

Espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada al control de la calidad en la industria alimentaria

Electrical impedance spectroscopy applied to quality control in the food industry

Julio César Caicedo-Eraso^{1*}, Félix Octavio Díaz-Arango², Andrea Osorio-Alturo³

¹ Profesor Asociado, Universidad de Caldas, Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Informática, Manizales, Colombia. Correo: julio.c.caicedo@ucaldas.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4073-9152>

² Profesor Asociado, Universidad de Caldas, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Manizales, Colombia. Correo: felix.diaz@ucaldas.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1202-2376>

³ Estudiante, Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería de Alimentos, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. Correo: andrealuro@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3718-5374>

Editor temático: Jader Rodríguez Cortina (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Fecha de recepción: 20/05/2018

Fecha de aprobación: 06/06/2019

Para citar este artículo: Caicedo-Eraso, J. C., Díaz-Arango, F. O., & Osorio-Alturo, A. (2019). Espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada al control de la calidad en la industria alimentaria. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), e951

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:951



Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

* Autor de correspondencia: Universidad de Caldas, Calle 65 # 26-10, Edificio El Parque, 2° piso, Oficina 201-O, Manizales, Colombia

Resumen

La espectroscopia de impedancia eléctrica (EIE) es una técnica que permite analizar las propiedades eléctricas de materiales, incluso biológicos, al inducir señales eléctricas alternas a diferentes frecuencias y medir las señales de respuesta. Se ha utilizado para determinar la madurez en frutos, identificar adulteraciones en productos cárnicos y lácteos, determinar propiedades físico-químicas en todo tipo de matrices alimentarias, incluso para cuantificar microorganismos presentes en alimentos y en superficies de trabajo. Esta técnica es segura, no invasiva, rápida, portátil, de bajo costo y fácil de usar, lo que la convierte en un método con un gran potencial para ser usado en la industria de alimentos, con el fin de monitorear y controlar los procesos

de calidad. La presente revisión sistemática recopila información científica publicada entre el 2012 y el 2018, que describe el uso de EIE implementada en el control de calidad de alimentos. Se realizó una búsqueda en las bases de datos ScienceDirect y Springer, así como a través del buscador Google Académico mediante la estrategia *Spectroscopy electrical impedance AND Foods*. Con base en una serie de filtros y una búsqueda manual, se encontraron 52 artículos y cuatro tesis relacionadas con la temática. Asimismo, se encontró que la mayoría de los estudios se centran en la evaluación de calidad de productos cárnicos y pesqueros, así como en la caracterización de los cambios generados durante los procesos térmicos y maduración de frutas.

Palabras clave: agroindustria, alimentos procesados, control de alimentos, tejidos animales, tejidos vegetales

Abstract

Electrical impedance spectroscopy (EIS) is a technique used to analyze the electrical properties of diverse materials, including the biological, inducing, and measuring alternating electrical signals at different frequencies. Impedance measurements are employed to establish ripeness in fruits, identify adulterations in meat and dairy products, determine physicochemical properties in all types of food matrices, and even to quantify microorganisms present in food and on work surfaces. This technique is safe, non-invasive, fast, portable, inexpensive and easy to use, which makes it a method with great potential to be used in the food industry to monitor and control quality processes. This systematic review

compiles scientific information published between the years 2012 and 2018 that describes the use of EIS applied to food quality control. Searches were made through the databases ScienceDirect and Springer as well as using the search engine Google Scholar, through the strategy: *Spectroscopy electrical impedance AND Foods*. After using a series of filters and a manual search, 52 articles and four theses related to the topic were found. The systematic review showed that most of the studies focus on the quality assessment of meat and fishery products, as well as on the characterization of the changes generated during the thermal processes and fruit ripening.

Keywords: agroindustry, animal tissues, food control, plant tissues, processed foods

Introducción

Los métodos analíticos para garantizar la calidad físico-química, microbiológica y sensorial son requeridos por la industria de alimentos (Jiménez & León, 2009). Las técnicas analíticas tradicionales, como las determinaciones gravimétricas, volumétricas y colorimétricas, cuentan con poca especificidad y brindan una baja sensibilidad para la determinación de trazas, mientras que otros métodos, como los cromatográficos, tienen la capacidad de detección de hasta partes por trillón, pero son costosos e involucran una preparación previa de la muestra, lo que implica mayor tiempo de procesamiento (Jiménez & León, 2009).

Además, en la mayoría de los casos, las técnicas clásicas de análisis son costosas y requieren de personal altamente capacitado, así como de un tiempo de procesamiento prolongado para obtener los resultados y, además, son destructivos, dejando inservible la pieza de estudio. Por lo tanto, numerosas investigaciones se han centrado en la búsqueda de métodos no destructivos y rápidos para desarrollar sistemas de monitorización de productos alimenticios. Algunas de las técnicas utilizadas son la captura de imágenes por resonancia magnética, aplicación de sistemas electrónicos sensoriales (lenguas y narices), espectroscopia por infrarrojo cercano, nefelometría espectral y reflectometría de dominio de tiempo (Masot, 2010). Estos métodos se caracterizan por una alta precisión (Blanco-Díaz, Del Río-Celestino, Martínez-Valdivieso, & Font, 2014), aunque requieren una costosa instrumentación (Grossi, Di Lecce, Toschi, & Riccò, 2014).

La espectroscopia de impedancia eléctrica (EIE) es una muy buena opción en comparación con los métodos de análisis tradicionales, ya que permite hacer mediciones de campo y en tiempo real, además de ser fácil de trasladar y utilizar. En el área de medicina, se ha utilizado para monitorear cultivos celulares, determinar cambios de volumen de órganos y composición corporal, clasificar y monitorear tejidos (Aristizábal-Botero, 2010). En el área de alimentos, se utiliza para caracterizar tejidos de verduras, frutas y cárnicos en los cultivos celulares

y procesos de fermentación, con el fin de medir la concentración de biomasa, y para correlacionar propiedades físico-químicas de los alimentos tratados térmicamente (Pérez, 2014).

Así, la EIE es una tecnología de detección prometedora con múltiples ventajas, como su rapidez, economía, fácil implementación, además de ser no destructiva y respetuosa con el medio ambiente (El Khaled, Castellano, Gazquez, García-Salvador, & Manzano-Agugliaro, 2017), y con un potencial para reemplazar los métodos tradicionales, con lo que se ahorra tiempo, costos y capacitación de personal. Sin embargo, también presenta inconvenientes en el procesamiento y la interpretación de los datos, por lo que es necesario automatizar su procesamiento (Pliquett, 2010); además, varios factores intrínsecos al material dentro de la celda pueden afectar la respuesta del espectro (Jorge et al., 2018), por lo que se deben estandarizar los materiales de los electrodos y los procedimientos de medición.

La EIE permite analizar las propiedades eléctricas de materiales y sistemas al inducir señales eléctricas alternas a diferentes frecuencias y medir las señales de respuesta (Fernández-Segovia et al., 2012). De este modo, se obtienen y ajustan los espectros en frecuencia de la impedancia, la conductividad y la permitividad de las muestras, utilizando modelos matemáticos que permitan calcular los parámetros que caracterizan los tejidos; además del modelo de Hayden, uno de los modelos matemáticos más ampliamente utilizado es el de Cole-Cole y sus representaciones gráficas: diagrama de Nyquist y Bode (Aristizábal-Botero, 2010).

El diagrama de Nyquist es muy usual en la evaluación de datos de impedancia en sólidos. Muestra la curva de la componente imaginaria Z'' contra la componente real de la misma Z' . Asimismo, permite evaluar los datos de la impedancia, para todo el rango de frecuencias. La representación es un arco circular, como se puede apreciar en la figura 3.1.3. de la tesis de grado de Farfán (2011).

El diagrama de Bode representa el módulo y la fase en función de la frecuencia; el logaritmo de

la impedancia ($\text{Log } |Z|$) y el desfase (θ) se grafican contra el logaritmo de la frecuencia ($\text{Log } \omega$), como se aprecia en la figura 3.1.4 de la tesis de grado de Farfán (2011).

El modelo de Hayden tiene en cuenta la resistencia intra y extracelular, así como la resistencia y capacitancia o la membrana celular. Se asume que la resistencia de la membrana puede ser ignorada, porque el valor de la impedancia es mucho más grande que los valores de otros parámetros, como se muestra en la figura 3.a de la investigación publicada por Ando, Mizutani y Wakatsuki (2014).

La impedancia es la oposición que manifiestan los materiales biológicos al paso de una corriente eléctrica alterna, que se descompone en dos módulos: la resistencia (parte real) y la fase (la parte imaginaria). La primera está determinada por el paso de la corriente a través de las soluciones electrolíticas intra y extracelulares, mientras que la segunda depende de las propiedades dieléctricas de los tejidos o por la acumulación temporal de cargas sobre las membranas celulares (Aristizábal-Botero, 2010).

La célula es la unidad básica de la materia viviente (Rodríguez, Uriarta, Palazuelos, & Pérez, 2012) y su principal elemento es la membrana celular, cuya estructura está compuesta por una bicapa lipídica en la que se encuentran las proteínas que facilitan la formación de canales para un intercambio iónico con el exterior (Salazar-Muñoz, 2004). Debido a su alta resistencia y carga superficial, las membranas celulares se comportan como un material no conductor y pueden ser representadas como las dos placas de un condensador eléctrico; en consecuencia, cuando se aplica un campo eléctrico constante, los iones cargados eléctricamente se mueven y se depositan en ambos lados de la membrana (Salazar-Muñoz, 2004).

Por esta razón, las células y los tejidos (tanto vegetales como animales) se pueden modelar como circuitos eléctricos, teniendo en cuenta las propiedades resistivas y capacitivas de los fluidos intracelulares, extracelulares y de la membrana celular (Aristizábal-Botero, 2010).

Uno de los circuitos eléctricos más utilizados: el modelo de Fricke, que consiste en una resistencia para simular el comportamiento del medio extracelular (R_e); otra para el medio intracelular (R_i), y una capacitancia (cantidad de energía almacenada) para la membrana (C_i), como se muestra en la figura 10 de la tesis de grado de Masot (2010).

Al inducir señales eléctricas alternas a diferentes frecuencias a un tejido biológico, generalmente a baja frecuencia la resistencia apoplásmica (de la pared celular) funciona como una resistencia paralela a la resistencia de la membrana, mientras que a alta frecuencia la resistencia de la membrana se cortocircuita para que pueda ser ignorada (Ando, Mizutani, & Wakatsuki, 2014). Por lo tanto, la impedancia como función de la frecuencia puede indicar fácilmente cambios en la integridad de la membrana celular y la fuga de soluto en el apoplasma, a través de los efectos sobre la capacitancia y la resistencia a alta y bajas frecuencias (Caravia, Collins, & Tyerman, 2015; Durante, Becari, Lima, & Peres, 2016).

El montaje experimental fue muy sencillo. Se utilizó un analizador de impedancia y un computador para controlar el analizador durante del proceso de medición; con los resultados obtenidos y el cálculo de los modelos, se hizo uso de un *software* de control y adquisición de datos y los electrodos para medir las propiedades eléctricas. Existen referencias de analizadores de impedancia que operan a rangos de frecuencias diferentes: 0,01 Hz-1 MHz, 100 Hz⁻¹ MHz (Scandurra, Tripodi, & Verzera, 2013), 100 Hz-5 MHz (Das et al., 2017) y máximo a 110 MHz (Guerhazi, Kanoun, & Derbel, 2014). Algunos de los *software* más utilizados son los siguientes: el EIS Spectrum Analyzer, desarrollado por Bondarenko y Ragoisha, en el 2005; *Software* Bode 100, por Caravia et al. (2015), y Zview, por Villa-García, Pedroza-Islas, Martín-Martínez y Aguilar-Frutis (2013). Estos *software* permiten extraer los valores de resistencia y capacitancia del sistema. Luego, la respuesta de impedancia se puede modelar con el Modelo de Hayden, modelo modificado y circuito equivalente.

Generalmente, los datos obtenidos en los análisis se representan en gráficas que muestran el cambio de la impedancia a medida que incrementa la frecuencia. En tejido de patata durante el secado se presentan cambios temporales en los espectros de impedancia, que declina marcadamente cuando la frecuencia incrementa entre 10^4 y 10^6 Hz. Este fenómeno en que decrece la impedancia a medida que incrementa de la frecuencia se llama *dispersión* (Ando et al., 2014).

En el momento de realizar los ensayos, no es necesario llevar a cabo acondicionamientos especiales a las muestras antes de analizar. Sin embargo, es indispensable garantizar que las muestras se mantengan estáticas durante las mediciones. Para ello, se diseñan soportes y electrodos que se adapten al tipo de alimento o sistema (sólido, líquido) y a la morfología.

En el caso de análisis en leche, se han utilizado dos varillas de acero inoxidable SAE 316, espaciadas 10 mm y sumergidas a una profundidad de 20 mm (Durante et al., 2016). En caldos de cultivos microbiológicos, se han utilizado dos electrodos de acero inoxidable de 10 cm de longitud, con diámetro de 0,9 mm y una separación entre ellos de 1 cm (Villa-García et al., 2013). En análisis de miel, se han utilizado electrodos de oro sujetos a un brazo metálico abisagrado, que permite ajustar los ángulos deseados, así como la distancia y profundidad de los electrodos (Scandurra et al., 2013), al igual que electrodos de platino (Das et al., 2017). En la caracterización eléctrica de aceite, se ha empleado un par de electrodos de acero inoxidable, con 6 mm de diámetro y 12 mm de espaciado entre ellos, sumergidos en una emulsión de agua/aceite (Yu et al., 2015).

Se han desarrollado sensores capacitivos interdigitales (ID), que son más sofisticados para explorar la presencia de ésteres de ftalato en medios fluidos, y que tienen electrodos de oro de detección múltiple, fabricados sobre un sustrato de silicio y recubiertos con una película delgada de polímero de parileno C, para mejorar las capacidades de detección capacitiva del sensor y reducir la magnitud de corriente farádica que fluye a través del sensor (Zia et al., 2013).

En alimentos sólidos esféricos como las bayas, se ha encontrado que las mediciones más estables se obtienen cuando se colocan con una pequeña porción de piel (3 mm de diámetro) a cada lado del diámetro menor de la baya, entre dos electrodos de disco (Ag/AgCl) de 8 mm de diámetro sujetos a un marco de plástico de acrilonitrilo butadieno estireno, con un brazo suspendido que se ajusta con un tornillo micrométrico. De esta manera, los electrodos pueden colocarse con cuidado para tocar la superficie y medir con precisión la distancia entre los electrodos (Caravia et al., 2015). Para el análisis de la maduración de mango, se han utilizado dos electrodos de Ag/AgCl dispuestos en el lado opuesto de la fruta (zona ecuatorial de las muestras) (Figueiredo-Neto, Cárdenas-Olivier, Rabelo-Cordeiro, & Pequeno de Oliveira, 2017). En hojas de espinaca, se han utilizado electrodos de aguja de acero separados a 17 mm, ubicados a lo largo de la vena principal en puntos distantes aproximadamente a 5 mm (Watanabe, Ando, Orikasa, Shiina, & Kohyama, 2017).

En productos cárnicos y pesqueros, se han diseñado electrodos con extremos puntiagudos que facilitan la penetración en las fibras musculares. Estos se insertan a 10 mm en dirección perpendicular a la dirección de la fibra (Fernández-Segovia et al., 2012); con el fin de aumentar la reproducibilidad, se han utilizado sondas de penetración circular, que constan de un electrodo central y ocho electrodos circundantes de acero (Guermazi et al., 2014).

Materiales y métodos

La revisión sistemática se realizó en las bases de datos ScienceDirect y Springer, utilizando la estrategia de búsqueda: $\{(Spectroscopy\ electrical\ impedance)\ AND\ (Food)\}$. Se aplicaron los siguientes filtros: Años: 2012 a 2018; Idioma: inglés; Tipo de artículo: Revisión, Original. Finalmente, se utilizó la herramienta de búsqueda Google Académico, con el fin de obtener más documentos que no se encontraban en las bases de datos elegidas, en cuyo caso se utilizaron los siguientes filtros: Años: 2012 a 2018; Idioma: inglés y español; Tipo de documento: artículos y

tesis de maestría y doctorado. Adicionalmente, se realizó depuración manual, descartando los artículos repetidos y los que no tenían una relación directa con el tema.

Resultados y discusión

La revisión sistemática con la estrategia de búsqueda planteada logró obtener un total de 80 documentos (ScienceDirect: 49, Springer: 21 y GoogleScholar: 10). Posteriormente, se procedió a eliminar los documentos repetidos y que se enfocaban solamente en el desarrollo del modelo eléctrico sin tener en cuenta las correlaciones con las propiedades físico-

químicas, sensoriales o microbiológicas en el alimento estudiado, obteniendo finalmente 56 documentos (52 artículos y cuatro tesis de doctorado).

Los documentos se agruparon en siete categorías que representan los campos de aplicación de EIE en la industria de alimentos más representativos para: (i) identificación de fraude, (ii) detección de contaminantes, (iii) determinación de propiedades físico-químicas, (iv) determinación de la madurez, (v) evaluación de la calidad de productos cárnicos, (vi), caracterización de tratamientos térmicos y (vii) detección de microorganismos. La tabla 1 muestra la síntesis de los artículos encontrados en cada una de las categorías definidas.

Tabla 1. Síntesis de los artículos encontrados

Aplicación	Año	Autores	Descripción
Identificación de fraude	2012	Fernández-Segovia et al.	Detección de venta fraudulenta de salmón congelado-descongelado bajo la denominación de fresco
	2013	Scandurra et al.	Determinación del origen floral de la miel
	2013	Fuentes et al.	Detección de venta fraudulenta de lubina congelada-descongelada bajo la denominación de fresca
	2013	Yang et al.	Determinación del contenido de agua ilegalmente inyectada en músculos de cerdo
	2016	Chen et al.	Detección de venta fraudulenta de pechuga de pollo congelada-descongelada bajo la denominación de fresca
	2016	Durante et al.	Detección de la adulteración de leche
	2017	Das et al.	Desarrollo de una plataforma para detectar la adulteración de la miel

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Aplicación	Año	Autores	Descripción
Detección de contaminantes	2013	Zia et al.	Detección de ftalatos en agua y jugos
	2015	Farahi et al.	Detección de pesticida en leche y tomates
	2015	Yu et al.	Detección de aflatoxinas en aceite de oliva
	2017	Boumya et al.	Determinación de aldehídos en alimentos
Determinación de propiedades físico-químicas	2012	Jishu y Du Guangyuan	Cambios en los parámetros fisiológicos de kiwi durante el almacenamiento
	2012	Juansah, Budiastira, Dahlan y Seminar	Evaluación de la acidez de la naranja
	2014	Grossi et al.	Método rápido y preciso para determinar la acidez del aceite de oliva
	2015	Żywica y Banach	Predicción del contenido de TSS en jugo de manzana
	2016	Nakonieczna, Paszkowski, Wilczek, Szyplowska y Skierucha	Detección de aditivos artificiales en alimentos líquidos
	2017	El Khaled et al.	Revisión sistemática sobre la aplicación de EIE en la calidad de frutas y verduras
	2017	Lopes et al.	Caracterización de vinos
	2017	Sharma et al.	Determinación de la humedad en hojas de té
2018	Lopes, Machado, Ramalho y Silva	Caracterización de leche ultrapasteurizada	
2018	Watanabe, Ando, Orikasa, Kasai y Shiina	Cambios durante el almacenamiento de manzana	

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Aplicación	Año	Autores	Descripción
Determinación de la madurez	2013	Kuson y Terdwongworakul	Evaluación de la maduración de durian
	2014	Juansah, Budiastira, Dahlan y Seminar	Evaluación de la maduración de naranja
	2014	González- Araiza	Procedimiento para medir el grado de madurez de fresa
	2015	Caravia et al.	Modelo de regresión que permite una predicción precisa del grado de madurez <i>Shiraz</i>
	2016	Nakawajana, Terdwongworakul y Teerachaichayut	Técnica para evaluar la calidad de mangostino tipo exportación
	2017	Chowdhury, Singh, Bera, Ghoshal y Chakraborty	Estudio de maduración de la mandarina naranja
	2017	Figueiredo- Neto et al.	Técnica aplicada en la identificación de maduración del mango
Evaluación de la calidad de productos cárnicos	2012	Vidaček et al.	Evaluación de la frescura de lubina (<i>Dicentrarchus labrax</i>)
	2013	Kaltenecker, Szöllösi, Friedrich y Vozáry	Determinación del contenido de sal en carne de cerdo madurada
	2013	Rizo et al.	Método para monitorear la calidad de salmón ahumado
	2014	De Jesús et al.	Método para monitorear la calidad del jamón
	2014	Pérez-Esteve et al.	Método para determinar la frescura de dorada (<i>Sparus aurata</i>) almacenada y de diferentes procedencias
	2014	Guermazi et al.	Método para monitorear la calidad de carne de vaca y ternera

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Aplicación	Año	Autores	Descripción
Evaluación de la calidad de productos cárnicos	2015	Nguyen y Nguyen	Evaluación de la calidad de carne de cerdo durante el almacenamiento
	2016	Zavadlav et al.	Evaluación de la vida útil de calamar refrigerado
	2017	Zhao et al.	Revisión sobre los avances en la aplicación de EIE en la calidad de carnes y pescados
	2018	Sun et al.	Evaluación de la frescura de la carpa (<i>Cyprinus carpio</i>)
Caracterización de Procesos térmico	2014	Ando et al.	Método para evaluar el estado del tejido de papa sometido a un proceso de secado.
	2014	Fuentes et al.	Cambios microestructurales y de textura en patatas cocidas en agua
	2015	Kertész, Hlaváčová, Vozáry y Staroňová	Cambios en el contenido de humedad de zanahorias deshidratadas
	2015	Imaizumi, Tanaka, Hamanaka, Sato y Uchino	Evaluar el grado de ablandamiento de la papa durante el calentamiento
	2016	Ando et al.	Cambios en la textura de zanahoria deshidratada, congelada y rehidratada
	2016	Bera, Bera, Kar y Mondal	Cambios en los tejidos de vástago de banano cocidos
	2017	Ando, Hagiwara y Nabetani	Cambios de textura en rábano japonés (<i>Raphanus sativus</i>) cocido
2017	Watanabe et al.	Determinación de las condiciones óptimas escaldado de espinaca	

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Aplicación	Año	Autores	Descripción
Detección de microorganismos	2013	Villa-García et al.	Monitoreo del crecimiento de <i>Lactobacillus acidophilus</i>
	2013	Dong, Zhao, Xu, Ma y Ai	Determinación de <i>Salmonella</i> en leche
	2014	Paredes, Becerro y Arana	Determinación de biopelículas de <i>Staphylococcus epidermidis</i>
	2015	Liu, Settu, Tsai y Chen	Desarrollo de un sensor para determinar contaminación bacteriana en granjas lecheras y plantas de procesamiento
	2016	Wang, Palmer y Flint	Método rápido para determinar biopelículas de <i>Yersinia enterocolitica</i> biofilms
	2018	Tubia, Paredes, Pérez-Lorenzo y Arana	Método para detección <i>in situ</i> y en tiempo real del crecimiento de la levadura de putrefacción del vino

Fuente: Elaboración propia

Identificación de fraude

Un alimento adulterado es aquel que tiene una completa o parcial supresión de los constituyentes de alto valor; total a parcial sustitución con componentes alimenticios de menor calidad o valor económico, enmascaramiento de defectos y calidad inferior o adición de sustancias no declaradas en la etiqueta, con el fin de aumentar el peso o volumen del producto (Hargin, 1996). Este problema afecta principalmente a los consumidores (pérdida de calidad e insatisfacción), pero también a la industria, ya que se genera una competencia desleal. Por esta razón, se requieren técnicas que permitan afrontar el problema de forma específica y eficaz (Hernández-Chávez et al., 2007).

Con el fin de evitar competencia desleal mediante el etiquetado falso, se ha utilizado este método para determinar la legitimidad del origen floral de la miel (Scandurra et al., 2013) y la adulteración de

mieles con sirope de sucrosa (Das et al., 2017), así como para la detección de la venta fraudulenta de pescado y pollo congelado-descongelado bajo la denominación de pescado fresco (Chen et al., 2016; Fernández-Segovia et al., 2012; Fuentes et al., 2013). EIE permite detectar cambios en la leche causada por mastitis, así como la adulteración de esta con agua, peróxido de hidrógeno, hidróxido de sodio y formaldehído (Bertemes-Filho, Valicheski, Pereira, & Paterno, 2010; Durante et al., 2016).

En productos cárnicos, se ha empleado como un método viable para discriminar carne de porcino adulterada. Puesto que en los últimos años se ha descubierto repetidamente en el mercado chino carne ilegalmente inyectada con agua, este aumento en el contenido de humedad permite que los microbios se multipliquen fácilmente, lo que podría afectar la salud de las personas y causar problemas importantes para la industria de procesamiento de la carne (Yang et al., 2013).

Detección de contaminantes

Los alimentos pueden ser un vehículo para el transporte de sustancias tóxicas, que se pueden formar durante el procesado, preparación y almacenamiento. Alimentos como lácteos y tomates pueden ser contaminados por el uso de plaguicidas que se emplean para el control de garrapatas en bovinos y control de maleza (Farahi et al., 2015); algunos aldehídos que en cantidad traza pueden contribuir al aroma fresco a concentraciones más alta pueden ser irritantes y cancerígenos (Boumya et al., 2017); toxinas producidas por *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus* han sido implicadas en la etiología del carcinoma hepatocelular humano (Yu et al., 2015) y los ésteres de ftalato (DEHP), provenientes de la industria del plástico, son tóxicos para el desarrollo y la reproducción (Zia et al., 2013), por lo que representan un grave riesgo para la salud humana. Es fundamental establecer un método con alta selectividad y sensibilidad para la determinar los niveles de estas sustancias en los alimentos, con el fin de garantizar la seguridad al ser consumidos.

Las técnicas analíticas utilizadas para medir las concentraciones de ftalatos en productos alimenticios y las bebidas, como la cromatografía de gases y espectroscopía de masas, requieren de equipos costosos y largos tiempo de ensayo, que pueden representar un problema en la producción industrial (Zia et al., 2013). Por su parte, EIE permite determinar la concentración de ftalatos utilizando un novedoso sensor fabricado con silicio y recubierto de una película delgada de un polímero (Zia et al., 2013).

Se ha empleado EIE como una técnica rápida y capaz de detectar la presencia de aldehídos de muestras de agua y jugo de naranja, usando 2,4-dinitrofenilhidrazina como reactivo para la derivatización (DNPH). Las medidas de impedancia se investigaron en el rango de frecuencia de 100 mHz a 100 kHz. Los diagramas de Nyquist se modelaron con un circuito equivalente de Randle. Se encontró que el diámetro del círculo de Nyquist disminuye al aumentar la concentración de aldehídos. Esta disminución está directamente relacionada con la concentración de DNPH y la formación de nuevo

producto formado en el electrodo de trabajo. En condiciones optimizadas, el análisis de aldehídos derivatizados presenta límites de detección en orden de $0,01 \mu\text{mol/L}$. Además, los resultados analíticos muestran que en condiciones de trabajo optimizadas, el presente método puede aplicarse ampliamente para determinar los aldehídos en muestras de agua potable, jugo de naranja y vinagre de manzana (Boumya et al., 2017).

Este método se puede aplicar en la determinación de cantidades ultra traza de paraquat (plaguicida) en muestras de tomate y leche. El método propuesto por Farahi et al. (2015) fue capaz de detectar $7,37 \times 10^{-16} \text{ mol/L}$ paraquat con una buena sensibilidad. También se ha utilizado en la detección de aflatoxinas en productos agrícolas y aceites vegetales (Yu et al., 2015).

Determinación de propiedades físico-químicas

Los espectros de impedancia pueden ser útiles para determinar pruebas físico-químicas o índices, que son indispensables para caracterizar y clasificar alimentos, según los estándares de calidad solicitado por las autoridades sanitarias. De acuerdo con las regulaciones internacionales, la calidad del aceite de oliva está definida principalmente por el índice de acidez y el índice de peróxido, dos determinaciones que se llevan a cabo en ambiente de laboratorio, mediante titulación manual; sin embargo, este tipo de método no se puede utilizar en los sitios de producción de aceite. Por ello, Grossi et al. (2014) presentaron una nueva técnica para medir la acidez del aceite de oliva mediante EIE, permitiendo un análisis rápido, económico y con resultados inmediatos.

El parámetro más importante que afecta la calidad de las hojas de té es la humedad, debido a que afecta los aspectos físicos y químicos relacionados con la estabilidad durante la cosecha, procesamiento, almacenamiento y transporte. Sharma, Bansod y Thakur (2017) desarrollaron un modelo de predicción de la humedad aplicando EIE. Se realizó una correlación entre la humedad y cinco propiedades eléctricas; finalmente, se observó una mayor

precisión usando un único parámetro eléctrico en comparación con la medición de humedad. Por lo tanto, el modelo que se desarrolló puede ser aplicable para la evolución de una mejor tecnología para la medición de humedad válida y precisa en hojas de té.

El vino es una bebida producida por la fermentación de uvas, cuya calidad depende de la variedad de uva, así como de su origen y procesamiento. Se ha utilizado la EIE para caracterizar diferentes variedades de vino, comparando los resultados con el análisis químico estándar. Los resultados obtenidos por Lopes, Machado y Ramalho (2017) muestran que la técnica tiene un alto potencial en la industria vinícola, tanto para reemplazar como para complementar el tradicional método químico.

Además, se ha utilizado para caracterizar leche ultrapasteurizada (entera, descremada, semidescremada, fortificada, orgánica), correlacionando medidas eléctricas con mediciones químicas como el contenido de calcio, azúcar, grasas, materia seca, proteína, entre otros. Los resultados revelaron que la impedancia conduce a una caracterización asertiva de la leche (Lopes et al., 2018).

Se han reportado estudios que pueden servir de base para futuras investigaciones sobre predicción del contenido de sólidos suspendidos totales en los zumos de frutas y la detección de adulteración (Żywica & Banach, 2015), así como para la determinación no destructiva de la acidez de los cítricos (Juansah et al., 2012). También es una técnica útil para evaluar la integridad de los tejidos celulares durante el almacenamiento y discriminar las variedades de manzana (Watanabe et al., 2018), así como para evaluar los cambios en los parámetros fisiológicos de kiwi durante el almacenamiento (Jishu & Du Guangyuan, 2012).

La técnica de espectroscopia de impedancia tiene el potencial de convertirse en un método efectivo para la detección de aditivos artificiales, ya que permite describir el contenido de una manera relativamente simple cuando los compuestos de interés están presentes en pequeñas cantidades en materiales químicamente complejas, como alimentos (Nakonieczna et al., 2016).

Determinación de la madurez

El conjunto de procesos que ocurren desde la etapa de crecimiento hasta el desarrollo de la fruta, conocida como madurez, es muy importante para los productores, ya que refleja el punto de máxima calidad (Watada, Herner, Kader, Romani, & Staby, 1984); el color es la característica externa más importante en la determinación del punto de maduración y de la vida poscosecha. Otros parámetros como el peso seco, sólidos solubles, acidez titulable, pH y dureza también intervienen en la maduración (Torres, Montes, Pérez, & Andrade, 2013).

Las propiedades físico-químicas de las frutas se miden con equipos, procesos específicos y personal capacitado, lo que implica altos costos de análisis. Pero es posible relacionarlas con propiedades fáciles de medir y que no impliquen análisis destructivos, como, por ejemplo, el color (Torres et al., 2013). Este se puede medir sencillamente con colorímetros en el Espacio de Color CIE L*A*B*, pero tienen como inconveniente que la superficie a medir debe ser uniforme y pequeña, lo que hace que las medidas sean poco representativas en materiales heterogéneos, como la mayoría de las frutas (León, Domingo, Pedreschi, & León, 2006).

Desde el punto de vista de la comercialización, el comerciante está interesado en la frescura y la durabilidad, mientras que la industria de procesamiento debe contemplar la idoneidad para el procesamiento y la conservación. Al consumidor le interesa adquirir un producto con buenas características organolépticas y nutricionales, y su decisión de compra se basa en la apariencia que se evalúa al primer contacto visual, seguido por su textura y sabor (Mitcham, Cantwell, & Kader, 1996).

La EIE tiene un gran potencial para ser utilizada en la caracterización de frutas y verduras de forma no destructiva *in vivo* y en el sitio de cosecha y almacenamiento (Rehman, Izneid, Basem, Abdullah, & Arshad, 2011), permitiendo evaluar los parámetros de calidad de los productos agrícolas e integrarlos a procesos de control. De esta forma, se puede contribuir a la reducción de pérdidas poscosecha durante

la cadena productiva y garantizar que llegue al consumidor un producto de calidad.

La EIE se ha utilizado con la intención de conocer si existe una relación entre las variables de impedancia con la firmeza y el grado de madurez de tres variedades de fresa (*Sweet charlie*, *Festival* y *Camino real*). Los resultados mostraron una relación significativa de las variables de color con los criterios de madurez establecidos y una disminución en la fuerza destructiva con el grado de madurez. Se observó que, cuanto más madura era la fresa, menor era la resistencia intracelular (aumento de la concentración de iones) y mayor la resistencia extracelular (reducción en la concentración de iones libres) (González-Araiza, 2014).

Juansah et al. (2014) realizaron un experimento con el fin correlacionar el grado de madurez de naranjas *Garut* con propiedades físico-químicas como la firmeza, sólidos solubles totales, pH y concentración de iones de hidrógeno. El modelo eléctrico propuesto para ello pudo describir las condiciones internas de los cítricos sin dañar la fruta.

La EIE se ha utilizado para estudiar las variaciones de la impedancia eléctrica durante la maduración de la naranja mandarina. Los resultados obtenidos por Chowdhury, Singh, Bera, Ghoshal, y Chakraborty (2017) revelaron que la impedancia aumentó y el peso de la naranja disminuyó con el aumento del estado de maduración. Por lo tanto, las propiedades eléctricas de las frutas se consideran indicadores aceptados para la determinación de la calidad de la fruta.

Asimismo, la EIE se utilizó para la identificación del grado de maduración de mango, basada en la dependencia de la variación de la resistencia bruta con la maduración de las frutas, debido a la variación en el contenido líquido de las fibras de fruta. Los resultados revelaron la fuerte correlación entre los ensayos mecánicos y los parámetros eléctricos (Figueiredo-Neto et al., 2017).

En bananos, se ha caracterizado el proceso de maduración en términos de la variación de impedancia. Los resultados del ensayo demostraron que

la impedancia compleja, así como la parte real y la parte imaginaria de la impedancia, aumentaron con el proceso de maduración. El análisis estadístico demostró que la desviación estándar de todos los parámetros de impedancia de diferentes muestras de banano obtenidas de un mismo grupo es muy baja en comparación con los valores medios correspondientes. Por lo tanto, los estudios EIE realizados en un número limitado de muestras pueden ser útiles para caracterizar la maduración en pilas de banano. Esta técnica, además de ayudar a encontrar el estado óptimo de maduración, también podría ser útil para analizar sus cambios fisiológicos, sabor y niveles de nutrientes (Chowdhury, Kanti Bera, Ghoshal, & Chakraborty, 2017).

Con el fin de obtener vinos de buena calidad, es necesario contar con un método confiable para determinar el grado de madurez de las uvas, para decidir el momento oportuno de la cosecha (Ojeda & Pire, 1997). Si las frutas no se cosechan en el momento ideal, pierden su vitalidad, lo que podría modificar el sabor resultante presente en la cosecha y afectar la calidad del vino.

Caravia et al. (2015) estudiaron la EIE como un método para detectar la pérdida de la vitalidad celular de uvas *Shiraz*, cuyas mediciones se realizaron en un rango de frecuencias entre 100 Hz y 1 o 2 MHz. Se efectuaron medidas diacetato de fluoresceína para determinar la fuga del material intracelular, así como de sólidos suspendidos totales. Los resultados indicaron que, desde el envero hasta el inicio de la muerte celular, la impedancia de la uva sigue la acumulación de sólidos suspendidos totales; luego, la impedancia disminuye proporcionalmente hasta su muerte. Finalmente, se concluyó que los cambios en la vitalidad celular de la uva se pueden determinar objetivamente a través de EIE.

En productos agrícolas de tipo exportación es indispensable conocer el estado de maduración óptimo, que garantice la calidad del alimento a los consumidores finales. Por ello, es necesario estandarizar los índices de madurez, ya que en la mayoría de los casos se realizan de forma manual siendo propensos al error (Kuson & Terdwongworakul, 2013).

En el caso del mangostino, la translucidez de la pulpa es una característica particularmente indeseable con respecto a la calidad. En el momento de la selección, cada fruto tiene su pericarpio parcialmente abierto para permitir la inspección visual de la fruta y verificar la apariencia de translucidez; una fruta sin translucidez visible se cierra y se pega con cinta adhesiva alrededor de la línea de corte y se congela para exportar. La EIE permite discriminar los mangostinos normales de los translúcidos, ofreciendo una solución barata y mínimamente destructiva para la inspección en pequeñas y medianas empresas (Nakawajana et al., 2016).

La inclusión de durian inmaduro en mercados de exportación es un gran problema, ya que proporciona una calidad inaceptable; además, las técnicas no destructivas que utilizan para determinar el grado de madurez no son prácticas, debido al gran tamaño del fruto y grosor de la cáscara. Por lo tanto, la medición indirecta con EIE del contenido de materia seca de la pulpa basada en la medición del tallo y la corteza es un método viable para la evaluación de la madurez. Los parámetros de impedancia podrían ser utilizados para clasificar los frutos inmaduros de los maduros con una precisión no menor de 83,3 % (Kuson & Terdwongworakul, 2013).

Evaluación de la calidad de productos cárnicos

El uso de la EIE para monitorear y evaluar la carne ha sido ampliamente explorado. Las aplicaciones incluyen el monitoreo de la frescura de la carne fresca y de productos procesados durante el almacenamiento. La carne y el pescado son alimentos altamente perecederos debido a su contenido de agua y abundantes nutrientes disponibles en las superficies, lo que los hace susceptibles al deterioro por desarrollo microbiano. Durante el almacenamiento de productos cárnicos se generan sabores desagradables, decoloración y otros cambios físico-químicos que afectan la aceptación del consumidor (Gram & Dalgaard, 2002). En pescado, la frescura se ve afectada principalmente por la actividad de enzimas y microorganismos autolíticos endógenos,

y durante el almacenamiento aparecen numerosos patógenos y toxinas bacterianas (Parlapani, Verdos, Haroutounian, & Boziaris, 2015). Por lo tanto, el riesgo al consumir este tipo de alimentos es mayor, generando una fuerte demanda de los fabricantes para evaluar la calidad de cada producto en línea para monitorear el procesamiento, con el fin de obtener información confiable y definitiva de la calidad para los clientes y otros fabricantes de procesamiento.

El estado de maduración de la carne influye en la estructura y conductividad de sus fibras, que conducen a cambios observables en su impedancia. La relación entre el estado *post mortem* y el cambio de la impedancia de la carne se ha caracterizado por servir como base para desarrollar métodos para la evaluación de la frescura de la carne de vaca, ternera y cerdo (Guermazi et al., 2014; Nguyen & Nguyen, 2015). La EIE tiene potencial para determinar el mejor destino para las carcasas de carne y reducir las pérdidas económicas para las industrias y los clientes (Zhao et al., 2017).

Además, la EIE permite evaluar la frescura de dorada (*Sparus aurata*), lubina (*Dicentrarchus labrax*) y carpa (*Cyprinus carpio*), tanto por su composición como por el tiempo de almacenamiento, correlacionando mediciones de impedancia con pruebas de nitrógeno básico volátil total (TVB-N), ya que posiblemente refleja la desnaturalización de las proteínas que se produce durante el almacenamiento (Pérez-Esteve et al., 2014; Sun et al., 2018; Vidaček et al., 2012). La EIE tiene potencial para la evaluación de la vida útil en refrigeración del calamar europeo, agrupando las muestras en tres grupos distintivos *post rigor mortis* (Zavadlav et al., 2016).

En productos cárnicos curados, la EIE se ha utilizado para el monitoreo en línea del salmón ahumado, con el fin de detectar cuándo el producto ha alcanzado el contenido de humedad, sal y Aw óptimo (Rizo et al., 2013), y en jamones curados en seco, para discriminar entre productos alterados e inalterados; además, se demostró que tiene una tendencia a clasificar el grado de deterioro (De Jesús et al., 2014).

También se ha utilizado para medir la concentración de sal en la carne de cerdo durante diversos procesos de curado, ya que en la práctica los procesos de curado convencionales se realizan de forma empírica y la concentración de sal en el interior de la pieza de carne se mide generalmente solo al final del curado y con métodos químicos destructivos; por lo tanto, no se puede controlar el porcentaje de sal deseado según las preferencias del cliente (Kaltenecker et al., 2013).

Caracterización de tratamientos térmicos

El procesamiento térmico es una de las operaciones unitarias más importantes en la industria alimentaria, debido a sus numerosas aplicaciones de procesamiento y preservación (Rattan & Ramaswamy, 2014). Durante la cocción se presentan fenómenos simultáneos de transferencia de masa y energía, debido al movimiento del agua en forma de vapor del alimento al medio de cocción y por el movimiento del medio al alimento. Estos fenómenos generan un intercambio de sustancias químicas que producen cambios físicos y químicos en el alimento, influenciados por su naturaleza, tamaño, forma y la intensidad de la fuente calorífica (García-Segovia, Andrés-Bello, & Martínez-Monzó, 2008).

El estado de la estructura de la pared celular y la membrana celular está relacionado con las propiedades físicas de vegetales, por lo que se pueden evaluar y predecir cambios en la textura del alimento que puedan ocurrir durante el procesamiento (Ando et al., 2017).

Esta técnica se ha utilizado para conocer los cambios microestructurales y de textura en patatas cocidas en agua (Fuentes et al., 2014; Imaizumi et al., 2015), en la determinación de las condiciones óptimas de escaldado de espinaca (Watanabe et al., 2017), así como para la determinación de la firmeza durante la cocción de rábano japonés (Ando et al., 2017); para conocer el estado fisiológico del tejido de papa deshidratado (Ando et al., 2014) y la textura de zanahoria deshidratada, congelada y rehidratada (Ando et al., 2016), al igual que los cambios generados en el tejido del vástago de banano (Bera et al., 2016).

Los cambios en la impedancia en los procesos térmicos dependen en gran medida de la presencia de agua en el alimento. En el caso del calentamiento en agua se genera una destrucción de las membranas celulares que incrementan la cantidad de electrolitos libres en el espacio extracelular del tejido, incrementando a su vez la conductividad y produciendo una disminución en la impedancia (Fuentes et al., 2014). Por otra parte, en procesos de secado tardío (después de la interrupción de la membrana celular), se produce una disminución en la conductividad, asociada con la pérdida de humedad y, por lo tanto, con un aumento en la impedancia (Ando et al., 2014; Kertész et al., 2015; Wu, Ogawa, & Tagawa, 2008).

Detección de microorganismos

Las técnicas tradicionales, como métodos espectrofotométricos, conteo en placa y reducción de colorantes, son eficientes para detectar y determinar la viabilidad de microorganismos, pero requieren de tiempos prolongados de incubación (24-48 h), así como de la preparación de material esterilizado (Grossi et al., 2008). La EIE se está utilizando en la industria alimentaria para una rápida detección, identificación, cuantificación y monitoreo de contenidos bacterianos (Arora, Sindhu, Dilbaghi, & Chaudhury, 2011); además, permite realizar conteos bacterianos de microorganismos inocuos, así como de patógenos peligrosos que pueden poner en grave peligro a los humanos. La impedancia se obtiene al medir el componente real y complejo que emerge entre un par de electrodos sumergidos en una celda que contiene el medio de cultivo (Felice, Madrid, Olivera, Rotger, & Valentinuzzi, 1999).

La EIE fue utilizada para monitorear el crecimiento de *Lactobacillus acidophilus*. Los resultados obtenidos evidencian que el crecimiento microbiano fue registrado en tiempos cortos, en comparación con el conteo en placa que tarda seis horas más. La resistencia del medio fue la más eficiente para la estimación de los parámetros del crecimiento que el valor de la capacitancia del sistema. Por lo tanto, la EIE fue capaz de detectar la etapa temprana del crecimiento del microorganismo en un medio de cultivo puro, comparada con la técnica de conteo en placa (Villa-García et al., 2013).

La infección bacteriana sigue siendo una de las principales causas de muerte en los países en desarrollo, y representa aproximadamente el 40 % de las muertes. Por ejemplo, la cepa O157:H7 de *Escherichia coli* se considera uno de los patógenos transmitidos por los alimentos más peligrosos. Las infecciones por *E. coli* generalmente son causadas por comer alimentos, o beber agua contaminada, o entrar en contacto directo con alguien que esté enfermo o con un animal que porta la bacteria. La EIE permite detectar *E. coli* en leche a concentraciones iniciales tan bajas como 7 células/mL; por lo tanto, podría ser un método adecuado para determinar la contaminación bacteriana en las granjas lecheras y en las plantas de procesamiento (Liu, Settu, Tsai, & Chen, 2015).

La *Salmonella* también es una de las bacterias más comunes, responsable de enfermedades transmitidas por los alimentos. Se transfiere a través del consumo de huevos, carne o leche, y causa una amplia variedad de enfermedades como salmonelosis, fiebre tifoidea, intoxicación alimentaria, gastroenteritis y septicemia (Joshi et al., 2009). Se ha demostrado que EIE se ha implementado con éxito para determinar *Salmonella typhimurium* en leche con resultados satisfactorios, en un rango lineal de $1,0 \times 10^3$ a $1,0 \times 10^7$ UFC/mL (Dong et al., 2013).

Las biopelículas en la industria de alimentos causan problemas como corrosión, olores desagradables, taponamiento de tuberías, fallas en equipos y deficiencia en la transmisión de calor, lo que genera elevados costos de limpieza y mantenimiento (Porrás, Castillo, & Sánchez, 2010). La EIE es un método conveniente, que permite ahorrar tiempo y esfuerzo para la detección de las biopelículas de *Yersinia enterocolitica* formadas en superficies de acero inoxidable, ya que en comparación con el conteo en placas no implica desalojar las biopelículas de las superficies (Wang, Palmer, & Flint, 2016). También se ha demostrado la capacidad para detectar y controlar la presencia y crecimiento de biopelículas *Staphylococcus epidermidis* (Paredes, Becerro, & Arana, 2014).

Brettanomyces bruxellensis se considera una de las levaduras de putrefacción más importantes en la producción de bebidas alcohólicas, que pueden causar cambios en las características del producto, arruinando su aroma y sabor; por lo tanto, disminuye la calidad de los productos finales y genera pérdidas económicas importantes. La detección por EIE se basa en cambios de las características eléctricas del medio causadas por la presencia de microorganismos, ya sea porque se adhieren a la superficie del sensor formando *biofilms* (levaduras adheridas a la superficie incrustadas en una matriz polimérica extracelular de producción propia) o porque por la actividad metabólica cambia la composición química del medio. Esta técnica podría aplicarse para la detección temprana de levaduras de putrefacción en las industrias del vino y la sidra (Tubia et al., 2018).

Conclusiones

La revisión realizada mostró que la EIE tiene un amplio campo de acción en la industria de alimentos. Permite caracterizar materias primas que serán almacenadas sin ningún proceso adicional o procesadas para otorgarles un valor agregado, conocer los cambios que se generan en los tejidos a someterlos a diferentes tratamientos térmicos, así como detectar sustancias tóxicas o elementos que no deberían hacer parte del alimento; también es útil para determinar adulteración en diferentes matrices alimentarias y para detectar la presencia de microorganismos patógenos y benéficos.

La EIE ha despertado un gran interés por su gran potencial como un método de análisis rápido, económico, no invasivo y sencillo. Sin embargo, algunos factores como el efecto de la polarización del electrodo, la temperatura de la medición, la estructura, los materiales y distancia entre los electrodos pueden afectar las respuestas eléctricas. Por lo tanto, se hace necesario aplicar protocolos de medición y rutinas de calibración del equipo.

También se deben realizar estudios que garanticen que las mediciones se pueden extrapolar a la industria de alimentos, ya que en condiciones reales es difícil controlar todas las variables del proceso productivo, que indudablemente podrían afectar la validez del modelo utilizado.

Referencias

- Ando, Y., Hagiwara, S., & Nabetani, H. (2017). Thermal inactivation kinetics of pectin methylesterase and the impact of thermal treatment on the texture, electrical impedance characteristics and cell wall structure of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of Food Engineering*, 199, 9-18. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.12.001.
- Ando, Y., Maeda, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N., Hagiwara, S., & Nabetani, H. (2016). Effect of air-dehydration pretreatment before freezing on the electrical impedance characteristics and texture of carrots. *Journal of Food Engineering*, 169, 114-121. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.026.
- Ando, Y., Mizutani, K., & Wakatsuki, N. (2014). Electrical impedance analysis of potato tissues during drying. *Journal of Food Engineering*, 121, 24-31. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.008.
- Aristizábal-Botero, W. (2010). *Electromagnetismo con aplicaciones a la biología y a la ingeniería*. Manizales, Colombia: Universidad de Caldas.
- Arora, P., Sindhu, A., Dilbaghi, N., & Chaudhury, A. (2011). Biosensors as innovative tools for the detection of food borne pathogens. *Biosensors and Bioelectronics*, 28(1), 1-12. doi:10.1016/j.bios.2011.06.002.
- Bera, T. K., Bera, S., Kar, K., & Mondal, S. (2016). Studying the variations of complex electrical bio-impedance of plant tissues during boiling. *Procedia Technology*, 23, 248-255. doi:10.1016/j.protcy.2016.03.024.
- Bertemes-Filho, P., Valichski, R., Pereira, R., & Paterno, A. (2010). Bioelectrical impedance analysis for bovine milk: preliminary results. *Journal of Physics*, 224(1), 012133. doi:10.1088/1742-6596/224/1/012133.
- Blanco-Díaz, M. T., Del Río-Celestino, M., Martínez-Valdivieso, D., & Font, R. (2014). Use of visible and near-infrared spectroscopy for predicting antioxidant compounds in summer squash (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo*). *Food Chemistry*, 164, 301-308. doi:10.1016/j.foodchem.2014.05.019.
- Bondarenko, A. S., & Ragoisha, G. A. (2005). Inverse problem in potentiodynamic electrochemical impedance. A. L. Pomerantsev (Ed.), *Progress in Chemometrics Research* (pp. 89-102). Nueva York: EE. UU.: Nova Science Publishers. doi:10.1016/j.electacta.2004.10.055.

Descargos de responsabilidad

Los autores están de acuerdo con la publicación del presente artículo y declaran que no existe ningún conflicto de interés que afecte los resultados.

- Boumya, W., Laghrib, F., Lahrich, S., Farahi, A., Achak, M., Bakasse, M., & El Mhammedi, M. A. (2017). Electrochemical impedance spectroscopy measurements for determination of derivatized aldehydes in several matrices. *Heliyon*, 3(10), 1-18. doi:10.1016/j.heliyon.2017.e00392.
- Caravia, L., Collins, C., & Tyerman, S. (2015). Electrical impedance of Shiraz berries correlates with decreasing cell vitality during ripening. *Australian journal of grape and wine research*, 21(3), 430-438. doi:10.1111/ajgw.12157.
- Chen, T.-H., Zhu, Y.-P., Wang, P., Han, M.-Y., Wei, R., ... & Zhou, G.-H. (2016). The use of the impedance measurements to distinguish between fresh and frozen-thawed chicken breast muscle. *Meat Science*, 116, 151-157. doi:10.1016/j.meatsci.2016.02.003.
- Chowdhury, A., Kanti Bera, T., Ghoshal, D., & Chakraborty, B. (2017). Electrical impedance variations in banana ripening: an analytical study with electrical impedance spectroscopy. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), 1-14. doi:10.1111/jfpe.12387.
- Chowdhury, A., Singh, P., Bera, T. K., Ghoshal, D., & Chakraborty, B. (2017). Electrical impedance spectroscopic study of mandarin orange during ripening. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 1654-1664. doi:10.1007/s11694-017-9545-y.
- Das, C., Chakraborty, S., Acharya, K., Bera, N. K., Chattopadhyay, D., ... Chattopadhyay, S. (2017). FT-MIR supported Electrical Impedance Spectroscopy based study of sugar adulterated honeys from different floral origin. *Talanta*, 171, 327-334. doi:10.1016/j.talanta.2017.05.016.
- De Jesús, C., Hernández-Coronado, G., Girón, J., Barat, J. M., Pagan, M. J., Alcañiz, M., ... Grau, R. (2014). Classification of unaltered and altered dry-cured ham by impedance spectroscopy: A preliminary study. *Meat Science*, 98(4), 695-700. doi:10.1016/j.meatsci.2014.05.014.
- Dong, J., Zhao, H., Xu, M., Ma, Q., & Ai, S. (2013). A label-free electrochemical impedance immunosensor based on AuNPs/PAMAM-MWCNT-Chi nanocomposite modified glassy carbon electrode for detection of *Salmonella typhimurium* in milk. *Food Chemistry*, 141(3), 1980-1986. doi:10.1016/j.foodchem.2013.04.098.
- Durante, G., Becari, W., Lima, F. A., & Peres, H. E. (2016). Electrical impedance sensor for real-time detection of bovine milk adulteration. *IEEE Sensors Journal*, 16(4), 861-865. doi:10.1109/JSEN.2015.2494624.

- El Khaled, D., Castellano, N. N., Gazquez, J. A., García Salvador, R. M., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Cleaner quality control system using bioimpedance methods: a review for fruits and vegetables. *Journal of Cleaner Production*, 140(3), 1749-1762. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.096.
- Farahi, A., El Gaini, L., Achak, M., El Yamani, S., El Mhammedi, M. A., & Bakasse, M. (2015). Interaction study of paraquat and silver electrode using electrochemical impedance spectroscopy: Application in milk and tomato samples. *Food Control*, 47, 679-685. doi:10.1016/j.foodcont.2014.08.005.
- Farfán, J. A. (2011). *Propiedades estructurales y espectroscopía de impedancia del estanato tipo perovskita (Ba, Sr) SnO3* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Felice, C. J., Madrid, R. E., Olivera, J. M., Rotger, V. I., & Valentinuzzi, M. E. (1999). Impedance microbiology: quantification of bacterial content in milk by means of capacitance growth curves. *Journal of Microbiological Methods*, 35(1), 37-42. doi:10.1016/S0167-7012(98)00098-0.
- Fernández-Segovia, I., Fuentes, A., Aliño, M., Masot, R., Alcañiz, M., & Barat, J. M. (2012). Detection of frozen-thawed salmon (*Salmo salar*) by a rapid low-cost method. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 210-216. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.06.003.
- Figueiredo-Neto, A., Cárdenas-Olivier, N., Rabelo-Cordeiro, E., & Pequeno de Oliveira, H. (2017). Determination of mango ripening degree by electrical impedance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 222-226. doi:10.1016/j.compag.2017.10.018.
- Fuentes, A., Masot, R., Fernández-Segovia, I., Ruiz-Rico, M., Alcañiz, M., & Barat, J. M. (2013). Differentiation between fresh and frozen-thawed sea bream (*Sparus aurata*) using impedance spectroscopy techniques. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 210-217. doi:10.1016/j.ifset.2013.05.001.
- Fuentes, A., Vázquez-Gutiérrez, J. L., Pérez-Gago, M. B., Vonasek, E., Nitin, N., & Barrett, D. M. (2014). Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture. *Journal of Food Engineering*, 133, 16-22. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.02.016.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., & Martínez-Monzó, J. (2008). Textural properties of potatoes (*Solanum tuberosum* L., cv. Monalisa) as affected by different cooking processes. *Journal of Food Engineering*, 88(1), 28-35. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.12.001.
- González-Araiza, J. (2014). *Impedancia bio-eléctrica como técnica no-destruccion para medir la firmeza de la fresa (Fragaria x Ananassa Duch)* y su relación con técnicas convencionales (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gram, L., & Dalgaard, P. (2002). Fish spoilage bacteria-problems and solutions. *Current opinion in biotechnology*, 13(3), 262-266. doi:10.1016/S0958-1669(02)00309-9.
- Grossi, M., Di Lecce, G., Toschi, T. G., & Riccò, B. (2014). Fast and accurate determination of olive oil acidity by electrochemical impedance spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*, 14(9), 2947-2954. doi:10.1109/JSEN.2014.2321323.
- Grossi, M., Lanzoni, M., Pompei, A., Lazzarini, R., Matteuzzi, D., & Riccò, B. (2008). Detection of microbial concentration in ice-cream using the impedance technique. *Biosensors and Bioelectronics*, 23(11), 1616-1623. doi:10.1016/j.bios.2008.01.032.
- Guermazi, M., Kanoun, O., & Derbel, N. (2014). Investigation of long time beef and veal meat behavior by bioimpedance spectroscopy for meat monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 14(10), 3624-3630. doi:10.1109/JSEN.2014.2328858.
- Hargin, K. D. (1996). Authenticity issues in meat and meat products. *Meat Science*, 43(Supl. 1), S277-S289. doi:10.1016/0309-1740(96)00072-1.
- Hernández-Chávez, J. F., González-Córdova, A. F., Sánchez-Escalante, A., Torrescano, G. R., Camou, J. P., & Vallejo-Cordoba, B. (2007). Técnicas analíticas para la determinación de la autenticidad de la carne y de los productos cárnicos procesados térmicamente. *Nacameh*, 2(1), 97-109.
- Imaizumi, T., Tanaka, F., Hamanaka, D., Sato, Y., & Uchino, T. (2015). Effects of hot water treatment on electrical properties, cell membrane structure and texture of potato tubers. *Journal of Food Engineering*, 162(1), 56-62. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.04.003.
- Jiménez, C., & León, D. E. (2009). Biosensores: Aplicaciones y perspectivas en el control y calidad de procesos y productos alimenticios. *Vitae*, 16(1), 144-155.
- Jishu, T. Y., & Du Guangyuan, Z. (2012). Change of electric parameters and physiological parameters of kiwi for storage period. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 43(1), 127-133. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.023.
- Jorge, J., Pereira, J. C., Rodríguez, M., Barrios N., Oliva, D., & Antonio, J. (2018). Impedance spectroscopy in water/oil emulsions in a range of intermediate frequencies. *Ingeniería UC*, 25(3), 388-395.
- Joshi, R., Janagama, H., Dwivedi, H. P., Kumar, T. S., Jaykus, L.-A., Schefers, J., & Sreevatsan, S. (2009). Selection, characterization, and application of DNA aptamers for the capture and detection of *Salmonella enterica* serovars. *Molecular and Cellular Probes*, 23(1), 20-28. doi:10.1016/j.mcp.2008.10.006.
- Juansah, J., Budiastara, W., Dahlan, K., & Seminar, K. (2012). The prospect of electrical impedance spectroscopy as non-destructive evaluation of citrus fruits acidity. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), 58-64.
- Juansah, J., Budiastara, I., Dahlan, K., & Seminar, K. (2014). Electrical properties of garut citrus fruits at low alternating current signal and its correlation with physicochemical properties during maturation. *International Journal of Food Properties*, 17(7), 1498-1517. doi:10.1080/10942912.2012.723233.

- Kaltenecker, P., Szöllösi, D., Friedrich, L., & Vozáry, E. (2013). Determination of salt content in various depth of pork chop by electrical impedance spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 434(1), 1-5. doi:10.1088/1742-6596/434/1/012094.
- Kertész, Á., Hlaváčková, Z., Vozáry, E., & Staroňová, L. (2015). Relationship between moisture content and electrical impedance of carrot slices during drying. *International Agrophysics*, 29(1), 61-66. doi:10.1515/intag-2015-0013.
- Kuson, P., & Terdwongworakul, A. (2013). Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 50-56. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.11.021.
- León, K., Domingo, M., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084-1091. doi:10.1016/j.foodres.2006.03.006.
- Liu, J. T., Settu, K., Tsai, J. Z., & Chen, C. J. (2015). Impedance sensor for rapid enumeration of *E. coli* in milk samples. *Electrochimica Acta*, 182, 89-95. doi:10.1016/j.electacta.2015.09.029.
- Lopes, A. M., Machado, J. T., & Ramalho, E. (2017). On the fractional-order modeling of wine. *European Food Research and Technology*, 243(6), 921-929. doi:10.1007/s00217-016-2806-x.
- Lopes, A. M., Machado, J. T., Ramalho, E., & Silva, V. (2018). Milk characterization using electrical impedance spectroscopy and fractional models. *Food Analytical Methods*, 11(3), 901-912. doi:10.1007/s12161-017-1054-4.
- Masot, R. (2010). *Desarrollo de un sistema de medida basado en espectroscopia de impedancia para la determinación de parámetros fisicoquímicos en alimentos* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Mitcham, B., Cantwell, M., & Kader, A. (1996). Methods for determining quality of fresh commodities. *Perishables Handling Newsletter*, 85, 1-5. Recuperado de <https://ucanr.edu/datastoreFiles/608-422.pdf>.
- Nakawajana, N., Terdwongworakul, A., & Teerachaichayut, S. (2016). Minimally destructive assessment of mangosteen translucency based on electrical impedance measurements. *Journal of Food Engineering*, 171, 137-144. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.10.020.
- Nakoniczna, A., Paszkowski, B., Wilczek, A., Szyplowska, A., & Skierucha, W. (2016). Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products. *Food Control*, 66, 116-129. doi:10.1016/j.foodcont.2016.01.044.
- Nguyen, H. B., & Nguyen, L. T. (2015). Rapid and non-invasive evaluation of pork meat quality during storage via impedance measurement. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(8), 1718-1725. doi:10.1111/ijfs.12847.
- Ojeda, M., & Pire, R. (1997). Estrategias para estimar el nivel de maduración en uvas para vinificación. *Bioagro*, 9(1), 20-25.
- Paredes, J., Becerro, S., & Arana, S. (2014). Label-free interdigitated microelectrode based biosensors for bacterial biofilm growth monitoring using Petri dishes. *Journal of Microbiological Methods*, 100, 77-83. doi:10.1016/j.mimet.2014.02.022.
- Parlapani, F. F., Verdos, G. I., Haroutounian, S. A., & Boziaris, I. S. (2015). The dynamics of *Pseudomonas* and volatilmome during the spoilage of gutted sea bream stored at 2 °C. *Food Control*, 55, 257-265. doi:10.1016/j.foodcont.2015.03.004.
- Pérez-Esteve, E., Fuentes, A., Grau, R., Fernández-Segovia, I., Masot, R., Alcañiz, M., & Barat, J. (2014). Use of impedance spectroscopy for predicting freshness of sea bream (*Sparus aurata*). *Food Control*, 35(1), 360-365. doi:10.1016/j.foodcont.2013.07.025.
- Pérez, C. (2014). *Equipo de espectroscopia de Bioimpedancia eléctrica en el margen de 1kHz-1MHz* (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Pliquet, U. (2010). Bioimpedance: a review for food processing. *Food Engineering Reviews*, 2(2), 74-94. doi:10.1007/s12393-010-9019-z.
- Porras, D. P. N., Castillo, H. S. V., & Sánchez, S. A. M. (2010). Las biopelículas en la industria de alimentos. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8(2), 118-128.
- Rattan, N., & Ramaswamy, H. (2014). Comparison of free/bi-axial, fixed axial, end-over-end and static thermal processing effects on process lethality and quality changes in canned potatoes. *LWT-Food Science and Technology*, 58(1), 150-157. doi:10.1016/j.lwt.2014.02.056.
- Rehman, M., Izneid, A., Basem, A., Abdullah, M. Z., & Arshad, M. R. (2011). Assessment of quality of fruits using impedance spectroscopy. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(6), 1303-1309. doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02636.x.
- Rizo, A., Fuentes, A., Fernández-Segovia, I., Masot, R., Alcañiz, M., & Barat, J. M. (2013). Development of a new salmon salting-smoking method and process monitoring by impedance spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), 218-224. doi:10.1016/j.lwt.2012.09.025.
- Rodríguez, A. A., Uriarta, A. R., Palazuelos, R. C., & Pérez, C. (2012). *Biología celular*. Culiacán, México: Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Salazar-Muñoz, Y. (2004). *Caracterización de tejidos cardiacos mediante métodos mínimamente invasivos y no invasivos basados en espectroscopia de impedancia eléctrica* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Scandurra, G., Tripodi, G., & Verzera, A. (2013). Impedance spectroscopy for rapid determination of honey floral origin. *Journal of Food Engineering*, 119(4), 738-743. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.06.042.
- Sharma, A., Bansod, B. K., & Thakur, R. (2017). Development of Moisture Prediction Model for Tea using Electrical Impedance Spectroscopy. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(2), 38-43. doi:10.22161/ijaers.4.2.8.

- Sun, J., Zhang, R., Zhang, Y., Liang, Q., Li, G., Yang, N., ... Guo, J. (2018). Classifying fish freshness according to the relationship between EIS parameters and spoilage stages. *Journal of Food Engineering*, 219, 101-110. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.09.011.
- Torres, R., Montes, E., Pérez, O., & Andrade, R. (2013). Relación del color y del estado de madurez con las propiedades fisicoquímicas de frutas tropicales. *Información Tecnológica*, 24(3), 51-56. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n3/art07.pdf>.
- Tubia, I., Paredes, J., Pérez-Lorenzo, E., & Arana, S. (2018). *Brettanomyces bruxellensis* growth detection using interdigitated microelectrode based sensors by means of impedance analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, 269, 175-181. doi:10.1016/j.sna.2017.11.009.
- Vidaček, S., Janči, T., Brdek, Z., Udovičić, D., Marušić, N., Medić, H., ... Lacković, I. (2012). Differencing sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets frozen in different conditions by impedance measurements. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(8), 1757-1764. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03031.x.
- Villa-García, M., Pedroza-Islas, R., Martín-Martínez, S., & Aguilar-Frutos, M. (2013). Espectroscopia de impedancia: un método rápido y eficiente para el monitoreo del crecimiento de *Lactobacillus acidophilus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(1), 57-64.
- Wang, H., Palmer, J., & Flint, S. (2016). A rapid method for the nonselective enumeration of *Yersinia enterocolitica*, a foodborne pathogen associated with pork. *Meat Science*, 113, 59-61. doi:10.1016/j.meatsci.2015.11.005.
- Watada, A. E., Herner, R. C., Kader, A. A., Romani, R. J., & Staby, G. L. (1984). Terminology for the description of development stages of horticultural crops. *HortScience*, 19(1), 20-25.
- Watanabe, T., Ando, Y., Orikasa, T., Kasai, S., & Shiina, T. (2018). Electrical impedance estimation for apple fruit tissues during storage using Cole–Cole plots. *Journal of Food Engineering*, 221, 29-34. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.09.028.
- Watanabe, T., Ando, Y., Orikasa, T., Shiina, T., & Kohyama, K. (2017). Effect of short time heating on the mechanical fracture and electrical impedance properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Food Engineering*, 194, 9-14. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.09.001.
- Wu, L., Ogawa, Y., & Tagawa, A. (2008). Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics. *Journal of Food Engineering*, 87(2), 274-280. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.12.003.
- Yang, Y., Wang, Z. Y., Ding, Q., Huang, L., Wang, C., & Zhu, D. Z. (2013). Moisture content prediction of porcine meat by bioelectrical impedance spectroscopy. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3), 819-825. doi:10.1016/j.mcm.2012.12.020.
- Yu, L., Zhang, Y., Hu, C., Wu, H., Yang, Y., ... & Jia, N. (2015). Highly sensitive electrochemical impedance spectroscopy immunosensor for the detection of AFB1 in olive oil. *Food Chemistry*, 176, 22-26. doi:10.1016/j.foodchem.2014.12.030.
- Zavadlav, S., Janči, T., Lacković, I., Karlović, S., Rogulj, I., & Vidaček, S. (2016). Assessment of storage shelf life of European squid (cephalopod: Loliginidae, *Loligo vulgaris*) by bioelectrical impedance measurements. *Journal of Food Engineering*, 184, 44-52. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.03.022.
- Zhao, X., Zhuang, H., Yoon, S. C., Dong, Y., Wang, W., & Zhao, W. (2017). Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances. *Journal of Food Quality*, 2017. doi:10.1155/2017/6370739.
- Zia, A. I., Syaifudin, A. M., Mukhopadhyay, S., Yu, P., Al-Bahadly, I., Gooneratne, C. P., ... Liao, T.-S. (2013). Electrochemical impedance spectroscopy based MEMS sensors for phthalates detection in water and juices. *Journal of Physics*, 439(1), 1-18. doi:10.1088/1742-6596/439/1/012026.
- Żywica, R., & Banach, J. K. (2015). Simple linear correlation between concentration and electrical properties of apple juice. *Journal of Food Engineering*, 158, 8-12. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.02.012.