



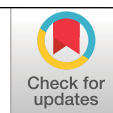


DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ PERGAMINO SECO Y ALMENDRA VERDE MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO

Claudia R. Gómez Parra *, Aristóteles Ortiz **, Jenny Paola Pabón Usaquén *,
Valentina Osorio Pérez *

Gómez, C. R., Ortiz, A., Pabón, J., & Osorio, V. (2024). Determinación del contenido de humedad del café pergamino seco y almendra verde mediante espectroscopia de infrarrojo cercano. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75203. <https://doi.org/10.38141/10778/75203>



El contenido de humedad es un parámetro físico de especial importancia, debido a que es el punto de partida para la conservación de la calidad durante la comercialización y vida útil del café. En esta investigación, se evaluó la viabilidad de la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo Cercano NIRS como una alternativa para la predicción del contenido de humedad del café pergamino seco (cps) y café almendra. La humedad se determinó por el método de referencia de acuerdo a la NTC 2325 de 2005 y las mismas muestras fueron analizadas por NIRS en un rango de longitud de onda de 400 nm a 2.490 nm. Para el desarrollo de los modelos se utilizaron 433 muestras de cps y 430 muestras de café almendra. La regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) fue la que presentó un mejor ajuste para las dos matrices de café, lo cual se evidencia por el valor de los indicadores estadísticos. Para el cps, el coeficiente de determinación de la validación cruzada (1-VR) fue de 0,91, el coeficiente de determinación de la calibración (RSQ) fue de 0,93 y el error estándar de calibración (SEC) de 0,17. Para el café almendra el 1-VR el valor fue 0,95, RSQ de 0,96 y el SEC 0,14. Con los valores obtenidos de los indicadores estadísticos de bondad puede concluirse que la técnica NIRS es una herramienta rápida, confiable y reproducible que puede ser utilizada para determinar la humedad en granos de café.

Palabras clave: Calidad del café, espectro, indicador, regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), Colombia.

DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT OF DRY PARCHMENT COFFEE AND GREEN COFFEE BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

Moisture content is a physical parameter of particular importance, as it is the starting point for quality preservation during the marketing and shelf life of coffee. In this research, the feasibility of the Near Infrared Spectroscopy technique NIRS was evaluated as an alternative for the prediction of the moisture content of dry parchment coffee (cps) and green coffee. Moisture was determined by the reference method according to NTC 2325 of 2005 and the same samples were analysed by NIRS in a wavelength range of 400 nm to 2490 nm. For the development of the models, 433 samples of cps and 430 samples of almond coffee were used. Partial least squares (PLS) regression was the best fit for the two coffee matrices, as evidenced by the value of the indicator statistics. For cps, the cross-validation coefficient of determination (1-VR) was 0.91, the calibration coefficient of determination (RSQ) was 0.93 and the standard error of calibration (SEC) was 0.17. For green coffee the 1-VR value was 0.95, RSQ was 0.96 and the SEC was 0.14. With the values obtained for the statistical indicators of goodness of fit, it can be concluded that the NIRS technique is a fast, reliable and reproducible tool that can be used to determine moisture in coffee beans.

Keywords: Coffee quality, spectrum, indicator, partial least squares (PLS) regression, Colombia.

* Asistente de Investigación e Investigador Científico I. Disciplina de Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-0685-8337>, <https://orcid.org/0000-0003-1576-2297> y <https://orcid.org/0000-0002-1166-0165>, respectivamente.

** Investigador Científico I. Disciplina de Fisiología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-3242-1948>



El contenido de humedad en el café es un parámetro esencial debido a su influencia en la vida útil, la inocuidad, la calidad sensorial y física, así como la posibilidad de comercialización. Mantener el contenido de humedad en un rango específico, como el recomendado del 10% al 12%, ayuda a preservar la frescura y calidad del café durante el almacenamiento (Oliveros et al., 2010; Puerta, 2015; Reh et al., 2006). Un alto contenido de humedad puede propiciar la proliferación de insectos (Alba-Alejandro et al., 2018; Mendoza-Cervantes et al., 2021; Valentine, 2005), hongos y la producción de micotoxinas, que son un riesgo para la salud humana; además, de generar sabores desagradables como moho, terroso y reposo, lo que afecta negativamente el sabor y la calidad del café (Escobar et al., 2020; Palacios-Cabrera et al., 2004). Por otro lado, un contenido de humedad demasiado bajo (< 9%) tampoco es favorable, puesto que los granos de café pueden volverse quebradizos, afectando las reacciones que desarrollan el aroma, al tiempo que dificulta el proceso de tueste y, en consecuencia, la calidad sensorial (Osorio, 2021; Pabón & Osorio, 2019).

Existen diferentes métodos para realizar la determinación de la humedad, los directos como los estandarizados con normas de referencia (ISO 1446, ISO 1447 e ISO 6673), que permiten una determinación cuantitativa del agua a través de la pérdida de masa o cantidad de agua obtenida. Los químicos, basados en la reacción del agua principalmente con carburo de calcio o hidruro de calcio, los cuales requieren mayor tiempo (Morgano et al., 2008). Y otros métodos indirectos, que se basan principalmente en la reacción de las moléculas del agua a una influencia física como es el caso de la resonancia magnética nuclear de baja resolución, la espectroscopia de microondas y la espectroscopia de infrarrojo cercano

(NIRS) (Büning-Pfaue, 2003; Morgano et al., 2008; Patiño-Velasco et al., 2016).

La espectroscopia de infrarrojo cercano NIRS (por sus siglas en inglés), ha sido un método utilizado para la evaluación de la calidad, composición química y características físicas, como la determinación de humedad en diferentes productos agrícolas. Heman & Hsieh (2016) determinaron el contenido de humedad en arroz, desarrollaron un modelo de calibración con la regresión lineal mínimos cuadrados parciales – PLSR y obtuvieron un error estándar de calibración (SEC) de 1,30 y el error estándar de predicción de 2,51. Hayati et al. (2021) desarrollaron un modelo de predicción en cacao, para determinar el contenido de humedad, reportando que la regresión PLSR fue la que presentó un mejor resultado con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,81 y un error medio cuadrático de predicción de 0,41. En espárragos, Flores (2009) desarrolló un modelo para la determinación de la calidad de la textura en este producto, aplicó la regresión de mínimos cuadrados parciales modificados-MPLS, con valores de R^2 de 0,55 y un error estándar de validación cruzada de 7,81. En términos generales, las ventajas que mencionan del NIRS es la rapidez del análisis, la confiabilidad, no requerir de preparación de la muestra, ni se utilizan reactivos químicos; lo que la hace una técnica sostenible ambientalmente, además es un método multianalítico, es decir, que puede realizar múltiples determinaciones de propiedades físicas y químicas simultáneamente (Büning-Pfaue, 2003; Morgano et al., 2008; Patiño-Velasco et al., 2016).

Específicamente en café se encuentran diferentes trabajos referenciados utilizando la técnica NIRS para la evaluación de la calidad sensorial, ya sea por el puntaje total de catador o la predicción de atributos, como la acidez, el cuerpo, el dulzor o defectos sensoriales

(Baqueta et al., 2019; Craig et al., 2014; Ribeiro et al., 2011), determinación de compuestos químicos como cafeína, lípidos, sacarosa y ácidos clorogénicos totales (Gallignani et al., 2008; Gómez et al., 2021; Llano Suárez, 2016; Vigo et al., 2022), en la identificación de adulteraciones o mezclas de café (Buratti et al., 2015; Ebrahimi-Najafabadi et al., 2012; Ribeiro et al., 2014), para la identificación del origen o zona de producción del café (Gómez et al., 2022; Siregar et al., 2020) y para la determinación de propiedades físicas como el contenido de humedad para el café almendra de diferentes especies como *Coffea liberica*, *C. arabica* y *C. canephora* (Adnan et al., 2017; Caporaso et al., 2018; Kyaw et al., 2020).

La tecnología NIRS consiste en la emisión de un haz de luz sobre la muestra. Dependiendo de la naturaleza de ésta y de los enlaces presentes en sus moléculas, principalmente los de tipo -CH, -NH, -OH y -CO, la radiación interactúa con dichos enlaces, provocando la absorción de una cantidad específica de radiación en la región NIR (Gómez et al., 2023; Shenk & Westerhaus, 1994). Las bandas de absorción en los espectros presentan diferentes intensidades, las cuales pueden clasificarse como fuertes, medias, débiles, anchas o agudas (Valenciaga & Saliba, 2006).

La información espectral se repite a lo largo de todo el espectro electromagnético; sin embargo, se ha identificado que las señales de las bandas tienden a debilitarse en orden de magnitud. Por ejemplo, en la región visible, de 400 a 800 nm, las intensidades de las bandas son considerablemente más débiles en comparación con las de la región cercana al infrarrojo (NIR), que abarca de 800 a 2.500 nm (Osborne et al., 1993). Esta tecnología se fundamenta en la ley de Lambert-Beer, la cual establece que el valor de absorbancia obtenido de una muestra, cuando esta tiene la capacidad de

absorber radiación en la región NIR, es directamente proporcional a la concentración del analito (Gómez et al., 2023; Shenk & Westerhaus, 1994).

El agua es un fuerte absorbente en el infrarrojo (IR), debido a su capacidad para asociarse intensamente con iones, monómeros orgánicos y polímeros mediante enlaces de hidrógeno. Por esta razón, las bandas de absorción del agua en el espectro de infrarrojo cercano (NIR) están influenciadas por los efectos de los solutos presentes en el agua. Se ha identificado que las bandas o sobretonos dominantes, amplios y cercanos a 1.440 y 1.930 nm, observados en casi todos los espectros NIRS, se deben principalmente al agua (Büning-Pfaue, 2003). En el caso del café, algunas estructuras químicas específicas han sido asignadas a bandas de absorción en el espectro NIR. Por ejemplo, el agua presenta una fuerte absorción en la región de 1.900 a 1.950 nm y, con menor intensidad, en torno a 1.400 nm. La cafeína muestra absorciones características entre 1.650 y 1.750 nm, con una intensidad reducida alrededor de 1.100 nm, mientras que los lípidos presentan bandas en el rango de 2.100 a 2.150 nm (Barbin et al., 2014; Corti et al., 1991; Cozzolino et al., 2006).

En esta investigación se evaluó la técnica NIRS como una alternativa para determinar el contenido de humedad del café almendra y el café pergamino seco, a partir del desarrollo de modelos de calibración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron por la técnica NIRS, 863 muestras de café en dos matrices, 433 muestras en pergamino seco-cps y 430 muestras de café almendra sana, especie *Coffea arabica* L., provenientes de los departamentos de Caldas, Cauca, Nariño y Tolima. La preparación de

las muestras consistió básicamente en la trilla y análisis físico separando la almendra defectuosa y la almendra sana.

Determinación de humedad

La determinación del contenido de humedad, en las dos matrices de café (almendra y cps), se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana 2325 de 2005 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2005). Se pesaron $10 \pm 0,05$ gramos de café para cada una de las matrices evaluadas, utilizando cajas de Petri de 35 x 10 mm, a las cuales se les tomó el peso inicial. La estufa utilizada fue la VWR 1370GM de convección calibrada a una temperatura de 105°C, el tiempo de secado fue de $16 \pm 0,5$ horas, una vez cumplido el tiempo, las muestras fueron dispuestas en desecadores por una hora, para su posterior pesaje, el cual se realizó en una balanza analítica Mettler Toledo AB-S/FACT, con una precisión de 0,01 mg; se realizó por duplicado la determinación del contenido de humedad, para cada una de las muestras analizadas. El valor de referencia utilizado para el modelo es el resultado del promedio de las dos repeticiones.

El contenido de humedad se determinó a partir de la diferencia del peso del café húmedo (antes de colocarlo en la estufa) y peso del café seco (después de transcurrido el tiempo en la estufa), como se observa en la Ecuación <1>:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad <1>$$

Donde:

W_1 = peso inicial del café

W_2 = peso del café después de secado

Técnica Espectroscopia de Infrarrojo cercano - NIRS

El equipo utilizado fue el NIRS XDS RCA (2012) de FOSS, ubicado en el laboratorio de instrumental de Cenicafé. Las muestras fueron analizadas en un rango de longitud de onda del 400 – 2.490 nanómetros. Se pesaron 110 gramos por cada matriz de café (pergamino seco -cps y almendra); las muestras fueron colocadas en celdas para reflectancia de transporte rectangular de 16 cm de largo, 5 cm de ancho y 5 cm de alto; las muestras fueron analizadas por duplicado. Para el análisis de la información espectral y el desarrollo de los modelos predictivos se utilizó el software WinISI (versión 4 Foss Infrasoftware International, USA) incorporado en el equipo. Se analizaron 863 muestras, se obtuvieron 1.726 espectros, los cuales fueron promediados para el posterior análisis de la información y desarrollo de los modelos de calibración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo de los modelos de calibración

En los sobretonos del enlace OH (color negro), en ambas matrices, se observaron incrementos en los valores de la absorbancia (Figura 1), con valores que concuerdan con los sobretonos de la molécula de H₂O reportada en la región NIRS de 1.440 nm y 1.930 nm y 1.950 nm (Barbin et al., 2014; Büning-Pfaue, 2003; Osborne et al., 1993). Al comparar la tendencia de la absorbancia se observa que el café almendra presentó valores más altos a lo largo de toda la longitud de onda respecto al cps (Figura 1).

En cuanto al café almendra, los valores de absorbancia obtenidos en este estudio (Tabla 1) son consistentes con los reportados por Adnan et al. (2017), quienes identificaron el mayor pico de absorbancia en 1.930 nm. Estos autores también observaron valores más elevados de

absorbancia (1.611nm) en muestras de café con niveles de humedad superiores al 12%. Por su parte, Reh et al. (2006) señalaron que el máximo punto de absorbancia ocurre en 1.940 nm, atribuyendo la eficacia de la técnica NIRS para la determinación de humedad a la alta sensibilidad de la molécula de agua a la luz infrarroja. Esto ha permitido identificar con precisión la región de sobretono entre 1.900 y 1.950 nm (Büning-Pfaue, 2003; Reh et al., 2006).

Tabla 1. Mayor valor de absorbancia media por rango de humedad en cps y almendra.

| Humedad (%) | cps Absorbancia (1.920 nm) | Almendra Absorbancia (1.930 nm) |
|-------------|----------------------------|---------------------------------|
| < 8,9 | 1 .023 | 1 .301 |
| 9,0–9,9 | 1 .014 | 1 .284 |
| 10,0–10,9 | 1 .032 | 1 .282 |
| 11,0- 11,9 | 1 .050 | 1 .273 |
| >12,0 | 1 .048 | 1 .299 |

Posteriormente se realizó el análisis de componentes principales –PCA, el cual

permitió identificar las muestras anómalas (*outlier*) las cuales presentaron un valor de distancia Mahalamobis >3. Para las muestras de cps se identificaron 14 y cuatro para el café almendra, estas muestras fueron eliminadas del colectivo de calibración; para garantizar que el grupo de muestras con el cual se desarrolló el modelo tuviera las características requeridas (Figura 2).

Para el desarrollo de los modelos de calibración de café cps y almendra, se separaron las muestras en dos grupos, el primero con el mayor número de muestras se utilizó para desarrollar el modelo, y el segundo se reservó para realizar la validación cruzada. Los valores de humedad de las muestras utilizadas oscilaron entre 8,1% y 17,6%.

Para el modelo de **café pergamino seco**, del total de 433 muestras analizadas, se excluyeron 14 *outliers*, quedando un total de 419 muestras válidas. De estas, 341 se utilizaron para el desarrollo del modelo y 78 para la validación cruzada (22%). El modelo se construyó mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), aplicando

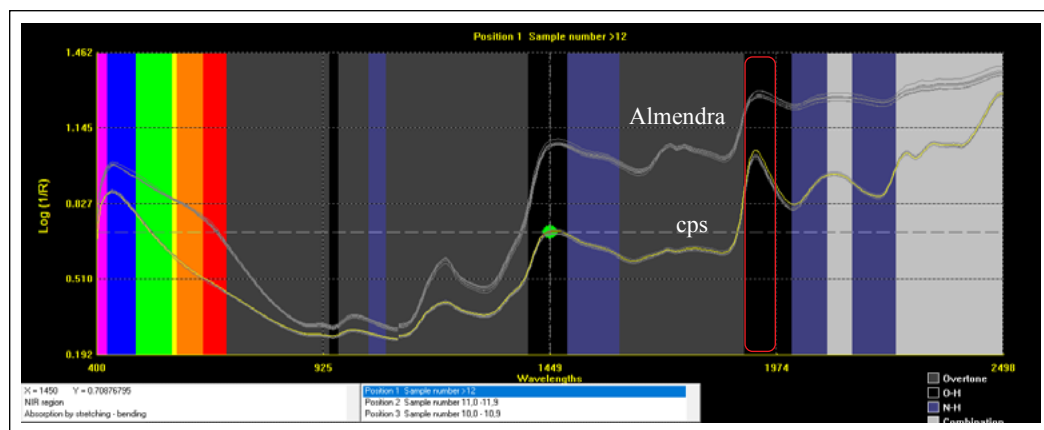


Figura 1. Absorbancia media por contenido de humedad respecto a la longitud de onda para cps y almendra sana.

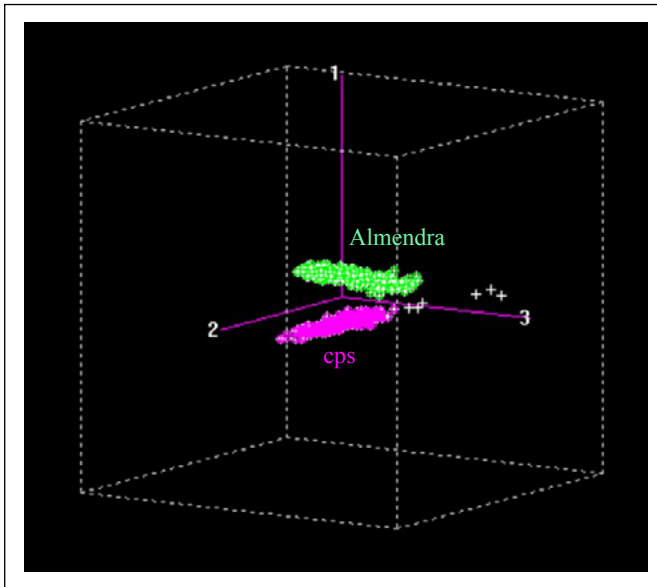


Figura 2. Box Plot del análisis de componentes principales PCA, café pergamino seco – cps y almendra.

la corrección *scatter* de los espectros mediante la técnica *Scale and Quadratic*, lo que permitió obtener los mejores resultados (Tabla 3). Entre los parámetros más destacados, se encontró el coeficiente de determinación de la validación cruzada (1-VR), cuyo valor fue de 0,91. Este coeficiente, que debe ser cercano a uno, indica la proporción de los constituyentes explicados por el modelo. Así mismo, el coeficiente de determinación de calibración (R^2), que refleja la correlación entre los datos de referencia y los predichos por el equipo, obtuvo un valor de 0,92, indicando una alta precisión del modelo, siendo el valor ideal cercano a uno. El error estándar de calibración (SEC), que mide la diferencia media entre los valores de referencia y los predichos, fue de 0,17, mientras que la desviación estándar (SD) fue de 0,64. Estos resultados reflejan la solidez y fiabilidad del modelo desarrollado para la predicción de la humedad en café pergamino seco.

Para el modelo de **café almendra**, del total de 430 muestras analizadas, se excluyeron cuatro *outliers*, quedando un

total de 426 muestras válidas. De estas, 349 se utilizaron para desarrollar el modelo, mientras que las 77 restantes (22%), se emplearon para su validación. El modelo se construyó utilizando regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y aplicando la corrección *scatter* de los espectros mediante la técnica *Derivative Scale and Offset*. Los indicadores estadísticos obtenidos fueron altamente satisfactorios. El coeficiente de variación (1-VR) fue de 0,95, y el coeficiente de determinación (R^2) alcanzó un valor de 0,96, lo que indica una alta correlación entre los datos de referencia y los predichos por el equipo. Además, el error estándar de calibración (SEC) fue de 0,14, y la desviación estándar (SD) fue de 0,70 (Tabla 2). De acuerdo con Fonseca (2012) y Shenk & Westerhaus (1994), una calibración se considera excelente cuando el valor del coeficiente de variación (1-VR o R^2) supera 0,90. En este caso, los resultados obtenidos en los modelos desarrollados superaron ampliamente este umbral, destacando la alta precisión y robustez del modelo.

Tabla 2. Indicadores estadísticos del modelo desarrollado para la determinación de humedad de café.

| Matriz de café | SD | Estimado Mínimo | Estimado Máximo | SEC | RSQ | SECV | 1-VR |
|----------------|------|-----------------|-----------------|------|------|------|------|
| cps | 0,64 | 8,90 | 12,72 | 0,17 | 0,93 | 0,19 | 0,91 |
| Almendra | 0,69 | 9,09 | 13,21 | 0,14 | 0,96 | 0,16 | 0,95 |

SD, desviación estándar; SEC, error estándar de calibración; RSQ, coeficiente de determinación de la calibración; SECV, error estándar de validación cruzada; 1-VR, determinación de la validación cruzada.

Los indicadores estadísticos obtenidos en los modelos de calibración desarrollados para las dos matrices de café evaluadas, permiten establecer que la Técnica NIRS es adecuada para la determinación de humedad. Para confirmar el resultado de los modelos de calibración se realiza la validación cruzada, la cual permite evaluar el desempeño de los modelos.

Validación cruzada

Para el **café pergamino seco**, la validación cruzada se realizó utilizando las 78 muestras. Los resultados estadísticos obtenidos, que se detallan en la Tabla 5, muestran una diferencia de 0,054 entre los valores reportados por el modelo y los valores de referencia (BIAS). Además, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,92, con una correlación de 0,94. En la Figura 4 se observa la relación entre los valores de referencia y los predichos por el modelo. Es importante resaltar que el modelo desarrollado para la predicción de humedad en café pergamino seco mediante NIRS representa una alternativa eficaz para complementar la función multianalítica de esta técnica. Cabe destacar que la mayoría de los trabajos referenciados están relacionados con las propiedades físicas en la matriz de almendra sana.

Para el **café almendra**, la validación cruzada se realizó con un grupo de 77 muestras. En este

caso, la diferencia entre la predicción del modelo y los valores de referencia (BIAS) fue de 0,01, y el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,95. En la Tabla 5 se presentan los indicadores de bondad obtenidos al realizar la validación. Las Figuras 3 y 4 muestran la relación entre los valores de referencia (determinados en el laboratorio) y los valores predichos por el modelo NIRS, evidenciando la excelente calibración de los modelos desarrollados para la determinación de humedad tanto en café pergamino seco como en café almendra.

Los resultados obtenidos en esta investigación, específicamente en el desarrollo de los modelos (Tabla 3), coinciden con los reportados por diversos autores, quienes han demostrado que la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) es la técnica que ofrece los mejores resultados para el desarrollo de modelos de predicción de humedad en café. Por ejemplo, Adnan et al. (2017) desarrollaron un modelo de predicción para café almendra verde utilizando 108 muestras, con un rango de humedad entre 7% y 22% y un R^2 de 0,97. Morgano et al. (2008) desarrollaron un modelo con 157 muestras de café almendra, con un rango de humedad entre 7% y 12%, reportando un R^2 de 0,82. Caporaso et al. (2018) utilizaron 350 muestras de café, con un rango de humedad entre 7% y 12%, obteniendo un R^2 de 0,96. Por último, Escobar et al. (2020) utilizaron

Tabla 3. Indicadores estadísticos de la validación cruzada para café pergamino seco y café almendra.

| Indicadores estadísticos | Café pergamino seco - cps Valores | Café almendra valores |
|---|--|----------------------------------|
| No. de muestras | 78 | 77 |
| Pendiente | 0,94 | 0,91 |
| Intercepto | 0,61 | 0,94 |
| Bias | 0,05 | 0,01 |
| Error estándar de calibración (SEC) | 0,19 | 0,17 |
| Error estándar de predicción (SEP) | 0,20 | 0,18 |
| Error estándar de predicción Corregido– SEP(C) | 0,19 | 0,18 |
| Coefficiente de determinación (RSQ) | 0,92 | 0,95 |
| Promedio–Predicción | 10,78 | 11,01 |
| Promedio – valor de referencia | 10,72 | 11,09 |
| Desviación estándar (SD) de predicción | 0,69 | 0,80 |
| Desviación estándar SD de valor de referencia | 0,67 | 0,79 |

100 muestras, con un rango de humedad similar y un R^2 de 0,99. Estos resultados confirman que la técnica de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) es una herramienta confiable para determinar el contenido de humedad en café pergamino seco y café almendra.

En este estudio, se evaluó la técnica NIRS y se desarrollaron modelos de calibración para la determinación de la humedad en

café pergamino seco y café almendra. Los resultados obtenidos mostraron indicadores estadísticos sólidos que respaldan la alta confiabilidad, precisión y reproducibilidad de esta técnica. Estos hallazgos posicionan a la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) como una herramienta altamente eficaz para la medición de humedad en café, con un gran potencial para su implementación en procesos de control de calidad y en la industria del café en general.

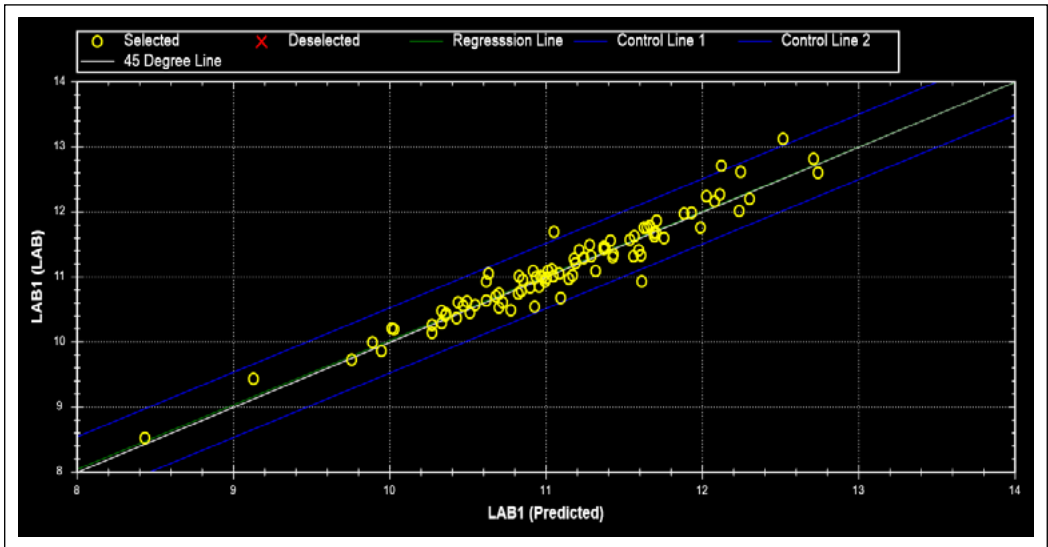


Figura 3. Relación de los valores de referencia respecto a los predichos por el modelo para café pergamino seco - cps.

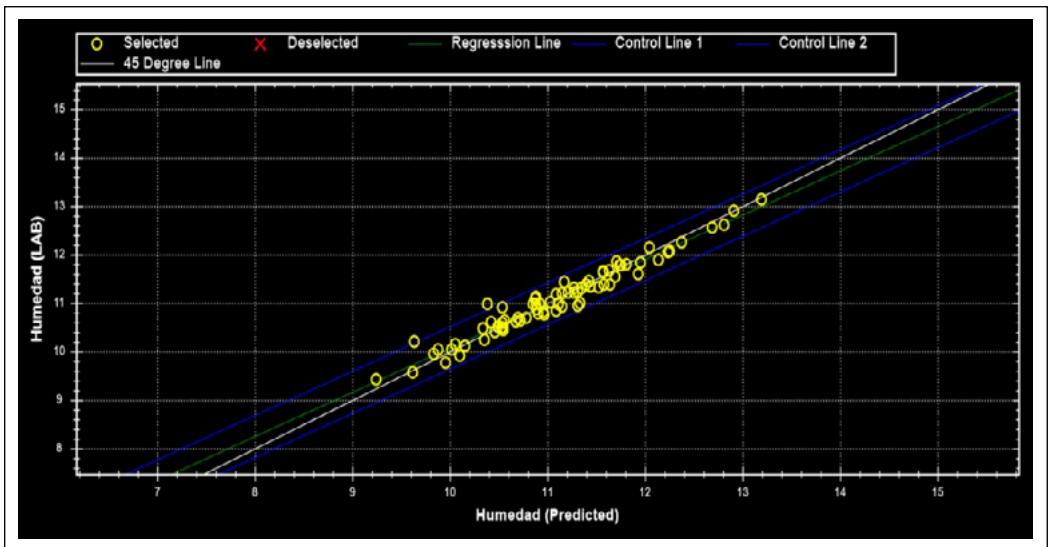


Figura 4. Relación de los valores de referencia respecto a los predichos por el modelo para café almendra.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Álvaro Gaitán Director de Cenicafé, Gerencia Técnica, en la Disciplina de Calidad Paola Calderón, Wilson Vargas, Víctor Castañeda; en Almacafé a Fernando Osorio Director de calidad, y al personal del apoyo Anderson Arias. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto número CAL1010007.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Administración de proyecto, Curación de datos, Metodología, Análisis formal, Redacción - borrador original: **CRG**; Curación de datos, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición: **AO, JP, y VO**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Alba-Alejandre, I., Alba-Tercedor, J., & Vega, F. E. (2018). Micro-CT to Document the Coffee Bean Weevil, *Araecerus fasciculatus* (Coleoptera: Anthribidae), Inside Field-Collected Coffee Berries (*Coffea canephora*). *Insects*, 9(3), 100. <https://doi.org/10.3390/insects9030100>
- Adnan, A., Hörsten, D. V., Pawelzik, E., & Mörlein, A. D. (2017). Rapid Prediction of Moisture Content in Intact Green Coffee Beans Using Near Infrared Spectroscopy. *Foods*, 6(5), 38. <https://doi.org/10.3390/foods6050038>
- Baqueta, M. R., Coqueiro, A., & Valderrama, P. (2019). Brazilian Coffee Blends: A Simple and Fast Method by Near-Infrared Spectroscopy for the Determination of the Sensory Attributes Elicited in Professional Coffee Cupping. *Journal of Food Science*, 84(6), 1247–1255. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14617>
- Barbin, D. F., Felicio, A. L. D. S. M., Sun, D.-W., Nixdorf, S. L., & Hirooka, E. Y. (2014). Application of infrared spectral techniques on quality and compositional attributes of coffee: An overview. *Food Research International*, 61, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.005>
- Büning-Pfaue, H. (2003). Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 82(1), 107–115. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00583-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00583-6)
- Buratti, S., Sinelli, N., Bertone, E., Venturello, A., Casiraghi, E., & Geobaldo, F. (2015). Discrimination between washed *Arabica*, natural *Arabica* and *Robusta* coffees by using near infrared spectroscopy, electronic nose and electronic tongue analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(11), 2192–2200. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6933>
- Caporaso, N., Whitworth, M. B., Grebby, S., & Fisk, I. D. (2018). Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 227, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.009>
- Corti, P., Dreassi, E., Ceramelli, G., Lonardi, S., Viviani, R., & Gravina, S. (1991). Near infrared reflectance spectroscopy applied to pharmaceutical quality control. Identification and assay of cephalosporins. *Analisis*, 19(7), 198–204.
- Cozzolino, D., Fernández, E., Restaino, E., & La Manna, A. (2006). Determinación de la composición química de heno mediante la espectrofotometría en el infrarrojo cercano [NIRS]. *Revista argentina de producción animal*, 26(3), 203–209. <http://www.aapa.org.ar/rapa/26/3/003-PP-Cozzolino.pdf>
- Craig, A. P., Franca, A. S., Oliveira, L. S., Irudayaraj, J., & Illeleji, K. (2014). Application of elastic net and infrared spectroscopy in the discrimination between defective and non-defective roasted coffees. *Talanta*, 128, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.05.001>
- Ebrahimi-Najafabadi, H., Leardi, R., Oliveri, P., Chiara Casolino, M., Jalali-Heravi, M., & Lanteri, S. (2012). Detection of addition of barley to coffee using near infrared spectroscopy and chemometric techniques. *Talanta*, 99, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.05.036>
- Escobar, M., Torres, A., & Rodriguez, N. J. M. (2020). Non-Destructive Prediction of Moisture Content of Philippine *Coffea arabica* and *Coffea liberica* Green Beans Using Locally-Developed NIR Spectroscopy Instrument. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 18(2),

- 208–223. <https://mjst.ustp.edu.ph/index.php/mjst/article/view/544>
- Flores, K. U. (2009). *Determinación no destructiva de parámetros de calidad de frutas y hortalizas mediante espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano* [Tesis de Doctorado, Universidad de Córdoba]. <http://hdl.handle.net/10396/2070>
- Fonseca, I. (2012). *Caracterización y tratamiento de la señal espectroscópica NIRS obtenida in-situ/on-line, para el desarrollo de modelos quimiométricos y su aplicación en la valoración nutritiva del ensilado de maíz* [Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/4240>
- Galignani, M., Torres, M., Ayala, C., & Brunetto, M. del R. (2008). Determination of Caffeine in Coffee by Means Fourier Transform Infrared Spectrometry. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 31(2), 159–168. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/6302>
- Gómez, C. R., Gallego, C. P., Echeverri, L. F., Pabón, J., Ortiz, A., & Osorio, V. (2023). Determinación de compuestos químicos del café tostado por Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIRS). *Revista Cenicafé*, 74(1), e74104. <https://doi.org/10.38141/10778/74104>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., Gallego, C., & Echeverri, L. F. (2021). Validación de curvas de calibración por NIRS para la predicción de compuestos químicos de café almendra. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72204. <https://doi.org/10.38141/10778/72204>
- Gómez, C. R., Ortiz, A., & Osorio, V. (2022). Predicción del origen regional del café de Colombia a partir de la técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano—NIRS. *Revista Cenicafé*, 73(2), e73205. <https://doi.org/10.38141/10778/73205>
- Hayati, R., Zulfahrizal, Z., & Munawar, A. A. (2021). Robust prediction performance of inner quality attributes in intact cocoa beans using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Heliyon*, 7(2), e06286. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06286>
- Heman, A., & Hsieh, C.-L. (2016). Measurement of moisture content for rough rice by visible and near-infrared (NIR) spectroscopy. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(3), 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.02.002>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). *NTC 2325:2005 Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105°C*. <https://tienda.icontec.org/gp-cafe-verdedeterminacion-de-la-perdida-de-masa-a-105-c-ntc2325-2005.html>
- Kyaw, E. M., Budiastra, I. W., Sutrisno, & Samsudin. (2020). Estimation of moisture content in Liberica coffee by using near infrared spectroscopy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 542(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012013>
- Llano Suárez, P. (2016). *Desarrollo y Validación de Modelos Quimiométricos Cuantitativos para la Predicción del Perfil de Ácidos Grasos en Leche* [Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/39005>
- Mendoza-Cervantes, G., Guzmán-López, O., & Salinas-Castro, A. (2021). Manejo de la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), con atrayentes etanólicos en cultivos de café de Coatepec, Veracruz, México. *Revista Chilena de Entomología*, 47(2), 265–273. <https://doi.org/10.35249/rche.47.2.21.14>
- Morgano, M. A., Faria, C. G., Ferrão, M. F., Bragagnolo, N., & Ferreira, M. M. D. C. (2008). Determinação de umidade em café cru usando espectroscopia NIR e regressão multivariada. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(1), 12–17. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000100003>
- Oliveros, C. E., Lopez, L., Buitrago, C. M., & Moreno, E. L. (2010). Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. *Revista Cenicafé*, 61(2), 108–118.
- Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis* (2nd ed). Longman Scientific & Technical.
- Osorio, V. (2021). La calidad del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 219–234). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- Pabón, J., & Osorio, V. (2019). Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila* (pp. 162–187). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0005_7
- Palacios-Cabrera, H., Taniwaki, M. H., Menezes, H. C., & Iamanaka, B. T. (2004). The production of ochratoxin A by *Aspergillus ochraceus* in raw coffee at different equilibrium relative humidity and under alternating

- temperatures. *Food Control*, 15(7), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2003.08.006>
- Patiño-Velasco, M. M., Pencue Fierro, E. L., & Vargas Cañas, R. (2016). Determinación del contenido de humedad en granos de café pergamino seco utilizando speckle dinámico. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 84–91. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)84-91](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)84-91)
- Puerta, G. I. (2015). Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: fermento, reposado, fenólico y mohoso. *Avances Técnicos Cenicafé*, 461, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0461>
- Reh, C., Gerber, A., Prodolliet, J., & Vuataz, G. (2006). Water content determination in green coffee – Method comparison to study specificity and accuracy. *Food Chemistry*, 96(3), 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.055>
- Ribeiro, B. B., Mendonça, L. M. V. L., Assis, G. A., Mendonça, J. M. A., Malta, M. R., & Montanari, F. F. (2014). Avaliação química e sensorial de blends de *Coffea canephora* Pierre e *Coffea arabica* L. *Coffee Science*, 9(2), 178–186. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/coffeescience/article/view/596>
- Ribeiro, J. S., Ferreira, M. M. C., & Salva, T. J. G. (2011). Chemometric models for the quantitative descriptive sensory analysis of Arabica coffee beverages using near infrared spectroscopy. *Talanta*, 83(5), 1352–1358. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.11.001>
- Shenk, J. S., & Westerhaus, M. O. (2015). The Application of near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) to Forage Analysis. En G. C. Fahey (Ed.), *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (pp. 406–449). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c10>
- Siregar, S. D., Rindang, A., & Ayu, P. C. (2020). Principle Component Analysis (PCA)—Classification of Arabica green bean coffee of North Sumatera Using FT–NIRS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 454(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/454/1/012046>
- Valenciaga, D., & Saliba, E. (2006). La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(3), 259–267. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017723001>
- Valentine, B. D. (2005). The scientific name of the coffee bean weevil and some additional bibliography (Coleoptera: Anthribidae: *Araecerus* Schönherr). *Insecta Mundi*, 19(4), 247–254. <https://digitalcommons.unl.edu/insectamundi/98/>
- Vigo, A., Latorre, M. Á., & Ripoll, G. (2022). Espectroscopia en el infrarrojo cercano por transmitancia y reflectancia para la predicción de la composición química de cereales en grano y molidos. *Información Técnica Económica Agraria*, 118(4), 565–579. <https://doi.org/10.12706/itea.2022.001>