



**Somos calidad,
somos USC**

Aplicación de la espectroscopia infrarroja cercana (NIR) en la industria papelera

Autor

José Eduardo Gómez Liévano

**Título por el que opta
Químico**

Director

Msc. Sandra Patricia Castro Narvárez

Grupo de Investigación

GIEMA Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente

**Línea de Investigación
Solución a problemas ambientales**

**Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali – Colombia
2025**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Científico	Revisión técnica a cerca de parámetros de análisis por NIR para el proceso de fabricación de papel	Comunidad académica, industria papelera, industria silvicultura.
Indicadores de Gestión	Se establece la NIR como herramienta analítica para el seguimiento de la calidad de maderas, pulpeo y papel	Comunidad académica, industria papelera, industria silvicultura.
Tecnológico	Se muestran los alcances técnicos y tecnológicos de las diferentes herramientas NIR para el análisis de las diferentes fases en la fabricación de papel.	Comunidad académica, industria del papel.
Ambiental	Aprovechamiento de residuos de biomasa	Comunidad en general. Sector agrícola y procesamiento de madera

Participación en:

- XXII Encuentro de Investigación formativa. 2025.
- XXI Encuentro de Investigación formativa. 2024.

APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA (NIR) EN LA INDUSTRIA PAPELERA

José Eduardo Gómez Lievano

jose.gomez13@usc.edu.co

¹Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente
Programa de Química. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali.
Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La técnica NIRS se presenta como una alternativa eficaz respecto a los métodos convencionales tradicionales en aplicaciones de la industria papelera. La metodología que se empleó incluyó revisión de literatura mediante búsquedas en bases de datos científicos, donde se identificó las aplicaciones más relevantes y estudios recientes. Se realizó un análisis detallado de los parámetros de calidad que pueden ser evaluados en todo el proceso, desde la caracterización de la madera, análisis de la pulpa y el licor negro, destacando la capacidad de la técnica para evaluar la densidad, humedad, contenido de lignina, celulosa, hemicelulosa, morfología de las fibras entre otras, mostrando su capacidad de proporcionar resultados rápidos y no destructivos. La comparación de la técnica NIRS respecto a los métodos tradicionales revela que NIRS permite tener ventajas significativas al brindar mayor rapidez, minimizar el uso de reactivos químicos y mayor número de análisis; obteniendo resultados confiables, que optimizan procesos en las industrias papeleras. Las recomendaciones incluyen continuar en el desarrollo de la técnica y realizar una calibración para garantizar un análisis estadístico en aras de la precisión y confiabilidad.

Palabras clave: *Métodos de calibración multivariada, Industria papelera, procesos, pulpeo, Kraft.*

NEAR INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS) APPLICATION IN THE PAPER INDUSTRY

ABSTRACT

An approach to the application of near infrared spectroscopy (NIRS) in the paper industry was made, highlighting its potential in the application for process optimization while improving product quality. The NIRS technique is presented as an effective alternative to traditional conventional methods. The methodology used included literature review through searches in scientific databases where the most relevant applications and recent studies were identified; a detailed analysis of the quality parameters that can be evaluated throughout the process, from wood characterization, pulp analysis and black liquor. Highlighting the ability of the technique to evaluate density, moisture, lignin content, cellulose, hemicellulose, fiber morphology, among others, showing its ability to provide fast and non-destructive results. The comparison of the NIRS technique with respect to traditional methods reveals that NIRS provides significant advantages by offering greater speed, minimizing the use of chemical reagents and a greater number of analyses, obtaining reliable results, allowing them to optimize the processes of the paper industries. Recommendations include further development of the technique and careful calibration to ensure statistical analysis guarantees accuracy and reliability.

Keywords: *Multivariate calibration methods, Paper industry, Process, Pulp, Kraft.*

1. INTRODUCCIÓN

La industria papelera, que hace parte de la industria primaria de transformación básica, es de gran importancia en la economía global. Con el auge de la digitalización de la información se esperaba que la demanda de papel disminuyera. Sin embargo, la innovación por parte de las empresas y las orientaciones enmarcadas hacia los mercados verdes la han posicionado fuertemente en el mercado. Estudios demuestran que la demanda de las industriales papeleras viene en aumento y se proyecta un incremento hasta un 65% en los próximos 30 años, por ello, las industriales papeleras se preparan para mejorar su producción, así como el control que se tiene sobre el proceso. (Dai et al., 2023)

En Colombia se aplica la Ley 2232, que prohíbe el uso de plásticos de un solo uso y establece impuestos relacionados (Cutiva Medina, 2022), como alternativa se ha posicionado reemplazarlos por papel debido a su alta tasa de biodegradabilidad; impulsando con ello, la utilización de bolsas, embalaje y empaques de papel. Este tipo de políticas nacionales e internacionales, promueven nuevos retos a la industria papelera asociadas con un mayor crecimiento y exigencias de calidad. Certificaciones como la de cadena de custodia, realizadas por industrias sin ánimo de lucro como Forest Stewardship Council (FSC), hacen un llamado a la responsabilidad por parte de las industrias papeleras, orientadas hacia el seguimiento constante y preferiblemente en línea al producto desde la fuente de fabricación hasta el consumidor. (Patiño Muñoz & Zárate Yépes, 2024)

Otro factor diferenciador en las nuevas organizaciones sustentables papeleras es evidenciar gestión responsable de bosques cultivados mediante un seguimiento adecuado de la cadena de custodia, monitoreando la materia prima, su procesamiento y la calidad del producto final; con el objetivo de lograr un mejor rendimiento y asegurar una calidad óptima del papel. Estudios han demostrado que es posible empezar a hacer el análisis de la materia prima desde la madera hasta las características y propiedades del papel años después de su uso. (Liang et al., 2020a; Liu et al., 2021a). En la industria papelera, los análisis convencionales suelen ser análisis húmedos, los cuales son destructivos en su gran mayoría, tienden a ser tediosos, prolongados, resultan costosos y requieren grandes cantidades de solventes haciéndolos poco amigables con el medio ambiente y la salud de los analistas. Como alternativa, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) ha permitido realizar análisis más eficientes tanto en su rapidez como en su confiabilidad, al ser menos laboriosos y permitir mediciones en línea mediante calibración multivariada (Khaliliyan et al., 2024a).

Las ondas electromagnéticas empleadas en los instrumentos NIRS abarcan números de onda desde 12500cm^{-1} hasta 4000cm^{-1} . Esta región se utiliza por su capacidad para interactuar con la materia y sus enlaces químicos, lo que permite obtener información cuantitativa y cualitativa a partir de combinaciones vibratorias de los grupos funcionales. Con los espectros NIRS y un adecuado tratamiento de datos como lo es un modelo estadístico de análisis multivariado se puede predecir y correlacionar las propiedades a estudiar. (Deepa et al., 2024). La espectroscopía NIRS resulta atractiva para la industria papelera debido a su versatilidad en los análisis, rapidez y facilidad de uso. Además, existen instrumentos portátiles que pueden integrarse en línea que exhiben respuestas inmediatas sobre el proceso (Andre Mazega et al., 2024).

La pulpa que es una parte del proceso en la fabricación de papel requiere de análisis rutinarios tales como el brillo que es determinado por reflectancia difusa a 457nm, la viscosidad suele realizarse con cuprietilendiamina siguiendo la ISO 5351; la viscosidad para R-10 Y R-18 se determina según la norma DIN 54355 (Khaliliyan et al., 2024b); el número kappa se mide siguiendo la norma TAPPI (T236 cm-85); la humedad por el método NBR 14929 (Medeiros et al., 2023), la cantidad de celulosa en suspensión se analiza por la norma (GB/T 9107 1999) (Zhou et al., 2018.) y la medición de consistencia, parámetro de concentración de la pulpa, se determina mediante la norma ISO standard 2470 (Costa et al., 2019). Todas las anteriores técnicas requieren insumos de reactivos costosos y muy contaminantes. Asimismo, la industria papelera cuenta con técnicas para analizar las cualidades fisicoquímicas de la madera, chips o astillas, residuos de madera, licor negro, licor blanco, papel en la industria y papel histórico. Todas estas técnicas que comúnmente se usan son dispendiosas mientras que, por otro lado, la NIRS ofrece un método con múltiples usos, no destructivo, económico, obtener datos en tiempo real, permitiendo la toma de decisiones ajustadas para optimizar el rendimiento del proceso. (Leoni et al., 2024)

Esta revisión efectúa un análisis bibliográfico sobre la aplicación de la espectroscopía NIRS en la industria papelera, identifica la viabilidad del uso en análisis rutinarios y se comparan contra técnicas de referencia. Asimismo, estima la viabilidad del uso de la técnica en la optimización de los procesos en la industria papelera, geolocalización de maderas. Se espera que la revisión sea relevante para la industria papelera como los nichos económicos que están asociados con ella.

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección de la literatura

La revisión se efectuó en bases de datos multidisciplinarias como Science Direct, Springer, Scopus además se usaron motores de búsquedas como Google Scholar y Scielo para identificar artículos científicos y estudios recientes de aplicaciones de la espectroscopía infrarroja cercana (NIRS) en la industria papelera. Se usaron palabras clave y combinaciones de la industria papelera, como “*Pulp, paper, kraft, polimerization, Wood y lignin*” con los conectores booleanos “*And*”, “*or*”, como criterios específicos de búsqueda que incluían la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS). La información analizada comprendió artículos de investigación en español, portugués e inglés entre 2018 a 2025.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios que abordaban específicamente la aplicación NIRS en los análisis que se realizan desde la materia prima, el procesamiento y el producto final en la industria papelera. Los artículos proporcionaron información detallada sobre la técnica NIRS, incluidos los métodos de calibración usados, autenticación y la evaluación de la calidad. Se consideraron artículos y revisiones sistemáticas que proporcionan una evaluación crítica de la técnica. Se excluyeron artículos que no brindaron un análisis específico de la aplicación de la técnica NIRS en la industria papelera. Los artículos seleccionados aplicaron métodos de calibración robustos que efectuaban comparación con respecto al método de referencia y presentaron resultados claros sobre las ventajas del uso de la técnica NIRS. Se priorizó los artículos que realizaron una comparación de los métodos tradicionales en el proceso de la fabricación del papel respecto a los métodos NIRS. Así como también, se tomaron en cuenta estudios que hicieron exploraciones de la aplicación NIRS para identificar materia prima no apta para el uso, sea por contaminación o violaciones ambientales.

2.3. Análisis de los datos

Mediante tablas dinámicas en excel se organizó la información para facilitar la comparación y análisis de datos. Se seleccionaron parámetros y análisis rutinarios en la industria como humedad, contenido de lignina, morfología de fibras, contenido de celulosa entre otros. Se documentaron los métodos de calibración y las respectivas validaciones utilizadas en cada caso de estudio, esto incluyó técnicas de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR), análisis de componentes principales (PCA), redes neuronales entre otros métodos estadísticos. También se evaluó la robustez de los métodos en las calibraciones NIRS estudiadas. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de datos cuantitativos reportados en las investigaciones realizadas, con una atención particular en los valores de R^2 , errores de predicción y precisión de la técnica NIRS. También, se documentó el tipo de espectroscopía NIRS utilizada, el equipo usado y condiciones experimentales especificadas.

2.4. Comparación de métodos

La comparación de métodos se realizó entre los alcances de la NIRS respecto a métodos primarios. Se comparó la exactitud y eficiencia con respecto a los métodos tradicionales: humedad de la madera, número kappa en solución, contenido de lignina en solución, contenido de celulosa en solución, blancura en papel, viscosidad de pulpa entre otros. Se evaluaron aspectos como tiempo de análisis, número de análisis realizados, así como la capacidad de hacer análisis y control desde la materia prima. Finalmente, se identificaron las ventajas, limitaciones y proyecciones de la técnica NIRS en la industria papelera.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La espectroscopía NIRS proporciona resultados rápidos y confiables evitando el uso de químicos contaminantes. Esta técnica se ha implementado en industrias de alimentos, análisis en fármacos, diagnósticos médicos, agricultura, en la industria textil, análisis de materiales y extractos, así como en la industria papelera (Gullifa et al., 2023), (Huang & Yu, 2019). El uso de NIRS ha permitido facilitar mediciones mediante equipos portátiles e incluso en línea, lo que permite tener datos en tiempo real. (dos Santos et al., 2013)

La industria papelera basa su producción mayoritariamente a partir de la madera, la cual está compuesta por lignocelulosa (Rabemanolontsoa et al., 2011).

La madera como fuente de celulosa se homogeniza en astillas y estas reaccionan con químicos bajo unas condiciones de presión, tiempo y temperatura determinados para producir pulpa, la cual se usa en los molinos para la fabricación del papel, teniendo además otros subproductos como licor negro, material de biomasa y desechos o efluente, la figura 1 se ilustra el proceso general para la producción de papel Kraft (Bajpai, 2018).

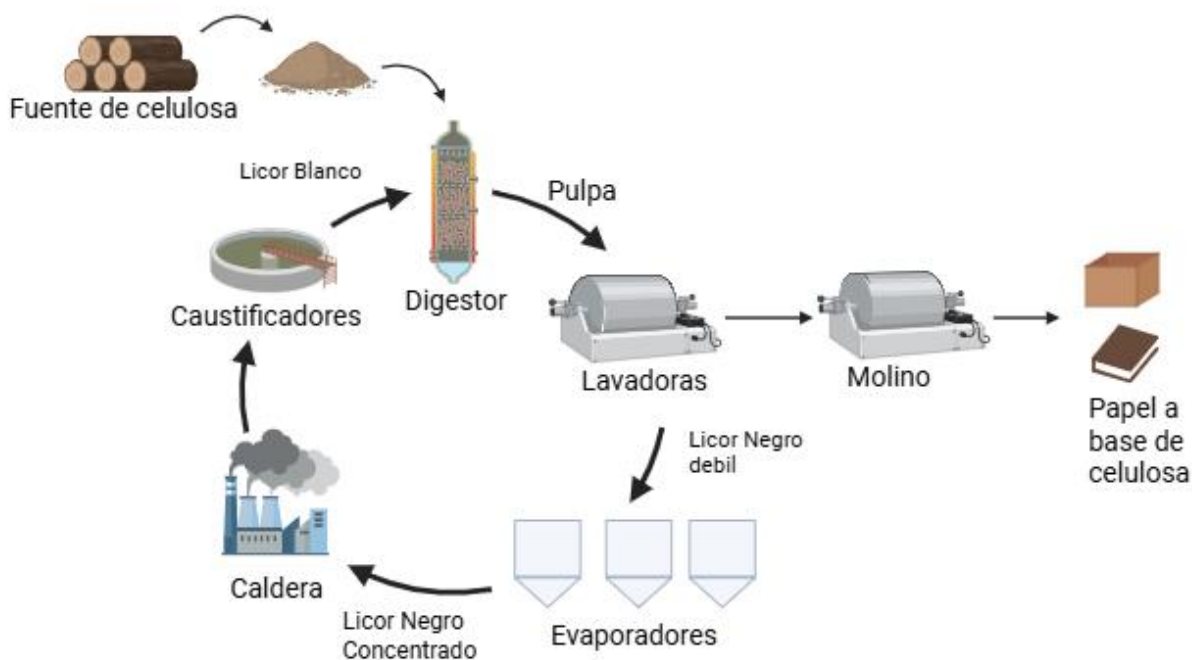


Figura 1. Proceso de fabricación de papel Kraft.

Estudios demuestran que la obtención de información de la materia prima, el proceso y el producto final de forma rápida y confiable permite mejorar el rendimiento y tomar medidas correctivas a tiempo, evitando pérdidas de producción, así como previniendo contaminación del eluentes. La espectroscopía NIRS emerge como una técnica prometedora que permite suplir esta necesidad de la industria papelera. (Liang et al., 2020a; Liu et al., 2021a), (Tsuchikawa & Schwanninger, 2013).

Aplicaciones NIRS en la madera

La madera es la fuente de celulosa comúnmente utilizada, está compuesta por agua, extractivos y lignocelulosa (lignina, hemicelulosa y celulosa). Los componentes de la lignocelulosa varían de acuerdo con las especies de madera e incluso de acuerdo con el lugar en que se encuentren los cultivos. La composición de la lignocelulosa y sus porcentajes típicos en la composición se ilustran en la figura 2 (Karlinsari et al., 2020) (Suárez Matallana et al., 2022).

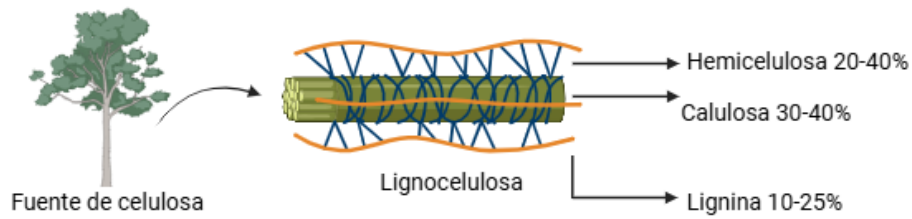


Figura 2. Composición de la lignocelulosa.

El interés de la industria papelera está principalmente centrado en el aprovechamiento de la celulosa para la producción de papel y la transformación de la energía química proveniente de la lignina residual, la cual se encuentra en el licor negro y contiene siringilo, hidroxifenilo y guayacilo como fragmentos principales los cuales se ilustran en la figura 3. Se han desarrollado estudios desde la madera como materia prima, con el fin de poder optimizar al máximo el rendimiento. (Khaliliyan et al., 2024)

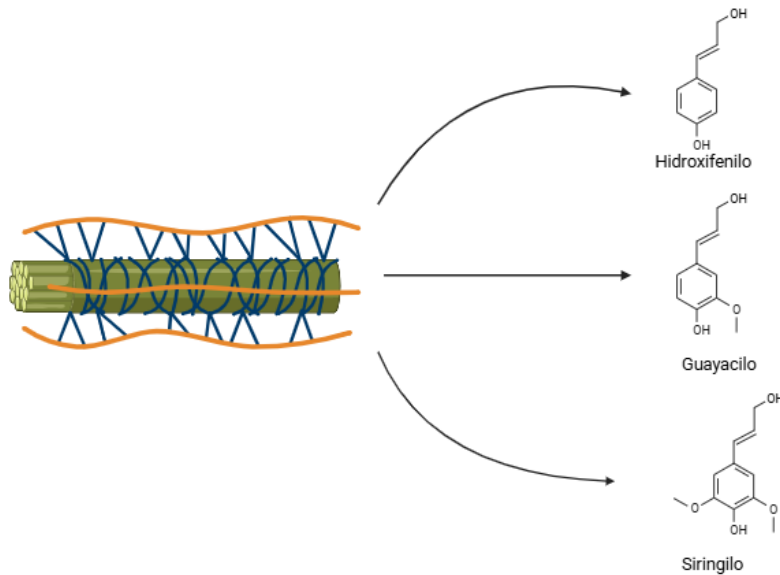


Figura 3. Fragmentación de la lignina presente en el licor negro.

Como se ha hecho referencia anteriormente estudios demuestran que la fuente de celulosa usada mayormente en la industria papelera proviene de material leñoso que a su vez puede venir de maderas duras o maderas suaves, estas se diferencian en su composición, ya sea en el contenido de hemicelulosa o lignina. (Sanchez-Salvador et al., 2022)

La madera presenta una serie de características que son observables cuando se realiza un corte en el diámetro de un tronco. Se puede observar que presenta la zona de la corteza, la zona del cambium el cual permite el crecimiento en su diámetro, la albura la cual permite el transporte de la savia, el duramen el cual permite el sostén de la planta y finalmente la medula o núcleo como se observa en la figura 4 (Ayllon & Pascual, 2022).

Clasificación:

Maderas Duras: Castaño, caoba, arce, ébano, eucalipto nogal, olmo roble, tejo.

Maderas blandas o suaves: cerezo, cedro, abeto, fresno, pino, alerce,

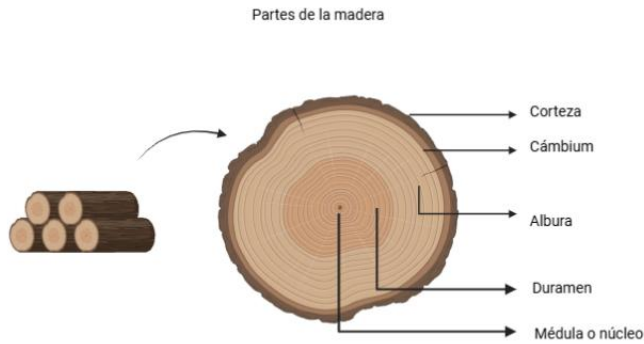


Figura 3. Partes de la madera.

Clasificación de la madera

La clasificación de las especies de madera es de vital importancia, éstas presentan propiedades físicas y químicas muy diferentes de una especie a otra, habitualmente se hace desde la cosecha. Se han realizado estudios que permiten identificar qué tipo de especies se están usando, con el fin de evitar mezclas. Yong Hao en el 2021 logró identificar 20 especies de madera diferentes de una matriz de más de 200 especies, mediante el uso de un espectrómetro portátil (MicroNIRS, VIAVI Corporation) trabajando en una región espectral de 900 a 1700 nm, para esto se usaron 1600 muestras con las cuales se tomaron 1200 muestras para el desarrollo del modelo, mientras que con las otras 400 realizaron las pruebas externas. Los investigadores usaron el análisis de componentes principales (PCA) a las 20 especies de madera donde encontraron una tasa de distribución acumulada del 99,8% como se observa en la figura 4.

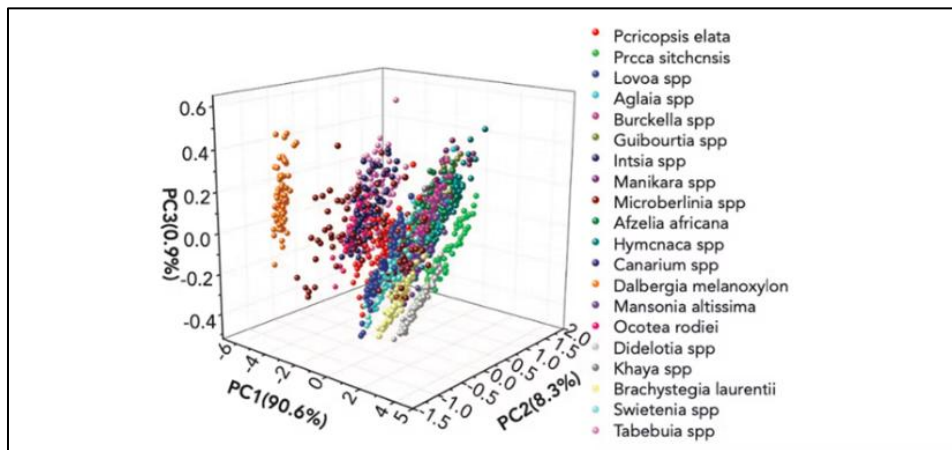


Figura 4. Distribución de PCA para especies de madera. (Hao, 2021)

En el desarrollo del modelo usaron 840 muestras para el modelado y 360 para la verificación del modelo, mediante el análisis PLS-DA se encontró que los espectros fueron óptimos con una tasa de reconocimiento (CRR) correcto del 98,25%. Además, el grupo de estudio realizó análisis usando pretratamientos como Savitzky Golay, primera derivada (SG 1ST-DER) y la variable normal estándar (SNV), donde encontraron una tasa de reconocimiento del 100%. La identificación del tipo de maderas por NIRS permite tener un comercio más seguro

y ejercer un control de las especies que se usan en la industria. (Hao, 2021). La tabla 1 muestra análisis realizados a la madera utilizando la espectroscopia de infrarrojo cercano.

Raobelina en el año 2023 usando un espectrómetro portátil MicroNIR VIAVE 1700 en una región que va desde 900 a 1700nm, realizó la identificación de cuatro especies de madera *Dalbergia* la cual comprende cerca de 250 especies, esto con el fin de poder realizar un control de las maderas como se exige en la región de Madagascar. Los investigadores realizaron espectros del duramen y de la albura de las muestras de madera, obteniendo una precisión entre 83.3-81.8% para los modelos basados en el duramen, estos estudios concluyeron que mediante el análisis del duramen se puede hacer una identificación de las especies más sencilla (Raobelina et al., 2023).

Tabla.1 Aplicaciones NIRS en la madera y biomasa.

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
NIRS Portátil	Madera	Espectrómetro portátil (MicroNIRS, VIAVI Corporation) 900 a 1700 nm Uso de PCA, PLS-DA y SVM	Identificación de especies.	Se Identifico 20 especies diferentes de maderas.	Microscopia	(Hao, 2021)
NIRS	Madera	Espectrómetro (NIR) Polytec PSS-2121 (Polytec GmbH, Waldbronn, Alemania) 1100–2100 nm Uso de SNV, MSC, VSN	Brillo y composición química.	Realizar medición en línea.	Tappi 257 y método de extracción por solvente.	(Hans & Allison, 2021)
FT-NIRS	Madera	Espectrómetro de infrarrojo cercano por transformada de Fourier MPA Burkerr (FT-NIR). 800 a 2500nm. Uso de PLS-R, R ²	Densidad	Análisis de densidad en Pino marítimo.	Microdensitometría de rayos X.	(Alves et al., 2020)
NIRS Portátil	Madera	Espectrómetro portátil VIAVI MicroNIR 1700. Uso de PCA, PLS-DA, distancia de Hotelling	Identificación de especies.	Identificación de 4 especies de madera de <i>dalbergia</i>	Microscopia	(Raobelina et al., 2023)
NIRS	Madera	Espectrómetro NIR (LabSpec Pro FR/A114260, Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, CO, EE. UU.). 350 a 2500 nm Uso de PLS-R, R ² , RMSE	Contenido de humedad y densidad.	Madera de álamo blanco chino.	GB/T 1933–2009 (ISO 3131: 1975)	(Li et al., 2022)
NIRS	Madera	Espectrómetro Bruker Modelo Vector 22/N (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania). 12500 y 3600 cm ⁻¹ (800 a 2.780 nm). Uso de PCA, PLS-R, VL, R ²	Densidad básica y lignina.	Análisis en madera de Eucalipto <i>urophylla</i> .	NBR 11041, Tappi 224	(Mesquita Pimenta et al., 2024)
NIRS	Madera	Espectrómetro NIR de transformada de Fourier (FT) (MPA, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania). 1112–2500 nm (9000–4000 cm ⁻¹). Uso de PCA, PLS-R, PLS-DA, RPD.	Densidad	Análisis de densidad en Eucalipto <i>grandis</i> .	ASTMD-2395	(Medeiros et al., 2024)
NIRS portátil	Madera	Espectrómetro PolisspecNIR. 900 - 1700nm. Uso de PLS, R ² , RMSECV, RMSEP	Humedad	Madera y astillas.	ISO 18134-2025	(Leoni et al., 2024)

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
Micro-NIRS	Residuos de madera	MicroNIR OnSite (JDSU Corporation, Milpitas, EE. UU.). Región espectral de 950 a 1650nm. Uso de PCA, MSC, primera y segunda derivada, R ² , RMSECV y RPD	Humedad- Poder calorífico	Análisis de humedad y poder calorífico en residuos de madera.	ISO 1834-2 e ISO 18125	(Mancini & Rinnan, 2021)
FT-NIRS	Residuos de madera	Espectrofotómetro Foss DS2500 (Foss A/S, Hillerød, Dinamarca). Rango espectral de 400 a 2500nm. Uso de PCA, SNV, MSC, primera y segunda derivada	Humedad- Poder calorífico	Identificación de madera virgen y tratada, a partir de madera de desecho.	Bases de datos	(Mancini & Rinnan, 2023)

Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS-R). Modelo análisis de componentes principales (PCA). Coeficiente de determinación (R²). Análisis de discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Máquinas de vectores de soporte (SVM). Error medio de calibración (RMSE). Corrección de dispersión multiplicativa (MSC). Número de variables latentes (VL). Desviación de predicción residual (RPD). Error cuadrático medio de predicción (RMSEP). Error cuadrático medio de la validación cruzada (RMSECV).

Mediante el uso de la espectroscopía NIRS, se han realizado estudios de caracterización química de la madera antes de iniciar el proceso. Guillaume Hans y colaboradores, desarrollaron estudios usando VIS-NIRS para determinar el brillo y las propiedades químicas de algunos tipos de maderas duras y blandas, e implementaron las medidas en el proceso en línea, convirtiéndose en un reto debido a la gran variabilidad que se puede presentar desde la especie de la madera, tamaños y hasta la humedad del medio ambiente. En el estudio se pudo demostrar que hay una mayor variabilidad en los análisis del brillo, 2,9% para madera blanda y 4,7% para madera dura. Otro análisis que presentó alta diferencias fue la lignina con 1,6% en madera blanda y 0,8% en madera dura; así mismo, los análisis de holocelulosa presentaron variabilidad de 1,5% y 1,0% respectivamente. Además, descubrieron que la región espectral para el análisis de extractivos está entre 1300 a 1800nm mientras que para la lignina y la celulosa se encuentra entre 1000 a 2500nm, concluyeron que cuando se hace una selección de la región espectral optima, la medición tendrá el mismo rendimiento con el polvo de la madera o con las astillas para el análisis de especies o clasificación de la madera (Hans & Allison, 2021).

Densidad de la madera

La densidad de la madera es un parámetro de gran utilidad en la cuantificación de plantaciones y la caracterización de sus propiedades es ampliamente utilizado en la industria maderera y de pulpa y papel para indicadores de calidad tales como resistencia, contracción de la madera, rendimiento de la pulpa y valores calóricos. Se puede describir como densidad verde, densidad básica, densidad seca al aire y densidad seca. La densidad verde representa la cantidad de madera en el árbol vivo; la densidad básica se refiere al peso mínimo del material seco y su volumen verde, siendo fundamental para medir la masa seca en plantaciones. La densidad seca al aire es la relación entre el peso de la madera en equilibrio con la atmósfera y su volumen correspondiente con una humedad del 12% y la densidad seca se establece entre el peso y el volumen de la madera exenta de agua (Cobas & Tortoriello, 2024). El parámetro de densidad en la industria papelera se relaciona con la cantidad de químicos que se agregan en la etapa de cocción, afectando directamente el rendimiento (Asta et al., 2024).

Las mediciones convencionales de densidad se realizan con técnicas que requieren mucho tiempo para su análisis (Gendvilas et al., 2024). Ana Alves y sus colaboradores en el año 2020 trabajaron en el desarrollo de métodos para análisis de densidad de madera de pino marítimo o *pinus pinaster*, teniendo en cuenta los perfiles de la madera por medio de NIRS, encontrando que usando el método de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS-R) se hallan resultados con buenas estadísticas. Obtuvieron valores del coeficiente de determinación (R²) de 0,95 lo cual indicó un alto nivel en la correlación que correlaciona valores predichos por el método y los valores reales. Además, la desviación residual de la predicción (RPD) obtenida fue de 4,6 considerada aceptable para aplicaciones prácticas, debido a esto el método es considerado adecuado para determinar la densidad de este tipo de madera de una forma sencilla y rápida. (Alves et al., 2020).

En China, Ying Li en año 2022 realizó estudios de varios modelos estadísticos para predecir la densidad del álamo blanco chino (*populus tomentosa carriere*); encontró que los modelos de red neuronal (GRNN) combinados con el método (transformada de wavelet de elevación) LWT y (muestreo reponderado adaptativo competitivo) CARS muestran muy buenos resultados logrando reducir la dimensión espectral de 2028 a 23

variables lo que corresponde a una disminución porcentual de 98,88%. para predecir la medida de densidad (Li et al., 2022).

En Brasil Emanuella Mesquita Pimenta, en el 2024 implementó medidas de densidad básica, donde se obtuvo información precisa con un coeficiente de variación (CV) de 8,34% tanto para mediciones radiales como transversales de la madera de Eucalipto *urophylla*. Igualmente, incluyó información de la composición química de la madera (Mesquita Pimenta et al., 2024). Modelos estadísticos, utilizando espectroscopía NIR, con tratamientos PLS-DA y PLS-R, permiten el uso de equipos portátiles para predecir la densidad de la madera directamente en el sitio, sin necesidad de extraer muestras y transportarlas. Modelos específicos para *Eucalyptus grandis*, presentan coeficientes de determinación (R^2) de 0,77 a 0,85 sin verse afectados por las variaciones en el contenido de humedad (Medeiros et al., 2024).

Humedad de la madera

Al igual que la densidad, el contenido de humedad en la madera es una medida de gran importancia en la industria papelera, permite estimar la proporción licor-madera que se obtiene durante el procesamiento. Las normas tradicionales como la Tappi 264 cm-97 y la ISO 18134:2015 representan métodos con tiempos de análisis prolongados. La técnica NIRS se ha utilizado en la determinación de la humedad debido a la absorción de los enlaces H-O-H en el infrarrojo cercano que esta entre 950 a 1950nm (Porto et al., 2021)(Álvarez-Ayala et al., 2024).

En el año 2019 se usaron imágenes hiperespectrales (NIRS-HSI) para la determinación de humedad tanto en maderas duras como en maderas suaves, enfocándose en la capacidad higroscópica de este tipo de materiales; para esto se trabajó con un rango de longitud de onda de 1816-2130nm concluyendo que es una metodología con gran potencial en el estudio de las interacciones del agua con la madera, esto debido a que mediante las imágenes se puede hacer un análisis a toda la superficie permitiendo un análisis más detallado (Ma et al., 2021)

Elena Leoni en el año 2024 realizó una adaptación de un NIRS portátil (PolispecNIR distribuido por ITPhotonics Srl) a un proceso en línea, obteniendo buenos rendimientos, con coeficientes de determinación entre 0,64 y 0,86 y errores de predicción inferiores al 4,44% (Leoni et al., 2024). Este tipo de adaptaciones de equipos portátiles en línea, han sido evaluados por otras industrias, buscando tener un monitoreo constante del proceso y a su vez disminuir los sobrecostos en los equipos (Sales et al., 2019).

Aplicaciones NIRS en la biomasa de la madera

La biomasa forestal es materia orgánica proveniente de residuos de la cosecha de la madera tales como: hojas, ramas, tallos de bajo diámetro, corteza, residuos de aserrín, virutas, astillas, entre otros. Se clasifica en biomasa primaria (obtenida en el sitio de cosecha), secundaria (residuos de aserraderos) y terciaria (reciclaje directo de productos de madera). La biomasa forestal es utilizada como energía renovable y se almacena en forma de pellets para su mejor manejo. Este material es de amplio estudio, dado que permite predecir su capacidad como combustible con fines de disminuir la huella de carbono o como recursos que son útiles en otras industrias. (Durán-García & Ruiz-Navas, 2020)(Pinilla et al., 2023). La industria papelera por lo general usa este recurso en la producción de energía eléctrica a partir de la energía química contenida en este material. Sin embargo, hay otras empresas que la usan en la producción de elementos, como tableros (Mancini & Rinnan, 2021).

Un estudio detalló que Colombia genera cerca de 3,97 millones de toneladas al año de biomasa residual forestal. Su potencial energético teórico es de 719 PJ/año, con un aprovechamiento técnico estimado en 77,3 PJ/año, a través de procesos termoquímicos (Martínez, et al, 2016). En 2023 se estimó que el potencial técnico de bioenergía del país es de 204,8-235,3 PJ si se considera métodos de Métodos de priorización más detallados, consideración de pérdidas logísticas y operacionales e inclusión de biomasa hasta ahora no contabilizada (Rodríguez, et al, 2023).

En Italia y Dinamarca Mancini y su equipo caracterizaron los residuos de madera, estudiando la variabilidad y la composición; centraron sus estudios en el análisis de humedad y el poder calorífico. Para este desarrollo usaron como referencia primaria los métodos tradicionales de pérdida de masa por calentamiento según las normas EN ISO 18134-2 (humedad) y EN ISO 18125 (poder calorífico por medio de una bomba calorimétrica) y los compararon con los resultados obtenidos con equipo micro-NIRS. Encontrando valores estadísticos en su modelo de predicción para la determinación de la humedad de $R^2=0,98$ - RMSECV=1,34%H y RPD=6,82; y para el análisis de poder calorífico $R^2=0,94$ - RMSECV=414,65 J/g y RPD=4,29 y valores de RPD en el rango de 3 a 5, concluyendo que el uso de Micro-NIRS es una técnica viable para estos análisis (Mancini & Rinnan, 2021).

Los estudios posteriores de Mancini y colaboradores en la clasificación de residuos de madera usaron FT-NIR, esto con el fin de aprovechar la madera de desecho y contribuir a la economía circular. La muestra fue madera desechada por una empresa de tableros y residuos de madera de centros de reciclaje, obteniendo la clasificación de dos categorías de madera: virgen, con una tasa de clasificación del 90,0% y error de 10% y madera tratada con una tasa de clasificación de 86,7% y error de 16,67%. Los datos anteriores fueron asociados con la utilidad económica que podían representar en su clasificación. Concluyeron que el potencial de reciclaje se puede aumentar con la correcta clasificación, siendo así, la FT-NIR una técnica rápida, económica y de fácil aplicación (Mancini & Rinnan, 2023b) (Mancini & Rinnan, 2023).

Aplicaciones NIRS en la Lignocelulosa

Desde un punto de vista estructural, el material lignocelulósico está constituido por macromoléculas donde la celulosa se envuelve con una monocapa de hemicelulosa y posteriormente se integra en la matriz interna central formada por lignina (Figura 2). La relación y composición de los andamios de la lignocelulosa permite determinar sus propiedades físicoquímicas y su conformación tridimensional (Vázquez-Vuevas et al., 2021). Desde la NIRS se han realizado diferentes estudios para la determinación de los componentes de la lignocelulosa.

La lignina se constituye en un polímero aromático amorfo de monómeros de fenilpropanoides, este proporciona resistencia y estabilidad mecánica a las plantas, por otro lado, es de gran importancia en el proceso de transporte de agua en las mismas. (Suárez Matallana et al., 2022) (Delgado-Aguilar et al., 2016). En la industria papelera se busca la separación de la lignina de la celulosa mediante su fragmentación por medios químicos, semiquímicos o mecánicos. La principal fuente de lignina conocida es obtenida del licor negro Kraft, el cual además de su uso como combustible en la caldera, tiene aplicaciones como la producción de adhesivos, dispersantes y emulsionantes entre otras, poniéndolo como una alternativa aprovechable para evitar uso de combustibles fósiles (Chen et al., 2025)(Wang & Deuss, 2023).

Kofi Nkansah en el año 2010 demostró la eficacia de la espectroscopía NIRS para la determinación del contenido de lignina soluble e insoluble usando madera de roble y álamo. Estableciendo una correlación sólida entre los estudios obtenidos por NIRS respecto a los métodos convencionales como ASTM 1106-96, donde concluyó que un modelo NIRS es un método adecuado para realizar los análisis. (Nkansah et al., 2010). En el 2019 Moksadur Rahman, basándose en los estudios previos de Nkansah, hizo análisis exhaustivos para la determinación de lignina residual en línea, con el objetivo de aplicarlos en digestores continuos permitiendo así tener un control de modelo predictivo (MPC) y reducir la variabilidad del número Kappa en la salida de los digestores. Dado que el número Kappa está relacionado estrechamente con el contenido de la lignina residual, los investigadores realizaron una comparativa de la variabilidad del número kappa al usar el control predictivo y la variabilidad del número kappa al usar los controles operativos manuales, encontrando que al usar el control predictivo el porcentaje de error en la variabilidad estuvo en 0,1275% mientras que al usar los controles manuales este estuvo en 6,1899%. Los estudios realizados por Moksador y sus colaboradores concluyen que el modelo predictivo mediante el uso de NIRS en línea para la medición de lignina reduce significativamente la variación del número kappa en la salida de los digestores continuos, permitiendo así una mayor eficiencia y estabilidad en el proceso (Rahman et al., 2019).

Fahey Leonay colaboradores obtuvo que los extractivos de la madera, presentaban contenidos de lignocelulosa entre 1,3-15% para la madera de *Eucalyptus bosistoana* con errores estándar (SE) para la lignina=2,1%, glucosa=6,98%, galactosa=2,54%, manosa=1,48%, xilosa=1,33%, arabinosa=0,3% y ácido glutámico=0,22% (Fahey et al., 2018). En Japón Ning Ai, en el año 2022 usando NIRS mediante el método de reflectancia difusa realizó una caracterización determinando el contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa en *Sargassum horneri*, encontrando que al hacer uso del modelo de intervalo de mínimos cuadrados parciales (IPLS) combinado con la regresión (PLS-R), el cual llamaron IPLS-PLSR, obtuvieron un método adecuado para la determinación de los componentes lignocelulósicos. En la celulosa obtuvieron valores del coeficiente de determinación de $R^2=0,8955$ y una desviación residual predictiva RPD=3,0934, para la hemicelulosa de $R^2=0,8669$ y RPD=2,7406 y en la lignina $R^2=0,7307$ y RPD=1,9272, concluyendo que esta técnica es viable además de ser más rápida comparada con el uso de los métodos convencionales (Ai et al., 2022).

La caracterización química de la madera usando la técnica NIRS ha sido llevada hasta nivel celular, Vahid Nasir en el año 2023 realizó la predicción del ancho de las traqueidas haciendo uso de redes neuronales y máquinas de refuerzo, encontrando que al usar máquinas potenciadoras de gradiente se obtiene un método más eficaz para la caracterización de la madera en un conjunto de datos espectrales NIRS de tamaño medio. Nasir encontró que usando máquinas para aumentar el gradiente de luz (LGBM) se obtienen mejores resultados que al

usar maquinas potenciadoras de gradiente extremo (XGBOOST) con resultados de $R^2=0,69$ y $MSE=2,56$; y para XGBOOST de $R^2=0,68$ y $MSE=2,57$ sin hacer uso de PCA (Nasir et al., 2023).

El contenido de extractivos en las especies de las maderas se relaciona con la durabilidad de estas, las que son fácilmente biodegradables es posible tratarlas con medios químicos para extender su duración, pero estos procesos pueden ser costosos o incluso tóxicos. Por ello Yanjie Li y sus colaboradores realizaron calibraciones usando NIRS en la determinación del contenido de extractivos en las maderas de *E. argophloia*, *E. Bosistoana* y *E. globoidea* con el fin de relacionarlo con la durabilidad de las especies, obteniendo resultados satisfactorios logrando predecir en un rango del contenido de extractivos de 0,34% a 18,0% y con un RMSE de 0,9% (Li & Altaner, 2019).

Se han realizado estudios con el fin de entender el comportamiento químico de la lignina: Oihana Gordobil en el año 2021 analizó las propiedades higroscópicas de la lignina apoyándose en la técnica NIRS y NIRS 2D, estudios que se realizaron secando la lignina a temperatura ambiente (25°C) y mediante el uso de un horno (55°C); para desarrollar este análisis los investigadores inicialmente realizaron la comparación de las muestras de lignina Kraft empleadas, donde encontraron que estas no presentaban diferencias significativas con un p-valor de menor de 0,05. Los investigadores usaron la técnica NIRS integrando otras técnicas con el fin de encontrar las correlaciones químicas y físicas con el agua. Con NIRS y el método de pirólisis analítica lograron estudiar las diferencias estructurales de la lignina secadas a diferentes temperaturas, con el apoyo de la técnica de permeación en gel lograron investigar la distribución del peso molecular de las muestras de lignina y con el uso de vapor dinámico de sorción (DVS) lograron estudiar el efecto del secado en la higroscopicidad de la lignina; finalmente a partir de los espectros NIRS y las condiciones de humedad, realizaron la creación de mapas de correlación sincrónicos y asincrónicos 2D, mediante los cuales lograron identificar el orden secuencial en el que las moléculas de vapor de agua interactúan con los sitios activos de la lignina (hidroxilo y carbonilo) encontrando cambios notables en las regiones que van de $6,000\text{cm}^{-1}$ a $7,500\text{cm}^{-1}$ y en la señal de $7,050\text{cm}^{-1}$, lo que indicó diferencias en la disponibilidad de los sitios de sorción dependiendo de las temperaturas de secado (Gordobil et al., 2021a).

En 2024, Richard Nadányi demostró la utilidad de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para la caracterización de la lignina. Su estudio integró la determinación del peso molecular, la concentración de grupos hidroxilo y fenólicos, concluyendo que NIRS es una herramienta eficaz para identificar cómo las variaciones de pH y temperatura durante la precipitación afectan las características específicas de las muestras de lignina. (Nadányi et al., 2024) Debido a la heterogeneidad inherente de la lignina, Iván Sumerskii, en el mismo año, exploró el potencial de NIRS para reemplazar métodos analíticos costosos y complejos, como la cromatografía de exclusión por tamaño (SEC), la cromatografía de gases, la espectrometría de masas y la resonancia magnética nuclear (RMN). Sus investigaciones resaltan la capacidad de NIRS para ofrecer una caracterización precisa y eficiente, simplificando el análisis de la lignina (Sumerskii et al., 2024).

La industria papelera usa el pulpeo Kraft mayoritariamente en sus procesos de producción de papel, siendo usada en más de 90% de las plantas papeleras, en ésta se usa licor blanco y una temperatura adecuada permitiendo así la despolimerización de la lignina, separándola de la matriz de lignocelulosa; esta degradación térmica y química va a depender del tipo de elemento y del tipo de fragmento separados. (Argyropoulos et al., 2023) Debido a que la temperatura permite una modificación química en la madera, así como también puede provocar cambios en color y calidad de la misma; Elaine Cristina Lengowski usó la espectroscopía VIS-NIRS en la predicción de la modificación química de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* después de tener un tratamiento térmico (160°C); encontrando que tanto la química como el color tienen una modificación al ser tratados a altas temperaturas, así como también determinó que ocurre un aumento en el contenido de lignina y extractivos mientras que disminuye en contenido de holocelulosa en la madera. Los espectros NIRS y visibles permitieron obtener una correcta correlación de los datos espectrales y la composición real, obteniendo que los valores de error de predicción y los coeficientes de correlación para NIRS estuvieron en un rango $R^2=0,86-0,93$ y $RMSEP=1,09-1,23$; y por otro lado para UV de $R^2=0,76-0,92$ y $RMSEP=0,93-1,50$; llegando a la conclusión que es una técnica que tiene potencial para la predicción (Lengowski et al., 2018).

Tabla.2 Aplicaciones NIRS en la lignocelulosa y lignina.

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
NIRS En línea	Pulpa	Espectrómetro Bruker Matrix-F FT-NIR (Bruker Optics Inc., Billerica, MA, EE. UU.) con una sonda de muestreo de fibra óptica para sólidos y líquidos (IN263E).	Numero Kappa- Contenido de lignina.	Es posible realizar seguimiento del contenido de la lignina.	ASTM D 1106-96	(Rahman et al., 2019)

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
		Rango de 833 a 2500 nm. Uso MPC, R ² , PLS-R				
NIRS	Algas	Espectrómetro infrarrojo de transformación de Fourier (Nicolet) iS10, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). Rango de 12.000cm ⁻¹ a 4000cm ⁻¹ . Uso de PLS-R, R ² RMSE, IPLS Y RPD	Lignina, celulosa y hemicelulosa.	Análisis rápidos en los contenidos de hemicelulosa, lignina y celulosa en algas.	Procedimiento de Van Soest y Método de medición de lignina del laboratorio nacional de energía renovable (NREL).	(Ai et al., 2022)
NIRS	Madera	Espectrómetro NIR (tensor 37, Burker, Alemania). Rango de 9000cm ⁻¹ a 4000cm ⁻¹	Extractivos	Análisis de extractivos en la madera.	Extracción acelerada por solventes (ASE).	(Li & Altaner, 2019)
NIRS-2D	Licor negro	Espectrofotómetro Bruker MPA II con esfera integradora. Rango de 12000cm ⁻¹ a 4000cm ⁻¹ . Uso de PCA, 1ra y 2da derivada, MSC y Método de Savitzky-Golay.	Humedad	Análisis de comportamiento de la lignina seca a diferentes temperaturas.	Cromatografía de permeación en gel (GPC). Pirolisis analítica y vapor dinámico de sorción (DVS).	(Gordobil et al., 2021a)
NIRS-UV	Madera	Espectrómetro Bruker Tensor 37 (Bruker Optics, Ettlingen, Alemania), Rango de 10000cm ⁻¹ -4000cm ⁻¹ . Con programa Opus versión 6.5 (Bruker Optics). Uso de PCA, PLS, MSC y prueba de Turkey	Extractivos	Análisis de cambios en las propiedades químicas de la madera al realiza tratamientos térmicos.	Normas Tappi T204-om97-2004 y T222-om02-2004	(Lengowski et al., 2018)

Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS-R). Modelo análisis de componentes principales (PCA). Coeficiente de determinación (R²). Análisis de discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Máquinas de vectores de soporte (SVM). Error medio de calibración (RMSE). Corrección de dispersión multiplicativa (MSC). Número de variables latentes (VL). Desviación de predicción residual (RPD). Error cuadrático medio de predicción (RMSEP). Error cuadrático medio de la validación cruzada (RMSECV). Control de modelo predictivo (MPC). Intervalo de mínimos cuadrados parciales (IPLS). Error estándar (SE). Extracción acelerada por solventes (ASE). Vapor dinámico de sorción (DVS). Permeación en gel (GPC).

Aplicaciones NIRS en la Pulpa y papel

La pulpa es el material fibroso normalmente derivado de la madera, a partir de éste se realiza la fabricación de papel en los molinos. (Evelyn et al., 2025) No obstante hay otras fuentes de pulpa como el bagazo de la caña de azúcar.(Esteves, 2024). La pulpa es obtenida por medios mecánicos, semi-químicos o químicos, esto va a depender de la calidad de la pulpa requerida y su relación con el rendimiento del proceso. El proceso mediante el cual la madera es transformada es conocido como pulpeo, siendo el pulpeo Kraft el más usado por su facilidad en las recuperaciones de químicos, haciéndolo más amigable con el medio ambiente y económicamente viable (Jiménez Muñoz et al., 2017). Mediante el pulpeo mecánico, se puede obtener rendimientos mayores al 98%, a pesar de ello es el menos usado en la industria debido a su aplicabilidad, debido a esto se usan mezclas con otros tipos de fibras con el fin de mejorar sus propiedades y aplicabilidad.(Delgado-Aguilar et al., 2015)

La siguiente figura ilustra el proceso de pulpeo Kraft el cual es el más usado a nivel mundial para la fabricación de pulpa.

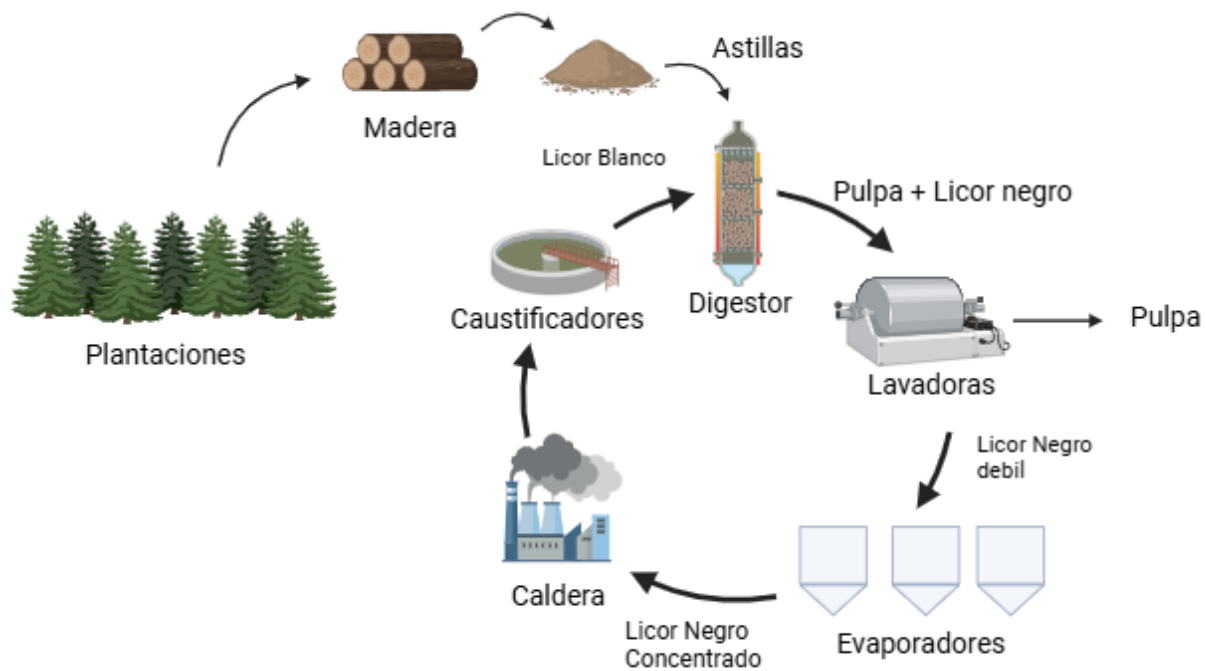


Figura 5. Proceso de pulpeo Kraft

En China se realizaron estudios con NIRS a nivel de laboratorio, para predecir de manera rápida las propiedades de resistencia de la pulpa mecánica, con el fin de tener una retroalimentación casi de manera inmediata y poder tomar acciones correctivas de manera oportuna. Estos estudios mostraron un gran potencial y viabilidad al usar la técnica NIRS con muy buenas estadísticas en la determinación del índice de tracción con un RMSE=1,776 y RPD=2,655, índice de estallido con un RMSE=0,108 y un RPD=2,161, y el índice de desgarro con un RMSE=0,116 y un RPD=3,171. Obteniendo así buenas estadísticas y haciéndola una herramienta útil, rápida y fácil de usar en la determinación de estas propiedades mecánicas (Liang et al., 2020a).

Humedad de la pulpa

La pulpa es una parte intermedia del proceso de producción de papel, un monitoreo continuo permite hacer correcciones y tener control adecuado del procesamiento de esta. En la tabla 3, contiene los alcances técnicos en el análisis de pulpa utilizando la NIRS.

La humedad de la pulpa es un parámetro que indica la concentración de esta, por lo que es un análisis rutinario en la industria, las metodologías realizadas como NBR 14929 tienden a ser demoradas, además requieren tomar una muestra y transportarla para el análisis. La determinación de humedad por medio de espectrometría NIRS fue estudiada por Livia Riveiro en el año 2019 usando la metodología NIRS con redes neuronales, encontrando predicciones satisfactorias tanto para el uso de redes neuronales como predicciones con NIRS donde obtuvo valores de predicción de error de RMS=2,5% y $R^2=0,99$. Con estos estudios los investigadores concluyeron que esta técnica es prometedora para realizar la medición de humedad en línea (Costa et al., 2019).

Dayane Targiño en el 2023 usando un espectrómetro NIR por transformada de Fourier realizó modelos en línea, para determinar el contenido de humedad de la pulpa en diferentes fuentes de madera, usando un rango de número de onda entre 12500cm^{-1} a 3500cm^{-1} obteniendo valores de $R^2=0,89$ A $9,98$ para la estimación de humedad en la pulpa con RMSEP que van desde 5,1% a 18%, concluyendo que estos modelos son robustos, rápidos siendo así adecuados para la medición de variaciones de humedad (Medeiros et al., 2023).

Tabla 3. Aplicaciones NIRS en la pulpa y papel.

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
NIRS	Pulpa y papel	Espectrómetro (NIR2500, Idea Optics, Shanghai, China). Trabajó de 950 a 2450nm. Uso de MSC, Primera y segunda derivada	índice de tracción, índice de estallido y índice de desgarro.	Estudios realizados para el análisis en pulpa mecánica.	T494 om-96, TAPPI T403 om-97 y TAPPI T414 om-98.	(Liang et al., 2020a)
NIRS	Pulpa	Espectrómetro NIR por transformada de Fourier (Bruker MPA). Rango de 12500cm ⁻¹ a 3500cm ⁻¹ . Uso de PCA, PLS-R.	Humedad	Monitoreo constante del parámetro de humedad.	Medición por método NBR 14929.	(Medeiros et al., 2023)
NIRS	Pulpa	Espectrómetro NIR de transformada de Fourier (MPA, BrukerOptik GmbH, Ettlingen, Alemania). Rango de 12500cm ⁻¹ a 3600cm ⁻¹ . Uso de PCA, PLS-R, primera y segunda derivada.	Humedad	Monitoreo de humedad en línea.	NBR 14929 para medición de humedad.	(Costa et al., 2019)
NIRS	Pulpa	Espectrómetro PerkinElmer FT-NIR.El. Rango 4000cm ⁻¹ a 12000cm ⁻¹ . Uso de SNV, suavizado Savitky Golay, primera y segunda derivada y PLS-R.	Pentosa, celulosa, R-10, R18, viscosidad y brillo	Análisis rápido y económico para analizar pulpas en solución.	Uso de Tappi 452 om-92 para determinación de brillo, Tappi T230 om-89 para determinación de viscosidad, Tappi 203 om-88 para determinación de celulosa y Tappi 223 cm 84 para determinación de pentosano.	(Uddin et al., 2019)
NIRS	Pulpa y Papel	Espectrómetro multipropósito MPA de Bruker (Billerica, MA, EE. UU.). Rango de 3700cm ⁻¹ a 12000cm ⁻¹ . Uso de PCA, PLS-DA Y PLS	Brillo, viscosidad, numero kappa, R ₁₀ Y R ₁₈	Análisis rápido y económico para analizar pulpas en solución.	ISO 2470-1 para medición del brillo, ISO 5351 para determinación de viscosidad, tappi 236 cm-85 para determinación de numero kappa y DIN 5455 para determinación de R ₁₀ Y R ₁₈ .	(Khaliliyan et al., 2024a)
NIRS	Pulpa	Espectrometro NIR por transformada de Fourier (FT) (modelo MPA, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania). Rango de 4000cm ⁻¹ a 12500cm ⁻¹ . Uso de PCA, PLS-DA, Primera y segunda derivada.	Morfología, turbidez y propiedades mecánicas	Estimar la calidad de las fibras en solución.	Las mediciones de turbidez se realizaron utilizando un turbidímetro portátil (Alfakit, Ltd., Santa Catarina, Brasil) que opera a 860 nm. Los patrones de difracción de rayos X (DRX) se midieron utilizando un difractorómetro de rayos X Philips X'Pert (Malvern Panalytical, Westborough, MA). La microscopia de midió observando y fotografiando usando un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE-SEM) JEOL JSM-7900F (Japón) a 2,0 kV	(Costa et al., 2024)
NIRS	Pulpa	Espectrómetro NIR portátil ASD Inc. (Analitical Spectral Devices) ASD Fiel Spec 4. Rango de 350 a 2500nm.	Celulosa	Determinación de celulosa en pulpa.	Método GBT 9107 1999	(Zhou et al., 2018)
NIRS	Pulpa	Espectrómetro MPA (Bruker, Billerica, MA). Rango de 4000cm ⁻¹ a	Grado de oxidación de la celulosa.	Determinar la cantidad de celulosa que se ha	Titulación potenciométrica.	(Simón et al., 2022)

Técnica	Muestra	Condiciones NIR	Análisis	Alcances	Comparación	Referencia
		12500cm ⁻¹ . Uso de PLS-R, primera y segunda derivada y RPD.		degradado en determinado tiempo.		
Micro NIRS	Pulpa	Espectrofotómetro portátil MicroNIR 1700ES (Viavi Solutions). Región espectral de 1000 a 2500nm. Uso de PCA,	Oxidación de celulosa	Determinar la cantidad de celulosa que se ha oxidado en determinado tiempo.	Determinación de oxidación de celulosa por TEMPO	(Mazega et al., 2024)
NIRS	Papel	Espectrómetro Bruker (modelo MPA, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania). Rango de 12500cm ⁻¹ a 3600cm ⁻¹ . Uso de PCA, PLS-R y PLS-DA.	índice de desgarro, estallido y tracción, estiramiento, tenacidad, módulo de elasticidad, prueba de aplastamiento de anillo.	Capacidad de predecir la concentración de las nanofibrilas.	Norma ISO 1990	(Lima et al., 2022)
NIRS-Portatil	Papel	Espectrómetro NIR de transformada de Fourier (FT) (MPA, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania). Rango espectral 350 a 1000nm. Uso de PLS, PLS-R y PCA.	Viscosidad y grado de polimerización.	Análisis del papel histórico.	Norma ISO 5351	(Liu et al., 2021b)

Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS-R). Modelo análisis de componentes principales (PCA). Coeficiente de determinación (R^2). Análisis de discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Máquinas de vectores de soporte (SVM). Error medio de calibración (RMSE). Corrección de dispersión multiplicativa (MSC). Número de variables latentes (VL). Desviación de predicción residual (RPD). Error cuadrático medio de predicción (RMSEP). Error cuadrático medio de la validación cruzada (RMSECV). Control de modelo predictivo (MPC). Intervalo de mínimos cuadrados parciales (IPLS). Error estándar (SE). Extracción acelerada por solventes (ASE). Vapor dinámico de sorción (DVS). Permeación en gel (GPC).

Propiedades químicas y físicas de la pulpa

Las propiedades físicas y químicas de la pulpa presentan una importancia notable en la producción de papel, ya que es a partir de ellas que se tiene claridad de cómo va a ser el rendimiento, propiedades mecánicas y estructurales de la pulpa y el papel, así como la calidad final que se obtiene (Małachowska et al., 2020)(Małachowska, Dubowik, Boruszewski, et al., 2020).

En el año 2019 Nashir Uddin usando UV y FT-NIRS, determinó algunas de las propiedades químicas y físicas en la pulpa, obteniendo que al usar espectroscopia UV los valores de R^2 en la determinación de celulosa y R_{10} fueron de 99% siendo un método adecuado para este tipo de análisis; por otro lado para la determinación de la blancura usando FT-NIRS, con corrección de línea base y suavizado se obtuvieron valores de correlación R^2 de 75% y para análisis de blancura con FT-NIR valores de R^2 de 92%, concluyendo que estos métodos son simples, rápidos y confiables en la determinación de propiedades químicas y físicas de la pulpa (Uddin et al., 2019).

En 2024 Khaliliyan realizó estudios sobre las propiedades químicas de la pulpa y papel, haciendo uso de análisis de componentes principales (PCA) con regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) en su investigación generó modelos que incluyeron los análisis realizados por Nashir en el año 2019. En las búsquedas realizadas Khaliliyan y sus colaboradores obtuvieron muy buenos coeficientes de determinación. Para el análisis de $R_{18}=0,92$, viscosidad $R^2=0,70$, brillo $R^2=0,90$ y para el análisis de número kappa un $R^2=0,98$. Los investigadores concluyeron que la técnica NIRS es muy eficaz para en la diferenciación y clasificación de pulpas e incluso papel (Khaliliyan et al., 2024a).

Livia Riveiro y su equipo de trabajo en el año 2024 enfocó su estudio en el uso de la pulpa en sistemas de refinación, con el fin de estimar la calidad y evitar un sobreconsumo energético usando NIR en un rango de longitud de número onda que va entre 12500cm⁻¹ a 4000cm⁻¹, en su estudio determinó la morfología de la fibra y la calidad de las nanofibrilas de la celulosa logrando clasificarlas con una precisión del 96%, mediante estos hallazgos los investigadores presentan la técnica NIRS con gran potencial para estimar la calidad de las nanofibrilas de la celulosa en tiempo en línea permitiendo así tener estimaciones importantes para beneficio del proceso (Costa et al., 2024).

Determinación de celulosa en pulpa

La celulosa, polisacárido de más interés por parte de la industria papelera e incluso otros sectores económicos buscan su aprovechamiento en distintas aplicaciones. La celulosa es el polisacárido más abundante constituyendo el 50% del contenido de carbono en el reino vegetal. La industria papelera aprovecha las propiedades que presenta debido a su estructura, cohesión, resistencia y la capacidad de entrelazarse entre las fibras con el fin de fabricar papel con las propiedades físicas, mecánicas y químicas adecuadas para su uso (Zhao et al., 2025).

Los procedimientos usados para la determinación de celulosa en pulpa están regidos por normas como Tappi T222 om-2011, métodos chinos como (GB/T 9107 1999), entre otros, los cuales son métodos bastante largos en los que se usa reactivos no apropiados para el medio ambiente; Chengfeng Zhou en el 2018 determinó el contenido de celulosa en la pulpa usando la técnica NIRS, obteniendo resultados confiables con valores de $R^2=0,92$ y $RPD=2,45$; es sus estudios concluyó que la espectroscopia NIRS es una técnica eficiente y de fácil uso en la determinación de celulosa en pulpa (Zhou et al., 2018).

En el año 2022 Jonas Simon usando la técnica NIR con un equipo multipropósito MPA (Bruker, Billerica, MA) con una sonda de fibra óptica y un detector de Te-InGaAs (10 kHz), realizó la medición del grado de oxidación de la celulosa di aldehído, análisis que importante en la separación de la celulosa, así como el estudio del aprovechamiento que se le está dando a su estructura, en la producción de materiales como biopolímeros. Al usar la espectrometría NIRS los investigadores obtuvieron coeficientes de correlación de $R^2=0,97$ y $RMSEC=0,42$. Concluyendo que es un método que da resultados rápidos y confiables (Simon et al., 2022). El contenido de carbonilos en la estructura de la celulosa fue estudiado por Mazega en el año 2024 mediante el uso de un equipo portátil NIRS, los resultados obtenidos fueron comparados con el método de oxidación de la celulosa por TEMPO, obteniendo que la espectrometría NIRS es una técnica viable al ser rápida, no destructiva, reproducible y fácil de usar, donde obtuvieron valores de $R^2=0,97$ para el análisis de pulpa proveniente de madera, $R^2=0,95$ para fibra proveniente de sisal y $R^2=0,91$ para fibra proveniente del cáñamo (Mazega et al., 2024).

Aplicaciones NIRS en papel

El papel como producto final de la industria papelera debe cumplir con parámetros de calidad específicos según el uso al que se destine. Por ello es fundamental medir tanto sus propiedades mecánicas como ópticas (Fardim et al., 2005). En el 2022, Lidiane Costa realizó modelos usando un espectrómetro Buerker NIRS en un rango de 12500cm^{-1} a 3600cm^{-1} , el cual uso para investigar el papel reforzado con nanofibrilas de celulosa. En su estudio analizó diversas propiedades del papel, como el índice de desgarro, estallido, tracción, estiramiento, tenacidad y elasticidad. Los resultados obtenidos llevaron a la conclusión que la técnica NIRS es adecuada para la estimación del contenido de nanofibrilas, así como en la determinación de propiedades tanto mecánicas como físicas de forma rápida y sin destruir la muestra, al obtener resultados del coeficiente de predicción $R^2=0,98$ para la determinación del contenido de nanobibrilas, $R^2=0,91$ para la medida de la tensión y finalmente $R^2=0,73$ a $0,98$ para la resistencia al aire (Lima et al., 2022).

El papel ha sido utilizado como un medio para conservar información histórica. Sin embargo, con el tiempo, se produce el proceso de envejecimiento debido a los cambios en moleculares que se producen en la estructura de la celulosa. Yun Liu en el 2021 realizó estudios donde caracterizó el grado de polimerización de papeles históricos, ya que técnicas como cromatografía por exclusión por tamaño, viscosimetría y espectrometría de masas suele ser muy dispendiosas, por lo que desarrolló aplicaciones NIRS-PLS logrando predecir el grado de polimerización del papel histórico de forma rápida y no destructiva con un coeficiente de correlación de $R^2=0,89$ concluyendo que esta técnica NIRS-PLS es de gran utilidad al permitir este tipo de análisis en el sitio, sin destruir la muestra y por lo tanto conservando los documentos históricos de la mejor manera (Liu et al., 2021b).

4. CONCLUSIONES

La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) está demostrando ser una técnica mucho más eficiente, rápida, precisa y rentable, respecto a los métodos tradicionales usados en la industria papelera. Tiene la ventaja de ser no destructiva, permitiendo estimar diferentes parámetros de calidad durante todo el proceso de producción en la industria papelera; permite una adaptabilidad a cada etapa del proceso, mediante el uso de espectrómetros portátiles o en línea; permitiendo caracterización de materias primas, proceso, licor negro y productos finales de manera rápida y precisa. Permite su implementación en línea a procesos de producción, proporcionando datos en tiempo real, facilitando así la toma de decisiones durante el proceso. Este tipo de implementación presenta un desafío debido a la gran variabilidad que puede presentarse durante el proceso. Los estudios analizados muestran

avances significativos en la caracterización de la madera como materia prima, lo que permite realizar un análisis de su composición química y hasta celular antes de que ingrese al proceso.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta sección es opcional. Los reconocimientos de personas, subvenciones, fondos, etc., deben ser breves.

6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ai, N., Jiang, Y., Omar, S., Wang, J., Xia, L., & Ren, J. (2022). Rapid Measurement of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin Content in *Sargassum horneri* by Near-Infrared Spectroscopy and Characteristic Variables Selection Methods. *Molecules*, *27*(2). <https://doi.org/10.3390/molecules27020335>
- Álvarez-Ayala, M. de L. Á., Martínez-Cinco, M. A., Gutierrez-Antonio, C., & Ruiz-García, V. M. (2024). Producción de briquetas a partir de residuos biomásicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *40*. <https://doi.org/10.20937/RICA.55085>
- Alves, A., Hevia, A., Simões, R., Majada, J., Alia, R., & Rodrigues, J. (2020). Improving spatial synchronization between X-ray and near-infrared spectra information to predict wood density profiles. *Wood Science and Technology*, *54*(5), 1151–1164. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01207-z>
- Argyropoulos, D. D. S., Crestini, C., Dahlstrand, C., Furusjö, E., Gioia, C., Jedvert, K., Henriksson, G., Hulteberg, C., Lawoko, M., Pierrou, C., Samec, J. S. M., Subbotina, E., Wallmo, H., & Wimby, M. (2023). Kraft Lignin: A Valuable, Sustainable Resource, Opportunities and Challenges. *ChemSusChem*, *16*(23). <https://doi.org/10.1002/cssc.202300492>
- Bajpai, P. (2018). Brief Description of the Pulp and Papermaking Process. In *Biotechnology for Pulp and Paper Processing* (pp. 9–26). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7853-8_2
- Chen, Z., Li, J., Hu, S., Zhou, X., Zhang, H., & Yue, F. (2025). Reaction pathways of lignin phenolation in alkaline medium and the compatibility for integrated phenolation-kraft pulping process. *Industrial Crops and Products*, *230*, 121092. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121092>
- Costa, L. R., de Amorim dos Santos, A., Dias, M. C., Silva, L. E., Wood, D. F., Williams, T. G., Hein, P. R. G., & Tonoli, G. H. D. (2024). Potential of NIR spectroscopy for predicting cellulose nanofibril quality in commercial bleached Kraft pulp of Eucalyptus. *Carbohydrate Polymers*, *329*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121802>
- Costa, L. R., Tonoli, G. H. D., Milagres, F. R., & Hein, P. R. G. (2019). Artificial neural network and partial least square regressions for rapid estimation of cellulose pulp dryness based on near infrared spectroscopic data. *Carbohydrate Polymers*, *224*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115186>
- Cutiva Medina, M. A. P. C. G. M. Á. P. G. (2022). *Impuestos verdes en Colombia*.
- Dai, M., Sun, M., Chen, B., Xie, H., Zhang, D., Han, Z., Yang, L., & Wang, Y. (2023). Advancing sustainability in China's pulp and paper industry requires coordinated raw material supply and wastepaper management. *Resources, Conservation and Recycling*, *198*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107162>
- Deepa, M. S., Shukla, S. R., & Kelkar, B. U. (2024). Overview of applications of near infrared (NIR) spectroscopy in wood science: recent advances and future prospects. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, *21*(1), 34–57. <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00334-5>
- Delgado-Aguilar, M., Recas, E., Puig, J., Arbat, G., Pereira, M., Vilaseca, F., & Mutjé, P. (2015). Aplicación de celulosa nanofibrilada, en masa y superficie, a la pulpa mecánica de muela de piedra: una sólida alternativa al tratamiento clásico de refinado. *Maderas. Ciencia y Tecnología, ahead*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000028>

- dos Santos, C. A. T., Lopo, M., Páscoa, R. N. M. J., & Lopes, J. A. (2013). A Review on the Applications of Portable Near-Infrared Spectrometers in the Agro-Food Industry. *Applied Spectroscopy*, 67(11), 1215–1233. <https://doi.org/10.1366/13-07228>
- Durán-García, M. E., & Ruiz-Navas, R. A. (2020). Simulador de propiedades termodinámicas en la conversión de la biomasa forestal de aserrín de pino. *Maderas. Ciencia y Tecnología, ahead*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000309>
- Esteves, C. V. G. (2024). Evaluation of oxygen delignified fibers with high water absorbency, as a greener alternative to fully bleached fibers for tissue paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 39(4), 527–539. <https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0024>
- Evelyn, E., Okewale, A. O., & Owabor, C. N. (2025). Optimization, Kinetics and thermodynamic modeling of pulp production from plantain stem using the kraft process. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2024.100129>
- Fahey, L. M., Nieuwoudt, M. K., & Harris, P. J. (2018). Using near infrared spectroscopy to predict the lignin content and monosaccharide compositions of Pinus radiata wood cell walls. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 507–514. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.105>
- Fardim, P., Ferreira, M. M. C., & Durán, N. (2005). Determination of Mechanical and Optical Properties of Eucalyptus Kraft Pulp by NIR Spectrometry and Multivariate Calibration. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 25(4), 267–279. <https://doi.org/10.1080/02773810500366748>
- Gordobil, O., Herrera, R., Poohphajai, F., Sandak, J., & Sandak, A. (2021a). Impact of drying process on kraft lignin: lignin-water interaction mechanism study by 2D NIR correlation spectroscopy. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.080>
- Gordobil, O., Herrera, R., Poohphajai, F., Sandak, J., & Sandak, A. (2021b). Impact of drying process on kraft lignin: Lignin-water interaction mechanism study by 2D NIR correlation spectroscopy. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.080>
- Gullifa, G., Barone, L., Papa, E., Giuffrida, A., Materazzi, S., & Risoluti, R. (2023). Portable NIR spectroscopy: the route to green analytical chemistry. *Frontiers in Chemistry*, 11. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1214825>
- Hans, G., & Allison, B. (2021). On-line characterization of wood chip brightness and chemical composition by means of visible and near-infrared spectroscopy. *Holzforschung*, 75(11), 989–1000. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0027>
- Hao, Y., W. Q., & Z. S. (2021). Rapid identification of wood species based on portable near-infrared spectrometry and chemometrics methods. *Spectroscopy Supplements*, 36(S12), 3–13. <https://www.spectroscopyonline.com/view/rapid-identification-of-wood-species-based-on-portable-near-infrared-spectrometry-and-chemometrics-methods>
- Huang, J., & Yu, C. (2019). Determination of cellulose, hemicellulose and lignin content using near-infrared spectroscopy in flax fiber. *Textile Research Journal*, 89(23–24), 4875–4883. <https://doi.org/10.1177/0040517519843464>
- Jardim, J. M., Hart, P. W., Lucia, L. A., Jameel, H., & Chang, H. (2022). The Effect of the Kraft Pulping Process, Wood Species, and pH on Lignin Recovery from Black Liquor. *Fibers*, 10(2), 16. <https://doi.org/10.3390/fib10020016>
- Jiménez Muñoz, E., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O. A., & Rodríguez-Laguna, R. (2017). Obtención de pulpa de celulosa a partir de residuos de Agave salmiana B. Otto ex Salm. Optimización. *DYNA*, 84(200), 253–260. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.58906>
- Karlinasari, L., Noviyanti, N., Purwanto, Y. A., Majiudu, M., Dwiyantri, F. G., Rafi, M., Damayanti, R., Harnelly, E., & Siregar, I. Z. (2020). Discrimination and Determination of Extractive Content of Ebony (Diospyros celebica Bakh.) from Celebes Island by Near-Infrared Spectroscopy. *Forests*, 12(1), 6. <https://doi.org/10.3390/f12010006>
- Khaliliyan, H., Rinnan, Å., Völkel, L., Gasteiger, F., Mahler, K., Röder, T., Rosenau, T., Potthast, A., & Böhmendorfer, S. (2024a). Strategies for multivariate characterization and classification of pulps and papers by near-infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, 1318. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342895>
- Khaliliyan, H., Rinnan, Å., Völkel, L., Gasteiger, F., Mahler, K., Röder, T., Rosenau, T., Potthast, A., & Böhmendorfer, S. (2024b). Strategies for multivariate characterization and classification of pulps and papers by near-infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, 1318. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342895>
- Lengowski, E. C., Muñiz, G. I. B. de, Klock, U., & Nisgoski, S. (2018). Potential use of nir and visible spectroscopy to analyze chemical properties of thermally treated wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología, ahead*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005041001>

- Leoni, E., Mancini, M., Picchi, G., & Toscano, G. (2024). Performance evaluation of NIR spectrophotometer simulating in-line acquisition for moisture content prediction of woodchips and comparison with hand-held NIR spectrophotometer. *Fuel*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130015>
- Li, Y., & Altaner, C. (2019). Calibration of near infrared spectroscopy (NIRS) data of three *Eucalyptus* species with extractive contents determined by ASE extraction for rapid identification of species and high extractive contents. *Holzforschung*, 73(6), 537–545. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0166>
- Li, Y., Wang, G., Guo, G., Li, Y., Via, B. K., & Pei, Z. (2022). Spectral Pre-Processing and Multivariate Calibration Methods for the Prediction of Wood Density in Chinese White Poplar by Visible and Near Infrared Spectroscopy. *Forests*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/f13010062>
- Liang, L., Fang, G., Wei, L., Han, S., Deng, Y., Zhu, B., & Wu, T. (2020a). Prediction of strength properties of poplar alkaline peroxide mechanical pulp using near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Vibrational Spectroscopy*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103070>
- Liang, L., Fang, G., Wei, L., Han, S., Deng, Y., Zhu, B., & Wu, T. (2020b). Prediction of strength properties of poplar alkaline peroxide mechanical pulp using near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Vibrational Spectroscopy*, 109, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103070>
- Lima, L. C., Costa, L. R., Carvalho, A. M. M. L., Bianchi, M. L., & Paulo Ricardo Gherardi, H. (2022). Near infrared spectroscopy for estimating properties of kraft paper reinforced with cellulose nanofibrils. *CERNE*, 28. <https://doi.org/10.1590/01047760202228012985>
- Liu, Y., Fearn, T., & Strlič, M. (2021a). Quantitative NIR spectroscopy for determination of degree of polymerisation of historical paper. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104337>
- Liu, Y., Fearn, T., & Strlič, M. (2021b). Quantitative NIR spectroscopy for determination of degree of polymerisation of historical paper. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 214, 104337. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104337>
- Ma, T., Schimleck, L., Inagaki, T., & Tsuchikawa, S. (2021). Rapid and nondestructive evaluation of hygroscopic behavior changes of thermally modified softwood and hardwood samples using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI). *Holzforschung*, 75(4), 345–357. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0298>
- Małachowska, E., Dubowik, M., Lipkiewicz, A., Przybysz, K., & Przybysz, P. (2020). Analysis of Cellulose Pulp Characteristics and Processing Parameters for Efficient Paper Production. *Sustainability*, 12(17), 7219. <https://doi.org/10.3390/su12177219>
- Mancini, M., & Rinnan. (2021). Near infrared technique as a tool for the rapid assessment of waste wood quality for energy applications. *Renewable Energy*, 177, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.137>
- Mancini, M., & Rinnan, Å. (2023a). Classification of waste wood categories according to the best reuse using FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Analytica Chimica Acta*, 1275. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341564>
- Mancini, M., & Rinnan, Å. (2023b). Classification of waste wood categories according to the best reuse using FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Analytica Chimica Acta*, 1275, 341564. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341564>
- Mazega, A., Fortuny, M., Signori-lamin, G., Aguado, R. J., Tarrés, Q., Santos, A. F., & Delgado-Aguilar, M. (2024). Near-infrared spectroscopy and multivariate analysis as real-time monitoring strategy of TEMPO-mediated oxidation of cellulose fibers from different feedstocks. *Cellulose*, 31(6), 3465–3482. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05824-w>
- Medeiros, D. T. de, Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of *Eucalyptus grandis* wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. *Industrial Crops and Products*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117921>
- Medeiros, D. T. de, Ramalho, F. M. G., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2023). Water desorption monitoring of cellulose pulps by NIR spectroscopy. *Industrial Crops and Products*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115989>
- Mesquita Pimenta, E., Dos Santos Brito, E. G., Ramalho, F. M. G., & Hein, P. R. G. (2024). Validation of models using near-infrared spectroscopy to estimate basic density and chemical composition of *Eucalyptus* wood. *IForest*, 17(6), 338–345. <https://doi.org/10.3832/ifor4516-017>
- Monteiro, V. A. C., da Silva, K. T., da Silva, L. R. R., Mattos, A. L. A., de Freitas, R. M., Mazzetto, S. E., Lomonaco, D., & Avelino, F. (2021). Selective acid precipitation of Kraft lignin: a tool for tailored biobased additives for enhancing PVA films properties for packaging applications. *Reactive and Functional Polymers*, 166, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104980>

- Morya, R., Kumar, M., Tyagi, I., Kumar Pandey, A., Park, J., Raj, T., Sirohi, R., Kumar, V., & Kim, S.-H. (2022). Recent advances in black liquor valorization. *Bioresource Technology*, 350, 126916. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126916>
- Nadányi, R., Ház, A., Lisý, A., Jablonský, M., Šurina, I., Majová, V., & Baco, A. (2022). Lignin Modifications, Applications, and Possible Market Prices. *Energies*, 15(18), 6520. <https://doi.org/10.3390/en15186520>
- Nadányi, R., Zinovyev, G., Majerčíak, M., Štosel, M., Jablonský, M., & Ház, A. (2024). Optimizing Hardwood Lignin Precipitation from Kraft Black Liquor: A Study of Temperature and pH Effects. *Forests*, 15(6), 1028. <https://doi.org/10.3390/f15061028>
- Nasir, V., Ali, S. D., Mohammadpanah, A., Raut, S., Nabavi, M., Dahlen, J., & Schimleck, L. (2023). Fiber Quality Prediction Using NIR Spectral Data: Tree-Based Ensemble Learning VS Deep Neural Networks. *Wood and Fiber Science*, 55(1), 100–115. <https://doi.org/10.22382/wfs-2023-10>
- Nkansah, K., Dawson-Andoh, B., & Slahor, J. (2010). Rapid characterization of biomass using near infrared spectroscopy coupled with multivariate data analysis: Part 1 yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.). *Bioresource Technology*, 101(12), 4570–4576. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.046>
- Patiño Muñoz, E., & Zárate Yépes, C. A. (2024). Avances y retos de los acuerdos de cero deforestación en Antioquia, Colombia. *CES Derecho*, 15(2), 69–87. <https://doi.org/10.21615/cesder.7293>
- Pinilla, J. C., Navarrete, F., Luengo, K., Navarrete, M., García, J., & Casanova, K. (2023). *Caracterización del pellet elaborado en base a mezcla de biomasa de Pinus radiata y Eucalyptus globulus en la región del Biobío*. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32706>
- Porto, D., Forim, M., Costa, E., Fernandes, J., & da Silva, M. (2021). Evaluation of Lignins of Trunk and Roots from *Citrus sinensis* L. Osbeck: A Large Available Brazilian Biomass. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200150>
- Rabemanolontsoa, H., Ayada, S., & Saka, S. (2011). Quantitative method applicable for various biomass species to determine their chemical composition. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4630–4635. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.014>
- Rahman, M., Avelin, A., & Kyprianidis, K. (2019). An approach for feedforward model predictive control of continuous pulp digesters. *Processes*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/pr7090602>
- Sales, R., da Silva, N. C., da Silva, J. P., França, H. H., Pimentel, M. F., & Stragevitch, L. (2019). Handheld near-infrared spectrometer for on-line monitoring of biodiesel production in a continuous process. *Fuel*, 254, 115680. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115680>
- Simon, J., Tsetsgee, O., Iqbal, N. A., Sapkota, J., Ristolainen, M., Rosenau, T., & Potthast, A. (2022). A fast method to measure the degree of oxidation of dialdehyde celluloses using multivariate calibration and infrared spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118887>
- Suárez Matallana, G. A., Sánchez Atahualpa, S. R., Lazaro Riquez, A., & Rodríguez Zúñiga, U. F. (2022). CONCEPTOS DE BIOCATALISIS DE LA LIGNOCELULOSA DESDE UN ENFOQUE DE INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS: UNA REVISIÓN. *Perfiles*, 1(28), 37–51. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.179>
- Sumerskii, I., Böhmendorfer, S., Tsetsgee, O., Sulaeva, I., Khaliliyan, H., Musl, O., Dorninger, K., Tischer, A., Potthast, K., Rosenau, T., Brereton, R. G., & Potthast, A. (2024). Tapping the Full Potential of Infrared Spectroscopy for the Analysis of Technical Lignins. *ChemSusChem*, 17(10). <https://doi.org/10.1002/cssc.202301840>
- Tsuchikawa, S., & Schwanninger, M. (2013). A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2). *Applied Spectroscopy Reviews*, 48(7), 560–587. <https://doi.org/10.1080/05704928.2011.621079>
- Uddin, M. N., Nayeem, J., Islam, M. S., & Jahan, M. S. (2019). Rapid determination method of dissolving pulp properties by spectroscopic data and chemometrics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(3), 585–592. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00383-8>
- Vázquez-Vuelvas, O. F., Cervantes-Chávez, J. A., Delgado-Virgen, F. J., Valdez-Velázquez, L. L., & Osuna-Cisneros, R. J. (2021). Fungal bioprocessing of lignocellulosic materials for biorefinery. In *Recent Advancement in Microbial Biotechnology* (pp. 171–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822098-6.00009-4>
- Wang, Z., & Deuss, P. J. (2023). The isolation of lignin with native-like structure. *Biotechnology Advances*, 68, 108230. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108230>
- Zhao, Y., Zhao, W., Jin, L., Chen, N., Zhang, Y., & Ni, Y. (2025). Highly efficient room temperature grafting polymerization of cellulose for the synthesis of cellulose-g-polypeptide biological macromolecules. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141685. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141685>

Zhou, C., Han, G., Gao, S., Xing, M., Song, Y., & Jiang, W. (2018). *Rapid Determination of Cellulose Content in Pulp using Near Infrared Modeling Technique.*