

04-038

**DEVELOPMENT OF LIGNIN/CELLULOSE ACETATE NANOCOMPOSITES WITH A POTENTIAL APPLICATION AS A THICKENING AGENT IN THE PRODUCTION OF LUBRICATING GREASES.**

Rubio Valle, José Fernando (1); MARTÍN ALFONSO, MANUEL ANTONIO (1); Valencia Barragán, Concepción (1); Martín Alfonso, José Enrique (1); Franco Gómez, José María (1)

(1) Universidad de Huelva

The present work is focused on the development of eucalyptus kraft lignin (EKL)/cellulose acetate (CA) nanocomposites using the electrospinning technique, these nanostructures have a potential application as a thickening agent for the production of lubricating greases. The physicochemical properties of the different elaborated EKL/CA solutions were characterized by rheological, surface tension and electrical conductivity tests, on the other hand, the morphological properties of the electrospun nanostructures were obtained by scanning electron microscopy. The results show that the morphological properties of the electrospun nanostructures depend mainly on the physicochemical properties of the solution. On the other hand, the morphological, rheological and tribological characterization of the oleogels obtained from the dispersion of the electrospun membranes in castor oil was carried out. As a result of this characterization it was obtained that the rheological properties of the oleogels can be adapted by modifying the EKL/CA ratio and the nanocomposite content used in the dispersion. As a general conclusion, the electrospinning of EKL/CA solutions can be proposed as a simple and efficient method to produce lubricating oleogels, with properties similar to conventional greases.

Keywords: Kraft lignin; cellulose acetate; electrospinning; oleogels; rheological properties

**DESARROLLO DE NANOCOMPOSITOS DE LIGNINA/ACETATO DE CELULOSA CON UNA POTENCIAL APLICACIÓN COMO AGENTE ESPESANTE EN LA ELABORACIÓN DE GRASAS LUBRICANTES**

El presente trabajo se centra en el desarrollo de nanocompositos de lignina kraft de eucalipto (EKL)/acetato de celulosa (CA) empleando la técnica de electrohilado, dichas nanoestructuras tienen una potencial aplicación como agente espesante para la elaboración de grasas lubricantes. Las propiedades fisicoquímicas de las distintas disoluciones elaboradas de EKL/CA se caracterizaron mediante ensayos reológicos, de tensión superficial y de conductividad eléctrica, por otro lado, las propiedades morfológicas de las nanoestructuras electrohiladas se obtuvieron mediante microscopía electrónica de barrido. Los resultados denotan que las propiedades morfológicas de las nanoestructuras electrohiladas depende principalmente de las propiedades fisicoquímicas de la disolución. Por otro lado, se llevó a cabo la caracterización morfológica, reológica y tribológica de los oleogeles obtenidos a partir de la dispersión de las membranas electrohiladas en aceite de ricino. Como resultado de dicha caracterización se obtuvo que las propiedades reológicas de los oleogeles pueden adaptarse modificando la relación EKL/CA y el contenido de nanocomposite empleado en la dispersión. Como conclusión general, el electrospinning de disoluciones de EKL/CA puede proponerse como un método sencillo y eficaz para producir oleogeles lubricantes, con propiedades similares a las grasas convencionales.

Palabras clave: Lignina Kraft; acetato de celulosa; electrospinning; oleogeles lubricantes; propiedades reológicas

Correspondencia:

Agradecimientos: J.F.R.-V. agradece la concesión de la beca de investigación doctoral PRE2019-090632 del Ministerio de Ciencia y Educación de España



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

En las últimas décadas ha crecido el interés por sustituir los productos derivados del petróleo por alternativas más ecológicas, debido a que es un recurso cada vez más limitado y caro, y también en uno de los principales responsables de la contaminación ambiental, el calentamiento global y el cambio climático. En el sector de la tecnología de lubricantes se estima que aproximadamente el 55% de la cantidad de lubricantes comercializados cada año acaba en el medio ambiente (Syahir et al., 2017). Además, la mayoría de las grasas lubricantes disponibles en el mercado son formulaciones complejas compuestas principalmente por aceites minerales o sintéticos y espesantes que no son biodegradables ni renovables (Panchal et al., 2017). Las propiedades reológicas de las grasas lubricantes, que determinan el grado NLGI tradicionalmente utilizado para clasificarlas, y otras propiedades funcionales de estos productos, son principalmente el resultado de la estructura formada por el espesante. Una posible solución para paliar estos problemas medioambientales es la sustitución de los aceites minerales por aceites naturales (vegetales) y la utilización de fibras naturales y/o biopolímeros para espesar y/o estructurar los aceites (Gallego et al., 2015).

Dentro del enorme abanico de biopolímeros existentes caben destacar las biomásas lignocelulósicas debido a que es un material renovable que se utiliza cada vez más para formular productos de uso final y desarrollar aplicaciones innovadoras (Frisch et al., 2012). A diferencia de otras fuentes como la biomasa azucarada o amilácea, la biomasa lignocelulósica es barata, abundante, está ampliamente distribuida y no está destinada al consumo alimentario (Prasad et al., 2016). Además, puede obtenerse de una gran variedad de especies forestales, uno de los tipos de residuos lignocelulósicos más abundantes, renovables y asequibles procede de la poda de los eucaliptos. La biomasa lignocelulósica está formada principalmente por celulosa (35-83%), hemicelulosa (0-30%), lignina (1-43%) y varios compuestos menores como taninos y ceras (Kobayashi & Fukuoka, 2013). El potencial de la biomasa lignocelulósica radica en gran medida en su alto contenido en hidratos de carbono (especialmente celulosa y hemicelulosas). Por el contrario, la lignina ha sido mucho menos utilizada hasta la fecha, a pesar de ser un recurso renovable con potencial de uso industrial, aunque la producción de lignina se estima en 40-50 Mt/año, apenas se utiliza para la obtención de productos de alto valor añadido como consecuencia de su compleja estructura química, hasta el punto de que la mayoría de las veces la lignina se gestiona como residuo y se quema para obtener energía.

En base a lo anterior, el uso de la lignina como espesante para grasas lubricantes ecológicas proporciona una nueva vía para su valorización. El principal problema es el desarrollo de un protocolo de pretratamiento y/o modificación química adecuado para una interacción eficiente con el aceite lubricante, una forma potencial de superar las deficiencias anteriores es la obtención de nanoestructuras de lignina mediante electrospinning. De hecho, la alta porosidad, el tamaño nanométrico y la elevada relación superficie/volumen de las nanoestructuras electrospun pueden permitir la formación de una red tridimensional por efecto de las interacciones físicas mejoradas con el aceite lubricante (Rubio-Valle et al., 2021).

Sin embargo, las nanofibras de electrohiladas de lignina se han desarrollado escasamente por una serie de razones que incluyen la composición química heterogénea de la lignina, su estructura altamente ramificada y la presencia de compuestos de bajo peso molecular que se forman por degradación durante el proceso de deslignificación de la biomasa. Como resultado, el electrohilado no genera fibras estructuradas si no partículas distribuidas heterogéneamente debido a esto, el electrohilado de lignina implica el empleo de un segundo polímero (dopante) para obtener nanofibras uniformes y mejorar la procesabilidad (Dallmeyer et al., 2010). En virtud de su alta electrospinnabilidad y de la capacidad de modular su afinidad por un medio oleoso a través del grado de acetilación, el acetato de celulosa es un polímero dopante o componente biopolimérico adecuado para los nanocompuestos; además, es un

material biodegradable, renovable y biocompatible que puede obtenerse fácilmente a partir de la celulosa (N. Bifari et al., 2016).

## 2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo se centra el desarrollo de nanoestructuras de lignina kraft de eucalipto (EKL)/acetato de celulosa (CA) empleando la técnica de electrohilado, dichas nanoestructuras tienen una potencial aplicación como agente espesante para la elaboración de grasas lubricantes, con el fin de desarrollar una nueva forma de valorizar los residuos de lignina con ventajas ecológicas, económicas y sociales. Para lograr ese objetivo global, se propusieron los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la influencia de la concentración y de las ratios de EKL:CA en las propiedades físico-químicas de las disoluciones.
- Evaluar la influencia de la concentración y de las ratios de EKL:CA en las disoluciones en las propiedades morfológicas de las nanoestructuras elaboradas.
- Evaluar la influencia de la concentración de fibras en las propiedades reológicas de los oleogeles lubricantes

## 3. Metodología

### 3.1 Materiales

La lignina kraft de eucalipto fue suministrada por el INIA-CSIC (Madrid, España). El acetato de celulosa ( $M_n = 30.000$  g/mol), la N,N-dimetilformamida (DMF) y la acetona (Ac) fueron suministradas por Sigma-Aldrich (Darmstadt, Alemania).

### 3.2 Preparación de los oleogeles

Los oleogeles fueron preparados siguiendo el procedimiento descrito en estudios previos (Rubio-Valle et al., 2021). Primero se prepararon las disoluciones de EKL/CA para ello se empleó una mezcla (2:1 v/v) de DMF/Acetona y se elaboraron al 20 y 30% en peso y a diferentes proporciones de peso de EKL/CA (véase la Tabla 1). A continuación, las disoluciones se electrohicieron en una cámara de la marca comercial DOXA Microfluidics (Málaga, España), utilizando una aguja de 21 G fijándose al soporte empleando una configuración horizontal y aplicando una diferencia de potencial de 17 kV. Finalizado el proceso, se retiraron cuidadosamente las nanoestructuras de la placa colectora con la ayuda de unas pinzas y una espátula.

La nanoestructura seleccionadas se disperso empleando diferentes concentraciones del 7, 15 y 30% en peso en aceite de ricino a temperatura ambiente bajo agitación suave, utilizando un agitador IKA RW 20 (75 rpm) Los oleogeles resultantes se almacenaron a temperatura ambiente para su posterior caracterización.

### 3.3 Caracterización de los oleogeles

#### 3.3.1 Caracterización físico-química de las disoluciones

La viscosidad dinámica de las soluciones de EKL/CA se determinó en un reómetro de deformación controlada ARES (Rheometric Scientific, Reino Unido) a velocidades de cizallamiento en el intervalo de 1 a 300 s<sup>-1</sup>, utilizando una geometría Couette (16 mm de diámetro interior y 1 mm de anchura de hueco) a 25 °C. Las mediciones de la tensión superficial se realizaron con un tensiómetro de fuerza Sigma 703D de Biolin Scientific (Pekín, China), empleando una placa Wilhelmy de platino de 39,24 mm de ancho × 0,1 mm de espesor a 25 °C. La conductividad eléctrica se midió con un conductivímetro CE GLP31 de

Crison (Alella, Barcelona, España), estando la célula de conductividad previamente calibrada con soluciones estándar de KCl de conductividad conocida (1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 12,88  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente).

### 3.3.2 Caracterización de las nanoestructuras

Las nanoestructuras electrohiladas se caracterizaron morfológicamente mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio JXA-8200 SuperProbe de JEOL (Tokio, Japón), utilizando un detector de electrones secundarios a una tensión de aceleración de 15 kV. Las imágenes de SEM se estudiaron empleando un software de código abierto FIJI ImageJ, donde se analizaron el tamaño de las partículas y de las nanofibras, así como la porosidad de las nanoestructuras.

### 3.3.3 Caracterización de las nanoestructuras

Los oleogeles se caracterizaron en términos reológicos con un reómetro Rheoscope de tensión controlada de Thermo Scientific (Waltham, MA, USA), utilizando una geometría de placa dentada (20 mm de diámetro y 1 mm de separación). Se realizaron ensayos de cizallamiento oscilatorio de pequeña amplitud (SAOS) dentro de la región viscoelástica lineal (rango de frecuencia 0,03-100 rad/s) a 25 °C y de flujo viscoso se a velocidades de cizallamiento de  $10^{-2}$  a  $10^2 \text{ s}^{-1}$ .

Las mediciones tribológicas se realizaron en un reómetro Physica MCR-501 de Anton Paar (Graz, Austria) equipado con una célula tribológica. La célula consistía en una bola de acero de 6,35 mm de diámetro que giraba sobre tres placas de acero rectangulares inclinadas a 45° sobre las que se extendían las muestras de oleogel que actuaban como lubricantes. Se utilizó una carga normal constante de 20 N y una velocidad de rotación de 10 rpm durante 10 minutos. Las fuerzas normales efectivas y los coeficientes de fricción se calcularon a partir de la fuerza axial aplicada y el par de torsión medido por el reómetro.

### 3.4 Analisis estadístico

Los datos de las propiedades medidas y los parámetros seleccionados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) empleando el software Origin Lab y se identificaron las diferencias significativas entre las medias con una prueba de comparación a  $p < 0,05$ .

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Estudio de la propiedades físico-químicas de las disoluciones

Varios autores aseguran que el rendimiento del electrospinning dependen única y exclusivamente de las propiedades físicoquímicas de las disoluciones (Kakoria & Sinha-Ray, 2018; Wilk & Benko, 2021). Es bien sabido que la electrospinnabilidad depende de la tensión superficial, la viscosidad y la conductividad eléctrica de la solución, que a su vez son función de la naturaleza del biopolímero y de su concentración (Rubio-Valle et al., 2021).

La Tabla 1 muestra la viscosidad dinámica, tensión superficial y la conductividad eléctrica para las soluciones de EKL/CA. Todas mostraron un comportamiento newtoniano en todo el rango de velocidad de cizallamiento estudiado (datos no mostrados). Como puede apreciarse,

la viscosidad dinámica aumentó con la concentración total empleada para elaborar la disolución y asimismo también aumento con la proporción de CA en la ratio de EKL:CA.

**Tabla 1. Valores de viscosidad dinámica, tensión superficial y conductividad eléctrica de las disoluciones de EKL:CA.**

Concentración (%)	EKL:CA ratio	Viscosidad dinámica (Pa.s)	Tensión superficial (mN/m)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
20	100:0	0.011 <sup>AA</sup>	29.53 <sup>a</sup>	219.7 <sup>A</sup>
	90:10	0.019 <sup>AA</sup>	30.72 <sup>b</sup>	210.9 <sup>B</sup>
	80:20	0.056 <sup>BB</sup>	31.23 <sup>c</sup>	189.2 <sup>C</sup>
30	100:0	0.016 <sup>AA</sup>	30.34 <sup>b</sup>	182.6 <sup>C</sup>
	90:10	0.055 <sup>BB</sup>	31.15 <sup>c</sup>	174.2 <sup>D</sup>
	80:20	0.184 <sup>DD</sup>	31.73 <sup>d</sup>	156.3 <sup>E</sup>

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes.

Por un lado, la tensión superficial tuvo una tendencia similar a la viscosidad, esta aumentó ligeramente con el aumento de la cantidad de CA y la concentración total de biopolímeros. Las diferencias fueron sustanciales, los valores oscilaron entre 29,53 mN/m para el sistema sin CA (EKL100-CA0) al 20% en peso y 31,73 mN/m para el sistema EKL80-CA20 al 30% en peso. Por otro lado, la conductividad eléctrica aumento con el aumento de EKL en la ratio de EKL:CA, como era de esperar por el menor peso molecular y la mayor polaridad del EKL ya que es una estructura química formada por hidróxilos y carboxilos fenólicos y alifáticos, y disminuyó con el aumento de la proporción de CA en la ratio EKL:CA y con la concentración de biopolímero en peso. Esta disminución puede atribuirse que, aunque cuando aumentamos la concentración en la disolución y por tanto la cantidad de iones, el efecto predominante es que estamos limitando la movilidad de estos debido a los enredos que se producen en la macromolécula.

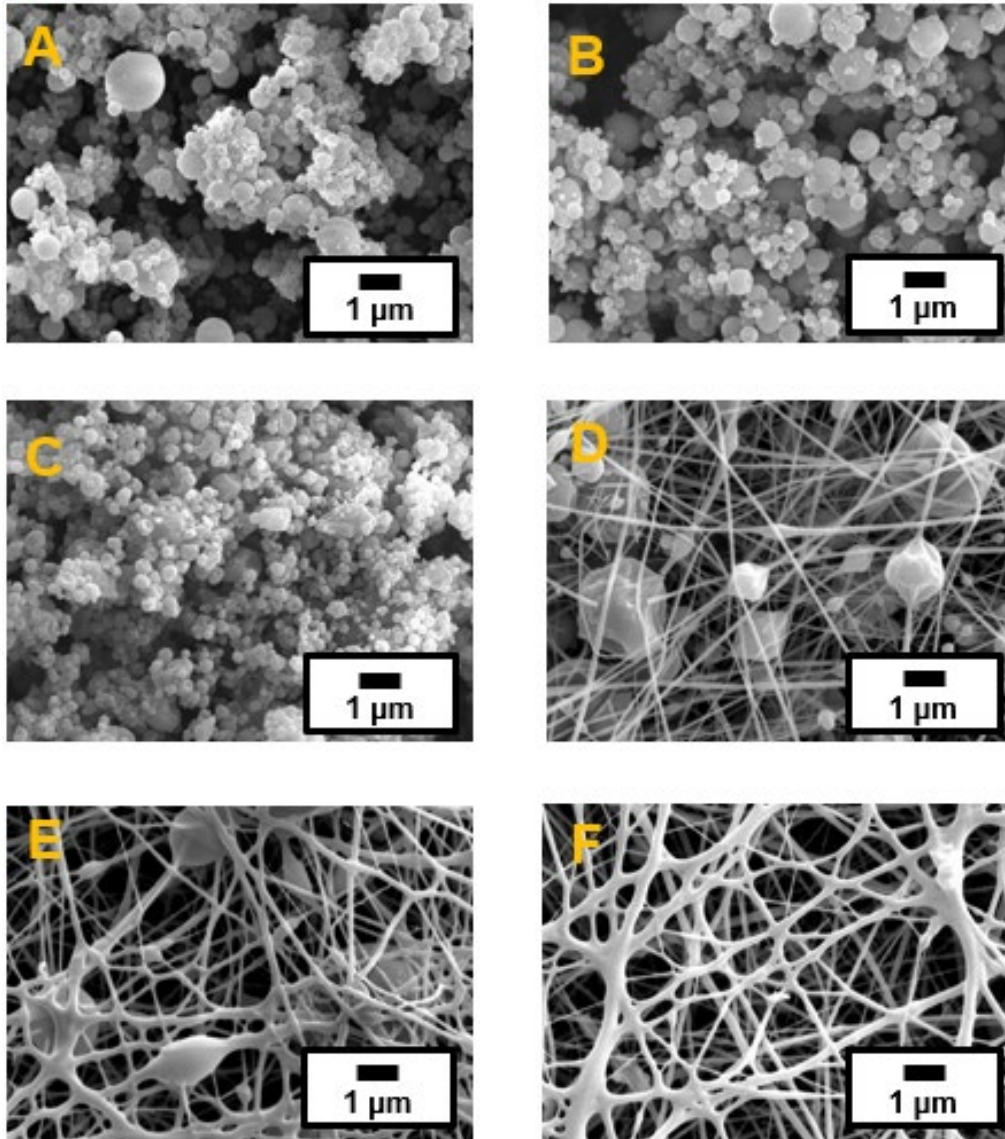
#### 4.2 Estudio de las propiedades morfológicas de las nanoestructuras

La figura 1 muestra las imágenes de SEM de las nanoestructuras electrohiladas obtenidas a partir de las disoluciones elaboradas. Como puede observarse, el proceso de electrohilado no consiguió producir nanofibras de lignina a menos que se añadiera algo de CA, en su ausencia del mencionado polímero dopante genero partículas de tamaño nanométrico (Figuras 1A y 1B). Se obtuvo un resultado similar cuando se añadió una 10 y 20% de CA a las disoluciones de lignina con una concentración total de biopolímero del 20% en peso (véanse las figuras 1C y 1E). Sin embargo, una relación de peso EKL:CA de 80:20 condujo a la formación de filamentos aislados que interconectaban las partículas (Figura 1E). El aumento de la concentración total de biopolímeros hasta el 30% en peso hizo que estas nanoestructuras aparecieran con relaciones de peso EKL:CA más altas, y que aumentara la cantidad y la densidad de las nanofibras. Así, se observaron fibras interconectadas con partículas incrustadas por encima de una relación de peso EKL:CA de 90:10 (Figura 1D).

Asimismo, la morfología de los nanocompuestos que contenían altas proporciones de CA era coherente con la de las esteras de nanofibras electrohiladas de CA puro en lo que respecta a las propiedades arquitectónicas, como el tamaño de las fibras, la porosidad general y el tamaño y la geometría de los poros (Nguyen et al., 2013). Estos resultados subrayan la

importancia del otro componente, es decir, de un polímero dopante para generar nanoestructuras empleando como base de lignina.

**Figura 1: Imágenes SEM de las nanoestructuras electrohiladas obtenidas a partir de las disoluciones con concentraciones totales de biopolímeros del 20 y el 30% en peso y diferentes relaciones de peso EKL:CA. (A) EKL100 al 20 % en peso, (B) EKL100 al 30% en peso, (C) EKL90-CA10 al 20% en peso, (D) EKL90-CA10 al 30% en peso, (E) EKL60-CA40 al 20% en peso y (F) EKL60-CA40 al 30% en peso.**



La tabla 2 muestra los diámetros medios de las partículas y las fibras, calculados a partir de las distribuciones de tamaño, así como la porosidad global de las nanoestructuras electrohiladas. Como puede observarse, el diámetro medio de las fibras aumentó con el aumento del contenido de CA en la ratio EKL:CA y con el aumento de la concentración desde filamentos muy finos de 0,07  $\mu\text{m}$  para el sistema de EKL80-CA20 que se preparó a partir de una solución al 20% en peso, hasta fibras gruesas de un tamaño medio de 0,48  $\mu\text{m}$  para el mismo sistema elaborado a partir de la disolución al 30% en peso. Por otro lado, el diámetro medio de las partículas disminuyó con el aumento del contenido de CA y la concentración total de biopolímeros. Asimismo, la porosidad aumentó con el incremento de la concentración

de polímeros y del contenido de CA por efecto de la reducción del número de partículas y/o perlas en los filamentos.

**Tabla 2: Diámetros de partículas, de fibras y porosidad global de las nanoestructuras electrohiladas de EKL/CA.**

Concentración (%)	EKL:CA ratio	Diámetro partícula (µm)	Diámetro fibra (µm)	Porosidad (%)
20	EKL100-CA0	0.91 <sup>AA</sup>	-	36.4 <sup>A</sup>
	EKL90-CA10	0.59 <sup>BB</sup>	-	37.2 <sup>B</sup>
	EKL80-CA20	0.47 <sup>CC</sup>	0.07 <sup>a</sup>	37.7 <sup>B</sup>
30	EKL100-CA0	0.69 <sup>DD</sup>	-	38.9 <sup>C</sup>
	EKL90-CA10	0.61 <sup>EE</sup>	0.26 <sup>b</sup>	45.2 <sup>D</sup>
	EKL80-CA20	0.51 <sup>CC</sup>	0.48 <sup>c</sup>	46.1 <sup>E</sup>

Nota: Letras diferentes corresponden a valores significativamente diferentes.

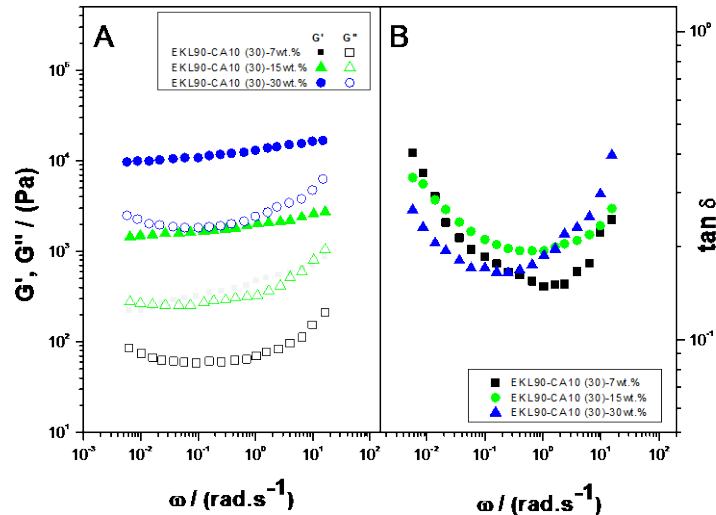
#### 4.3 Estudio de las propiedades reológicas de los oleogeles

En estudios previos, autores como Borrego et al. (Borrego et al., 2021) analizaron el efecto de las propiedades morfológicas de las nanoestructuras electrohiladas en la estabilidad de los oleogeles lubricantes. Por un lado, las nanoestructuras formadas exclusivamente por fibras o por nanopartículas interconectadas por fibras formaban oleogeles físicamente estables. Por el contrario, las membranas que consistían en partículas dieron dispersiones inestables de las que el aceite acabó separándose. Este resultado viene dado debido a que los oleogeles se forman por interacciones físicas entre el aceite y la red tridimensional de nanofibras, donde el aceite se adsorbía, difundía y se quedaba atrapado en los huecos, estas interacciones físicas eran principalmente de tipo hidrofóbico intermolecular y de van der Waals. Por lo tanto, la obtención de fibras nanoestructuradas es un parámetro esencial para que se forme una nanodispersión estable debido a la gran superficie específica y la alta relación superficie/volumen. De acuerdo a lo expuesto, la microestructura del oleogel está gobernada esencialmente por la morfología de las nanoestructuras electrohiladas utilizadas para su estructuración.

Se seleccionó como sistema de referencia la nanoestructura obtenida a partir de la disolución al 30% en peso con una proporción de EKL:CA de 90:10, denominada EKL90-CA10(30), se dispersó empleando para ello distintas concentraciones 7, 15 y 30% en aceite de ricino a temperatura ambiente. La figura 2A muestra los espectros mecánicos de los oleogeles resultantes en función de la concentración del nanocompuesto. La dependencia de la frecuencia de las funciones SAOS donde  $G'$  y  $G''$ , que son el módulo de almacenamiento y de pérdida, respectivamente. El perfil que muestran estas funciones son típicas de las dispersiones tipo gel y cualitativamente similar en las tres concentraciones de nanocompuestos, siendo  $G'$  superior a  $G''$  en todo el rango de frecuencias. Además, ambas funciones SAOS aumentaron considerablemente, casi dos décadas con el aumento de la concentración del nanocompuesto electrohilado. Por el contrario, como puede verse en los gráficos de tangente de pérdida ( $\tan \delta = G''/G'$ ) frente a la frecuencia de la Figura 2B, que la

elasticidad relativa casi no se vio afectada con el aumento de la concentración de nanocompuesto

**Figura 2: A. Dependencia del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ) y B. Módulo de almacenamiento con la frecuencia para los oleogeles preparados con el nanocompuesto EKL90-CA10(30) al 7, 15 y 30% en peso.**



## 5. Conclusiones

Se obtuvieron varios tipos de nanoestructuras mediante el electrohilado de disoluciones de lignina Kraft de eucalipto (EKL) y acetato de celulosa (CA) en una mezcla (2:1 v/v) de DMF y acetona. La tensión superficial y la conductividad eléctrica de las soluciones de EKL/CA permitieron su electrospinning. Sin embargo, la morfología de los nanocompuestos resultantes dependía en gran medida de la viscosidad dinámica de la solución, que a su vez estaba dictada por la concentración global de EKL/CA y la relación de peso EKL:CA. Las soluciones que contenían concentraciones del 20% en peso con altas relaciones de peso de EKL formaron partículas submicrónicas o nanopartículas conectadas por filamentos finos, mientras que las soluciones con una concentración del 30% en peso y/o que contenían una mayor proporción de CA formaron nanofibras uniformes.

Las nanoestructuras de EKL/CA formadas por partículas interconectadas entre si con nanofibras uniformes, estructuraron con éxito el aceite de ricino y formaron oleogeles físicamente estables. La respuesta viscoelástica lineal de los oleogeles fue cualitativamente similar, pero las funciones SAOS aumentaron con la concentración del nanocompuesto y el contenido de CA. Por otra parte, la elasticidad relativa de los oleogeles no se vio afectada por la relación de peso EKL/CA.

A partir de los resultados experimentales, el electrohilado de las disoluciones EKL/CA puede proporcionar un método eficaz para obtener nanoestructuras capaces de estructurar los aceites vegetales en distinta medida con vistas a producir oleogeles con propiedades reológicas adecuadas para la lubricación. Asimismo, el uso de la lignina como espesante para



la obtención de grasas lubricantes verdes que puede proporcionar una nueva forma de valorizar los residuos lignocelulósicos con beneficios ecológicos, económicos y sociales.

## Referências

- Borrego, M., Martín-Alfonso, J. E., Sánchez, M. C., Valencia, C., & Franco, J. M. (2021). Electrospun lignin-PVP nanofibers and their ability for structuring oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 180, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.069>
- Dallmeyer, I., Ko, F., & Kadla, J. F. (2010). Electrospinning of Technical Lignins for the Production of Fibrous Networks. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 30(4), 315–329. <https://doi.org/10.1080/02773813.2010.527782>
- Frisch, D., Cottenie, K., Badosa, A., & Green, A. J. (2012). Strong Spatial Influence on Colonization Rates in a Pioneer Zooplankton Metacommunity. *PLoS ONE*, 7(7), e40205. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040205>
- Gallego, R., Arteaga, J. F., Valencia, C., Díaz, M. J., & Franco, J. M. (2015). Gel-Like Dispersions of HMDI-Cross-Linked Lignocellulosic Materials in Castor Oil: Toward Completely Renewable Lubricating Grease Formulations. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(9), 2130–2141. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00389>
- Kakoria, A., & Sinha-Ray, S. (2018). A Review on Biopolymer-Based Fibers via Electrospinning and Solution Blowing and Their Applications. *Fibers*, 6(3), 45. <https://doi.org/10.3390/fib6030045>
- Kobayashi, H., & Fukuoka, A. (2013). Synthesis and utilisation of sugar compounds derived from lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, 15(7), 1740. <https://doi.org/10.1039/c3gc00060e>
- N. Bifari, E., Bahadar Khan, S., A. Alamry, K., M. Asiri, A., & Akhtar, K. (2016). Cellulose Acetate Based Nanocomposites for Biomedical Applications: A Review. *Current Pharmaceutical Design*, 22(20), 3007–3019. <https://doi.org/10.2174/1381612822666160316160016>
- Nguyen, T. P. N., Yun, E.-T., Kim, I.-C., & Kwon, Y.-N. (2013). Preparation of cellulose triacetate/cellulose acetate (CTA/CA)-based membranes for forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, 433, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.027>
- Panchal, T. M., Patel, A., Chauhan, D. D., Thomas, M., & Patel, J. V. (2017). A methodological review on bio-lubricants from vegetable oil based resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.105>
- Prasad, A., Sotenko, M., Blenkinsopp, T., & Coles, S. R. (2016). Life cycle assessment of lignocellulosic biomass pretreatment methods in biofuel production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 44–50. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0985-5>

Rubio-Valle, J. F., Sánchez, M. C., Valencia, C., Martín-Alfonso, J. E., & Franco, J. M. (2021). Electrohydrodynamic Processing of PVP-Doped Kraft Lignin Micro- and Nano-Structures and Application of Electrospun Nanofiber Templates to Produce Oleogels. *Polymers*, 13(13), 2206. <https://doi.org/10.3390/polym13132206>

Syahir, A. Z., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., Khuong, L. S., & Harith, M. H. (2017). A review on bio-based lubricants and their applications. *Journal of Cleaner Production*, 168, 997–1016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.106>

Wilk, S., & Benko, A. (2021). Advances in Fabricating the Electrospun Biopolymer-Based Biomaterials. *Journal of Functional Biomaterials*, 12(2), 26. <https://doi.org/10.3390/jfb12020026>

### **Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

