A Activity*. The Target Report. <https://www.thetargetreport.com/2022/06/paper-industry-in-transition-may-2022-m.html>
- Metsä Board. (n.d.). *The global packaging market | Metsä Board*. Retrieved January 29, 2024, from <https://www.metsagroup.com/metsaboard/investors/operating-environment/global-packaging-market/>
- Mundo Papelero. (2022, June 19). Stora Enso evalúa conversión de máquina papelera de periódico a embalaje en Bélgica - Mundopapelero.com. <https://mundopapelero.com/stora-enso-evalua-conversion-de-maquina-papelera-de-periodico-a-embalaje-en-belgica/>
- Papel Prensa S.A. (N.D.). *Papel para Embalaje*. Retrieved January 29, 2024, from <https://www.papelprensa.com/embalaje.php>
- Popil, R. (n.d.). *What's important in liner and medium physical properties*.
- Saito, T., & Isogai, A. (2004). TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. The effect of oxidation conditions on chemical and crystal structures of the water-insoluble fractions. *Biomacromolecules*, 5(5), 1983–1989. <https://doi.org/10.1021/BM0497769/ASSET/IMAGES/LARGE/BM0497769F00009.JPEG>
- Sanchez-Salvador, J. L., Balea, A., Monte, M. C., Negro, C., Miller, M., Ol-

- son, J., & Blanco, A. (2020). Comparison Of Mechanical And Chemical Nanocellulose As Additives To Reinforce Recycled Cardboard. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60507-3>
- Sergio Ginés Cosín. (2017). *Descripción y optimización del uso de cartón en envase y embalaje*. 1–65.
- Tarrés, Q., Area, M. C., Vallejos, M. E., Ehman, N. V., Delgado-Aguilar, M., & Mutjé, P. (2020). Lignocellulosic nanofibers for the reinforcement of brown line paper in industrial water systems. *Cellulose*, 27(18), 10799–10809. <https://doi.org/10.1007/S10570-020-03133-6/FIGURES/6>
- Twede, D., Selke, S. E. M., Kamdem, D.-P., & Pira, S. (n.d.). *SECOND EDITION CARTONS, CRATES and CORRUGATED BOARD Handbook of Paper and Wood Packaging Technology David Shires, BA (Hons)*.
- University of Maine. (n.d.). UMaine Nanomaterial Pilot Plant - The Process Development Center - University of Maine. Retrieved January 29, 2024, from <https://umaine.edu/pdc/nanocellulose/umaine-nanomaterial-pilot-plant/>
- Zanuttini, M., Antúnez, C., Clemente, A., Torres, Antonio. L., Ferreira, P., & Mochiutti, P. (2008). Propiedades del Papel. In *Panorama de la industria de celulosa y papel en iberoamérica*.