

**APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA (NIRS)
EN LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR DURANTE LA COSECHA Y
POSTCOSECHA: “UNA REVISION”**

GEFERSOON BRAVO ESPAÑA

**Director
JULIETH ORDUÑA ORTEGA**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Cali, Colombia
2024**

Calle 5 Carrera 62 Campus Pampalinda A.A. 4102 / Teléfono: PBX 5183000
web: www.usc.edu.co / Nit. 890.303.797-1 / Santiago de Cali - Colombia



APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA (NIRS) EN LA CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR DURANTE LA COSECHA Y POSTCOSECHA “: UNA REVISIÓN”

Gefersoon Bravo España

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Químico**

**Director
Julieth Orduña Ortega**

Grupo de Investigación: GIEMA

Línea de Investigación: Aseguramiento de la calidad,

**Nombrar ODS en el que se enmarca el trabajo de grado: ODS Producción y
consumo responsable**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Ciudad, Colombia
2024**

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Analizar productos de caña de azúcar con bajo costo, por las características no destructivas y no uso de reactivos de la técnica.	Sector Azucarero, Agricultores.
Responsabilidad social	N/A	N/A
Científico	Innovación en técnicas de mejoramiento de calidad durante la cosecha para la determinación de madurez y crecimiento para el corte de caña de azúcar	Agricultores, Industria Azucarera, Centros de Investigación.
Indicadores de Gestión	N/A	N/A
Tecnológico	Implementación de equipos complejos en sistemas cotidianos utilizados en la agricultura con el uso de microsensores NIRS y equipos portables.	Agricultores, Sector Azucarero, Centros Tecnológicos.
Técnico	N/A	N/A
Ambiental	La técnica NIRS promueve una química limpia generando 0 desechos peligrosos para el medio ambiente al no usar ningún tipo de solvente.	Comunidades Adyacentes, Fuentes Hídricas, Fauna y Flora Local
Social	Apropiación social del conocimiento innovador de la técnica NIRS	Comunidad Estudiantil Universitaria.
Cultural	Importancia del proceso de calidad exigida por la comunidad que consume todos los productos derivados de la caña de azúcar.	Consumidores del sector azucarero nacionales e internacionales.

APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CERCANA (NIRS) EN LA CALIDAD E LA CAÑA DE AZÚCAR DURANTE LA COSECHA Y POSTCOSECHA

Gefersoon Bravo España¹ (gefersoon.bravo00@usc.edu.co), Julieth Orduña Ortega² (Julieth.orduña00@usc.edu.co)

^{1,2}Grupo de Investigación GIEMA, Programa de Química. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La espectroscopia infrarroja cercana (NIRS) se ha establecido como una técnica crucial en la industria de la caña de azúcar, en la evaluación de los parámetros de calidad en las diferentes etapas del proceso de conversión de materia prima a producto. Este artículo tiene como objetivo revisar y comparar las diferentes investigaciones recientes sobre la aplicación de NIRS en la determinación de parámetros cruciales en la calidad de caña de azúcar en las diferentes etapas del proceso desde la identificación en el tallo de caña hasta el jugo de caña, como lo son la fibra, el Pol, sólidos solubles totales, brix, las diferentes técnicas de regresión lineal, los equipos utilizados a lo largo de esta revisión. La metodología de análisis NIRS más utilizada comúnmente es la reflectancia y la transmitancia dado que proporcionan modelos predictivos lo suficientemente robustos para la predicción de los factores ya mencionados. La técnica NIRS ofrece evaluaciones rápidas y no destructivas, con un gran potencial para la optimización de los parámetros de calidad en el crecimiento de caña.

Palabras clave: *Espectroscopia Infrarroja Cercana, NIRS, Pol, Brix, Caña de Azúcar, Reflectancia, Transmitancia.*

APPLICATION OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS) IN SUGARCANE QUALITY DURING HARVEST AND POST-HARVEST.

ABSTRACT

Near infrared spectroscopy (NIRS) has established itself as a crucial technique in the sugarcane industry, in the evaluation of quality parameters at different stages of the raw material to product conversion process. This article aims to review and compare the different recent research on the application of NIRS in determining crucial parameters in sugarcane quality at different stages of the process from identification in the cane stem to cane juice, such as fiber, Pol, total soluble solids, brix, the different linear regression techniques, the equipment used throughout this review. The most widely used NIRS analysis methodology is reflectance and transmittance since it provides sufficiently robust predictive models for the prediction of the factors already mentioned. The NIRS technique offers rapid and non-destructive evaluations, with great potential for the optimization of quality parameters in cane growth.

Keywords: *Near Infrared Spectroscopy, NIRS, Pol, Fiber, Sugarcane, Reflectance, Transmittance.*

1. INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1950 algunos institutos de la industria de la caña de azúcar han analizado diferentes muestras de caña de azúcar en sus diferentes etapas, empezando por la selección preliminar de la caña hasta evaluar las características de calidad en el jugo de caña (Koonjah et al., 2019a). El método analítico tradicional requiere triturar muestras enteras de caña, extraer la sacarosa usando desintegradores húmedos, la separación de la fibra del jugo y clarificar el jugo, este proceso es lento, intensivo en mano de obra, costo y propenso a errores aleatorios de muestreo significativos. La aplicación espectroscópica ha provisto un avance tecnológico relevante en los diferentes sectores industriales de productos agrícolas optimizando tiempos de análisis, procesos e investigaciones, específicamente la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), que en la actualidad se ha explorado extensamente con un potencial alto en el sector azucarero, el valor caña de azúcar comercial (CSS) es uno de los principales parámetros usados para la determinación del contenido de azúcar tales como lo son el Pol (%), Brix (°Bx) y azúcares reductores (%) entre otros más de relevancia, el cual es determinado usando algunas técnicas convencionales que son lentas y laboriosas de ejecutar (Koonjah et al., 2019a).

Para la evaluación de estos parámetros de calidad en cada lote de caña a usar en el proceso de fabricación es dispendioso depender de las técnicas convencionales de análisis, dado que la rapidez de análisis para cada camión entrante influye en una pérdida de costos a nivel industrial, por lo que se hace necesario establecer una técnica que sea más eficaz y realizar la medición de varias toneladas de caña en los ingenios azucareros (Koonjah et al., 2019a). Optar por la espectroscopia infrarroja cercana (NIRS) en lugar del análisis químico tradicional ofrece numerosas ventajas, dado que proporciona análisis rápidos, requiere de menos mano de obra, es una técnica limpia por el uso inexistente de solventes y contaminantes, tiene un bajo costo de análisis, reduce la manipulación de muestras por su naturaleza no destructiva y mejora la seguridad de los analistas evitando el uso y disposición de productos químicos peligrosos.

NIR provee un análisis directo de muestras con un rango de medición desde longitudes de onda 700 a 2500 nm. Adicionalmente la inclusión de la tecnología y el manejo de datos reemplazan el manejo manual, mejorando la precisión y confiabilidad de los datos. (Aparatana et al., 2023a; Chea et al., 2022a; L. P. Corredo et al., 2021a; Maraphum et al., 2020a; Phuphaphud et al., 2020a). Sin embargo, el desarrollo inicial de la técnica NIRS requiere de tiempo y puede llegar a considerarse costoso, puesto que los modelos de calibración necesitan ser construidos con datos de la técnica primaria o el método convencional, necesitando grandes volúmenes de muestras. Por lo que de entrada los costos para la instrumentación NIR pueden ser una barrera y se requiere de personal altamente capacitado con enfoque en modelos químicométricos para la obtención de resultados efectivos. Además, la espectroscopia de infrarrojo cercano es una técnica secundaria, dependiente de una biblioteca de análisis primarios en el laboratorio.

Los algoritmos químicométricos de las técnicas de regresión son fundamentales para definir un modelo de calibración adecuado para cada parámetro analizado en NIRS, describiendo a profundidad los valores de correlación R^2 lo más cercanos a 1.0, la desviación estándar del error de calibración o validación (RMSEP o RMSEC) y la relación entre la desviación estándar del valor de referencia y el error de predicción (RPD). Este artículo se centrará en hacer la revisión de algunos modelos de regresión lineal utilizados en diferentes aspectos del proceso de calibración usando la técnica NIRS en la caña de azúcar, dando un recorrido por su aplicación en la cosecha del cultivo, y la determinación de los parámetros de calidad en el jugo de caña (Pol, Brix, Sacarosa).

2. METODOLOGÍA

Esta revisión bibliográfica detalla el proceso de búsqueda y selección de literatura sobre la aplicación de la espectroscopia infrarroja en la caña de azúcar, con el objetivo de garantizar los estudios más actualizados y relevantes. El uso de esta metodología permite la reproducibilidad del estudio y asegura que los artículos mencionados en este artículo sean pertinentes al tema de investigación y de mayor calidad en el sector investigado.

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

La búsqueda bibliográfica se realizó utilizando palabras claves específicas, tales como “Near-Infrared Spectroscopy”, “Sugar Cane”, “Quality Assessment on Sugar Cane”, “Portable NIRS in Sugar Industry”, “Pol”, “Fiber”, “Brix”, “Moisture Content”. La búsqueda se limitó a estudios publicados en los últimos 8 años, publicados entre 2016 y 2024 para asegurar contar con la información más actualizada. Se priorizó artículos de investigación originales y estudios particulares realizados por los diferentes sectores azucareros, siendo estos las fuentes primarias, y se incluyen algunos pocos artículos de revisión como fuentes secundarias de conocimiento. La búsqueda se realizó en diferentes bases de datos, tal como se observa en la tabla 1, mencionando el nombre de la base de datos y la cantidad de artículos tomados de ellas.

Tabla 1. Distribución de Artículos de la revisión literaria.

Bases de Datos Consultadas	Numero de Artículos Revisados
Science Direct	18
MDPI Open Access Journals	2
Google Scholar	9
Springer Link	4
Plos ONE	1
Sage Journals	4

Los criterios de inclusión se establecieron en que solo consideraría estudios publicados entre el 2016 y 2024 con el fin de garantizar una revisión relevante y actualizada. Adicionalmente solo se permitieron artículos en el idioma inglés, excluyendo los escritos en otros idiomas dado la dificultad de recursos de traducción idóneos, la preferencia del idioma inglés sobre otros, es debido a que mundialmente es el idioma más hablado, y para la comunidad científica presenta las mejores publicaciones en cuanto al avance de nuevas técnicas, tecnologías y mejoramiento de procesos. Esta extracción de artículos se organizó en tablas detalladas que incluían la información más relevante, como el DOI de publicación, el año en que fue publicada, la revista, el tipo de estudio, el resumen y conclusiones generales, temas abordados en el desarrollo del mismo y sus objetivos principales. Este método facilitó la verificación de los artículos al revisar las referencias y citas para garantizar la veracidad de la información y evitar discrepancias con los autores o versiones adicionales de los artículos.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1. Aplicaciones de NIRS en caña de azúcar.

La espectroscopia infrarroja cercana ha sido expuesta como una técnica alternativa que facilita la determinación de los parámetros de calidad, con una visión en el sector agrícola en productos como el albaricoque, las fresas, el néctar y las manzanas. Así como para la caña de azúcar, estudios recientes han demostrado el potencial que tiene la técnica NIRS para realizar la predicción de algunos parámetros como brix, Pol, sólidos solubles y fibra, lo cual es crucial para garantizar que los productos provenientes de la caña de azúcar cumplan con las necesidades para las cuales serán utilizadas. La espectroscopia Vis-NIR provee algunas ventajas como análisis rápidos, de bajo costo, evitando el uso de agentes tóxicos. En esta revisión se identificaron varios estudios relevantes sobre este tema, donde algunas de sus características principales y resultados serán expuestas en la Tabla 1.

Tabla No. 1. Estudios sobre Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIRS) en el sector azucarero: Equipos Portables y De Mesa, Técnicas de luz aplicadas, y Principales Objetivos de Estudio.

Equipo NIRs	Autor	Técnica NIRS	Longitudes de Onda (nm)	Parámetros de Calidad Evaluados
Mobile - NIR	(Sanseechan et al., 2018)	Absorbancia	570-1031 nm	Densidad del Tallo de Caña
MATRIX-F Bruker con Sensor Q413	(Wang et al., 2021)	Reflectancia	1000-2500 nm	Determinación de Contenido de Humedad y Contenido de Azúcar
Vis/NIR AvaSpect-2048-USB2	(Phetpan et al., 2018)	Reflectancia	350-1100 nm	Evaluación del contenido de solidos solubles
Antaris II FT-NIR Analyzer y Portable DLP® NIRscan Nano™ EVM	(Cardoso et al., 2022)	Transreflectancia y Reflectancia	1000-2500 nm 900-1700 nm	Mejoramiento de predicción de sacarosa, glucosa y fructosa en jugos de caña
Sistema Construido a Necesidad.	(Aparatana et al., 2020)	Hyperspectral Imaging	400-1000 nm	Diferenciación de la caña limpia con residuos no aprovechables de caña
ASD FielSpec 3	(Rodrigues et al., 2022)	Reflectancia	350-1000 nm 1000-2500 nm	Determinación de Pol de jugo solidos solubles totales (Brix), Pol de caña, fibra, azucares totales recuperables, azucares totales reductores y pureza.
FT-NIR Spectrometer	(Kamwilaisak et al., 2021)	Reflectancia Difusa	800-2777 nm	Determinación de °Brix, %Pol, %Fibra y Caña de Azucar Comerciable (CSS)
Matrix- F FT NIR Spectrophotometer	(Ochola et al., 2015)	NIRS	No especificado	Determinación de Pol, Brix Fibra y Contenido de Humedad.
JEFFCO InfraCana II	(Koonjah et al., 2019b)	NIRS	910 – 1674 nm	Determinación de Brix %, Pol % y Fibra % de caña.
ASD, SCIO, F750, µNIR1700, DLP NIRScan Nano, µNIR2200 y NIRone 2.2	(Ryckewaert et al., 2022)	Reflectancia	350-2500 nm 740-1070 nm 450-1140 nm 908-1676 nm 901-1701nm 1150-2150 nm 1750-2150 nm	Determinación del contenido de azúcar y proteína cruda.
MicroNIR™ 1700	(Henrique da Silva Melo et al., 2022)	Transmitancia Reflectancia Difusa	950 -1650 nm	Cuantificación de Brix y Pol en las etapas de producción del azúcar.
Sistema Personalizado de Hyperspectral imaging	(Henrique da Silva Melo et al., 2022)	Hyperspectral Imaging	900-1700 nm	Determinación del contenido de azúcar comercial en el tallo de caña de azúcar.
FOSS 5000	(Sexton et al., 2020)	Absorbancia	1100-2498 nm	Identificación de caña de azúcar deteriorada en bajos contenidos de pol y brix
MicroNIR 1700	(L. de P. Corrêdo et al., 2024)	NIRS	908-1676 nm	Determinación del contenido de Brix (%), Pol

Equipo NIRs	Autor	Técnica NIRS	Longitudes de Onda (nm)	Parámetros de Calidad Evaluados
				(%), Fibra (%), Pol de caña (%), y azúcares reductores totales (TRS) durante la cosecha de caña.
NIR/VNIR	Abstract Proceedings of International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM-2020): 9th-10th January 2020 (2020)	NIRS	No Especificado	Cuantificación del contenido de azúcar en el crecimiento de la caña de azúcar usando modelos de predicción.
NIRQuest 5125-2.5	(Bahrami et al., 2020)	Transmitancia	860-2500 nm	Predicción de Pol, Brix. Concentración de sacarosa y pH.
No especificado	(Walford, 2019)	Transmitancia	400-1000 nm	Determinación de Pol, Brix, Sacarosa, Fructosa y Glucosa en el control de proceso.
FOSS XDS RLA	(García Ivonne & Ramírez Juan S., 2018)	Transmitancia	400-2500 nm	Determinación de azúcares reductores en jugo de caña en campo
Portable AgriNIR	(L. P. Corrêdo et al., 2021b)	Reflectancia	1100-1800 nm	Predicción de Brix, Pol, y Fibra en cultivos de caña de azúcar.
Portable VIS/SWNIR	(Phuphaphud et al., 2020b)	NIRS	570-1031 nm	Determinación del contenido de azúcar en el crecimiento del tallo de caña.
VESPA HEX 650	(Chea et al., 2022b)	Hyperspectral Imaging	No Especificado	Predicción de Brix en cultivos de caña combinando la edad de caña, altura del cultivo e información climática del sector.
NIR DS2500	(Ramírez-Morales et al., 2016)	Reflectancia	780-2500 nm	Monitoreo de Brix y Sacarosa durante el control en proceso.
NIR DS2500 H-NIR-SC-01	(Aparatana et al., 2023b)	Absorción	400-2500 nm	Determinación de Brix y Pol en el jugo de caña y el tallo de caña.
FieldSpec HandHeld y FielsSpec Pro	(Mat Nawi et al., 2013)	Reflectancia	325-1075 nm	Determinación de Brix en tallo de caña de azúcar.
Portable Vis/SWNIR	(Phuphaphud et al., 2019)	Reflectancia	570-1031 nm	Determinación del contenido de fibra en tallos de caña.
Portable Veris Vis-NIR y Portable AgriNir	(Louis, 2016)	No especificado	1070-2200 nm 1100-1800 nm	Determinación de Brix, Pol, Fibra, Pureza, TRS y RS.

Equipo NIRs	Autor	Técnica NIRS	Longitudes de Onda (nm)	Parámetros de Calidad Evaluados
HIS System	(Maraphum et al., 2020b)	Hyperspectral Imaging	450-950 nm	Determinación de Brix y Contenido de Humedad en el tallo de caña de azúcar.
FOSS DS 2500	(Kuswujanto & Triantarti, 2019)	Reflectancia	850-250 nm	Determinación de Brix y Pol en Jugo de caña de azúcar.
Phantom 3 Advanced Multirotor Drone	(Akbarian et al., 2022)	Hyperspectral Imaging	630-690 nm 460-510 nm 545-575 nm 820-860 nm 712-722 nm	Determinación de tiempo de corte para el cultivo de caña de azúcar
No Especificado	(Ong et al., 2024)	Reflectancia	220-1400 nm	Determinación del contenido de Clorofila como medida de madurez de la caña de azúcar.

A continuación, se exploran las aplicaciones en NIRS descritas en la Tabla 1. en el sector azucarero, analizando los principales hallazgos recientes y la relevancia a nivel internacional de la técnica.

3.2. Determinación de parámetros de calidad de caña de azúcar durante el crecimiento de la caña de azúcar.

La espectroscopia infrarroja cercana (NIRS) ha provisto ser una herramienta de alto interés y relevancia para la industria azucarera, puesto que permite en los campos de cultivos realizar análisis directos de la caña de azúcar, como se evidencia en la Tabla 1. Sin embargo, en el contexto internacional se ha buscado la minimización de los equipos de laboratorio con el fin de utilizarlos en otros sectores del proceso y no depender directamente de los laboratorios de control de calidad. En los estudios de (Aparatana et al., 2023b) indican que esta brecha con el avance tecnológico promueve el uso de sistemas portables, ellos indican que al realizar una comparación entre el equipo de escritorio y un equipo portable midiendo los parámetros de Pol y Brix, el equipo de escritorio muestra resultados muy similares al método convencional, e indica que al mantener condiciones controladas tanto del método primario como del secundario la calidad de resultados promueve una alta resolución. El equipo portable en comparación permite realizar la recolección de datos con menor exactitud, pero permite medir la calidad de la caña mucho más rápido, sin embargo, con el fin de mejorar la calidad de los modelos de predicción utilizaron otros modelo de regresión lineal que permitan mejorar el coeficiente de correlación (R^2), (Aparatana et al., 2023b) indican que para el equipo de escritorio usando el modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) un rango entre $0.92 < R^2 < 0.99$ para las mediciones de Pol y Brix, con un total de 52 muestras para el set de calibración y 51 para el set de validación, y para el equipo portable bajo las mismas condiciones de tratamiento un rango entre $0.66 < R^2 < 0.84$.

A su vez, recomiendan que utilizar modelos de regresión utilizados en el sistema japonés de determinación de calidad del azúcar, pueden ser más efectivos. Algunos autores como (Phetpan et al., 2018) concuerdan en que utilizar otros modelos de regresión mejoran la calidad de predicción de los equipos portables, tal como se indica en su estudio donde demuestra que al usar pretratamiento del espectro (MA) antes de la medición combinado con los modelos de regresión SNV, MSC y normalización muestran un excelente desempeño, aumentando la exactitud, de $0.7 - 0.8 R^2$ a 0.807 , con dos picos dominantes en las regiones de 755 y 890 nm, este autor destaca también la importancia de usar combinación de modelos de regresión, dado que utilizar un solo modelo en algunos casos no promueve una buena resolución.

Los equipos portables de NIRS se han convertido en una herramienta de ayuda en la toma de decisión en campo a la hora de realizar el corte del cultivo, (Sanseechan et al., 2018) menciona la importancia de medir la densidad de la caña en cuanto a conocer el posible contenido de masa utilizable en el proceso productivo, pero otros autores como (Aparatana et al., 2020) indican que la recolección de caña tiene algunas variables que son catalogadas

como basura en el proceso productivo, las cuales son hojas secas, hojas verdes, raíces, y cañas enfermas en las diferentes alturas bajo, medio y alto. Por lo que se propone el uso de sistemas cerrado de imágenes hiperespectrales, compuestas por una fuente de luz, una cámara hiperespectral, una banda de transporte para las muestras de análisis y un controlador, que puede ser ejecutado desde un equipo de cómputo. Autores como (Akbarian et al., 2022; Aparatana et al., 2020; Chea et al., 2022b; Maraphum et al., 2020b; Phuphaphud et al., 2019; Sanseechan et al., 2018) promueven la integración de esta técnica en las diferentes partes del proceso, donde encontraron diferentes aplicabilidades muy variadas, usadas desde drones por (Chea et al., 2022b) hasta el equipamiento en elevadores durante la recolección en tractores, por lo que en base a estos alcances tecnológicos se evalúan diferentes parámetros de calidad como se describen a continuación:

La medición de densidad entre el método convencional y la técnica NIRS, bajo lo analizado por (Sanseechan et al., 2018) indica que el tiempo de integración en el rango de 700 a 1000 nm de los espectros tomados de las muestras, donde evaluaron 9 pretratamientos bajo el mismo sistema de regresión PLS, aquellos que presentaron mejor predicción son los integrados a 200 ms, donde observaron valores de R² de entre 0.57 a 0.67 y un error de predicción de alrededor 2.00%, esto indica que el 67% de las muestras es detectada por la espectroscopia NIRS, y un 33% no detectable, esto es atribuible al escaneo de la muestra pues su superficie curvada y no homogénea no permiten realizar una excelente predicción. El contenido de fibra es otro parámetro importante medido en campo y más específicamente en el tallo de caña, anteriores estudios demuestran que las ondas visibles y cortas del infrarrojo cercano, penetran la superficie de algunos cultivos cuyo grosor va desde los 7.1 a 62.5 mm, por lo que (Phuphaphud et al., 2019) menciona que este método de penetración de luz es efectivo en la caña, permitiendo así la construcción de un modelo predictivo de fibra en el tallo de caña de azúcar. Este autor menciona que en la identificación de los espectros NIRS la influencia del tiempo de integración afecta la calidad de la predicción, reforzando la teoría demostrada en la determinación de la densidad de caña.

Cada valor obtenido del contenido de fibra fue evaluado en tallo alto, medio y bajo, en promedio con valor mínimo de 7.10 % de fibra y máximo de 15.30%, obtenidas de 6 variedades de caña en diferentes estados de madurez o edad, el método de referencia tiene un coeficiente de correlación de 0.95, en comparación con el método secundario de alrededor de 0.77, pero con un error de predicción de calibración (RMSEC) de 0.79, a un tiempo de integración de 300 ms, siendo el más bajo de los modelos usados. Este modelo al ser el más el preciso fue evaluado con un set de validación de muestras de tallo alto, medio y bajo obteniendo un coeficiente de 0.71 a 0.81 respectivamente, y un valor RPD de 2.42. Ellos indican que la combinación de tiempos de integración y técnicas de pretratamiento mejoran respectivamente los modelos, siendo en particular para este estudio el de mejor desempeño a un tiempo de 300 ms y ocho técnicas de pretratamiento. Sin embargo, mencionan que el potencial uso de la técnica de medición en los programas de cruces ha sido un campo de poca investigación, promoviendo a futuro con base al contenido de fibra realizar cruces para obtener contenidos más altos para las industrias que lo requieran.

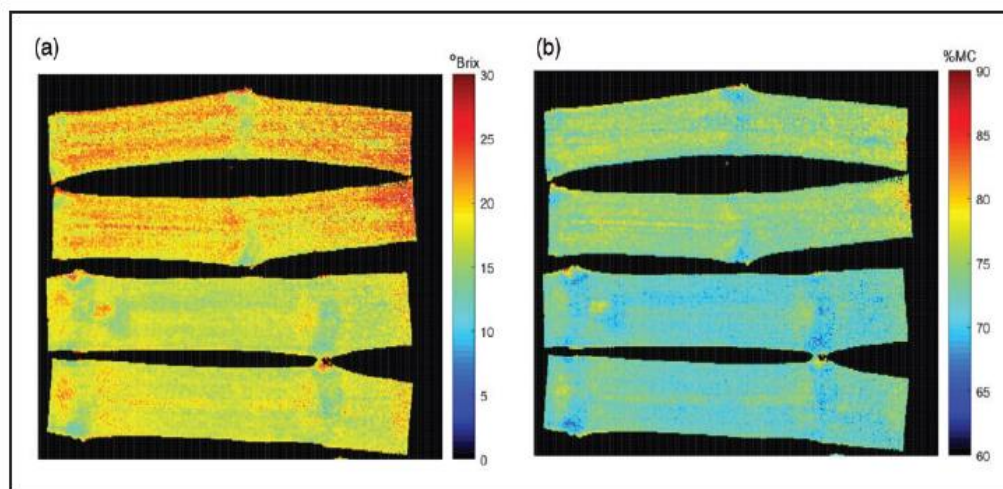


Figura 1. Distribución de (a) contenido de brix y (b) contenido de humedad en secciones del tallo. Tomado de: (Maraphum et al., 2020b)

Es difícil construir un modelo robusto de calibración basándose en el tamaño de las muestras y un rango amplio de valores de referencia, (Maraphum et al., 2020b) menciona en su estudio que un modelo de calibración puede ser clasificado en base al RPD obtenido, indicando que valores de $RPD > 2$ proveen un excelente modelo de predicción, valores entre 1.4 – 2 proveen un modelo predictivo aceptable pero con posibilidades de mejoramiento, y valores de $RPD < 1.4$ indican un modelo no aceptable para la predicción. Este autor indica que el pretratamiento de datos para la determinación de Brix y contenido de humedad usando cámaras hiperespectrales tiene un factor importante en la selección del modelo de calibración, obteniendo en este caso modelos predictivos de 0.70 en coeficiente de correlación para la determinación del brix en el tallo, y 0.68 para la determinación del contenido de humedad, indicando que las cámaras de imágenes espectrales proveen información suficiente y confiable como se observa en la figura 1. A lo largo de esta revisión se observó como las técnicas portables de NIRS con un avanzado tratamiento químico métrico presentan ventajas significativas, pues se observa como los modelos predictivos mejoran respecto al avance científico y demás investigaciones relacionadas a las técnicas portables. Ellos mencionan la importancia de poder visualizar de manera directa en los tallos de caña el contenido de brix y de humedad directamente, y la ampliación a otros parámetros que se deseen evaluar, como los ya mencionados de fibra, densidad, y compuestos no aprovechables.

Otro valor determinante en la calidad de caña en campo es la caña azúcar comerciable (CCS), definida como la caña de azúcar de mejor calidad para la producción de azúcar no refinada y refinada, (Chiatrakul et al., 2022) menciona que las muestras de caña poseen de un 1.35 – 18.36% de CCS, y que la posición a través del tallo que es medida y su edad, son consideradas una variación en el análisis, y que esto es evidenciable en un crecimiento de los valores desde el tallo alto hasta el bajo especialmente a la edad de 8 a 9 meses. Sin embargo, denotan que a los 10 y 12 meses este valor tiende a decrecer en el tallo alto, mientras que en el tallo medio y bajo se mantiene. Por lo que en este estudio (Chiatrakul et al., 2022) evaluaron los efectos de la técnica de escaneo y la cera en la superficie del tallo, para el primer análisis se compararon las mediciones entre la caña de azúcar con contenido de cera en su superficie (NW) y una con esta superficie removida (NNW), donde el coeficiente de correlación fue de 0.84 para NW y 0.86 NNW con una diferencia en RPD de 2.31 para NW y 2.41 para NNW, indicando que el desempeño en la predicción es considerablemente bueno, pues alrededor del 80% de las muestras son analizadas sin variabilidad. Las investigaciones realizadas por (Akbarian et al., 2022; Chiatrakul et al., 2022; L. de P. Corrêdo et al., 2024; L. P. Corrêdo et al., 2021b; Kuswurdanto & Triantarti, 2019; Louis, 2016; Mat Nawi et al., 2013; Ong et al., 2024; Phuphaphud et al., 2020b; Ramírez-Morales et al., 2016) definen que la técnica más utilizada en los equipos NIRS se divide en 2 principales, las cuales son reflectancia y transmitancia, pues son las más idóneas y efectivas para la medición del contenido de fibra, Pol, brix, contenido de azúcar, etc.

3.3. MicroSensores NIRs y su importancia en el control de procesos.

La espectroscopia infrarroja emerge como una nueva tecnología para el análisis de productos agrícolas, se menciona que los equipos NIR estáticos de laboratorio para la determinación de pol y brix de caña (sistemas offline) pueden ser miniaturizados y acoplados a sistemas en línea (in-line monitoring), encontrando diversas aplicaciones comerciales especialmente en la comunidad científica, donde se ha evidencia que el uso de estos sensores en la maquinaria convencional permite analizar parámetros de calidad a los agricultores, sin depender del análisis de laboratorio. Algunos autores como (L. de P. Corrêdo et al., 2024) mencionan que esta técnica está sujeta a algunos factores que afecta la distancia entre el sensor y la muestra, como lo son tierra, humedad, vibraciones y variación de luz. Sin embargo, la implementación de un sensor NIR en las cosechadoras promete mejorar las medidas de calidad en caña de azúcar desde su recolección, se propone la implementación de estos sensores al final de los sistemas de elevación de la caña. Ellos proponen la construcción de una cabina de hierro donde es adaptado el equipo MicroNIR 1700, que contiene dos lámparas de tungsteno como fuente de radiación, y equipado con dos detectores (LVF y InGaAs) en un rango de operación de 908 a 1676 nm, con una fuente de 5V para la operabilidad del sistema, este sistema es acoplado a media altura en el elevador del cosechador.

Para determinar la eficiencia de este sistema, (L. de P. Corrêdo et al., 2024) desafiaron los espectros obtenidos y evaluaron 5 parámetros, % Brix, % Pol, %Fibra, %Pol de Caña, Azúcares totales recuperables (TRS), donde el análisis de componentes principales (PCA) tomado en el sistema In-Line antes y después de aplicar los modelos de calibración confirman que el método es lo suficientemente robusto y reduce la variación de las mediciones entre un equipo de escritorio y sistemas in-line. Este estudio indica que la predicción de contenido de Pol, Brix, TRS y Pol de caña del sistema In-Line es demasiado cercana a lo reportado en el laboratorio, y que adicionalmente el contenido de fibra es un poco más alto en este sistema en comparación con lo reportado en laboratorio. La

implementación de estos equipos portables enfocados en el control de procesos para la molienda de caña en la producción de azúcar, han sido enfocados en el uso de las técnicas de reflectancia difusa y transmitancia variando entre la muestra de interés dado que en algunos casos la luz irradiada no realiza el efecto difusivo y no puede ser detectada. (Henrique da Silva Melo et al., 2022) indica que los equipos portables no poseen un rango espectral tan grande como los equipos de mesa, y a su vez una alta resolución, sin embargo, permiten adquirir información durante las diferentes etapas del proceso industrial (Recepción de Caña, Molienda, Sistemas de tratamiento, fase de evaporación hasta que las muestras estén hirviendo, cristalización, centrifugación y refinación), permiten tomar decisiones sobre el proceso de forma inmediata.

(Ryckewaert et al., 2022) demostraron que los equipos portables contruidos con microsensores NIRS tienen un desempeño similar a los equipos de laboratorio, impulsando la construcción de modelos in-line, basándose en óptimos pretratamientos y modelos de regresión que pueden ser traídos o adaptados de equipos de escritorio con el fin de mejorar la calidad de predicción y los espectros. (Henrique da Silva Melo et al., 2022) refuerzan el potencial uso que tienen los equipos portables en la determinación de factores de calidad, en diferentes industrias no solamente relacionadas con la caña, adentrándose también en la composición de las muestras que definen el tipo de técnica de luz irradiada que será utilizada en el estudio, mencionando que la técnica más utilizada en este sector es la transmitancia y la reflectancia difusa.

3.4. Desventajas y enfoques adicionales de la técnica NIRS.

Las aplicaciones de la espectroscopia infrarroja se ha desarrollado ampliamente en el sector agrícola industrial, contribuyendo principalmente al análisis de componentes vitales como proteínas, polisacáridos, fenoles, minerales, entre otros, observándose buenos resultados respecto a las técnicas primarias, sin embargo la técnica tiene algunas desventajas como lo son inicialmente el costo de adquisición de los equipos que puede rondar desde los 4000 USD hasta los 10000 USD, la variabilidad del contenido de muestras para definir los rangos de estudio tal como lo menciona (Aparatana et al., 2023b; Mat Nawi et al., 2013), adicionalmente (Zhang et al., 2018) encuentra en adición otros efectos como el geométrico, de la temperatura, de la variabilidad del color, de variación en la posición y variaciones biológicas.

Una desventaja que ha sido detectada en el sector agrícola una gran cantidad de alimentos y plantas herbáceas son aproximadamente esféricas o cilíndricas, siendo este uno de los principales problemas puesto que la luz irradiada no se distribuye uniformemente y no aplica su efecto de reflectancia, este efecto es conocido como el efecto geométrico (Chitrakul et al., 2022; Zhang et al., 2018). El problema de distribución no uniforme es transversal a otras técnicas de tomas espectrales, especialmente en superficies curvadas, lo que influye directamente en buscar otras alternativas en las que este tipo de geometrías tengan una precisión alta en la determinación de parámetros de calidad. Las variaciones de temperatura ocurren alrededor del mundo debido al cambio climático, la temperatura de almacenamiento o del campo donde se tomen las muestras, afecta el espectro de reflectancia en NIRS. (Cui & Fearn, 2017; Louis, 2016; Ong et al., 2024). Las fluctuaciones en la temperatura a través de las muestras provocan cambios en las fuerzas intermoleculares que influyen en el espectro vibracional, debido principalmente a las propiedades térmicas de los enlaces puentes de hidrogeno, este efecto es denominado como el efecto de temperatura.

El efecto de variabilidad de color depende del contenido de clorofila, antocianinas y carotenoides, para determinar la apariencia y el color de frutos, vegetales y plantas herbáceas, y sirven como atributos de calidad, sin embargo el contenido de estos es variable conforme a la maduración del producto y su almacenamiento, donde el principal obstáculo induce una superposición de luz por pigmentación en la superficie de los frutos, vegetales y plantas herbáceas, especialmente en la determinación de contenido de azúcar y SSC, disminuyendo la precisión de los modelos de calibración en NIRS, observándose que la absorción de luz lo hace difícil de estimar. El autor (Zhang et al., 2018) menciona que para las mediciones in-line la posición y la distancia entre el detector y la muestra son incontrolables por el medio de transporte que las lleva, pues no realizar las mediciones en las zonas correctas disminuye la capacidad de predecir con exactitud los contenidos, pues en los diferentes sectores agrícolas algunos parámetros de calidad se definen en ciertas secciones de los cultivos, por ejemplo (Chitrakul et al., 2022) menciona que en caña de azúcar se conoce que conforme madura el tallo de caña, el brix y el Pol varía en contenido por lo que realizar medición en una sola sección no proporciona un dato representativo, definiendo este fenómeno como el efecto de la posición de medida.

Las características biológicas de las muestras afectan las mediciones en NIRS, como la técnica de cultivo, el nivel de maduración, la geografía de origen, la temporada de cosecha, la edad biológica, y son parámetros no controlables, pues los parámetros de calidad varían conforme a la composición de los frutos, vegetales o plantas herbáceas, (Zhang et al., 2018) clasifican a la temporada de cosecha como una de las variables que más afecta los espectros NIRS, pues las diferentes condiciones de crecimiento, la luz solar, la temperatura, las precipitaciones y la temporada, pueden predecir contenidos variados de algunos parámetros como el contenido de azúcares o ácidos, así como la estructura celular y espacios intermoleculares puede variar entre temporadas de cosecha, afectando en gran medida la precisión de los modelos de calibración por el efecto biológico de las muestras.

4. CONCLUSIONES

La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) se consolida como una herramienta relevante en el control de proceso, durante la cosecha y postcosecha en la evaluación de los parámetros de calidad de caña de azúcar, principalmente en la determinación del contenido de azúcar, Pol, Brix, Azúcares reductores, Fibra, densidad, etc. Los estudios revisados en este artículo evidencian que NIRS y sus diversas técnicas de análisis con equipos portables y de escritorio proporcionan grandes beneficios al sector azucarero, pues ofrece resultados rápidos, con una alta precisión de predicción, no se requiere del uso de solventes o contaminantes que pongan el peligro al producto y al equipo de laboratorio, y es una técnica no destructiva, permitiendo que la materia prima analizada pueda ser incluida nuevamente en el proceso productivo, disminuyendo costos en la determinación de los parámetros de calidad. Los modelos de calibración utilizados en las técnicas de NIRS pueden mejorarse mediante la optimización del uso de diferentes técnicas de pretratamiento y regresión lineal, donde el modelo más utilizado para regresión fue el de mínimos cuadrados parciales (PLS). Las investigaciones a futuro deberían centrarse en el acoplamiento de modelos In-Line que permitan realizar el control en proceso con mayor exactitud, pues en este estudio se evidencia que es posible llevar control de parámetros críticos de calidad con una reproducibilidad bastante alta, pero que debido al poco avance en estas técnicas no son lo suficientemente robustos en relación a la técnica convencional. En general NIRS ofrece aplicaciones variadas con la integración de las tecnologías emergentes y refuerza su aplicabilidad en el manejo eficiente de los cultivos durante la cosecha y postcosecha de la caña de azúcar.

5. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Geferson Bravo España y Julieth Orduña Ortega declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo de revisión.

6. CONFLICTO DE INTERESES

El señor Gefersoon Bravo España y la señora Julieth Orduña Ortega declaran que no tienen conflicto de intereses en la elaboración de este artículo de revisión.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abstract proceedings of International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM-2020) : 9th-10th January 2020. (2020). IEEE.

Akbarian, S., Xu, C., Wang, W., Ginns, S., & Lim, S. (2022). Sugarcane yields prediction at the row level using a novel cross-validation approach to multi-year multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107024>

Aparatana, K., Naomasa, Y., Sano, M., Watanabe, K., Mitsuoka, M., Ueno, M., Kawamitsu, Y., & Taira, E. (2023a). Predicting sugarcane quality using a portable visible near infrared spectrometer and a benchtop near infrared spectrometer. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 31(1), 14–23. <https://doi.org/10.1177/09670335221136545>

Aparatana, K., Naomasa, Y., Sano, M., Watanabe, K., Mitsuoka, M., Ueno, M., Kawamitsu, Y., & Taira, E. (2023b). Predicting sugarcane quality using a portable visible near infrared spectrometer and a benchtop near infrared

- spectrometer. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 31(1), 14–23. <https://doi.org/10.1177/09670335221136545>
- Aparatana, K., Saengprachatanarug, K., Izumikawa, Y., Nakamura, S., & Taira, E. (2020). Development of sugarcane and trash identification system in sugar production using hyperspectral imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 28(3), 133–139. <https://doi.org/10.1177/0967033520905369>
- Bahrami, M. E., Honarvar, M., Ansari, K., & Jamshidi, B. (2020). Measurement of quality parameters of sugar beet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109775>
- Cardoso, W. J., Gomes, J. G. R., Roque, J. V., Barbosa, M. H. P., & Teófilo, R. F. (2022). Dehydration as a Tool to improve predictability of sugarcane juice carbohydrates using near-infrared spectroscopy based PLS models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104459>
- Chea, C., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Saikaew, K., Wongphati, M., & Taira, E. (2022a). Optimal models under multiple resource types for Brix content prediction in sugarcane fields using machine learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100718>
- Chea, C., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Saikaew, K., Wongphati, M., & Taira, E. (2022b). Optimal models under multiple resource types for Brix content prediction in sugarcane fields using machine learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100718>
- Chiatrakul, J., Terdwongworakul, A., Phuangsombut, K., & Phuangsombut, A. (2022). Improved evaluation of commercial cane sugar content in sugarcane stalk using near infrared hyperspectral imaging and stalk axis rotation technique. *Biosystems Engineering*, 223, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.019>
- Corrêdo, L. de P., Molin, J. P., & Canal Filho, R. (2024). Is It Possible to Measure the Quality of Sugarcane in Real-Time during Harvesting Using Onboard NIR Spectroscopy? *AgriEngineering*, 6(1), 64–80. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010005>
- Corrêdo, L. P., Wei, M. C. F., Ferraz, M. N., & Molin, J. P. (2021a). Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the fields. *Biosystems Engineering*, 206, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.001>
- Corrêdo, L. P., Wei, M. C. F., Ferraz, M. N., & Molin, J. P. (2021b). Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the fields. *Biosystems Engineering*, 206, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.001>
- Cui, C., & Fearn, T. (2017). Comparison of partial least squares regression, least squares support vector machines, and Gaussian process regression for a near infrared calibration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 25(1), 5–14. <https://doi.org/10.1177/0967033516678515>
- García Ivonne, & Ramírez Juan S. (2018). *Near-infrared spectroscopy: a rapid alternative technique to reducing sugars determination in juice of sugarcane (Saccharum officinarum L.)*. <http://jppres.com/jppres>
- Henrique da Silva Melo, B., Figueiredo Sales, R., da Silva Bastos Filho, L., Souza Povoas da Silva, J., Gabrielle Carolino de Almeida Sousa, A., Maria Camará Peixoto, D., & Pimentel, M. F. (2022). Handheld near infrared spectrometer and machine learning methods applied to the monitoring of multiple process stages in industrial sugar production. *Food Chemistry*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130919>
- Kamwilaisak, K., Jutakradsada, P., Iamamornphanth, W., Saengprachatanarug, K., Kasemsiri, P., Konyai, S., Posom, J., & Chindaprasirt, P. (2021). Estimation of sugar content in sugarcane (*Saccharum* spp.) Variety lumpang 92-11 (LK 92-11) and khon kaen 3 (KK 3) by near infrared spectroscopy. *Engineering Journal*, 25(3), 69–83. <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.3.69>
- Koonjah, S. S., Beekharri, A., Badaloo, M. G. H., Henderson, C., & Dookun Saumtally, A. (2019a). Evaluation of Near Infrared Spectroscopy for the Direct Analysis of Cane Quality Characters. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 169–176. <https://doi.org/10.13189/ujar.2019.070501>
- Koonjah, S. S., Beekharri, A., Badaloo, M. G. H., Henderson, C., & Dookun Saumtally, A. (2019b). Evaluation of Near Infrared Spectroscopy for the Direct Analysis of Cane Quality Characters. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 169–176. <https://doi.org/10.13189/ujar.2019.070501>
- Kuswurjanto, R., & Triantarti. (2019). Study on application of near infrared (nir) spectroscopy for sugar cane juice analysis to replace conventional analysis methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012059>
- Louis, S. (2016). *NIR spectroscopy to map quality parameters of sugarcane A paper from the Proceedings of the 13 th International Conference on Precision Agriculture*.

- Maraphum, K., Saengprachatanarug, K., Aparatana, K., Izumikawa, Y., & Taira, E. (2020a). Spatial mapping of Brix and moisture content in sugarcane stalk using hyperspectral imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 28(4), 167–174. <https://doi.org/10.1177/0967033520905370>
- Maraphum, K., Saengprachatanarug, K., Aparatana, K., Izumikawa, Y., & Taira, E. (2020b). Spatial mapping of Brix and moisture content in sugarcane stalk using hyperspectral imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 28(4), 167–174. <https://doi.org/10.1177/0967033520905370>
- Mat Nawi, N., Chen, G., Jensen, T., & Mehdizadeh, S. A. (2013). Prediction and classification of sugar content of sugarcane based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. *Biosystems Engineering*, 115(2), 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.005>
- Ochola, P., Apunda, E. O., & Yewa, E. O. (2015). *Evaluation of Near Infrared Spectroscopy for Sugarcane Quality Determination in Western Kenya*. 7(9). www.iiste.org
- Ong, P., Jian, J., Li, X., Yin, J., & Ma, G. (2024). Visible and near-infrared spectroscopic determination of sugarcane chlorophyll content using a modified wavelength selection method for multivariate calibration. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123477>
- Phetpan, K., Udompetaikul, V., & Sirisomboon, P. (2018). An online visible and near-infrared spectroscopic technique for the real-time evaluation of the soluble solids content of sugarcane billets on an elevator conveyor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 460–466. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.033>
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., & Taira, E. (2019). Prediction of the fibre content of sugarcane stalk by direct scanning using visible-shortwave near infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 101, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.02.005>
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., & Taira, E. (2020a). Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 197, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.012>
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., & Taira, E. (2020b). Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 197, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.012>
- Ramírez-Morales, I., Rivero, D., Fernández-Blanco, E., & Pazos, A. (2016). Optimization of NIR calibration models for multiple processes in the sugar industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 159, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.10.003>
- Rodrigues, M., Cezar, E., Abrantes dos Santos, G. L. A., Reis, A. S., Furlanetto, R. H., de Oliveira, R. B., D'Ávila, R. C., & Nanni, M. R. (2022). Estimating technological parameters and stem productivity of sugarcane treated with rock powder using a proximal spectroradiometer Vis-NIR-SWIR. *Industrial Crops and Products*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115278>
- Ryckewaert, M., Chaix, G., Héran, D., Zgouz, A., & Bendoula, R. (2022). Evaluation of a combination of NIR micro-spectrometers to predict chemical properties of sugarcane forage using a multi-block approach. *Biosystems Engineering*, 217, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.019>
- Sanseechan, P., Panduangnate, L., Saengprachatanarug, K., Wongpichet, S., Taira, E., & Posom, J. (2018). A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 20, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2018.07.001>
- Sexton, J., Everingham, Y., Donald, D., Staunton, S., & White, R. (2020). Investigating the identification of atypical sugarcane using NIR analysis of online mill data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105111>
- Walford, S. (2019). Near infrared spectroscopy: rethinking the analysis of sugarcane factory streams. In *Proceedings of the 18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy* (pp. 129–133). IM Publications Open LLP. <https://doi.org/10.1255/nir2017.129>
- Wang, M., Li, X., Shen, Y., Adnan, M., Mao, L., Lu, P., Hu, Q., Jiang, F., Khan, M. T., Deng, Z., Chen, B., Huang, J., & Zhang, M. (2021). A systematic high-throughput phenotyping assay for sugarcane stalk quality characterization by near-infrared spectroscopy. *Plant Methods*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00777-8>
- Zhang, B., Dai, D., Huang, J., Zhou, J., Gui, Q., & Dai, F. (2018). Influence of physical and biological variability and solution methods in fruit and vegetable quality nondestructive inspection by using imaging and near-infrared

spectroscopy techniques: A review. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 58, Issue 12, pp. 2099–2118). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1300789>