

# Capítulo 10

---

## **Lignocelulosa microfibrilada de recursos no convencionales como aditivo papelerero. El caso de la Moringa oleifera**

*Julieta B. Benitez<sup>1</sup>*  
*María E. Vallejos<sup>1</sup>*  
*María Cristina Area<sup>1</sup>*  
*Fernando E. Felissia<sup>1</sup>*

<https://doi.org/10.61728/AE20246112>

---

<sup>1</sup> Programa de Celulosa y Papel - Instituto de Materiales de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales, Posadas, Misiones, Argentina.

## Resumen

La Moringa oleífera es conocida comercialmente por el valor nutricional de sus semillas, hojas, tallos y flores, para consumo humano y animal. Es un árbol de rápido crecimiento que se adapta a una amplia gama de suelos, generando gran interés en su cultivo. El *Eucalyptus grandis* es, en cambio, un recurso forestal instalado ampliamente cultivado en América del Sur. La celulosa microfibrilada (CMF) y la lignocelulosa microfibrilada (LCMF) han despertado un gran interés como biomaterial, ya que tiene una amplia gama de aplicaciones potenciales en diversas industrias. El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de diferentes porcentajes de LCMF sobre pulpas marrones kraft fibra larga (BFL) y soda-antraquinona (AQ) fibra corta (BFC). La LCMF se obtuvo a partir de pulpas de soda-AQ de Moringa oleífera (MO) y *Eucalyptus grandis* (EG) tratadas mediante dos etapas de fibrilación mecánica. Las pulpas EG (número kappa 17) y MO (número kappa 19,5) se refinaron en un refinador de laboratorio (PFI) hasta 70° Schopper Riegler, y las pulpas refinadas se microfibrilaron en un molino de alto esfuerzo de corte a 37 000 rpm durante 1 h. Se prepararon hojas de laboratorio agregando 2,5, 5,0 y 7,5 % de LCMF y 0,1 % de agente de retención a la pulpa base. La aplicación de LCMF provocó un importante aumento de la resistencia en las hojas de fibra corta y tiene una leve contribución sobre la resistencia de las hojas de fibra larga, ya de por sí elevada. La Moringa oleífera demostró ser una materia prima interesante para la producción de LCMF.

## Introducción

La transición gradual de áreas de economía convencional a otras basadas en el uso de materia prima de biomasa renovable y sostenible para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos es una estrategia para un crecimiento económico sostenible. En América Latina, en estos últimos años, se perdieron millones de hectáreas de bosques, la principal

causa de la deforestación fue la conversión de los bosques a tierras de pastoreo y cultivables (FAO, 2022). La creciente demanda de biomasa forestal ha motivado el cultivo de plantaciones forestales de corta rotación en países desarrollados y en desarrollo. La Moringa oleífera se conoce comercialmente por el valor nutricional de sus hojas, tallos, flores y semillas para consumo humano y animal. Esta especie que actualmente se cultiva en Sudamérica, es de rápido crecimiento (10 a 12 m de altura y 20-40 cm de diámetro en la madurez, 12 años) y se adapta a un amplio rango de suelos (Foidl, 1999; Pandey et al., 2011). Hace un par de décadas ha cobrado un auge importante en América Latina, primeramente en México (Olson, 2011) y más tarde en Colombia (del Toro Martínez et al., 2012), Perú (Cervantes, 2017), Bolivia (Moringa-Salud, 2015), Paraguay (Bogado, 2007) y Chile (Mendoza Ortiz, 2013) con resultados positivos para consumo animal o humano, como cultivo anual, perenne o integrado a un sistema agroforestal. La incorporación de la Moringa oleífera como cultivo forestal en los sistemas silvo-pastoriles permitiría el uso de las semillas y hojas como forraje y como productos medicinales/alimentos de bajo costo, obteniendo una mejor rentabilidad de los productores y mayor sustentabilidad de la actividad.

A pesar de que sus hojas secas son aprovechadas, aún no se ha logrado un aprovechamiento integral de la materia prima. La madera de Moringa oleífera tiene una densidad básica baja ( $0.21-0.24 \text{ g/cm}^3$ ). Presenta un contenido de extractivos totales de aproximadamente 20 % compuesto mayoritariamente de extraíbles en agua caliente (aproximadamente, la mitad del extracto en agua es almidón), por lo que se recomienda una extracción en agua caliente como el primer paso del fraccionamiento. Los contenidos de hemicelulosas y lignina son relativamente bajos. Lo anterior, junto con su elevado contenido de alfa celulosa, hacen de esta especie una materia prima interesante para la producción de celulosa microfibrilada (J. Benitez et al., 2018; J. B. Benitez, Vallejos, , 2016).

La producción de celulosa microfibrilada (CMF) a partir de pulpas celulósicas requiere de un tratamiento mecánico, para lo cual se utilizan diferentes equipos, como refinadores estándar, homogeneizadores, microfluidizadores, entre otros (Chakraborty et al., 2007; Yang et al., 2017). Estas CMF funcionan como aditivo en seco de papeles y cartones, mejorando sus propiedades físicas en diferentes proporciones, de acuerdo con su ma-

teria prima (Tarrés et al., 2020). La lignocelulosa microfibrilada (LCMF) consiste de microfibrillas que contienen lignina, que a diferencia de las CMF (altamente deslignificadas), presentan mayor rendimiento, son potencialmente menos hidrofílicas (menos absorción de humedad) y presentan mejor compatibilidad química con polímeros hidrofóbicos (aplicable en envases y materiales compuestos).

En la industria del papel se utilizan varios aditivos de resistencia en seco que se agregan al papel durante el proceso de fabricación para mejorar sus propiedades de resistencia a la tracción y desgarro, imprimibilidad, y durabilidad. La CMF y LCMF podrían ser una alternativa a los agentes de resistencia en seco basados en polímeros sintéticos (poliacrilamidas, polivinilamina y anhídrido estireno maleico) y naturales (almidón). En este estudio se propone el uso del leño de *Moringa oleífera* para la obtención de lignocelulosa microfibrilada y su evaluación como refuerzo de papeles de fibra larga y fibra corta.

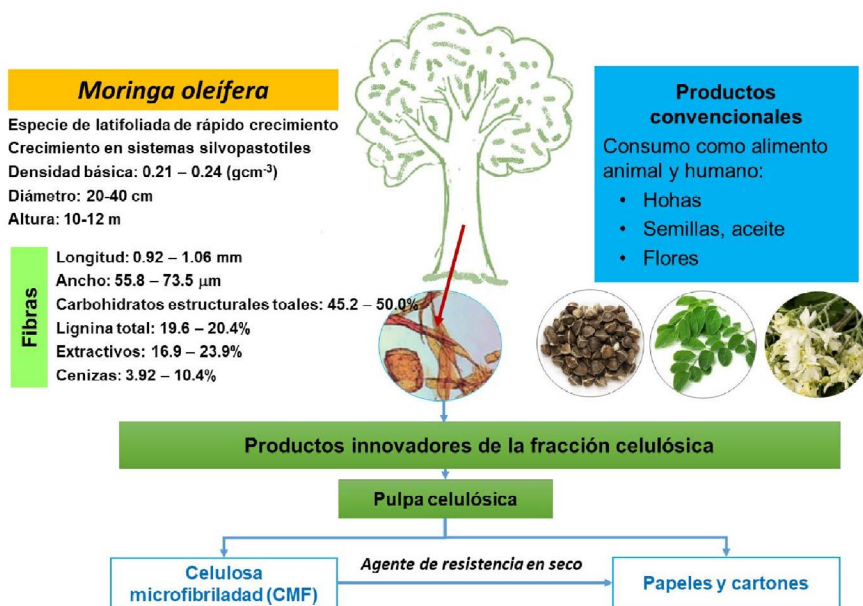


Figura 1. *Potencial de Moringa oleífera como recurso fibroso y no-fibroso*

## Materiales y métodos

Se utilizó madera de *Moringa oleífera* de 8 años de edad, obtenida de plantaciones experimentales de la región, con densidad  $0.24 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$  y la siguiente composición química (% sobre madera total):  $23,9 \pm 0,4 \%$  de extractivos en agua caliente,  $20,4 \pm 0,3 \%$  de lignina total,  $12,4 \pm 0,3 \%$  de hemicelulosas,  $35,0 \pm 0.1 \%$  de glucanos (celulosa)  $3,92 \pm 0.04 \%$  de cenizas a  $525^\circ\text{C}$ . La caracterización química se realizó con base en métodos analíticos estándares para biomasa de la NREL (Standard Biomass Analytical Methods, del National Renewable Energy Laboratory, NREL) (más detalles en J. Benitez et al., 2018).

Para la obtención de la pulpa de referencia se utilizaron chips industriales de *Eucalyptus grandis*. Esta pulpa se utilizó para la elaboración de LCMF y como pulpa base para la aplicación del aditivo.

Las pulpas para la fabricación de LCMF se obtuvieron a partir de un tratamiento en dos etapas. La remoción de extractivos se realizó mediante una primera etapa con agua caliente a  $120^\circ\text{C}$  durante 60 min, utilizando una relación licor/madera (L/M) de 6,4 para la MO y de 4,3 para el EG. La segunda etapa, de deslignificación, se realizó con un proceso estándar con soda-antraquinona (AQ) en las siguientes condiciones:  $170^\circ\text{C}$ ,  $20 \%$  NaOH y  $0,1 \%$  AQ, ambos sobre material seco. El tiempo de deslignificación fue de 90 min para la MO y de 45 min para el EG.

La etapa previa a la obtención de lignocelulosa microfibrilada (LCMF) consistió en refinar las pulpas en un molino PFI. Las pulpas se refinaron en molino PFI a  $70^\circ\text{SR}$ , aplicando 2000 y 4000 vueltas a la pulpa de MO y EG, respectivamente. La obtención de CMF se realizó en un molino alto esfuerzo de corte (licuadora industrial MIKA). Se trataron 800 mL a  $0,7 \%$  de consistencia durante 60 minutos a 37 000 rpm.

La evaluación de la potencialidad de la LCMF de MO como aditivo de resistencia en seco en hojas de laboratorio se realizó sobre papeles de base fibras cortas (BFC) de una pulpa marrón de EG con similar grado de deslignificación que la que se utilizó como referencia en la preparación de la LCMF. Una pulpa kraft marrón de pino (número kappa 88) utilizada para la fabricación de linerboard se utilizó como hojas base fibras largas (BFL).

Dado que un elevado porcentaje de LCMF se perdía en el agua blanca en la formación de las hojas, se decidió agregar un polímero sintético ca-

tiónico de alto peso molecular como auxiliar de retención. Las dosis del material microfibrilado aplicado para mejorar la resistencia en seco de papeles BFC fueron de 5 % y 10 % de LCMF de MO y 10 % LCMF de EG. En el caso de los papeles BFL, se aplicaron dosis de 2.5 %, 5 % y 10 % de LCMF de MO y EG. Las hojas se elaboraron y ensayaron según normas TAPPI T205 y T220.

## **Resultados**

### *Obtención de pulpas celulósicas bases para la preparación de LCMF*

Los rendimientos de la extracción con agua caliente fueron de 86,9 para la MO y 99.2 % para el EG, respectivamente. El tratamiento extrajo 13,1 % del material (51 % del total de los extraíbles (en alcohol + agua) presentes en los chips de MO. Prácticamente, no se extrajeron componentes solubles en agua en el tratamiento del EG (0.75 %).

Las condiciones seleccionadas para ambos materiales permitieron alcanzar un número kappa objetivo cercano a 18 (19.5 para MO y 17 para EG). En el caso de la MO, el tiempo requerido para alcanzarlo fue el doble respecto al utilizado para EG y el rendimiento de la etapa fue levemente inferior en la MO (40.8 vs. 43.8 % sobre madera extraída en agua caliente). El rendimiento total de las dos etapas fue de 35.5 y 43.4 % (sobre madera inicial) para la MO y el EG, respectivamente.

### **Aplicación de LCMF como aditivo de resistencia en seco de papeles**

En la Figura 2 se presentan las propiedades físico-mecánicas de los papeles de base fibra corta (BFC), sin y con agregado de LCMF.

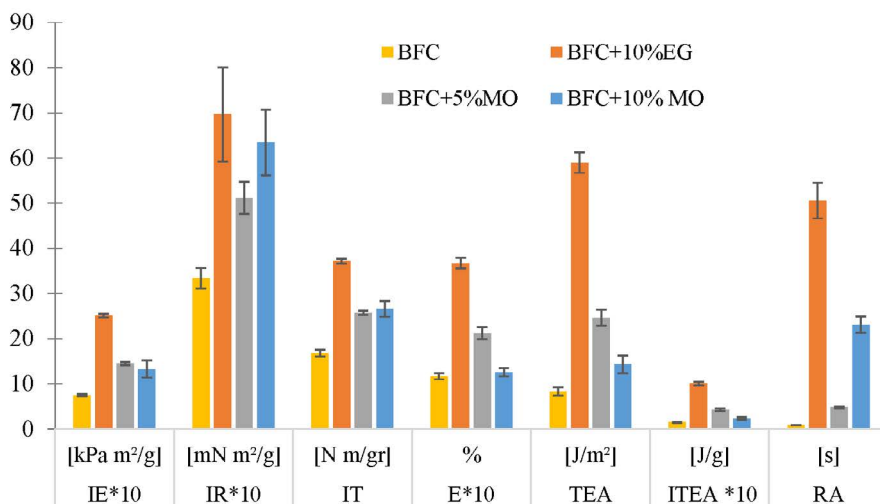


Figura 2. *Propiedades físico-mecánicas de papeles de base fibra corta (BFC) con diferentes dosis 5 y 10 % de LCMF de MO y 10 % de LCMF de EG*

Todas las resistencias se ven mejoradas con el agregado de LCMF. Las hojas de BFC muestran un aumento en las propiedades de 100 a 600 % cuando se añade LCMF de EG, mientras que los incrementos son de 50 a 200 % cuando se agrega LCMF de MO. En el caso de la LCMF de MO, el mayor cambio en las propiedades físico-mecánicas se produce con una dosis del 5 %.

En la Figura 3 se presentan las propiedades físico-mecánicas de los papeles de base fibra larga (BFL), sin y con agregado de LCMF.

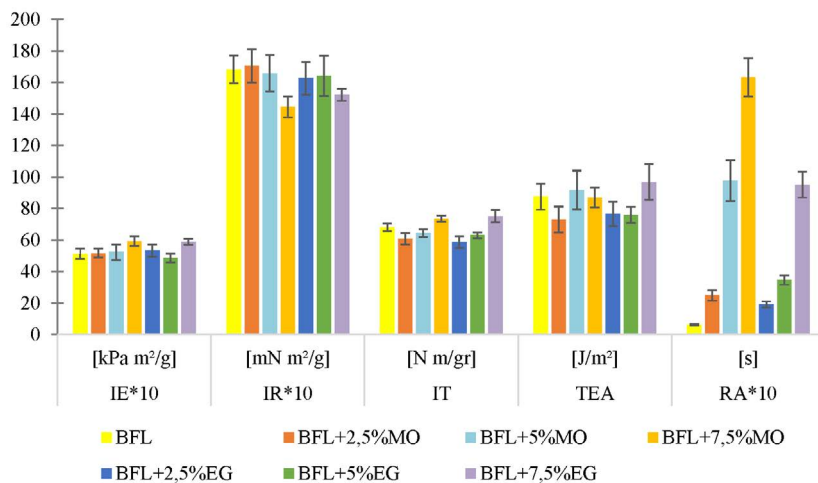


Figura 3. *Propiedades físico-mecánicas de papeles de base fibra larga (BFL) con dosis de 2.5, 5.0 y 7.5 % de CMF de MO y CMF de EG*

El agregado de LCMF de MO y de EG produce mejoras similares en propiedades mecánicas, a igualdad de dosis. Los mayores cambios en las propiedades de los papeles de BFL se producen con la adición de 7,5 % de LCMF de MO y LCMF de EG. El Índice de Rasgado (IR) disminuye ligeramente con la adición de LCMF de MO y LCMF de EG. Esta propiedad está directamente relacionada con la longitud de fibra.

El Índice de tracción (IT) aumenta con el incremento en la dosis de LCMF, mientras que el Índice de Explosión (IE) no presenta cambios significativos con la adición de LCMF. El mayor aumento se produjo en la resistencia al paso de aire de los papeles (RA). El agregado de LCMF produce una hoja menos porosa.

Ehman et al., (Tarrés et al., 2020) mostraron que a adición de lignocelulósica nanofibrilada (LCNF) en la producción de papel marrón es útil para mejorar sus propiedades y prolongar su vida útil. La adición de 1,5 % y 3 % de LCNF aumenta la longitud de rotura de los papeles (40 % y 60 %, respectivamente) empleando un sistema de retención con agentes de captura de basura aniónica, mientras que los aumentos obtenidos con 3 % de LCNF usando un sistema de retención dual almidón catiónico/micro-sílice fue relativamente menor (entre 22 y 14 %). Sin embargo, la adición



de porcentajes superiores al 4,5 % LCNF podrían afectar la capacidad de drenaje sin mejoras significativas en esta propiedad. Ehman et al., 2023 determinaron que la adición de lignocelulosa nanofibrilada en la producción de papel requiere de una adecuada dispersión y retención durante el proceso de formación del papel. En esta etapa, es común el uso de agentes de retención con carga catiónica, que actúan sobre las sustancias coloidales disueltas en el agua de proceso. En este estudio la LCMF se utilizó como agentes de resistencia en seco sin agregado de otros aditivos como en los trabajos que se han discutido anteriormente; alcanzado resultados similares a los obtenidos con LCNF (Ehman et al., 2023; Tarrés et al., 2020).

## Conclusiones

El agregado de la celulosa microfibrilada de *Moringa oleífera* mejoró las propiedades físico-mecánicas de papeles de fibra corta, al igual que en papeles de fibra larga. Los cambios en las propiedades de resistencia mecánicas fueron más evidentes en papeles de fibra corta, ya que los papeles de fibra larga presentan buenas resistencias mecánicas sin el agregado de agentes de resistencia en seco. Los resultados indican que la elaboración de lignocelulosa microfibrilada destinada a la industria celulosico-papelera de *Moringa oleífera* es una opción viable para completar el aprovechamiento integral del recurso.

## Referencias

- Benitez, J., Area, M., Vallejos, M., et al. (2018). *Caracterización química y morfología de la madera de Moringa oleifera como materia prima potencial para biorrefinerías*.
- Benitez, J. B., Vallejos. (2016). *Microfibrillated lignocellulose (MFLC) from soda-AQ pulp of Moringa oleifera and Eucalyptus grandis by mechanical fibrillation*.
- Bogado, Ó. (2007). *En Itapúa, agricultores probarán una nueva siembra: el moringá*. Última Hora.
- Cervantes, S. (2017). *Efecto de sustratos sobre la propagación sexual del cultivo de moringa (Moringa oleifera) en etapa de vivero en la zona de Vinces-Ecuador*. Tesis de Ingeniero agronomo, Universidad de Guayaquil, Vinces-Ecuador.

- Chakraborty, A., Sain, M., Kortschota, M., et al. (2007). Modeling energy consumption for the generation of microfibrils from bleached kraft pulp fibres in a PFI mill. *BioResources*, 2, 210-222. 10.15376/biores.2.2.210-222
- del Toro Martínez, J. J., Carballo Herrera, A., and Rocha Román, L. (2012). Valoración de las Propiedades Nutricionales de Moringa Oleífera en el Departamento de Bolívar. *Revista de Ciencias*, 15(0), 23-30. 10.25100/rc.v15i0.514
- Ehman, N. V., Aguerre, Y. S., Vallejos, M. E., et al. (2023). Nanocellulose addition to recycled pulps in two scenarios emulating industrial processes for the production of paperboard. *Maderas-Cienc Tecnol*, 25, 1-14. 10.4067/s0718-221x2023000100438
- FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022. Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles.* (FAO Ed.) Rome, Italy.
- Foidl, N., Mayorga, L., Vasquez, W., Murqueitio, E., Osorio, H., Sanchez, M. D., & Speedy, A. (1999). Utilización del marango (*Moringa oleifera*) como forraje fresco para ganado. In M. D. S. y M. R. Méndez (Ed.), *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina: Memorias. In Estudio Producción y Sanidad Animal.* (pp. 341-349): Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO. .
- Mendoza Ortiz, J. A. (2013). *Características agronómicas de la moringa (Moringa oleifera Lam.) y su posible adaptación a las condiciones de Chile.* Tesis de, Universidad de Chile, Chile.
- Moringa-Salud. (2015). *Plantines de moringa. Empresa ubicada en Santa Cruz-Bolivia.* Retrieved from <https://moringasalud-bolivia.blogspot.com/>
- Olson, M. E., & Fahey, J. W. (2011). Moringa oleifera: Un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84, 1071-1082.
- Pandey, A., Pradheep, K., Gupta, R., et al. (2011). 'Drumstick tree' (*Moringa oleifera* Lam.): a multipurpose potential species in India. *Genetic resources and crop evolution*, 58(3), 453-460. 10.1007/s10722-010-9629-6
- Tarrés, Q., Area, M., Vallejos, M., et al. (2020). Lignocellulosic nanofibers for the reinforcement of brown line paper in industrial water systems. *Cellulose*, 27. 10.1007/s10570-020-03133-6

Yang, W., Cheng, T., Feng, Y., et al. (2017). Isolating Cellulose Nanofibers from Steam-Explosion Pretreated Corncobs Using Mild Mechanochemical Treatments. *Bioresources*, 12, 9183-9197. 10.15376/biores.12.4.9183-9197

