Espectroscopía FTIR en la síntesis y caracterización de poliuretanos renovables.

FTIR spectroscopy for the synthesis and characterization of renewable polyurethanes.

Eder Armando Caballero Moreno (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. eder.caballero01@gmail.com.

Andy Jarenni Gómez Valdéz (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. isemvaldez@outlook.com.

Rocío Meza Gordillo* (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx.

María Cristina Velasquillo Martínez (4). Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra. mvelasquillo@ciencias.unam.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 10, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Cuarto Encuentro de Investigación de Estudiantes en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica 2026.

Resumen.

Los poliuretanos constituyen una de las familias de materiales poliméricos más versátiles debido a la posibilidad de ajustar su composición y arquitectura molecular para obtener espumas, películas, recubrimientos, adhesivos y elastómeros con propiedades diferentes. Sin embargo, una parte importante de sus materias primas continúa procediendo de recursos petroquímicos, lo que ha impulsado el desarrollo de poliuretanos obtenidos parcial o totalmente a partir de aceites vegetales, lignina y otras fuentes de biomasa. En este contexto, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) constituye una herramienta útil para hacer el seguimiento de las transformaciones químicas que ocurren desde la funcionalización de una materia prima renovable hasta la formación, curado, envejecimiento y degradación del poliuretano. En este artículo se presentan los fundamentos esenciales de FTIR y se analiza su aplicación en espumas, películas y recubrimientos, con especial atención a los grupos hidroxilo, isocianato, uretano y carbonilo. Se destaca la importancia de interpretar de manera conjunta distintas regiones del espectro y de complementar la información obtenida mediante FTIR con otras técnicas de caracterización cuando sea necesario.

Palabras clave: Espectroscopía FTIR, polioles, recursos renovables.

Abstract.

Polyurethanes are among the most versatile polymeric materials because their composition and molecular architecture can be adjusted to produce foams, films, coatings, adhesives, and elastomers with different properties. However, a significant proportion of the raw materials used in their production still comes from petrochemical resources, which has encouraged the development of polyurethanes partially or fully derived from vegetable oils,

lignin, and other biomass sources. In this context, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) is a useful tool for monitoring the chemical transformations that occur from the functionalization of renewable feedstocks through polyurethane formation, curing, aging, and degradation. This article presents the essential fundamentals of FTIR and discusses its application to polyurethane foams, films, and coatings, with particular attention to hydroxyl, isocyanate, urethane, and carbonyl groups. Emphasis is placed on the joint interpretation of different spectral regions and on complementing FTIR information with other characterization techniques when necessary.

Keywords: FTIR spectroscopy, polyols, renewable resources.

1. Introducción.

El desarrollo de poliuretanos de origen renovable plantea diversos retos relacionados con la identificación de las transformaciones químicas que ocurren desde la modificación de la materia prima hasta la obtención y posterior degradación del material. En este contexto, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) constituye una herramienta de particular interés, ya que permite relacionar la evolución de determinados grupos funcionales con las distintas etapas de síntesis y caracterización del polímero.

Los poliuretanos (PU) forman una de las familias de materiales poliméricos más versátiles. La variación en la naturaleza, funcionalidad y proporción de sus precursores permite obtener productos con propiedades muy diferentes, entre ellos espumas rígidas para aislamiento térmico, espumas flexibles, elastómeros, adhesivos, selladores, recubrimientos y películas. La necesidad de reducir la dependencia de recursos fósiles ha favorecido el desarrollo de formulaciones que incorporan materias primas renovables. Mo et al. (2024) describen el empleo de aceites vegetales, lignina, polisacáridos y otras fuentes de biomasa como precursores o componentes funcionales de poliuretanos. Entre estas materias primas, resaltan los aceites vegetales, debido a que su estructura puede modificarse químicamente para introducir grupos funcionales capaces de participar en la reacción de formación del PU (figura 1). Musik et al. (2021) señalan que procesos como la epoxidación y la posterior apertura de anillos oxirano constituyen rutas relevantes para introducir grupos hidroxilo y producir polioles de origen vegetal. En el caso de las espumas, Santos et al. (2025) muestran que los biopolioles pueden incorporarse tanto en sistemas rígidos como flexibles. De manera experimental, Kim et al. (2024) demostraron la utilización de lignina y aceite de ricino en espumas rígidas de poliuretano, observando que la naturaleza del biopoliol influye en la reactividad, morfología y propiedades del material.

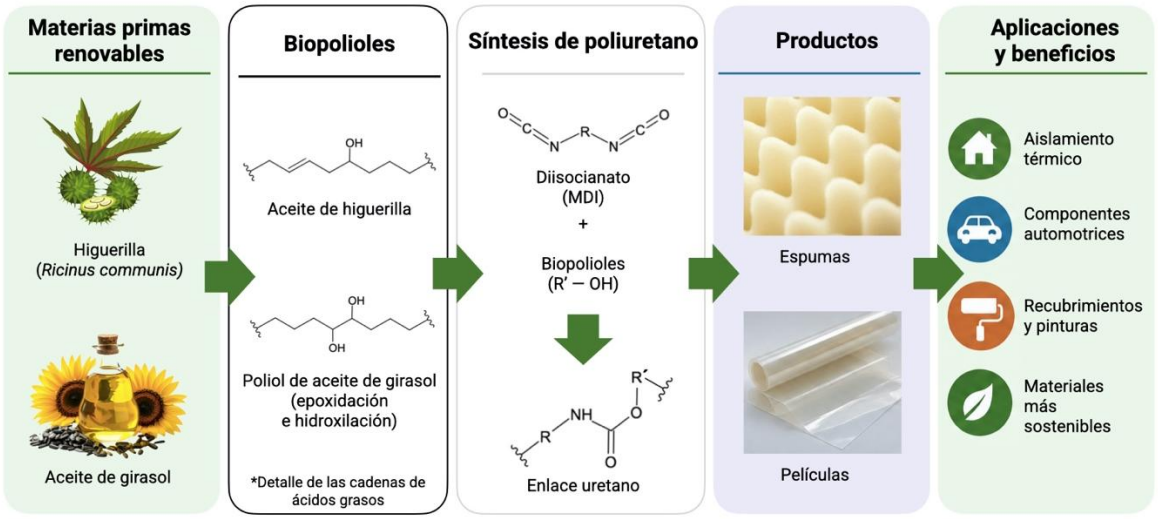


Figura 1. Espectroscopía FTIR como herramienta de seguimiento del ciclo químico de un poliuretano renovable.

En este contexto, la espectroscopía FTIR ofrece una ventaja analítica importante, ya que permite examinar de manera sucesiva las transformaciones químicas asociadas con la modificación de la materia prima, la formación del poliol, la reacción con el isocianato, el curado y los posteriores procesos de envejecimiento o degradación.

2. Métodos.

El contenido técnico presentado en la conferencia y desarrollado en este artículo se sustentó en una revisión de literatura científica, complementada con ejemplos experimentales de espectros FTIR correspondientes a materias primas, polioles, poliuretanos y materiales sometidos a procesos de degradación. Se priorizaron publicaciones comprendidas principalmente entre 2022 y 2025 que abordaran alguno de los siguientes aspectos: síntesis de polioles a partir de materias primas renovables, preparación de espumas o películas de PU, utilización de espectroscopía FTIR para el seguimiento de grupos funcionales, evaluación del curado y análisis de procesos de envejecimiento o degradación.

Para la interpretación espectral se consideraron de manera principal las regiones asociadas con vibraciones O-H, N-H, N=C=O, C=O, C-N, C-O y C-O-C. Los intervalos de número de onda se presentan como valores aproximados, ya que la posición exacta de las bandas puede modificarse por factores como la estructura química, los enlaces de hidrógeno, la formulación, el estado físico, la microseparación de fases y las condiciones instrumentales.

En particular, los espectros FTIR presentados fueron tomados mediante un espectrómetro FT-IR Thermo Scientific (Nicolet iS10), en un rango de número de onda de 4000 a 550 cm-1, con 40 escaneos. Las muestras corresponden a películas de poliuretano sintetizadas a partir del poliol correspondiente y 4,4'-difenil metilen diisocianato (MDI), en una relación molar 1:1, polimerizado por vaciado en molde y curado en desecador a temperatura ambiente durante 7 días. Como poliol se utilizó aceite de higuerilla (*Ricinus communis*) y aceite vegetal usado epoxidado e hidroxilado *in situ* con ácido peracético y catálisis ácida, con número de hidroxilo de 166 y 92 mg KOH/g, respectivamente.

3. Desarrollo.

3.1. Fundamentos de la espectroscopía FTIR.

La espectroscopía infrarroja es una técnica analítica que emplea la radiación de ondas electromagnéticas correspondiente al infrarrojo medio (2.5-25 μm) (Xie et al., 2022). A través de la interacción radiación IR- materia, es posible realizar determinaciones estructurales y/o moleculares de especies orgánicas.

Las moléculas no presentan estructuras rígidas, los átomos que las integran, experimentan movimientos vibracionales que, de manera simplificada, pueden clasificarse en estiramientos (ν), relacionados principalmente con cambios en la longitud de los enlaces, y flexión (δ), o deformaciones asociadas con variaciones en los ángulos entre ellos. Para que una vibración sea activa en espectroscopía infrarroja se debe producir un cambio en el momento dipolar de la molécula. Cuando la frecuencia de la radiación incidente coincide con la frecuencia característica de dicha vibración, se produce absorción de energía. Como resultado, distintos enlaces y grupos funcionales generan señales en determinadas regiones del espectro, lo cual es posible registrarse en bandas o señales en un espectro infrarrojo (figura 2) (Peña et al., 2023).

Un espectro FTIR representa normalmente el número de onda, expresado en cm^{-1}, frente a absorbancia o transmitancia. Sin embargo, su interpretación no debe limitarse a la identificación de máximos. La posición, intensidad, anchura y desplazamiento de las bandas también dependen del entorno químico, de las interacciones intermoleculares y del estado físico del material. En este sentido, una banda aislada rara vez permite identificar de forma segura una estructura. Rodriguez et al. (2025), al estudiar películas de PU derivadas de aceite de ricino, analizaron conjuntamente regiones correspondientes a N-H, C=O, C-N y C-O, además de verificar la ausencia de NCO residual, resultando en un enfoque más robusto que el análisis basado en una única señal.

Entre las configuraciones instrumentales más utilizadas para polímeros se encuentra ATR-FTIR. En esta modalidad, la muestra se coloca directamente sobre un cristal de alto índice de refracción y una onda evanescente interactúa con una región próxima a la superficie. Esta característica permite analizar películas, recubrimientos y fragmentos de espuma con una preparación mínima. Zuliani et al. (2022) emplearon ATR-FTIR para evaluar poliuretanos renovables antes y después de ensayos de degradación en suelo. El trabajo mostró que la técnica puede utilizarse no sólo para identificar cambios químicos globales, sino también para evaluar su distribución espacial mediante mapeo espectroscópico.

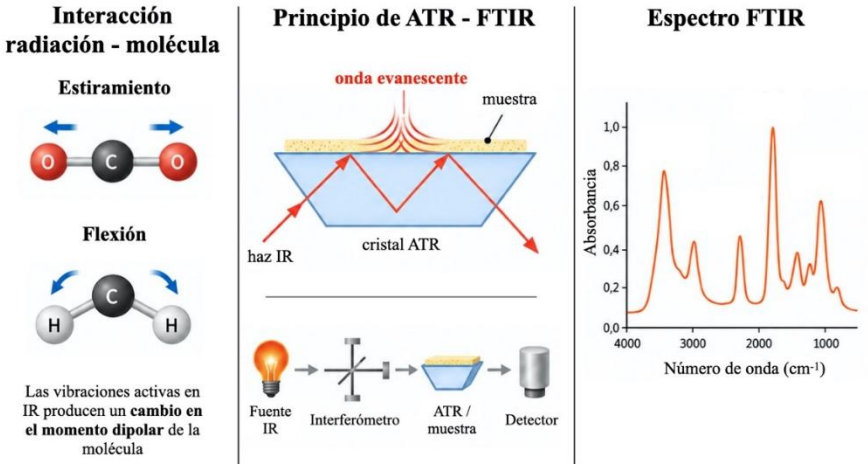


Figura 2. Del movimiento vibracional al espectro ATR-FTIR.

3.2. Transformación de aceites vegetales en polioles y poliuretanos.

Los aceites vegetales están constituidos principalmente por triglicéridos cuyos ácidos grasos pueden presentar distintos grados de insaturación. Estos dobles enlaces constituyen sitios de interés para introducir nuevos grupos funcionales mediante diferentes rutas de modificación química. Musik et al. (2021) describen procedimientos como la epoxidación seguida de apertura de anillos oxirano, los cuales permiten introducir grupos hidroxilo y producir polioles susceptibles de reaccionar posteriormente con isocianatos.

La espectroscopía FTIR puede utilizarse para dar seguimiento a estas transformaciones mediante la comparación de los espectros obtenidos antes y después de la funcionalización. La disminución de señales relacionadas con insaturaciones y el incremento de la región O-H son consistentes con la formación de grupos hidroxilo. Sin embargo, cuando se pretende determinar con mayor precisión el grado de transformación, esta información debe complementarse con parámetros como el índice de hidroxilo, el índice de yodo u otras técnicas instrumentales.

Una vez obtenido el poliol, los grupos hidroxilo reaccionan con grupos isocianato para formar enlaces uretano (figura 3). En sistemas reales, esta reacción se encuentra condicionada por la funcionalidad de los polioles e isocianatos y por la presencia de extensores de cadena, catalizadores, agua y otros aditivos. La presencia de agua presenta gran importancia en poliuretanos, ya que su reacción con el isocianato genera CO_2 y especies amínicas que pueden reaccionar posteriormente para formar grupos urea. Santos et al. (2025) describen esta combinación de reacciones como un elemento central en la formación de numerosos sistemas espumados. En consecuencia, el espectro de una espuma de PU puede contener contribuciones correspondientes a grupos uretano, urea, poliol residual y otros componentes de la formulación.

3.3. Seguimiento de la síntesis y del curado.

La región correspondiente al grupo isocianato constituye una de las más útiles para el seguimiento de la reacción. El estiramiento N=C=O suele observarse aproximadamente entre 2230 y 2280 cm^{-1}, aunque su posición puede modificarse en función de la estructura del isocianato y de su entorno químico (Tabla 1). Zuliani et al. (2022) siguieron una absorción próxima a 2230 cm^{-1} durante la formación de PU de origen biológico, mientras que Rodriguez et al. (2025) consideraron una señal cercana a 2250 cm^{-1} en películas derivadas de aceite de higuerilla. Estas diferencias evidencian la conveniencia de expresar las asignaciones como intervalos y no como valores universales.

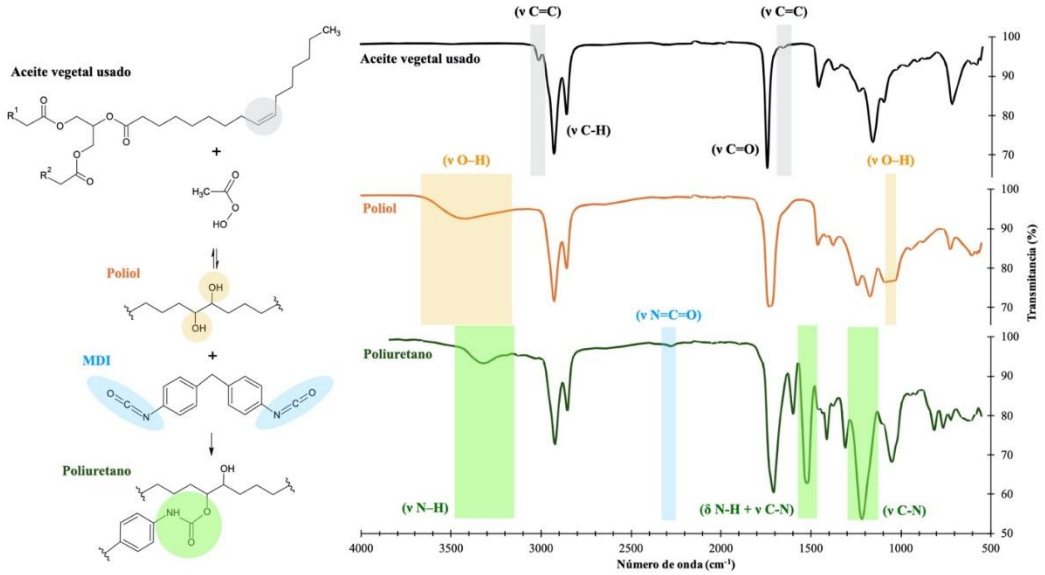


Figura 3. Evolución espectral durante la síntesis de un poliuretano renovable.

Durante el curado, la intensidad de la señal NCO disminuye conforme el isocianato es consumido. De Smet et al. (2022) evaluaron recubrimientos de PU renovables mediante el análisis conjunto de la desaparición de NCO y la evolución de señales correspondientes a N-H y C=O. La región de estiramiento N-H suele localizarse aproximadamente entre 3200 y 3500 cm^{-1} y puede verse afectada por enlaces de hidrógeno y por el solapamiento con grupos O-H residuales. Rodriguez et al. (2025) observaron una banda cercana a 3335 cm^{-1}, mientras que Kim et al. (2024) reportaron absorciones próximas a 3300 cm^{-1} en espumas rígidas.

La región carbonilo (C=O), requiere una interpretación especial, dado que en un PU pueden coexistir carbonilos asociados con uretanos, ureas y ésteres, además de carbonilos libres o involucrados en enlaces de hidrógeno. Por ello, las señales comprendidas aproximadamente entre 1680 y 1750 cm^{-1} pueden presentar varias contribuciones.

Cuando las condiciones de adquisición son reproducibles, la banda correspondiente al NCO puede utilizarse también con fines semicuantitativos mediante su normalización respecto de una banda interna relativamente estable. Este procedimiento permite comparar el consumo relativo de isocianato a diferentes tiempos de reacción o curado.

Tabla 1. Principales regiones FTIR de interés en poliuretanos.

Número de onda aproximado (cm^{-1})	Grupo / modo vibracional	Asignación de banda en PU
3600 - 3200	ν(O-H), ν(N-H)	OH del poliol o residual N–H de grupos uretano/urea Posibles interacciones por enlace de hidrógeno

2970 - 2850	ν(C-H)	Segmentos alifáticos, principalmente CH_2 y CH_3
2280 - 2230	ν(N=C=O)	Isocianato libre o residual Seguimiento de conversión
1750 - 1680	ν(C=O)	Carbonilos de éster, uretano y urea Carbonilos libres o asociados por enlace de hidrógeno
1550 - 1510	δ(N-H) + ν(C-N)	Regiones asociadas con grupos uretano y urea
1300 - 1200	ν(C-N), ν(C-O)	Enlaces relacionados con la estructura uretano
1200 - 1000	ν(C-O-C), ν(C-O)	Segmentos poliéster/poliéster, polioles y enlaces asociados con la matriz de PU

3.4. Aplicación de FTIR al estudio de degradación.

La utilidad de la espectroscopía FTIR va más allá de la síntesis del PU. Durante su vida útil, los PU pueden quedar expuestos a radiación ultravioleta, oxígeno, humedad, temperatura o microorganismos, factores capaces de producir modificaciones progresivas de su estructura química (figura 4). Zuliani et al. (2022) analizaron PU de origen biológico antes y después de ensayos de degradación en suelo y observaron cambios en regiones asociadas con carbonilos, cadenas alifáticas y enlaces C-O-C. Estos resultados muestran que la espectroscopía FTIR puede emplearse para dar seguimiento a la evolución química del material durante la exposición a dichos agentes. La radiación ultravioleta constituye un factor relevante. Lopes et al. (2025) estudiaron PU obtenidos a partir de aceites de linaza y maracuyá sometidos a envejecimiento acelerado. Mediante espectroscopía FTIR se identificaron modificaciones en diferentes regiones espectrales, mientras que el análisis termogravimétrico permitió evaluar cambios en la estabilidad térmica.

La interpretación de estos fenómenos debe realizarse con precaución. Un incremento de la región carbonilo puede ser consistente con procesos oxidativos, pero no constituye por sí solo evidencia de un mecanismo particular. Procesos como oxidación, hidrólisis, ruptura de cadenas y pérdida de fragmentos pueden ocurrir de manera simultánea.

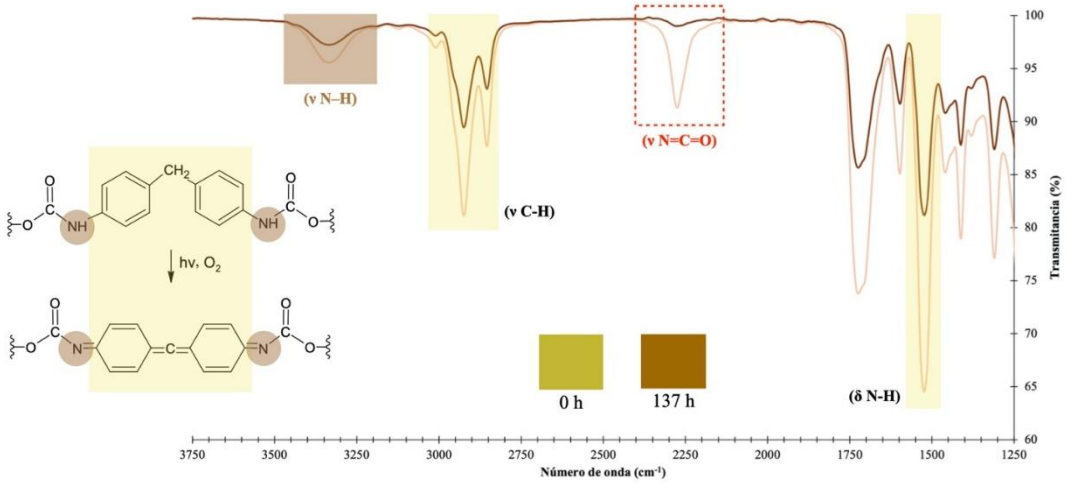


Figura 4. Evolución del espectro FTIR de un recubrimiento de poliuretano durante su exposición a radiación UV.

3.5. Aplicación en espumas, películas y recubrimientos.

En espumas de PU, la reacción química tiene lugar de manera simultánea con procesos de nucleación, expansión y crecimiento celular. Santos et al. (2025) señalan que la naturaleza de los biopolioles influye tanto en la química de la red como en la morfología y en las propiedades finales del material. Kim et al. (2024) muestran esta relación al combinar FTIR con microscopía, análisis térmico y ensayos mecánicos. En dicho trabajo, la espectroscopía FTIR permitió evaluar aspectos de la estructura química, mientras que las técnicas complementarias permitieron relacionar esa estructura con el desempeño físico de la espuma.

En películas y recubrimientos, el interés suele concentrarse en el grado de curado, la presencia de NCO residual y las modificaciones superficiales asociadas con el envejecimiento. Rodriguez et al. (2025) emplearon ATR-FTIR para caracterizar películas derivadas de aceite de ricino, siendo especialmente adecuada en estos sistemas debido a su sensibilidad hacia las regiones próximas a la superficie. Esta característica la convierte en una herramienta útil para estudiar envejecimiento UV, oxidación, hidrólisis y modificaciones superficiales.

En términos generales, la espectroscopía FTIR permite identificar grupos funcionales presentes y cómo evolucionan. La interpretación de estos cambios sobre la morfología, estabilidad térmica, comportamiento mecánico o funcionalidad del material requiere la integración de técnicas complementarias, como la difracción de rayor X, espectroscopía Raman (ER) y resonancia magnética nuclear (RMN) (Pastor et al., 2024).

3.6. Limitaciones y técnicas complementarias.

A pesar de su rapidez, versatilidad y alta sensibilidad frente a cambios en grupos funcionales, la espectroscopía FTIR no proporciona por sí sola una descripción completa de la estructura y desempeño de un poliuretano. El espectro permite reconocer la presencia y evolución de determinados enlaces químicos, pero no determina directamente parámetros como la masa molecular, la longitud de las cadenas de carbono, la densidad de entrecruzamiento o las propiedades mecánicas del material. Por esta razón, sus resultados deben interpretarse dentro de un esquema de caracterización más amplio.

Una de las principales limitaciones de FTIR es el solapamiento de bandas. Esta situación resulta particularmente evidente en la región carbonilo (1750 cm^{-1}), donde pueden coexistir contribuciones correspondientes a grupos uretano, urea, éster y carbonilos en diferentes estados de asociación mediante enlaces de hidrógeno-hidrógeno (1750 – 1680 cm^{-1}). De manera similar, la región comprendida aproximadamente entre 3200 y 3600 cm^{-1} puede incluir contribuciones simultáneas de grupos O-H y N-H, cuya posición y forma dependen además de las interacciones intermoleculares. En estos casos, una modificación en la intensidad o posición de una banda no siempre puede atribuirse de forma segura a una única transformación química (Ochoa-Flores et al., 2025).

La reproducibilidad experimental constituye otra consideración importante. En mediciones ATR-FTIR, el contacto entre la muestra y el cristal, la presión aplicada, la heterogeneidad superficial y la presencia de humedad pueden modificar la intensidad aparente de las señales. Asimismo, procedimientos como la corrección de línea base, la normalización y la selección de las regiones de integración pueden influir en la comparación entre espectros. Por estas razones, la información espectroscópica adquiere mayor valor cuando se integra con técnicas capaces de examinar otros niveles de la estructura y del comportamiento del material, como lo son: resonancia magnética nuclear (RMN), cromatografía de permeación en gel (GPC o SEC), calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), análisis mecánico dinámico (DMA), así como ensayos directamente relacionados con la aplicación prevista, p.e. pruebas de tracción, compresión, dureza o adhesión, entre otros (Bikiaris et al., 2025).

Conclusiones.

La espectroscopía FTIR constituye una herramienta de gran utilidad para el estudio de poliuretanos renovables, ya que permite realizar el seguimiento de las distintas etapas de transformación química, desde la materia prima hasta el material envejecido. Durante la funcionalización de aceites vegetales, la espectroscopía FTIR puede aportar evidencia consistente con la formación de polioles. En la etapa de síntesis permite seguir el consumo del grupo isocianato y la evolución de señales asociadas con enlaces N-H, C=O, C-N y C-O. Posteriormente, puede utilizarse para evaluar modificaciones químicas vinculadas con procesos de envejecimiento y degradación.

La literatura revisada muestra que estas aplicaciones son válidas tanto para espumas como para películas y recubrimientos. Sin embargo, la interpretación espectral debe realizarse considerando que las posiciones de las bandas no son universales y que una señal aislada no es suficiente para identificar inequívocamente una estructura o mecanismo. En este sentido, la principal fortaleza de FTIR reside en el análisis de patrones de transformación. La

comparación sistemática entre materias primas, productos intermedios, polímeros curados y materiales sometidos a envejecimiento permite utilizar el espectro como un registro de la evolución química del poliuretano.

Créditos.

Este artículo se desarrolló a partir de la conferencia titulada *"Espectroscopía FTIR en la síntesis y caracterización de poliuretanos renovables"*, presentada en Cuarto Encuentro de Estudiantes de Investigación de Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica, el día 17 de marzo de 2026 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por las becas doctorales otorgadas.

Referencias bibliográficas.

Bikiaris, N. D., Malini, E., Christodoulou, E., Klonos, P. A., Kyritsis, A., Galaris, A., Pantopoulos, K. (2025). Amphiphilic Thermoresponsive Triblock PLA-PEG-PLA and Diblock mPEG-PLA Copolymers for Controlled Deferoxamine Delivery. Gels, 11(9), 742. https://doi.org/10.3390/gels11090742.

De Smet, D., Uyttendaele, W., & Vanneste, M. (2022). Bio-Based 2K PU Coating for Durable Textile Applications. *Coatings*, *12*(2), 169. https://doi.org/10.3390/coatings12020169.

Kim, H. J., Jin, X., & Choi, J. W. (2024). Investigation of bio-based rigid polyurethane foams synthesized with lignin and castor oil. *Scientific Reports*, *14*(1), 13490. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64318-8

Lopes, R. V. V., Quirino, R. L., Breves, R. A., Pezzin, A. P. T., Mazur, L. P., dos Santos, M. L., & Sales, M. J. A. (2025). Accelerated Weathering Tests of Linseed and Passion Fruit Oil-Based Polyurethanes. *Coatings*, *15*(5), 550. https://doi.org/10.3390/coatings15050550.

Mo, Y., Huang, X., & Hu, C. (2024). Recent Advances in the Preparation and Application of Bio-Based Polyurethanes. *Polymers*, *16*(15), 2155. https://doi.org/10.3390/polym16152155.

Musik, M., Bartkowiak, M., & Milchert, E. (2021). Advanced Methods for Hydroxylation of Vegetable Oils, Unsaturated Fatty Acids and Their Alkyl Esters. *Coatings*, *12*(1), 13. https://doi.org/10.3390/coatings12010013.

Ochoa Florez, Diego Enrique, Chaparro Garcia, Amanda Lucía, Salazar Tellez, Criss Fernando. (2025). Estabilidad térmica de grupos funcionales en aceites vegetales analizados mediante espectroscopia infrarroja. Ciencia en Desarrollo, 16(1), 166-173. https://doi.org/10.19053/uptc.01217488.v16.n1.2025.18402.

Pastor, E., Lian, Z., Xia, L. (2024). Complementary probes for the electrochemical interface. Nat Rev Chem 8, 159–178. https://doi.org/10.1038/s41570-024-00575-5.

Peña, P. P. (2023). Espectroscopía de infrarrojo: Análisis e interpretación de compuestos. Universidad Juárez del Estado de Durango. 1-128. Libro

Rodriguez, O. T., Diaz, L. E., & Valero, M. F. (2025). Modified Castor Oil-Based Polyurethane Films with Streptomyces Extracts Presenting Anti-Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus Activity. *Polymers*, *17*(17), 2383. https://doi.org/10.3390/polym17172383.

Santos, M., Mariz, M., Tiago, I., Alarico, S., & Ferreira, P. (2025). Bio-Based Polyurethane Foams: Feedstocks, Synthesis, and Applications. *Biomolecules*, *15*(5), 680. https://doi.org/10.3390/biom15050680.

Xie, H., Li, C., Wang, Q. (2022). A critical review on performance and phase separation of thermosetting epoxy asphalt binders and bond coats. Construction and Building Materials, 326, 126792. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126792.

Zuliani, A., Rapisarda, M., Chelazzi, D., Baglioni, P., & Rizzarelli, P. (2022). Synthesis, Characterization, and Soil Burial Degradation of Biobased Polyurethanes. *Polymers*, *14*(22), 4948. https://doi.org/10.3390/polym14224948.

Información de los autores.



Eder Armando Caballero Moreno es Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de Colombia, cuenta con Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica por el Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez y actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en el mismo instituto.



Andy Jarenni Gómez Valdéz tiene formación en Ingeniería Bioquímica, egresada del Tecnológico Nacional de México, Maestra en Ciencias en Ingeniería Bioquímica egresada de la misma institución y actualmente alumna del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en la línea de investigación en alimentos.



Rocío Meza Gordillo es profesora de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Desarrolla proyectos de investigación relacionados con la valorización de residuos agroindustriales, extracción y síntesis orgánica de compuestos de interés relacionados con la generación de materiales.



María Cristina Velasquillo Martínez es investigadora del Instituto Nacional de Rehabilitación “Luis Guillermo Ibarra Ibarra”, especializada en ingeniería de tejidos, terapia celular, medicina regenerativa y biomateriales. Su trabajo se ha enfocado en el desarrollo de sustitutos biológicos de piel, cartílago y hueso, así como en el estudio de la interacción entre células y biomateriales. Es tutora acreditada de maestría y doctorado en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM y participa en la formación de recursos humanos en medicina regenerativa e ingeniería tisular.