

Predicción no destructiva de sólidos solubles, acidez y pH de aguaymanto (*Physalis peruviana* L) mediante propiedades dieléctricas en el rango de microondas

Non-destructive prediction of soluble solids, acidity and pH of aguaymanto (*Physalis peruviana* L) using dielectric properties in the microwave range

Tony Chuquizuta^{1,a,*}, Lesly Díaz^{1,b}, Tatiana Mego^{1,c}, Hubert Arteaga^{2,d}, Wilson Castro^{3,e}

¹ Instituto de investigación del Mejoramiento Productivo, Universidad Nacional Autónoma de Chota, Perú.

² Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de Jaén, Carretera Jaén-San Ignacio, Km 24-Sector Yanuyacu, Jaén, Cajamarca, Perú.

³ Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

^a M.Sc., ✉ tchuquizuta@unach.edu.pe,  <https://orcid.org/0000-0003-3447-6296>

^b Bach., ✉ ldiazrafael97@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0001-2913-9976>

^c Bach., ✉ tatianamego1998@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0002-0333-1473>

^d Dr., ✉ hubert.arteaga@unj.edu.pe,  <https://orcid.org/0000-0003-1425-3757>

^e Dr., ✉ ing.wilsoncastro@hotmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-7286-1262>

* Autor de Correspondencia: Tel. +51 969637172

<http://doi.org/10.25127/riagrop.20234.935>

<http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/RIAGROP>
revista.riagrop@untrm.edu.pe

Recepción: 11 de julio 2023

Aprobación: 15 de agosto 2023

Este trabajo tiene licencia de Creative Commons.
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0
International Public License – CC-BY-NC-SA 4.0



Resumen

La investigación tuvo como objetivo predecir los sólidos solubles, acidez y pH de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) mediante la técnica de espectroscopía dieléctrica en el rango de microondas. Las propiedades dieléctricas (constante dieléctrica – ϵ') de los frutos de aguaymanto se midieron en una escala logarítmica de 0.5 a 9 GHz a 20 °C, mediante una sonda coaxial abierta conectado a un analizador vectorial de redes, además, se determinó los sólidos solubles, acidez y pH. Los resultados mostraron que los valores medios de los espectros de la constante dieléctrica de los frutos de aguaymanto disminuyó a medida que aumentaba la frecuencia de 0.5 a 9 GHz, asimismo, los valores de sólidos solubles aumentaron de 13.493 a 14.850 °Brix, la acidez disminuyó de 2.842 a 2.120 y el pH aumentó de 3.468 a 3.663. Los mejores modelos de predicción para los sólidos solubles a

915 MHz con $R^2=0.7760$ y $RECM=0.5185$, la acidez a 5800 MHz con $R^2=0.4790$ y $RECM=0.2391$ y el pH a 2450 MHz con $R^2=0.9994$ y $RECM=0.0221$.

Palabras claves: calidad; sólidos solubles; constante dieléctrica; microondas; aguaymanto.

Abstract

The objective of the research was to predict the soluble solids, acidity and pH of the fruits of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) using the dielectric spectroscopy technique in the microwave range. The dielectric properties (dielectric constant – ϵ') of the aguaymanto fruits were measured on a logarithmic scale from 0.5 to 9 GHz at 20 °C, using an open coaxial probe connected to a vector network analyzer, in addition, the soluble solids were determined, acidity and pH. The results showed that the average values of the dielectric constant spectra of the aguaymanto fruits decreased as the frequency increased from 0.5 to 9 GHz, likewise, the values of soluble solids increased from 13.493 to 14.850 °Brix, the acidity decreased from 2.842 to 2.120 and the pH increased from 3.468 to 3.663. The best prediction models for soluble solids at 915 MHz with $R^2=0.7760$ and $RECM=0.5185$, acidity at 5800 MHz with $R^2=0.4790$ and $RECM=0.2391$ and pH at 2450 MHz with $R^2=0.9994$ and $RECM=0.0221$.

Keywords: Quality; soluble solids; dielectric constant; microwave; goldenberry.

1. INTRODUCCIÓN

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) es un fruto exótico, oriundo de la región andina del Perú, con características fisicoquímicas de: humedad (78.2 – 80%), sólidos solubles (11.6 – 13.5 °Brix), pH (3.6 – 4.9) y acidez (1.6 – 2.4), en los estadios de madurez 3, 4, 5 y 6 según la NTC 4558 (Duque *et al.*, 2011; Márquez *et al.*, 2009; Mendoza *et al.*, 2012; Novoa *et al.*, 2006; Augusto-Elías-Peñañiel *et al.*, 2021; Rossi *et al.*, 2012). Asimismo, diversos estudios manifiestan que el consumo de aguaymanto provee de vitaminas A, B y C, carotenoides, compuestos fenólicos y fibra dietética, los mismos que, previenen enfermedades como el cáncer, diabetes, inflamaciones y del corazón (Málaga *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.*, 2009; Rosssi *et al.*, 2012).

Los beneficios reportados por el consumo de aguaymanto, han incentivado a los agricultores de zonas rurales a cultivar de manera intensiva

dicho fruto, permitiendo dinamizar su microeconomía rural (Sierra y Selva Exportadora, 2021). En el año 2019, Perú alcanzó 1607 t de aguaymanto fresco, reflejando un incremento de 3.47% respecto al año anterior. En el 2020 el volumen total de aguaymanto exportado fue 288 t (82% aguaymanto orgánico y el 18% convencional) a mercado estadounidenses y europeos, cuyas presentaciones fueron: aguaymanto deshidratado (92.6%), fresco (2.1%), congelado (1.65%), con chocolate (1.2%), puré (0.8%) y polvo (0.8%) (Diario- El Peruano, 2023; León Carrasco, 2021).

En vista del incremento de la producción de aguaymanto, los agricultores y las micro empresas dedicadas a la comercialización interna y externa de aguaymanto, vienen realizando el control de calidad de los frutos a partir de sus características fisicoquímicas (acidez, sólidos solubles, pH, color y otros)

(López *et al.*, 2005). Actualmente, la calidad de los frutos de aguaymanto vienen siendo determinados a partir de sus parámetros fisicoquímicos mediante el uso de métodos - técnicas convencionales como penetrometría, refractometría, volumetría, colorimetría, entre otras (Cazar, 2006), que si bien son precisas y replicables, presentan las desventajas de ser destructivas, tediosas, costosas, necesitan de pre procesamiento - acondicionamiento de muestras, son generadores de desechos químicos y no son capaces de ser instaladas en líneas de producción (Breznes-Llecha, 2000; Reyes, 2018). Es por ello, que la industria frutícola, en especial la del aguaymanto, demandan de métodos y técnicas no destructivas, precisas y rápidas en la toma de decisiones, permitiendo mejorar y dinamizar el control de calidad.

Diversos esfuerzos realizados por investigadores en el desarrollo de técnicas y/o métodos no destructivos novedosos, basados en los principios fotónicos, tales como: espectroscopia de Infrarrojo cercano (NIR), Imágenes híper espectrales (HSI) y Espectroscopia dieléctrica (ED), vienen siendo aplicados al control de calidad interna de frutas (Beshah, 2014; Fito *et al.*, 2010; Skierucha *et al.*, 2014). La espectroscopia dieléctrica, es una técnica no destructiva, basada en la interacción del flujo de fotones con la composición química del alimento, además, de originarse dos fenómenos físicos en la dispersión gama, como la conductividad iónica (< 1GHz) y su relación con la pérdida dieléctrica causada por la vibración de especies químicas de ácidos orgánicos o electrolitos y la inducción - la orientación (> 1GHz) de moléculas dipolares como las moléculas del agua (Castro-Giráldez *et al.*, 2013; Traffano-Schiffo *et al.*, 2018). La

aplicación de la ED ha permitido predecir el contenido de sólidos solubles [10 MHz a 1 GHz], la firmeza [20 MHz a 4500 MHz], el índice de madurez [500 MHz a 20 GHz] y el contenido de humedad [10 MHz a 4500] en caquis, manzanas, peras y melones correspondientes al rango de radiofrecuencia (Guo *et al.*, 2015a; Guo *et al.*, 2015b; Liu *et al.*, 2021; Liu & Guo, 2018; Reyes *et al.*; 2017). Así mismo, existen limitados estudios en caracterización dieléctrica de bayas, como el de Sosa-Morales *et al.* (2017) quienes caracterizaron las propiedades dieléctricas (ϵ' y ϵ'') de puré de frambuesas, fresas y moras en el rango de microondas de 0.5 - 25 GHz, a temperaturas de 20 - 60 °C, mas no realizaron correlación alguna de las propiedades fisicoquímicas con las propiedades dieléctricas. Sin embargo, las predicciones realizadas a los atributos de calidad interna a las frutas antes mencionadas, ha sido realizadas mediante métodos quimiométricos y de selección de variables relevantes (frecuencias) de uso no industrial, que en su mayoría imposibilitan su escalamiento o desarrollo de sensores, así como, no se han reportado estudios en la predicción de los sólidos solubles, la acidez y el pH mediante las propiedades dieléctricas a frutos exóticos como el aguaymanto.

La utilización de herramientas matemáticas y estadísticas son cada vez más utilizadas para la predicción de atributos de calidad interna de frutos tropicales mediante propiedades dieléctricas (Guo *et al.*, 2015a). Las técnicas quimiométricas permiten extraer la máxima información química del análisis de muestras a partir de señales (espectroscópicas) o respuestas instrumentales con muy poca selectividad (Porcel, 2001). Entre los modelos más utilizados destacan el análisis de componentes principales con regresión lineal simple (ACP-RL), la

regresión lineal múltiple (RLM), la regresión de mínimos cuadrados parciales (RMCP) y la regresión lineal simple (RLS), permitiendo obtener resultados prometedores en la predicción de propiedades fisicoquímicas de alimentos (Santiago, 2020). No obstante, el uso de estos métodos de cálculo en su mayoría requiere de niveles de programación y cómputo avanzado y de equipos de alto rendimiento (Montero, 2016). Por ello, el objetivo de la presente investigación fue la predicción de los sólidos solubles, la acidez y el pH de aguaymanto (*Physalis peruviana*) mediante espectroscopía dieléctrica de microondas a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Frutos de aguaymanto

Los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) se obtuvieron de los sembríos pertenecientes al fundo “Capulí el Valle” ubicado en el C.P. San Juan de Lacamarca provincia de Bambamarca, región Cajamarca. Se utilizó 450 unidades de frutos de aguaymanto para la determinación de las propiedades dieléctricas y fisicoquímicas, 150 unidades por cada estadio de madurez (4, 5 y 6) según la NTC 4580. Los frutos de aguaymanto tuvieron características de homogeneidad en peso, color y tamaño, sin presencia de magulladuras o daños mecánicos.

2.2. Sistemas de extracción de propiedades dieléctricas

Para medir las propiedades dieléctricas (constante dieléctrica - ϵ') en un rango de 0.5 a 9.0 GHz, se utilizó una sonda coaxial de terminación abierta (N1501A-001), conectada a un analizador de redes vectorial (modelo N 9915A, Keysight Technologies), y controlada de manera remota mediante una Laptop (Lenovo

HP CORE i7). Previo a la obtención de las propiedades dieléctricas, el equipo se dejó encendido por aproximadamente 30 min con la finalidad de brindar estabilidad a los circuitos electrónicos del equipo, seguidamente se procedió con la calibración del equipo – sonda coaxial en aire, corto circuito y dieléctrico (agua destilada) sugerido por Chuquizuta *et al.*, (2021). Para la extracción de las propiedades dieléctricas de los frutos de aguaymanto, estos se posicionaron en la parte inferior de la sonda coaxial para hacer contacto con la superficie del fruto (Figura 1), sin ejercer presión de penetración por parte de la sonda, y obteniendo las medidas por triplicado. Finalmente, se seleccionaron las constantes dieléctricas según los estadios de madurez de los frutos de aguaymanto a frecuencias puntuales de 0.915; 2.450 y 5.800 GHz.

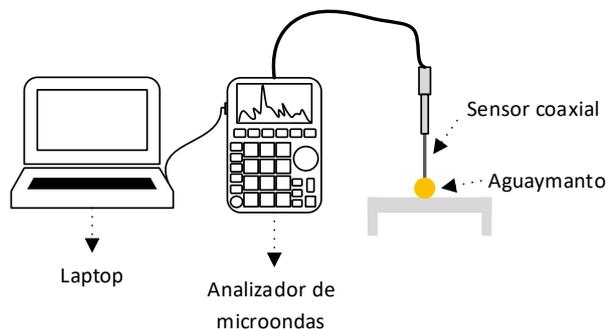


Figura 1. Sistema de medición de propiedades dieléctricas.

2.3. Caracterización química de frutos de aguaymanto

Posterior a la extracción de las propiedades dieléctricas de los frutos de aguaymanto, se extrajo el zumo de los frutos mediante el uso de un extractor de zumo (FPSTJU407W, Oster) para las determinaciones químicas. Se determinó de los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) del zumo de aguaymanto de acuerdo con el método AOAC 932. 12 (AOAC, 1980), colocando de 3 a

5 gotas sobre el lente del refractómetro (Hanna HI96800) y posterior lectura.

La acidez titulable se determinó a través del método AOAC (22.008.1984), mediante la valoración con solución de NaOH (0.1 N) y expresada como porcentaje de ácido cítrico; el pH se midió de acuerdo a AOAC 981.12 (AOAC, 1998) utilizando un pH-metro (Orion Versastar pro - Thermo Scientific), previamente calibrado con tampones de 4, 7 y 10, mediante la inmersión directa del electrodo en el zumo.

2.4. Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey a los resultados químicos de frutos de aguaymanto, con un margen de error de $\alpha=0.05$, con la finalidad de observar diferencias significativas entre los estadios de madurez. El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el software Statgraphics Centurion XVIII.

Los estudios realizados por Guo *et al.* (2017), Zhu *et al.* (2016) y Zhu *et al.* (2019) recomiendan evaluar los modelos de predicción de los parámetros químicos utilizando el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RECM), tanto para el desarrollo del modelo de calibración como el de validación. Para el desarrollo de los modelos de predicción de las propiedades químicas del aguaymanto se tomó el 70% para la calibración y el 30% para la validación del modelo (Zhu *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2018). Para la determinación de R^2 y RECM se obtienen a través de las ecuaciones 1 y 2.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Donde \hat{Y}_i e Y_i son los valores predichos y de referencia de una muestra (i); \bar{Y} es la media de valores de referencia de todas las muestras

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Espectros dieléctricos – ϵ' de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) en sus estadios de madurez 4, 5 y 6 (NTC 4580), en el rango de 0.5 a 9 GHz

En la Figura 2, se muestran los espectros dieléctricos medidos de la constante dieléctrica – ϵ' , de los frutos (*Physalis peruviana* L.) en los estadios de madurez 4, 5 y 6 según la NTC 4580, los espectros dieléctricos ϵ' , de los estadios de madurez disminuyen 30.5 a 23.0 con el incremento de la frecuencia, asimismo los espectros del estadio 4 presentaron valores más altos debido a que el fruto adquiere diferentes especies químicas, como ácidos débiles, minerales, proteínas, calcio y vitaminas como resultado de la modificación de su estructura celular y los cambios fisicoquímicos que experimenta durante el ciclo de maduración. Fito *et al.* (2010), Talen *et al.* (2016) y Traffano-Schiffo *et al.* (2018) observaron que la permitividad disminuye en estudios realizados en frutas como: naranja, mandarina y manzana en el rango de radiofrecuencias y microondas producto de la inducción u orientación (relajación dipolar) de las moléculas de agua y la conductividad iónica de los electrolitos y ácidos orgánicos débiles. Puesto que la aplicación de un flujo de fotones al tejido aumenta la energía interna de las moléculas a consecuencia de la vibración de los iones, produciendo pérdidas de energía eléctrica (Fito *et al.*, 2010; Talens *et al.*, 2016). Igualmente, en investigaciones hechas por Fang & Guo (2016);

Guo *et al.* (2011); Guo *et al.* (2015 a), Guo *et al.* (2015b); Liu *et al.* (2021); Liu & Guo (2018) y Reyes *et al.* (2017) en frutas como caquis,

manzanas, peras y melones respectivamente observaron el mismo comportamiento de los espectros dieléctricos medidos.

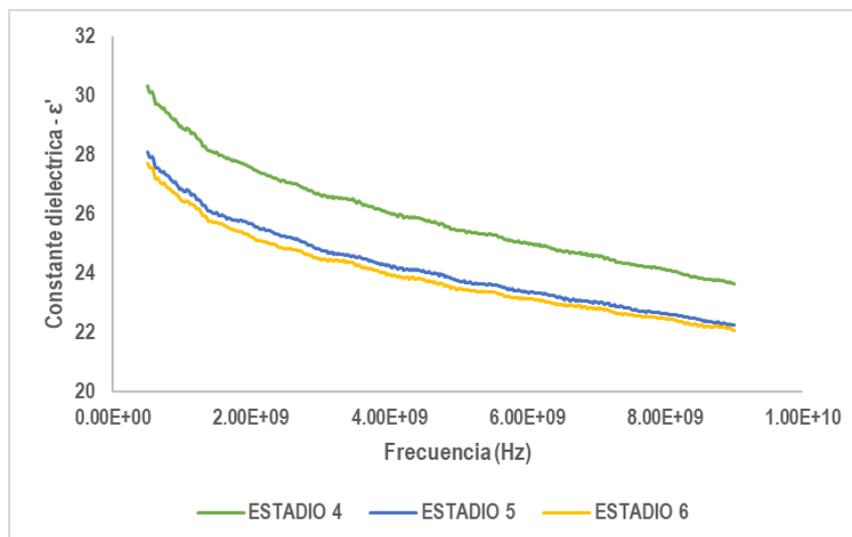


Figura 2. Espectros dieléctricos medidos de la constante dieléctrica – ϵ' , de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) en sus estadios de madurez 4, 5 y 6 (NTC 4580), en un rango de 0.5 a 9 GHz.

3.2. Caracterización química de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) en sus estadios de madurez 4, 5 y 6 (NTC 4580)

En la Tabla 1, se muestran los resultados de los sólidos solubles, la acidez y el pH de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) en sus estadios de madurez 4, 5 y 6 (NTC 4580); asimismo, se observa una tendencia ascendente de los sólidos solubles y pH en relación con el avance del grado de madurez del fruto, coincidiendo con otros reportes (Duque *et al.*, 2011; Fischer *et al.*, 2005; Mendoza *et al.*, 2012; Velasquez & Velasquez, 2017). Esta tendencia es atribuible a la formación de azúcares como: la sacarosa, glucosa y fructosa a partir de la hidrólisis de cadenas de almidón por intermedio de las enzimas (deshidrogenasas) (Fischer *et al.*, 2005; Tapia, 2019). Además, de la

capacidad de translocar sacarosa del cáliz al fruto (Balaguera *et al.*, 2014) y la reducción de los ácidos orgánicos (cítrico, málico y oxálico) en aras de estabilidad celular durante la maduración (García, 2015). Sin embargo, la acidez disminuye a mayor grado de madurez con o menor diferencia significativa en diferentes estudios, en este caso nuestros valores de acidez no concuerdan con las investigaciones de Duque *et al.* (2011); Fischer *et al.* (2005); Mendoza *et al.* (2012) y Restrepo *et al.* (2009) quienes reportaron un intervalo de acidez entre 2.0% a 1.5% para los estadios de 3–6, provocado por la disminución de los ácidos orgánicos durante el periodo de maduración, y el consumo de los ácidos orgánicos por enzimas deshidrogenasas para mantener la estabilidad celular y el proceso respiratorio del fruto.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) en sus estadios de madurez 4,5 y 6

Propiedades químicas	n ¹	Estadio de madurez (NTC 4580)		
		4	5	6
Sólidos Solubles (°Brix)	150	14.636 ± 0.516 ^a	14.643 ± 0.292 ^a	14.850 ± 0.444 ^b
Acidez titulable (%)	150	2.230 ± 0.240 ^a	2.105 ± 0.115 ^b	2.219 ± 0.189 ^a
pH	150	3.568 ± 0.039 ^a	3.630 ± 0.026 ^b	3.663 ± 0.012 ^c

¹Número de unidades experimentales por estadio de madurez; los superíndices de las mismas letras de los valores medios en cada estadio de madures, indican la no existencia de diferencias significativas según la prueba de Tukey (pvalor < 0.05).

3.3. Relación estadística de los sólidos solubles, la acidez y el pH de los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) con la ε', a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

La relación entre los sólidos solubles, la acidez y el pH de los frutos de aguaymanto con la ε', a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz, se determinaron por el coeficiente de determinación (R²), para el posterior desarrollo de los modelos de predicción a partir de los espectros de ε', según la metodología propuesta por Chuquizuta *et al.* (2022).

En la Tabla 2, se muestran las ecuaciones de relación directa mediante regresiones lineales simples de los sólidos solubles, la acidez y el pH en función de las propiedades dieléctricas (ε') a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz, obteniendo una alta relación directa para sólidos solubles a 915 MHz con R²=0.8951 (Figura 3a), acidez titulable a 5800 MHz con R²=0.9807 (Figura 4c) y pH a 2450 MHz con R²=0.9071 (Figura 5b), indicando que las tres frecuencias evaluadas tienen un buen desempeño para la predicción de las propiedades químicas estudiadas.

Tabla 2. Relación entre los sólidos solubles, la acidez y el pH y la ε', de los frutos de aguaymanto

Propiedades Fisicoquímicas	Frecuencia		
	915 (MHz)	2450 (MHz)	5800 (MHz)
Sólidos solubles	y=0.0748X+12.636 R ² =0.8951	y=0.0807X+12.625 R ² =0.8561	y=0.0099X+14.947 R ² =0.0311
Acidez titulable	y=-0.0003X+2.1318 R ² =0.0002	y=-0.002X+2.1741 R ² =0.0052	y=-0.0177X+2.5651 R ² =0.9807
pH	y=-0.03X+4.4476 R ² =0.87	y=-0.338X+4887 R ² =0.9071	y=-0.0114X+3.9048 R ² =0.2482

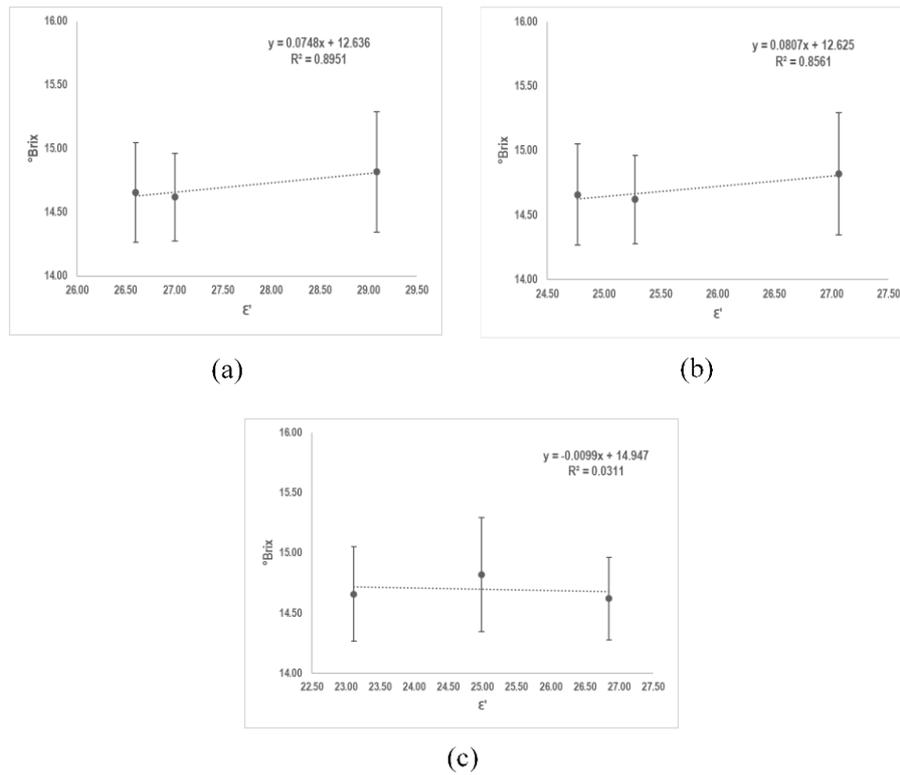


Figura 3. Relación lineal entre los sólidos solubles y ϵ' de los frutos de aguaymanto, a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

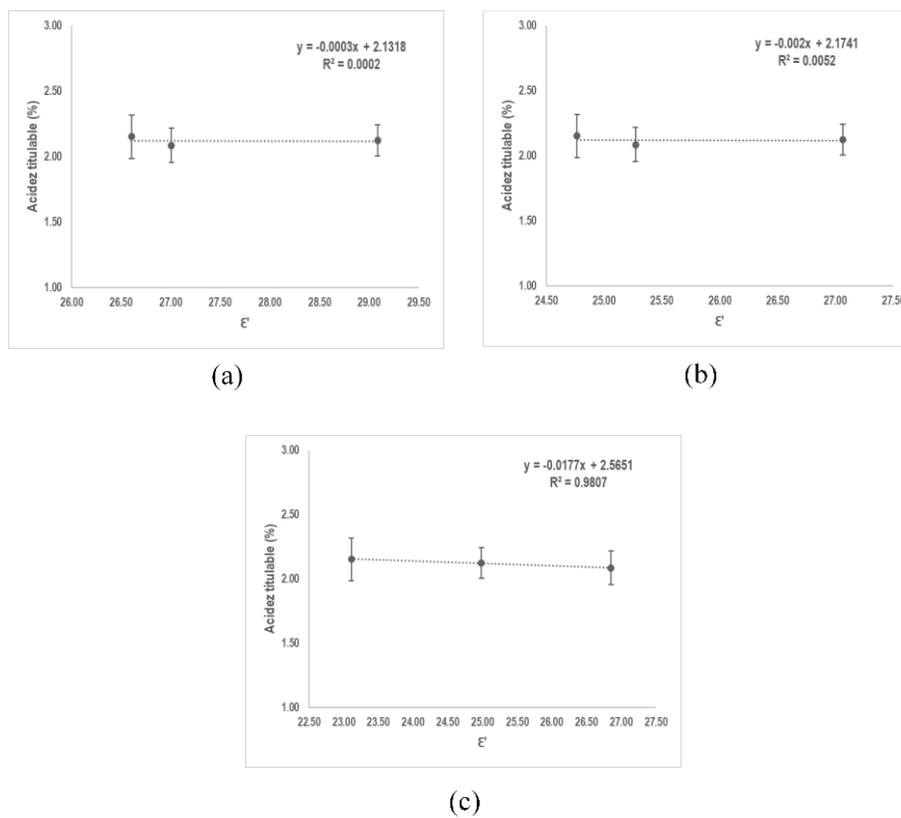


Figura 4. Relación lineal entre la acidez titulable (%) y ϵ' de los frutos de aguaymanto, a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

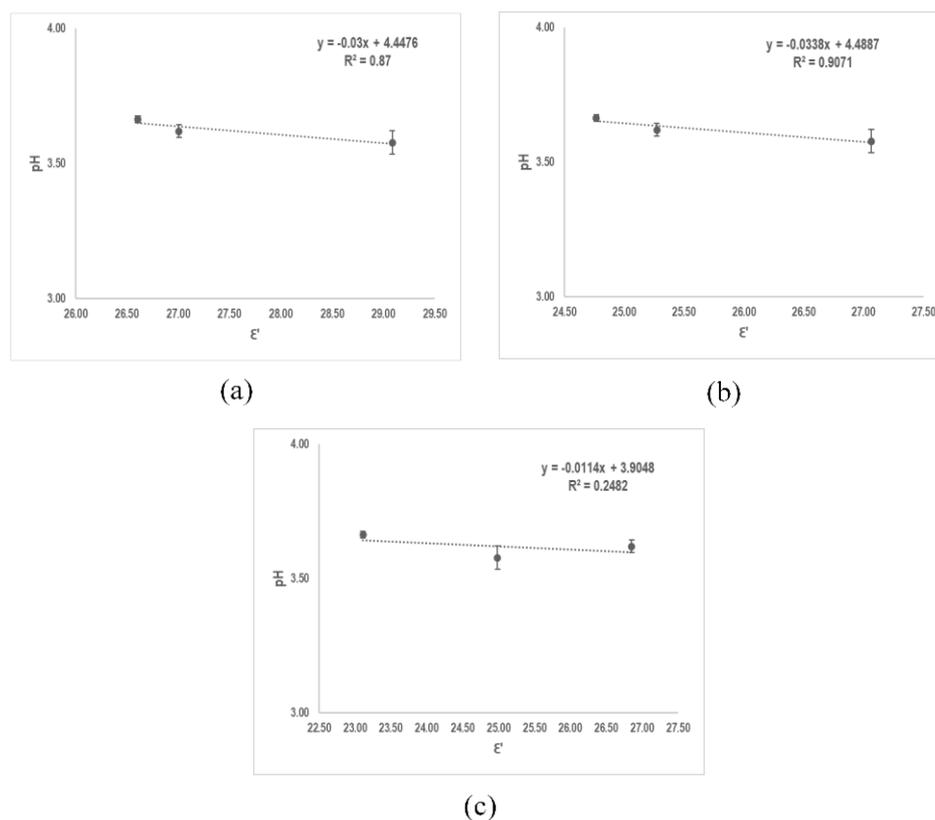


Figura 5. Relación lineal entre el pH y ϵ' de los frutos de aguaymanto, a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

3.4. Predicción de los parámetros químicos de los frutos de aguaymanto a frecuencias puntuales

Luego de haber obtenido los modelos de calibración (Tabla 2) para cada uno de los parámetros químicos del aguaymanto, estos modelos fueron utilizados para obtener los valores predichos a partir del grupo de valores ϵ' restantes (30% del total de datos). Las correlaciones entre los valores predichos y los valores reales de referencia (parámetros químicos) se muestran en la tabla 3, resultando el mejor modelo de predicción para los sólidos solubles a 915 MHz con $R^2=0.7760$ y $RECM=0.5185$ (Figura 6a), la acidez a 5800 MHz con $R^2=0.4790$ y $RECM=0.2391$ (Figura 7c) y el pH a 2450 MHz con $R^2=0.9994$ y $RECM=0.0221$ (Figura 7b). Los rendimientos de la predicción

obtenidos mediante la técnica de ED son similares a estudios previos realizados por Guo *et al.* (2015b); Liu *et al.* (2021); Liu & Guo (2018) y Nelson *et al.* (2007) en melones, caquis y manzanas obteniendo $R^2 = 0.80$ y $RECM < 1.00$; $R^2 = 0.970$, $RECM = 0.494$ y $R^2 = 0.908$, $RECM = 0.822$ respectivamente; Baiano *et al.* (2012) en uvas obtuvieron para la acidez $R^2 > 0.82$, sólidos solubles $R^2 = 0.94$ y pH $R^2 > 0.80$; Weng *et al.* (2020) y Amodio *et al.* (2017) en fresas para sólidos solubles totales reportaron $R^2 = 0.9370$, $RECM = 0.1145$, pH $R^2 = 0.8493$, $RECM = 0.0501$; SST $R^2 = 0.85$, $RECM = 0.58$, pH $R^2 = 0.86$; $RECM = 0.09$ respectivamente y Louw & Theron (2010) en ciruelas para sólidos solubles totales reportaron un $R^2 > 0.817$, $RECM < 0.610$, acidez $R^2 > 0.608$, $RECM < 0.194$. Sin embargo, estos estudios han utilizado técnicas espectroscópicas

como: imágenes hiperespectrales, espectroscopia de reflectancia de infrarrojo - transformada por Fourier y espectroscopia de infrarrojo cercano, además, de la utilización de técnicas de pre procesamiento de señal, que si bien son precisas, a menudo requieren algoritmos de programación más complejos para procesar y analizar los datos espectrales, lo

que puede hacer que su implementación sea más desafiante en una línea de producción, a diferencia del método utilizado de regresión lineal simple que es más sencillo de ser implementado en entornos de producción debido a su bajo requerimiento de cómputo y de inversión en equipos con mayor capacidad de procesamiento de datos.

Tabla 3. Predicción de los parámetros químicos de los frutos de aguaymanto a frecuencia puntual de 915, 2450 y 5800 MHz

Propiedades fisicoquímicas	Frecuencia		
	915 (MHz)	2450 (MHz)	5800 (MHz)
Sólidos solubles	R ² =0.7760 RECM=0.5185	R ² =0.7604 RECM=0.5166	R ² =0.7470 RECM=0.4385
Acidez titulable	R ² =0.4452 RECM=2466	R ² =0.4635 RECM=0.2482	R ² =0.4790 RECM=0.2391
pH	R ² =1.0000 RECM=0.0222	R ² =0.9994 RECM=0.0221	R ² =0.9984 RECM=0.0445

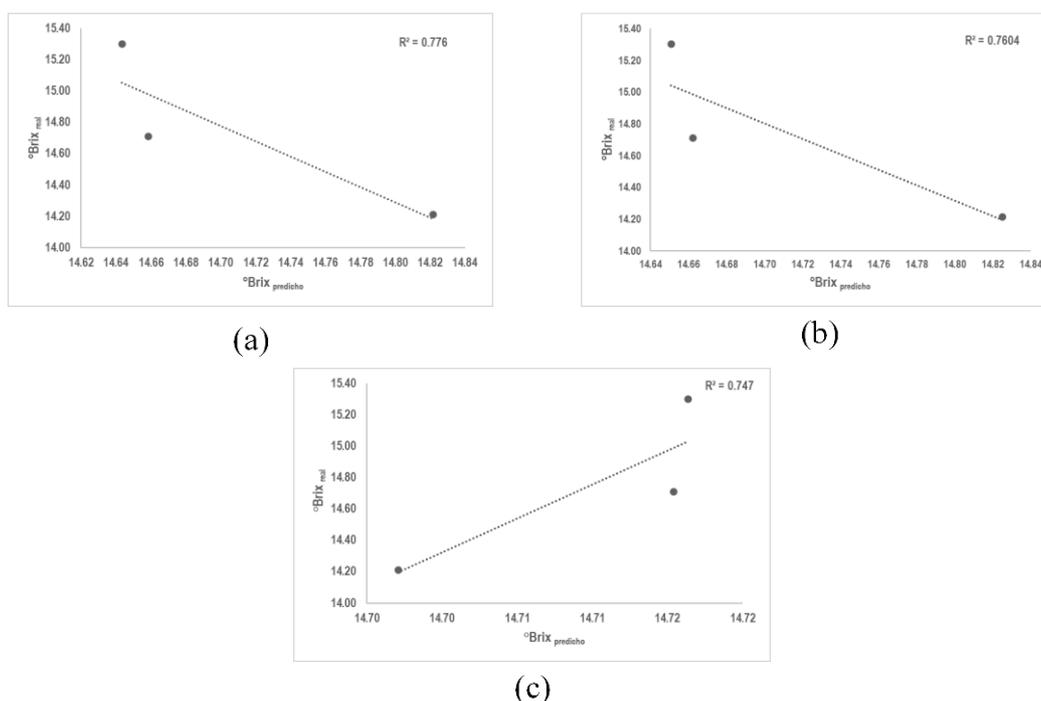


Figura 6. Modelos de validación de los sólidos solubles a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

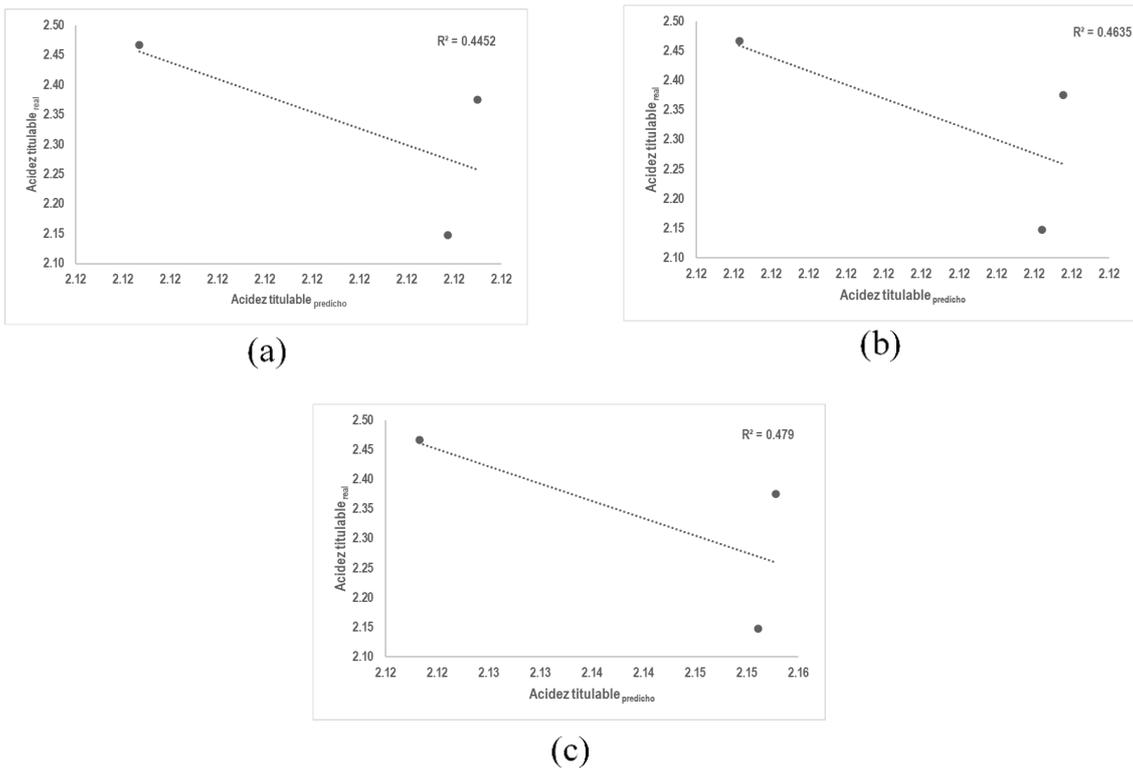


Figura 7. Modelos de validación de la acidez titulable a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

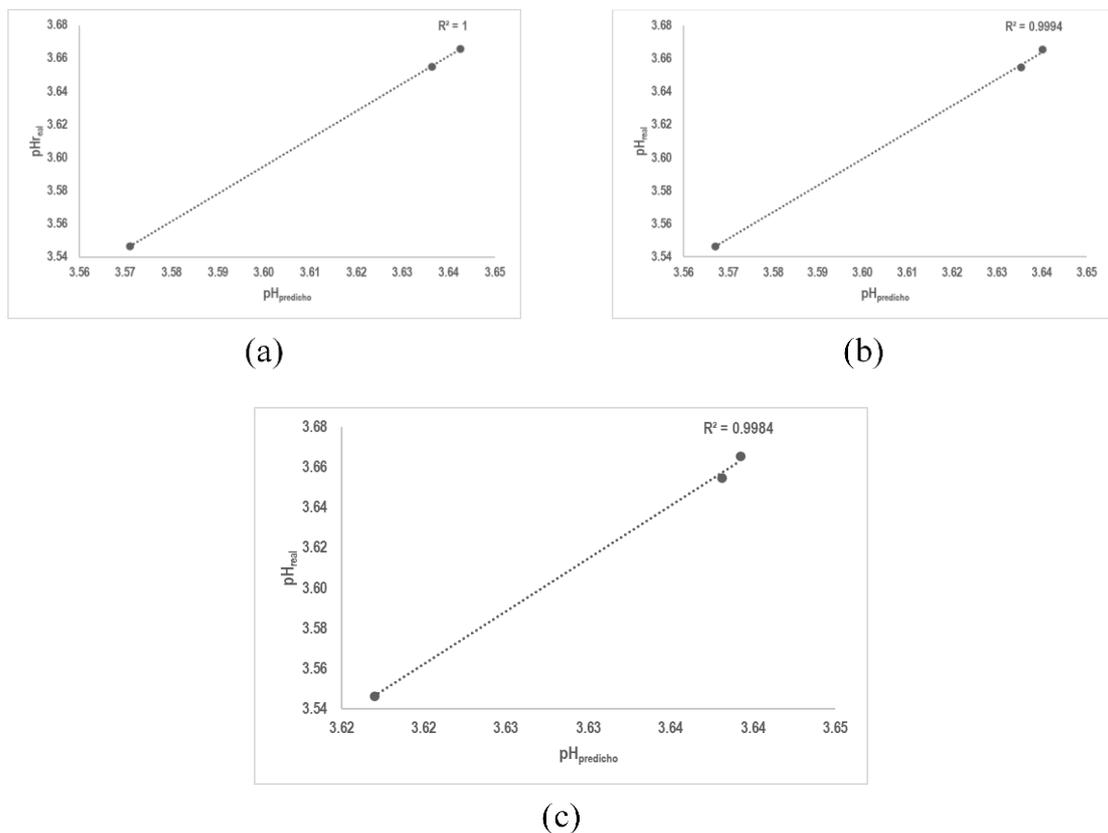


Figura 8. Modelos de validación del pH a frecuencias puntuales de 915, 2450 y 5800 MHz.

4. CONCLUSIONES

La técnica de la espectroscopia dieléctrica ha demostrado ser una herramienta prometedora para la predicción de los sólidos solubles ($R^2=0.7760$ y $RECM=0.5185$), la acidez ($R^2=0.479$ y $RECM=0.2391$) y el pH ($R^2=0.9994$ y $RECM=0.0221$) de los frutos aguaymanto a frecuencias puntuales 915, 5800 y 2450 MHz respectivamente, permitiendo a futuro desarrollar sensores dieléctricos miniaturizados para evaluaciones rápidas y no destructivas de la calidad interna de los frutos de aguaymanto.

Declaración de intereses

Ninguna.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de Chota por el financiamiento otorgado a través del Proyecto: "Desarrollo de un sistema no destructivo para la determinación de las propiedades fisicoquímicas en frutas nativas y derivados de la región Cajamarca, usando espectroscopía dieléctrica", con resolución de ganador "Resolución N° 432-2018-C.O./UNACH". Asimismo, al Instituto de Investigación del Mejoramiento Productivo – UNACH por brindar el apoyo, la instalación y el soporte técnico en la ejecución de la presente investigación.

Referencias

- Amodio, M.L., Ceglie, F., Arif, M.M., Piazzolla, F. & Colelli, G. (2017). Potential of NIR spectroscopy for predicting internal quality and discriminating among strawberry fruits from different production systems. *Postharvest Biology and Technology*, 125, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.013>
- Augusto-Elías-Peñañiel, C.C., Obregón-La Rosa, A.J., Contreras-López, E., Arias-Arroyo, G.C. & Bracamonte-Romero, M. (2021). Características fisicoquímicas, nutricionales y morfológicas de frutas nativas. *Revista De Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 23(1), 17-25. <https://doi.org/10.18271/ria.2021.202>
- Baiano, A., Terracone, C., Peri, G. & Romaniello, R. (2012). Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.06.002>
- Balaguera, H., Martínez, C. & Herrera, A. (2014). Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 8(2), 181-191.
- Beshah, W.B. (2014). *Calidad de la carne de cerdo, efecto de la congelación y descongelación, uso del calentamiento dieléctrico para la descongelación y la espectroscopia dieléctrica para evaluar la calidad tecnológica*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona]. Archivo digital. <https://www.tdx.cat/handle/10803/283362#page=1>
- Breznes-Llecha, J. (2000). *Técnicas de control de calidad en fruta. Control de Calidad. APITOL2.pdf*. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6877/CAPITOL2.pdf>
- Castro-Giráldez, M., Fito, P.J., Ortolá, M.D. & Balaguer, N. (2013). Study of pomegranate ripening by dielectric spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.024>
- Cazar, I.M. (2006). *Análisis físico-químico para la determinación de la calidad de las frutas*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica Del Ecuador]. Archivo digital. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11453/An%3%a1lisis%20f%3%adsico-qu%3%admico%20para%20la%20determinaci%3%b3n%20de%20la%20calidad%20de%20las%20frutas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chuquizuta, T., Colunche, Y., Rubio, M., Oblitas, J., Arteaga, H. & Castro, W. (2022). Prediction of Quality Attributes of Fresh Unpasteurized Milk Using Dielectric Spectroscopy Coupled to Chemometric Tools. *Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2022-April*. <https://doi.org/10.1109/PIERS55526.2022.9792687>
- Chuquizuta, T., Oblitas, J., Arteaga, H., Yarleque, M. & Castro, W. (2021). Dielectric Spectral Profiles for Andean Tubers Classification: A Machine Learning Techniques Application. *2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICEAA52647.2021.9539623>
- Diario - El Peruano. (14 de setiembre de 2023). *Más del 80% de aguaymanto que exportó Perú en el 2020 fue orgánico*.

- <https://Elperuano.Pe/Noticia/118480-Mas-Del-80-de-Aguaymanto-Que-Exporto-Peru-En-El-2020-Fue-Organico>.
- Duque, A.L., Giraldo, G.A. & Quintero, V.D. (2011). Caracterización de la fruta, pulpa y concentrado de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Temas Agrarios*, 6(1), 75-83.
- Fang, L.J. & Guo, W.C. (2016). Nondestructive measurement of sugar content and firmness in Korla fragrant pears by using their dielectric spectra. *Modern Food Science and Technology*, 32(5), 295-301. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.5.044>
- Fischer, G., Miranda, D., Piedrahíta, W. & Romero, J. (2005). *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva Physalis peruviana L. en Colombia*. Primera edición, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Fito, P., Castro-Giráldez, M., Fito, P.J. & Chenoll, C. (2010). Development of a dielectric spectroscopy technique for the determination of apple (Granny Smith) maturity. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(4), 749-754. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.08.002>
- García, D.A. (2015). *Cambios físico-químicos durante el proceso de maduración de uvilla (Physalis peruviana) orgánica*. [Tesis de grado, Universidad Tecnológica Equinoccial]. Archivo digital. https://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/5093/57703_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guo, W., Fang, L., Dong, J. & Wang, Z. (2015a). Nondestructive detection of internal qualities for pears using dielectric spectra. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(9), 233-239. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.034>
- Guo, W., Lin, B., Liu, D. & Zhu, X. (2017). A Novel Technique on Determining Water Content in Milk Using Radio-Frequency/Microwave Dielectric Spectroscopy and Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 10(12), 3781-3789. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0946-7>
- Guo, W., Shang, L., Zhu, X., & Nelson, S.O. (2015b). Nondestructive Detection of Soluble Solids Content of Apples from Dielectric Spectra with ANN and Chemometric Methods. *Food and Bioprocess Technology*, 8(5), 1126-1138. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1477-0>
- Guo, W., Zhu, X., Nelson, S.O., Yue, R., Liu, H. & Liu, Y. (2011). Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz. *LWT*, 44(1), 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.05.032>
- Léon Carrasco, J.C. (2021, May 4). *Exportaciones peruanas de aguaymanto alcanzaron las 288 toneladas por US\$ 2.659.000 en 2020*. <https://Agraria.Pe/Noticias/Exportaciones-Peruanas-de-Aguaymanto-Alcanzaron-Las-288-Toneladas-2020#:~:Text=Exportaciones%20de%20aguaymanto%20en%202020,3.460.000%20despachadas%20en%202019>
- Liu, D. & Guo, W. (2018). Nondestructive determination of soluble solids content of persimmons by using dielectric spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, 20, 2596-2611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1381114>
- Liu, D., Wang, E., Wang, G., Wang, P., Wang, C. & Wang, Z. (2021). Non-destructive sugar content assessment of multiple cultivars of melons by dielectric properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(10), 4308-4314. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11070>
- López, C., Vázquez, C. & Cos, A.I. (2005). *Alimentación y nutrición manual teórico-práctico*. Segunda edición, España.
- Louw, E.D. & Theron, K.I. (2010). Robust prediction models for quality parameters in Japanese plums (*Prunus salicina* L.) using NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 58(3), 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.07.001>
- Málaga, R., Guevara, A. & Araujo, M. (2013). Efecto del procesamiento de puré de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.), sobre los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79(2), 162-174.
- Márquez, C.J., Trillos, O., Cartagena, J.R. & Cotes, J.M. (2009). Evaluación físico-química y sensorial de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Vitae*, 16(1), 42-48.
- Mendoza, J.H., Rodríguez, A. & Millán, P. (2012). Caracterización físico química de la uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 188-196.
- Montero, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Documentos de Trabajo En Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
- Nelson, S.O., Guo, W.C., Trabelsi, S. & Kays, S.J. (2007). Dielectric spectroscopy of watermelons for quality sensing. *Measurement Science and Technology*, 18(7). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/014>
- Novoa, R., Bojacá, M., Galvis, J.A. & Fischer, G. (2006). La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.). *Agromonía Colombiana*, 24(1), 77-86.

- Porcel, M. (2001). *Aplicación de técnicas quimiométricas para el desarrollo de nuevos métodos cinético-espectrofotométricos de análisis*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. Archivo digital. <https://www.tdx.cat/handle/10803/3118#page=1>
- Restrepo, A.M., Cortes, M. & Márquez, C.J. (2009). Uchuvas (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 16(1), 19-30.
- Reyes, A.C. (2018). Determinación de constantes dieléctricas por espectroscopia de microondas para el análisis de calidad de productos hortofrutícolas. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Archivo digital. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/13807/REYES_RIOFRIO_ALEXANDRA_CELINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes, A., Yarlequé, M., Castro, W. & Chuquizuta, S. (2017). Determination of dielectric properties of the red delicious apple and its correlation with quality parameters. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2017-November. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293478>
- Rodrigues, E., Rockenbach, I.I., Cataneo, C., Gonzaga, L.V., Chaves, E.S. & Fett, R. (2009). Minerals and essential fatty acids of the exotic fruit *Physalis peruviana* L. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29(3), 642-645. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000300029>
- Rossi, D., Fuentes, R., Pardo, F., Reyes, D., Urbina, E. & Vega, J. (2012). Efecto de la temperatura y sinergismo de sacarosa, sacarina y sugar light en la deshidratación osmótica de aguaymanto (*Physalis peruviana*). *Agroindustrial Science*, 2(1), 100-109.
- Santiago, M. (2020). *Espacio de diseño con métodos de inversión de modelos de regresión sobre variables latentes*. [tesis doctoral, Universidad de Burgos]. Archivo digital. https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/5950/Ruiz_%20Miguel-Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sierra y Selva Exportadora. (9 de marzo de 2021). *Análisis de Mercado - Aguaymanto 2015 - 2020*. <https://Www.Gob.Pe/Institucion/Sse/Informes-Publicaciones/1745797-Analisis-de-Mercado-Aguaymanto-2015-2020>
- Skierucha, W., Walczack, R. & Wilczek, A. (2014). Comparison of Open-Ended Coax and TDR sensors for the measurement of soil dielectric permittivity in microwave frequencies. *Int. Agrophysics*, 18, 355-362.
- Sosa-Morales, M.E., Flores-López, T., Miranda-Estrada, D.E., Kaur Kataria, T., Abraham-Juárez, M.D.R., Cerón-García, A., Corona-Chávez, A., Olvera-Cervantes, J.L. & Rojas-Laguna, R. (2017). Dielectric properties of berries in the microwave range at variable temperature. *Journal of Berry Research*, 7(4), 239-247. <https://doi.org/10.3233/JBR-170161>
- Talens, C., Castro-Giraldez, M., & Fito, P.J. (2016). Study of the effect of microwave power coupled with hot air drying on orange peel by dielectric spectroscopy. *LWT- Food Science and Technology*, 66, 622-628. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.015>
- Tapia, T.D. (2019). *Evaluación del perfil de color, características fisicoquímicas y capacidad antioxidante de tres estados de madurez comercial del aguaymanto (Physalis peruviana L.)*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano]. Archivo digital. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3279033>
- Traffano-Schiffo, M.V., Castro-Giraldez, M., Colom, R.J. & Fito, P.J. (2018). New Spectrophotometric System to Segregate Tissues in Mandarin Fruit. *Food and Bioprocess Technology*, 11(2), 399-406. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2019-8>
- Velasquez, E.J. & Velasquez, K.I. (2017). *Evaluación de las características fisicoquímicas del aguaymanto (physalis peruviana L.) de la zona andina y selva en diferentes estados de madurez*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Archivo digital. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1593/Velasquez%20Cristobal%20-%20TESIS%20-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Weng, S., Yu, S., Guo, B., Tang, P. & Liang, D. (2020). Non-destructive detection of strawberry quality using multi-features of hyperspectral imaging and multivariate methods. *Sensors (Switzerland)*, 20(11), 3074. <https://doi.org/10.3390/s20113074>
- Zhu, X., Guo, W., Kang, F., Kong, F. & Zhu, Q. (2016). Determination of Protein Content of Raw Fresh Cow's Milk Using Dielectric Spectroscopy Combined with Chemometric Methods. *Food and Bioprocess Technology*, 9(12), 2092-2102. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1791-1>
- Zhu, X., Guo, W., Liu, D. & Kang, F. (2018). Determining the Fat Concentration of Fresh Raw Cow Milk Using Dielectric Spectroscopy Combined with Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 11(5), 1528-1537. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1140-7>
- Zhu, Z., Zhu, X., Kong, F. & Guo, W. (2019). Quantitatively determining the total bacterial count of raw goat milk using dielectric spectra. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 7895-7903. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16666>