



Reseña

NIRS. Su uso en la evaluación de alimento para animales

NIRS. Its use in animal feed evaluation

Silvio J. Martínez Sáez *, Ciro A. Ordoñez-Gómez **, Marlene León González *

*Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba.

** SELMET, Univ. Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Correspondencia: silvio.martinez@reduc.edu.cu

Recibido: Diciembre, 2025; Aceptado: Diciembre, 2025; Publicado: Febrero, 2026.

RESUMEN

Antecedentes: La Espectroscopia en el Infrarrojo Cercano (NIRS, por sus siglas en inglés) se basa en la interacción con la materia de las radiaciones infrarrojas cercanas al espectro visible. Desde la década del 70 del pasado siglo, la NIRS se ha estado usando en la predicción de componentes del valor nutritivo de alimentos para animales. **Objetivo.** Dar una visión sobre las características de la NIRS y su uso en la evaluación de alimento para animales. **Desarrollo:** El primer uso significativo de la NIRS para la evaluación de alimentos animal fue reportado en 1976. Su utilización se ha incrementado notablemente dada su rapidez, ser no destructiva y la buena relación efectividad costo. Un papel importante en tales mejoras lo constituye la integración de procedimientos de relativa complejidad para el manejo de un número elevado de datos, pues se requiere de modelos estadísticos de predicción previamente obtenidos durante la calibración. Debe recolectarse un conjunto diverso de muestras que cubran el rango completo de variaciones esperadas en los parámetros de interés. El modelo se prueba con un grupo independiente de muestras con valores de referencia conocidos. Esto permite evaluar su rendimiento mediante estadísticas como el coeficiente de determinación y el error estándar de predicción. **Conclusión:** NIRS es la espectroscopia de mayor avance en las últimas décadas. En la producción animal puede ser utilizada para la gradación de calidad de los alimentos, formulación del alimento, y verificación de la calidad del producto final.

Palabras claves: alimento animal, espectroscopia, modelos de regresión, infrarrojo cercano (Fuente: AIMS)

ABSTRACT

Background: Near-infrared spectroscopy (NIRS) is based on the interaction of near-infrared radiation with matter. Since the 1970s, NIRS has been used to predict the nutritional value of animal feed components. **Objective.** To provide an overview of the characteristics of NIRS and its use in animal feed evaluation. **Development:** The first significant use of NIRS for animal feed

Como citar (APA) Martínez Sáez, S. J., Ordoñez-Gómez, C. A., & León González, M. (2025). NIRS. Su uso en la evaluación de alimento para animales. *Revista De Producción Animal*, 37. <https://rpa.reduc.edu.cu/index.php/rpa/article/view/e281>



©El (los) autor (es), Revista de Producción Animal 2020. Este artículo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional Attribution-NonCommercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), asumida por las colecciones de revistas científicas de acceso abierto, según lo recomendado por la Declaración de Budapest, la que puede consultarse en: Budapest Open Access Initiative's definition of Open Access.

evaluation was reported in 1976. Its use has increased considerably due to its speed, non-destructive nature, and cost-effectiveness. A key factor in these improvements is the integration of relatively complex procedures for handling large datasets, as this requires statistical prediction models previously obtained during calibration. A diverse set of samples must be collected to cover the full range of expected variations in the parameters of interest. The model is then tested with an independent group of samples with known reference values. This allows for the evaluation of its performance using statistics such as the coefficient of determination and the standard error of prediction. **Conclusion:** NIRS is the most advanced spectroscopy technique in recent decades. In animal production, it can be used for feed quality grading, feed formulation, and verification of final product quality.

Keywords: animal feed, spectroscopy, regression models, near-infrared (Source: AIMS)

INTRODUCCIÓN

Las técnicas instrumentales de análisis usan propiedades físicas que de alguna manera se relacionan con el analito. La espectroscopía óptica se basa en la interacción existente entre la sustancia objeto de análisis y la radiación electromagnética. La interacción puede ser emisión o absorción o ambas. Las radiaciones pueden ser visibles, ultravioletas o infrarrojas, dependiendo del rango de longitudes de onda que cubren. La espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés) estudia los espectros en el rango de longitudes de onda entre 900 y 2500 nm (Amaral, 2022).

Desde la década del 70 la NIRS se ha estado usando en la predicción de componentes del valor nutritivo de alimentos para animales (Norris *et al.*, 1976). Avances recientes permiten análisis *in situ* de ensilajes, granos, alimentos compuestos reduciendo el uso de métodos que requieren de tiempo para tener una respuesta y son más agresivos al medio (Bristy *et al.*, 2025).

El este trabajo se pretende dar una visión sobre las características de NIRS y su uso en la evaluación de alimento para animales.

DESARROLLO

La NIRS

Por la región del espectro en que se produce la interacción, esta ocurre especialmente sobre enlaces covalentes presentes en la materia orgánica entre elementos como el carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Se han encontrado correlaciones con los espectros entre estos y otros elementos como el fósforo y el azufre y algunos metales ligados a la materia orgánica. (Zhang *et al.*, 2022)

Es un método que puede ser rápido y no destructivo cuando el espectro se obtiene por reflexión de la luz incidente sobre una muestra original (Kun-Jun, 2023). Según Ibrahim *et al.* (2023) y

Maduro *et al.* (2024) la técnica ofrece ventajas operativas y económicas insuperables frente a métodos tradicionales en aplicaciones donde la rapidez y la no destructividad son críticas.

La ausencia de residuos químicos en NIRS no solo disminuye los costos de disposición de desechos en laboratorios, sino que también mitiga riesgos regulatorios (Jun *et al.*, 2023; Mendoza *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024).

Cómo operar la NIRS

Todos los métodos instrumentales de análisis requieren de una calibración previa (correlación entre la propiedad que se mide y la concentración del analito) antes de hacer las mediciones. NIRS no es la excepción.

Para lograr buenos resultados es crucial recolectar un conjunto diverso de muestras que cubran el rango completo de variaciones esperadas en el parámetro de interés (Murphy *et al.*, 2022).

Se capturan los espectros NIR de cada muestra para generar datos espectrales. Estas muestras deben ser analizadas mediante métodos tradicionales de referencia (como HPLC, Kjeldahl, Van Soest, etc) para obtener valores precisos que sirvan como datos de calibración para determinar sus propiedades reales. Buenos valores de referencia son esenciales para desarrollar modelos de calibración robustos (Catunda *et al.*, 2022; Murphy *et al.*, 2022; Si-Ware, 2024).

El tamaño de partícula influye en la dispersión de la luz, lo que puede alterar la intensidad y la forma del espectro NIR. Partículas muy grandes pueden causar dispersión excesiva, mientras que partículas muy pequeñas pueden resultar en una absorción más uniforme, pero con menor intensidad de señal. Pero, más que un tamaño específico, lo crucial es mantener una distribución uniforme del tamaño de partícula en todas las muestras utilizadas para la calibración. Esto ayuda a minimizar la variabilidad en los espectros debido a la dispersión y asegura que los modelos predictivos sean robustos y precisos (Hossain *et al.*, 2024). En algunos casos, como en el análisis de alimentos, el tamaño de partícula debe ajustarse para cumplir con normas. Además, la NIRS puede adaptarse para trabajar con diferentes tamaños de partícula, pero siempre es necesario un control adecuado durante la calibración (Murphy *et al.*, 2022; Hossain *et al.*, 2024).

Dado el volumen de datos a manejar (un solo espectro entre 900 y 2500 nm, si se capturan datos cada un nanómetro, tiene 1600 valores), es imprescindible el uso de métodos matemáticos potentes.

Procesamiento matemático

La regresión lineal múltiple se usa raramente debido a su incapacidad para manejar adecuadamente set de datos complejos (Han *et al.*, 2022). Los espectros NIR contienen una gran cantidad de variables (longitudes de onda) que pueden estar correlacionadas entre sí. La PCR (Regresión con Componentes Principales) ayuda a identificar los componentes principales que capturan la mayor variabilidad en los datos, reduciendo así la dimensionalidad del conjunto. Esto

facilita el análisis y la interpretación de los resultados, ya que se centra en las variables más relevantes para el parámetro de interés (Si-Ware, 2024).

Se aplica quimiometría a los datos espectrales y de referencia, emparejados para determinar cómo las características específicas de los espectros corresponden a las propiedades de interés. Para mejorar la calidad de la señal es importante un pretratamiento de los datos espectrales en aras de eliminar ruidos, dispersión y derivas de la línea base; Entre estas se mencionan: i) Primera y segunda derivada: Incrementa las diferencias sutiles enfatizando los cambios en la pendiente; ii) Estandarización de las variables: Corrige cambios debidos a deferencias entre tamaño de particular iii) Corrección ortogonal de la señal. Elimina variaciones irrelevantes no relacionadas con la propiedad que se estudia (Jun *et al.*, 2023).

La regresión parcial es ampliamente utilizada en NIRS debido a su capacidad para manejar datos multicolineales y capturar relaciones entre variables espectrales y químicas. Es particularmente efectiva cuando existe una relación lineal entre los espectros y las propiedades a determinar (Maduro *et al.*, 2024), lo que ocurre con bastante frecuencia.

Aunque tanto PCR como PLSR (Regresión parcial) son métodos efectivos para la calibración NIRS, PLSR tiende a ser más común debido a su capacidad para incorporar directamente la información sobre la variable dependiente en el proceso de selección de componentes. Sin embargo, PCR es útil cuando se busca una comprensión más detallada de la estructura de los datos espectrales antes de la regresión (Maduro *et al.*, 2024), pues ayuda a mitigar la multicolinealidad al transformar las variables originales en componentes principales que son ortogonales entre sí. Esto reduce la inestabilidad en la estimación de los parámetros del modelo, lo que puede ser un problema en regresiones múltiples tradicionales. La reducción de variables y la eliminación de multicolinealidad contribuyen a una mayor estabilidad del modelo. Los estimadores de los coeficientes tienen menos varianza, lo que mejora la precisión de las predicciones (Catunda *et al.*, 2022, Xu *et al.*, 2024).

El modelo se prueba con un conjunto independiente de muestras con valores de referencia conocidos. Esto permite evaluar su rendimiento mediante estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de predicción (Si-Ware, 2024). Se puede llevar a cabo una validación cruzada, trabajando con pequeños grupos de datos que, en cada caso, no se consideran en el modelo (Skvaril *et al.*, 2025).

Se han desarrollado modelos locales y globales para adaptarse a diferentes tipos de muestras y productos (Reddy *et al.*, 2023). Los modelos locales son útiles cuando se dispone de una base de datos específica para un tipo de muestra, mientras que los modelos globales son más versátiles, pero requieren una calibración más robusta (Hossain *et al.*, 2024).

El desarrollo de la NIRS, como procesamiento analítico viable, ha estado íntimamente ligado a la modernización de la infraestructura para la captura de los espectros (arreglos de diodos,

interferómetros y Transformada de Fourier) y al tratamiento de la información que estos dan en relación con las características de las muestras. Ambas cosas dependientes del aumento en la potencia de las microcomputadoras (Gomez *et al.*, 2024).

Algunas limitaciones

No es un procedimiento de elección para trazas, para micotoxinas y otros componentes en muy baja concentración en alimentos. La NIRS requiere concentraciones mínimas de 100 ppb, mientras que la HPLC-MS (Cromatografía Líquida de Alta Presión acoplada con Espectroscopía de Masa) detecta hasta 1 ppb (Maduro *et al.*, 2024).

Aunque se ha probado su posible uso (Campos, 2015), en la evaluación de metales como los electrolíticos sólo se logran buenas correlaciones con el espectro cuando los mismos aparecen ligados a la materia orgánica.

La especificidad de los modelos y su relación con las condiciones locales hacen difícil la validación cruzada entre laboratorios. La transferencia de calibraciones entre equipos incrementa el error, problema aún no resuelto del todo en la mayoría de los modelos usados hasta hace unos años (Fan Wei, 2021). Para resolver el sesgo que se crea entre instrumentos, algunas soluciones propuestas incluyen bases de datos basados en bloques encadenados (comunes) y aprendizaje de las máquinas para armonizar datos globales (Evans, 2021).

Estudios recientes (Castillo *et al.*, 2025) revelan que, en ocasiones, se aprecian inconsistencias en la exactitud de los valores predichos lo que subraya la necesidad de mayor robustez en las validaciones. Sugieren el uso de herramientas visuales como el análisis del ploteo de puntos entre las mediciones de laboratorio y los valores predichos con el objetivo de lograr una mejor calificación de los datos.

Usos en la evaluación de alimentos

El primer uso importante de la NIRS en la evaluación de alimento animal se reportó en 1976 relacionado con la predicción de la digestibilidad *in vivo* e *in vitro* de forrajes (Norris *et al.*, 1976). Los autores demostraron la capacidad de la NIRS para predecir la digestibilidad de materia seca con exactitud. En los 70 los avances en instrumentación en el campo de los monocromadores mejoraron la precisión de los análisis espectrales, lo que facilitó la predicción de contenido de proteína y fibra en los forrajes. Durante los 80 y 90, la NIRS fue más allá al incluir los análisis de materias primas y alimentos compuestos. Esto permitió la evaluación del contenido de proteína, grasas y almidón en alimentos mezclados (Barber *et al.*, 1990). El posterior desarrollo de la quemometría amplió aún más el alcance de la técnica (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2023; Hossain *et al.*, 2024). La técnica se ha empleado también en predecir el contenido de energía en alimentos para mascotas (Hervera *et al.*, 2012).

En general, la espectroscopía en infrarrojo cercano aparece, desde entonces y hasta ahora, como una herramienta transformativa en la evaluación de alimentos, caracterizada por ser no destructiva, rápida y relativamente barata para el análisis de parámetros nutricionales (Santos *et al.*, 2022; Bagavan *et al.*, 2023). La espectroscopía de infrarrojo cercano ha transformado la producción animal al mejorar significativamente la eficiencia y economía en varios aspectos clave. A continuación, se detallan algunos impactos relevantes:

La NIRS permite analizar rápidamente el contenido nutricional de los forrajes y piensos, lo que facilita la formulación de raciones más precisas y eficientes, y decisiones acertadas en tiempo (Nipane *et al.*, 2023). Esto reduce los costos de alimentación al ajustar las cantidades de nutrientes a las necesidades específicas de los animales, lo que, por ejemplo, puede disminuir hasta un 5-10% el coste de la ración en granjas lecheras (Pereira-Crespo, 2021).

Al reemplazar métodos tradicionales de análisis químico, la NIRS reduce los costos asociados con el envío de muestras a laboratorios externos y el uso de reactivos químicos. Además, los dispositivos portátiles permiten realizar análisis en el lugar, minimizando la dependencia de servicios externos y mejorando la gestión interna de calidad (Garrido, 1996; Alessandro *et al.*, 2025; Yadav *et al.*, 2025).

La capacidad de la NIRS para proporcionar resultados rápidos (en cuestión de segundos) permite a los productores ajustar sus estrategias de alimentación y producción en tiempo real. Esto es particularmente útil para responder a cambios en el clima, el precio de los ingredientes o la calidad de los forrajes (Garrido, 1996; Amaral, 2022, Garcia y Flanagan, 2024). Puede ser efectiva incluso en aplicaciones donde la variabilidad es grande como es el caso del análisis de carnes (Lizárraga-Hernández, 2021; Xu *et al.*, 2024).

Al optimizar la formulación de raciones, se reduce la sobrealimentación y, por lo tanto, las excretas de nutrientes al medio ambiente. Esto contribuye a una menor carga ambiental y a un uso más eficiente de los recursos naturales (Pereira-Crespo, 2021; Reddy *et al.*, 2023).

En algunos casos es importante la especificidad del tipo de muestra a analizar:

Para los forrajes se requiere un enfoque especial en la predicción de parámetros como la materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutra, y digestibilidad *in vitro* (Pereira-Crespo, 2021; Alessandro *et al.*, 2025) mientras en piensos compuestos la calibración debe abarcar una amplia gama de ingredientes y nutrientes y se centra en la predicción de proteína, humedad, y otros nutrientes esenciales para el producto terminado (Bagavan *et al.*, 2023; Yadav *et al.* 2025).

Avances recientes

Equipos portables permiten análisis *in situ* de ensilajes, granos, alimentos compuestos reduciendo el uso de métodos que requieren de tiempo para tener una respuesta. La integración de NIRS con plataformas informáticas permite el almacenamiento y gestión eficiente de curvas de calibración

y ecuaciones de determinación. Esto facilita la reducción de la variabilidad de datos y mejora la precisión de los resultados al correlacionarlos con análisis húmedos y espectrales tradicionales que puedan existir (Bristy *et al.*, 2025).

Modernos algoritmos como las redes neuronales artificiales (Bandyopadhyay *et al.*, 2025) y máquinas de soporte vectorial, capacitan al sistema para trabajar con relaciones no lineales entre los datos espectrales y las propiedades químicas. Se pueden usar técnicas no lineales de calibración como las regresiones Kernel (Zhang *et al.*, 2022) y Ridge (Huang *et al.*, 2024). Se logran buenos modelos con datos con una amplia variabilidad, pero requieren de grandes volúmenes y potencia computacional para su entrenamiento (Maduro *et al.*, 2024).

Las máquinas de soporte vectorial son efectivas para problemas de clasificación y regresión no lineal. En NIRS, pueden ser útiles para modelar relaciones complejas, aunque requieren una cuidadosa selección de parámetros (Workman, 2025; Wang *et al.*, 2025).

En el último lustro, la NIRS ha sido integrada en sistemas de cría de precisión para monitorear la calidad de los alimentos en tiempo real. Equipos portables permiten el análisis in situ de ensilajes, granos y alimentos compuestos, reduciendo la dependencia de los laboratorios que consumen más tiempo (Han *et al.*, 2022; Candelaria-Carabajo, 2023).

En época relativamente reciente, se ha visto también la NIRS aplicada en autenticar ingredientes de alimentos y contaminantes. Por ejemplo, ha sido usada para diferenciar el uso de dietas basadas en pastoreo o en concentrados analizando muestras de leche y heces. (Han *et al.*, 2022; Rodríguez-Hernández *et al.*, 2023). También se ha demostrado su capacidad para predecir parámetros de significado biológico como la energía metabolizable con muy buena exactitud (Hossain *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2024).

El futuro de la NIRS en la evaluación de alimento animal descansa en su integración con análisis de *big-data* y algoritmos de aprendizaje (*machine learning*) para la creación de modelos globales que permanezcan robustos frente a diferentes tipos de alimentos. Procedimientos enriquecidos con el auge del uso de la Inteligencia Artificial como el aprendizaje profundo han ampliado la participación de la NIRS en el tratamiento de imágenes (Wang *et al.*, 2025; Workman, 2025).

Uso de la NIRS en Cuba

En Cuba, el enfoque principal ha sido en la producción y manejo de pastos y forrajes, con énfasis en la fertilización y el rendimiento de los cultivos. No se han encontrado muchos estudios específicos sobre el uso de NIRS en el país, sin embargo, la técnica es reconocida por su rapidez, confiabilidad y bajo costo, lo que la hace ideal para su implementación en programas de nutrición animal (Valenciaga y Olivera, 2006; Estupiñán *et al.*, 2021).

En la Universidad de Camagüey

Actualmente, gracias a la participación de la Universidad de Camagüey en PROLAIF, se cuenta con un equipo en las instalaciones del laboratorio de evaluación de alimento animal. Las concentraciones de los indicadores a medir son calculadas gracias al uso de calibraciones existentes en el CIRAD de Francia, y se trabaja para en algún momento, tener calibraciones propias.

CONCLUSIONES

NIRS es probablemente la espectroscopia óptica de mayor avance en las últimas décadas. Manejada apropiadamente, es la tecnología ideal para análisis rápidos. En la Producción animal puede ser utilizada para la gradación de calidad de los alimentos, formulaciones y verificación de la calidad del producto final. No se requieren habilidades especiales o preparación de muestras; los instrumentos son fáciles de operar, y los resultados están disponibles de inmediato. La preparación de la calibración, y especialmente los programas de mantenimiento de una calibración apropiada, son esenciales para asegurar resultados confiables continuos y requieren de una infraestructura de laboratorio adecuada.

En Cuba se han dado algunos pasos en la utilización de esta tecnología analítica y actualmente se trabaja por ir más allá y consolidarlos.

REFERENCIAS

- Amaral, R. (2022). Tecnología NIR: ¿Qué es, cómo funciona y cuál es su impacto en la formulación? Optimal blog, Brasil. <https://optimal.com.br/es/blog/tecnologia-nirs-que-es-como-funciona-y-cual-es-su-impacto-en-la-formulacion/>
- Bagavan, P., Narayana, K., Harani, M., & Das, T. (2023) Analysis of Feed and Fodder by Using Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). *Advance Analytical Techniques in Animal Nutrition* (pp.63-74) I Ed. Chapter: 5. AkiNik Publications. https://www.researchgate.net/publication/375910741_Analysis_of_Feed_and_Fodder_by_Using_Near_Infrared_Reflectance_Spectroscopy_NIRS
- Bandyopadhyay, R., Sing, D., Banerjee, S., Mahtab, A., Das Mahapatra, S., Ajanto & Kumar H., A. (2025) Estimation of Paracetamol in Intact Tablets Using Near-Infrared Spectroscopy and Artificial Neural Networks. *Oral conference. Roma NIR2025 Abstracts Book*. <https://nir2025.sisnir.org/wp-content/uploads/2025/05/ABSTRACT-BOOK.pdf>
- Barber, S., Lindgren, E., & Robertsson, J. (1990). Advances in forage digestibility prediction using near-infrared spectroscopy: A comparative study with traditional methods. *Journal of Animal Science*, 68(4), 1201-1210.

- Benelli, A., Primi, R., Evangelista, C., Spina, R., Milanese, M., Pietrucci, D., & Moschetti, R. (2025). Predicting Forage Nutritional Quality With Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(3), e70077. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/sae2.70077>
- Bristy, K. K., Ghosh, D., & Hashem, M. A. (2025). NIRS and machine learning algorithms as a non-invasive technique to discriminate and classify cooked broiler and duck meat. *Applied Food Research*, 5(1), 100984. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100984>
- Campos, M. (2015) Aplicación de la tecnología NIRS para la determinación de sodio y potasio en suelos. *Tesis doctoral. Facultad de ciencias, Departamento de química analítica, Universidad de Valladolid*. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/17713/TESIS722160114.pdf?sequence=1>
- Candelaria-Carbajo, M. (2023). NIRS, la solución al análisis de calidad alimentaria. *All Pet Food Magazine*. <https://allpetfood.net/entrada/nirs-la-solucion-al-analisis-de-calidad-alimentaria-54255>
- Castillo, M. S., Griggs, T. C., Digman, M. F., Vendramini, J. M., Dubeux Jr, J. C., & Pedreira, C. G. (2025). Reporting forage nutritive value using near-infrared reflectance spectroscopy. *Crop Science*, 65(3), e70063. <https://repositorio.usp.br/item/003247789>
- Catunda, K. L., Churchill, A. C., Power, S. A., & Moore, B. D. (2022). Near infrared spectroscopy calibration strategies to predict multiple nutritional parameters of pasture species from different functional groups. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 30(5), 254-263. <https://doi.org/10.1101/2021.07.31.454175>
- Estupiñán, C., Carcelén, F., Hidalgo, V., Rojas, D., Vera, O., López, S., & Bezada, S. (2021). Aplicación de la espectroscopía del infrarrojo cercano-NIRS-para determinar el valor nutritivo de variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L) y trébol rojo (*Trifolium pratense* L). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(1), NA-NA. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v32i1.19491>
- Evans, M. (2021). Near-infrared reflectance spectroscopy: The tech that's taking the guess-work out of assessing feed quality. <https://cgspace.cgiar.org/items/68e80fdd-f99f-4972-bd23-c4d8cec67c8c>
- Fan Wei Hong F., & Seng Chia K. (2021). A review on recent near infrared spectroscopic measurement setups and their challenges. *Measurement*, 171, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108732>

- Garcia, R., & Flanagan, S (2024). Optimising feed strategy with NIR technology. *An interview. AB Vista website.* <https://www.abvista.com/news/optimising-feed-strategy-with-nir-technology>
- Garrido, A., Gómez, A., Guerrero, J. E., & Fernández, V. (1996). NIRS: Una tecnología de apoyo para un servicio integral en Alimentación Animal. *XII Curso de Especialización FEDNA. Madrid.* https://fedna.bioluminas.com/wp-content/uploads/2021/11/96CAP_XIV.pdf
- Gomez, J., Barquero-Pérez, O., Gonzalo, J., Salguero, S., Riado, D., Casas, M. L., & Catalá, M. (2024). Near infrared spectroscopy (NIRS) and machine learning as a promising tandem for fast viral detection in serum microsamples: A preclinical proof of concept. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 322, 124819. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124819>
- Han, K., Pitman, B., & Alison, W. (2022). Non destructive analysis on agricultural products using near-infrared spectroscopy. <https://www.lsuagcenter.com/articles/page1663167906466>
- Hervera, M., Castrillo, C., Albanell, E., & Baucells, M. D. (2012). Use of near-infrared spectroscopy to predict energy content of commercial dog food. *Journal of animal science*, 90(12), 4401-4407. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23100585/>
- Hossain, M. E., Kabir, M. A., Zheng, L., Swain, D. L., McGrath, S., & Medway, J. (2024). Near-infrared spectroscopy for analysing livestock diet quality: A systematic review. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e4001>
- HUANG, Haowen, et al. Stacking and ridge regression-based spectral ensemble preprocessing method and its application in near-infrared spectral analysis. *Talanta*, 2024, vol. 276, p. 126242. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126242>
- Ibrahim, M., Santoso, B., & Wahyudi, A. (2023). Rapid and non-destructive prediction of animal feed nutritive parameters using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18(4). <https://doi.org/10.18280/ij dne.180422>
- Jun Zhang, Limin Dai, & Yanlong Song, Rui Zhong (contributors) (2023). Scholarly Community Encyclopedia. The Principles and Characteristics of NIR Spectroscopy. *Food Science & Technology*. <https://encyclopedia.pub/entry/41803>
- Kun-Jun, H. (2023). Nondestructive Analysis on Agricultural Products Using Near-Infrared Spectroscopy. *AgCenter, College of Agriculture Web.* <https://www.lsuagcenter.com/articles/page1663167906466>

- Lizárraga-Hernández, F., Agüero-Fernández, Y., Cortés-Jacinto, E., Vega-Villasante, F., Vargas-Ceballos, M., & Martín-Manzo, M. (2021). El uso del NIRS como alternativa viable en el análisis químico. *Recursos Naturales y Sociedad*, 7(1), 19-34. https://www.cibnor.gob.mx/revista-rns/pdfs/vol8num2/3_EL_USO.pdf
- Maduro Dias, C., Nunes, H., & Borba, A. (2024). Near-infrared spectroscopy in animal nutrition: Historical insights, technical principles, and practical applications. *Analytica*, 5(4), 481-498. <https://doi.org/10.3390/analytica5040033>
- Mendoza, P. T. D., Hurburgh, C. R., Maier, D. E., & Armstrong, P. R. (2023). NIR spectral imaging for animal feed quality and safety. *Applied Engineering in Agriculture*, 39(6), 553-564. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=54509>
- Murphy, D. J., O'Brien, B., O'Donovan, M., Condon, T., & Murphy, M. D. (2022). A near infrared spectroscopy calibration for the prediction of fresh grass quality on Irish pastures. *Information Processing in Agriculture*, 9(2), 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.012>
- Nipane, S. F., Kawitkar, S. B., Dhok, A. P., Chopade, S. V., Jawale, M. R., Lende, S. R., & Roupesh, G. (2023). NIRS: analytical tools in discernment in animal nutrition research and allied Field. *Journal of Livestock Science*, (14). <https://doi.org/10.33259/JLivestSci.2023.41-46>
- Norris, K. H., Barnes, R. F., Moore, J. E., & Shenk, J. S. (1976). Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. *Journal of animal science*, 43(4), 889-897. <https://doi.org/10.2527/jas1976.434889x>
- Pereira-Crespo, S. (2021). Las ecuaciones NIRS, nuevas alternativas de análisis para conocer la calidad de los forrajes en las ganaderías de leche. *Campo galego Xornal dixital agrario*. [https:// www.campogalego.es/las-ecuaciones-nirs-nuevas-alternativas-de-analisis- para-conocer-la-calidad-de-los-forrajes-en-las-ganaderias-de-leche/](https://www.campogalego.es/las-ecuaciones-nirs-nuevas-alternativas-de-analisis-para-conocer-la-calidad-de-los-forrajes-en-las-ganaderias-de-leche/)
- Reddy, P. B., Harani, M., Rathode, K. N., Das, T., & Namdeo, S. (2023). Analysis of Feed and Fodder by Using Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). *Técnicas analíticas avanzadas em nutrição animal*, 63-74. https://www.researchgate.net/profile/P-Reddy-31/publication/375910741_Analysis_of_Feed_and_Fodder_by_Using_Near_Infrared_Reflectance_Spectroscopy_NIRS/links/6561f0c9b86a1d521b0b1b11/Analysis-of-Feed-and-Fodder-by-Using-Near-Infrared-Reflectance-Spectroscopy-NIRS.pdf
- Rodríguez-Hernández, P., Díaz-Gaona, C., Reyes-Palomo, C., Sanz-Fernández, S., Sánchez-Rodríguez, M., Rodríguez-Estévez, V., & Núñez-Sánchez, N. (2023). Preliminary feasibility of near-infrared spectroscopy to authenticate grazing in dairy goats through

- milk and faeces analysis. *Animals*, 13(15), 2440. <https://doi.org/10.3390/ani130410417735>
- Santos, M. C., Viana, J. L., Monteiro, J. D., Freire, R. C., Freitas, D. L., Câmara, I. M., ... & Lima, K. M. (2022). Infrared spectroscopy (NIRS and ATR-FTIR) together with multivariate classification for non-destructive differentiation between female mosquitoes of *Aedes aegypti* recently infected with dengue vs. uninfected females. *Acta tropica*, 235, 106633. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2022.106633>
- Si-Ware. (2024). Comprender los principios de la espectroscopia NIR. *Sitio web* <https://www.si-ware.com/es/blogs/from-light-to-insight-grasping-the-principles-of-nir-spectroscopy>
- Skvaril, J. & Mesgarpour, M. (2025). Expanding horizons of near-infrared spectroscopy through a small domain-specific language model. Posted from: Mälardalen University - School of Business, Society and Engineering. Future Energy Center, Västerås, SWEDEN. *Roma NIR2025*. <https://nir2025.sisnir.org/wpcontent/uploads/2025/05/ABSTRACT-BOOK.pdf>
- Sun, X., Wang, S., & Jia, W. (2024). Research progress of electronic nose and near-infrared spectroscopy in meat adulteration detection. *Chemosensors*, 12(3), 35. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12030035>
- Valenciaga, D., & Saliba, E. D. O. S. (2006). La espectroscopia de reflectancia en el infrarojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(3), 259-267. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017723001.pdf>
- Wang, L., Wang, T., Dai, L., Li, F., Guo, T., Li, F., & Reshalaitihan, M. (2025). Deep learning and machine learning methods based on the NIRS dataset for rapid determination of the nutrients content and quality of oat hay. *Computers and Electronics in Agriculture*, 236, 110428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110428>
- Workman, J. (2025). The Marriage of Near-Infrared Spectroscopy with AI: The Small-Sample Breakthrough. *Spectroscopy on line*. <https://www.spectroscopyonline.com/view/the-marriage-of-near-infrared-spectroscopy-with-ai-the-small-sample-breakthrough>
- Yadav, S., Tomar, M., Singhal, T., Joshi, N., Bhargavi, H. A., Aavula, N., & Riar, A. (2025). Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS): An innovative, rapid, economical, easy and non-destructive whole grain analysis method for nutritional profiling of pearl millet genotypes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 142, 107373. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107373>
- Zhang, W., Kasun, L. C., Wang, Q. J., Zheng, Y., & Lin, Z. (2022). A review of machine learning for near-infrared spectroscopy. *Sensors*, 22(24), 9764. <https://doi.org/10.3390/s22249764>

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Concepción y diseño de la investigación: SJMS, CAOG, MLG; análisis e interpretación de los datos: SJMS, CAOG, MLG; redacción del artículo: SJMS, CAOG, MLG.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.