

Caracterización de las propiedades eléctricas de un vegetal, aplicación en plantas de chile carnaval

Oscar Josué Barrón López, Juan Prado Olivarez,
Juan Carlos Gómez Cortés, José Alfredo Padilla,
Alejandro Israel Barranco Gutiérrez,
Jessica Alejandra Araujo Rodríguez

Tecnológico Nacional de México en Celaya,
México

m2303035@itcelaya.edu.mx

Resumen. Este artículo presenta un proyecto preliminar destinado a desarrollar un prototipo para la espectroscopia de impedancia eléctrica en plantas de chile carnaval, enfatizando varios aspectos, incluyendo la comunicación, los materiales utilizados, las técnicas empleadas y, en particular, subrayando la importancia del balance hídrico y la hidratación, dada su importancia primordial en la evaluación de cultivos. Al proporcionar conocimientos invaluables sobre el cuidado de los cultivos, esta investigación aspira a hacer una contribución sustancial a las prácticas agrícolas. La espectroscopia de impedancia eléctrica emerge como una técnica prometedora para evaluar la salud y el rendimiento de las plantas de chile carnaval, permitiendo un monitoreo no invasivo y preciso de su estado de hidratación. El énfasis en la comunicación y los materiales utilizados en el desarrollo del prototipo asegura la accesibilidad y eficacia de la tecnología propuesta. Se espera que este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones en agricultura de precisión, mejorando la gestión de los recursos hídricos y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

Palabras clave: Espectroscopia de impedancia eléctrica, chile carnaval, hidratación, cultivos.

Characterization of the Electrical Properties of a Plant, Application in Chile Carnival Plants

Abstract. This article presents a preliminary project aimed at developing a prototype for electrical impedance spectroscopy in chile carnival plants, emphasizing various aspects including communication, materials used, techniques employed, and particularly underscoring the significance of water balance and hydration, given their paramount importance in crop evaluation. By furnishing invaluable insights into crop care, this research aspires to make a substantial contribution to agricultural practices. Electrical impedance spectroscopy emerges as a promising technique for assessing the health and performance of chile carnival plants, enabling non-invasive and precise monitoring of their hydration status. The emphasis on communication and materials utilized in prototype development ensures accessibility and efficacy of

the proposed technology. This project is expected to lay the groundwork for future research in precision agriculture, enhancing water resource management, and advocating for more sustainable agricultural practices.

Keywords: Electrical impedance spectroscopy, chile carnaval, hydration, crops.

1. Introducción

Este estudio se centra en la elaboración de un prototipo preliminar de un sistema para medir la impedancia eléctrica en plantas, con un enfoque principal en las hojas. El objetivo principal de la investigación radica en el procesamiento de los datos adquiridos mediante este prototipo, con el fin de evaluar el estado de la planta o cultivo, permitiendo así una comprensión más precisa de su estado fisiológico.

1.1. Espectroscopia eléctrica

La espectroscopia eléctrica ha emergido como una herramienta importante en el campo de la biología vegetal, permitiendo la medición y análisis de la actividad eléctrica en las plantas con una precisión aceptable [1]. En la búsqueda por comprender los mecanismos que regulan el funcionamiento y la respuesta de las plantas a su entorno, se ha utilizado esta técnica, principalmente debido a su capacidad para caracterizar procesos fisiológicos y bioquímicos cruciales [2]. Desde la detección temprana de estrés hasta la optimización del rendimiento de los cultivos, la espectroscopia eléctrica ofrece una ventana única para observar y comprender la vida vegetal en su nivel más fundamental.

En esta era de desafíos ambientales y demandas alimentarias crecientes, la necesidad de comprender los sistemas vivos, incluidas las plantas, es más apremiante que nunca. La espectroscopia eléctrica se erige como una herramienta indispensable en este esfuerzo, permitiendo a los investigadores profundizar en los procesos biológicos que subyacen al crecimiento, desarrollo y respuesta adaptativa de las plantas ante los cambios ambientales [3,4].

Se necesitan usar sistemas electrónicos que apliquen técnicas de inteligencia artificial para optimizar los procesos agroindustriales. Este proyecto es el estudio preliminar de un sistema el cual incluye un sensor y comunicación por medir espectroscopia de impedancia eléctrica de hojas de chile carnaval. Este estudio en su etapa final utilizará la inteligencia artificial para realizar la medición de manera autónoma.

1.2. Antecedentes

La exploración de la actividad eléctrica en las plantas se remonta a los primeros pasos de la fisiología vegetal, cuando visionarios científicos como Burdon-Sanderson y Julius von Sachs comenzaron a investigar la excitabilidad y conductividad eléctrica en los tejidos vegetales [5,6]. Sin embargo, fue en el transcurso del siglo XX cuando la técnica de medición de impedancia eléctrica en hojas surgió como una herramienta innovadora y no invasiva para sondear la actividad eléctrica en las plantas.

La impedancia eléctrica, que describe la resistencia y la capacidad de un material para oponerse al flujo de corriente alterna, se estableció como una medida sensible de las propiedades eléctricas de las plantas [7]. Esta técnica permitió caracterizar la respuesta eléctrica de las hojas en función de frecuencias específicas, proporcionando información valiosa sobre la conductividad iónica, la capacidad de almacenamiento de carga y la estructura celular de las plantas [8].

Con el advenimiento de tecnologías de medición más avanzadas, incluyendo equipos de alta precisión y análisis de datos computarizados, los investigadores pudieron profundizar en la complejidad de la respuesta eléctrica de las plantas ante diversos estímulos y condiciones ambientales. Desde la detección de señales eléctricas asociadas con la apertura de estomas hasta la evaluación de la respuesta de las plantas al estrés hídrico y térmico, la medición de impedancia eléctrica en hojas demostró ser una herramienta versátil en el estudio de la fisiología vegetal [9].

La investigación en este campo ha generado descubrimientos significativos sobre los mecanismos subyacentes a la respuesta de las plantas a su entorno, así como la identificación de biomarcadores eléctricos para la salud y el rendimiento de los cultivos [10]. Sin embargo, aún existen desafíos en la interpretación de los datos de impedancia eléctrica y su integración con otros enfoques de investigación, lo que subraya la necesidad continua de investigaciones interdisciplinarias y el desarrollo de nuevas técnicas analíticas.

1.3. Estado del arte

La medición de impedancia eléctrica en hojas de plantas ha sido objeto de una amplia investigación en los últimos años, abarcando una variedad de aspectos relacionados con la fisiología vegetal, la agronomía y la ecología.

Numerosos estudios han investigado cómo la medición de la impedancia eléctrica en hojas puede proporcionar información sobre la respuesta de las plantas al estrés abiótico, como la sequía, la salinidad y la temperatura, así como al estrés biótico, incluyendo la presencia de patógenos y herbívoros. Por ejemplo, Wang et al. (2016) examinaron los cambios en la impedancia eléctrica en hojas de trigo sometidas a estrés hídrico [11], mientras que Zimmermann et al. (2020) investigaron la respuesta de la impedancia eléctrica en hojas de tomate ante la infección por patógenos [12].

Además, la medición de la impedancia eléctrica en hojas se ha utilizado como una herramienta para evaluar el estado de salud de las plantas y detectar enfermedades o deficiencias nutricionales. Sankaran et al. (2010) investigaron la relación entre la impedancia eléctrica en hojas y el contenido de clorofila en plantas de tomate [13], mientras que Fuentes et al. (2015) estudiaron la impedancia eléctrica en hojas de maíz para detectar deficiencias nutricionales [14].

Por último, esta técnica ha encontrado aplicaciones en agricultura de precisión, donde se utiliza para monitorear el estado de las plantas a nivel parcelario y optimizar el manejo agronómico. Sadeghi-Tehran et al. (2015) desarrollaron un sistema de monitoreo de campo basado en la medición de la impedancia eléctrica en hojas para detectar el estrés hídrico en viñedos [15].

Estos estudios representan solo una etapa preliminar de la investigación realizada en el campo de la medición de impedancia eléctrica en hojas de plantas de chile carnaval,

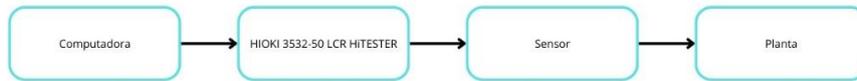


Fig. 1. Comunicación entre elementos para la medición.

destacando su diversidad de aplicaciones y su potencial para mejorar nuestra comprensión y manejo de la vida vegetal.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presenta la estructura general del modelo propuesto, los detalles de la comunicación entre el medidor de impedancia eléctrica y el equipo de cómputo. Así como el uso del software empleado como el uso del sensor al realizar las medidas de impedancia eléctrica, ver Fig. 1.

2.1. Planta (Chile carnaval)

El chile carnaval ofrece varias cualidades que lo hacen ideal para medir impedancia eléctrica en estudios agrícolas y científicos. Su composición de tejido vegetal, respuesta al agua y nutrientes, tamaño y forma del fruto, junto con su disponibilidad y accesibilidad, que lo convierten ideal para este propósito.

El chile carnaval requiere un suelo bien drenado, preferiblemente rico en materia orgánica, con un pH entre 6.0 y 7.0 para un crecimiento óptimo. Es crucial mantener el suelo uniformemente húmedo mediante un riego regular, evitando tanto el exceso de humedad como la sequedad extrema. Se utiliza una exposición directa al sol durante al menos 6 horas diarias para asegurar un desarrollo vigoroso de la planta y una producción de frutos óptima. Estos elementos fueron fundamentales para el cultivo exitoso del chile carnaval, ya que proporcionan las condiciones ideales para su crecimiento y desarrollo saludable.

2.2. Sensor

El sensor de impedancia se elaboró con dos electrodos, uno en la parte inferior y otro en la parte superior ajustable, se utilizó para medir la impedancia eléctrica de la hoja de chile carnaval entre estos electrodos.

El electrodo inferior se coloca en contacto directo con la hoja de chile carnaval que se analizó, mientras que el electrodo superior ajustable puede moverse hacia arriba o hacia abajo para variar la distancia entre los electrodos. Al aplicar una corriente eléctrica entre los electrodos, se mide la resistencia de la hoja de chile carnaval al paso de esta corriente. Cuanto mayor sea la impedancia eléctrica de esta, mayor será la resistencia y, por lo tanto, mayor será la dificultad para que la corriente fluya entre los electrodos. El ajuste de la distancia entre los electrodos permite adaptar el sensor a diferentes espesores.

2.3. Analizador de impedancia HIOKI 3532-50

El dispositivo LCR-HiTESTER 3532-50 de la marca HIOKI constituye un medidor de impedancia equipado con una interfaz de usuario basada en pantalla táctil. Dicha pantalla de control facilita la manipulación y operatividad del analizador de impedancia, permitiendo ajustes precisos de parámetros tales como la frecuencia de muestreo, el nivel de corriente o voltaje de la señal de medición, así como el intervalo temporal entre mediciones, entre otros. Así mismo, posibilita la realización de mediciones directamente desde la pantalla táctil, sin requerir la conexión de una computadora al dispositivo HIOKI, se consultó el manual HIOKI para comprobar las características técnica [16].

2.4. Equipo de cómputo y software

El proveedor del equipo HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER suministra un software que actúa como interfaz entre la computadora y el usuario. A través de este software, es posible definir diversos parámetros de medición que resultan útiles en contextos donde se requiere una adquisición eficiente de datos, especialmente en casos que implican una alta frecuencia de mediciones consecutivas, los parámetros y variables de medición [16].

Se realizó la medición de espectroscopia de impedancia eléctrica en un rango de frecuencias, las cuales son configuradas en una ventana accesible desde el menú "Measure" y denominada "Frequency Characteristics" (ver Fig. 2a) en dicha ventana se definen las frecuencias asociadas a cada medición. Además, en la misma figura se muestra cómo se establece la cantidad de mediciones realizadas por el equipo HIOKI, así como la frecuencia de la señal de medición; en este caso se muestran doscientas diferentes frecuencias de 1 kHz hasta 100 kHz, que implican doscientas mediciones a diferentes frecuencias. Sin embargo, si se desea realizar estas mediciones a una sola frecuencia, simplemente se ingresa el valor de la frecuencia deseada. Así mismo, en esta ventana "Frequency Characteristics", se puede activar la opción para almacenar las mediciones efectuadas por el analizador de impedancia en una hoja de cálculo Excel. Para acceder a más opciones y ajustes, se abre la ventana "Option Settings", en la cual se configura el intervalo entre cada medición, ver Fig. 2b.

En relación con el equipo informático, se utilizó una laptop OMEN 15 15.6" i7-10750H 8GB GTX 1650 Ti con Windows 11, equipada con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-9750H CPU y 8 GB de memoria RAM. En este dispositivo se instaló el software HIOKI LCR adaptando el software para una versión de 11 ya que la versión solo es compatible con Windows 7 y se realizará una serie de experimentos que constituyen el desarrollo del sistema preliminar.

2.5. Muestra

Las características de la planta muestra de chile carnaval enfocadas en las hojas de estas, son alargadas y lanceoladas, con bordes lisos o ligeramente ondulados. El tamaño de las hojas promedio tiene una longitud de 10 centímetros y un ancho de entre 1.8 centímetros. En cuanto al color, las hojas son verde brillante.

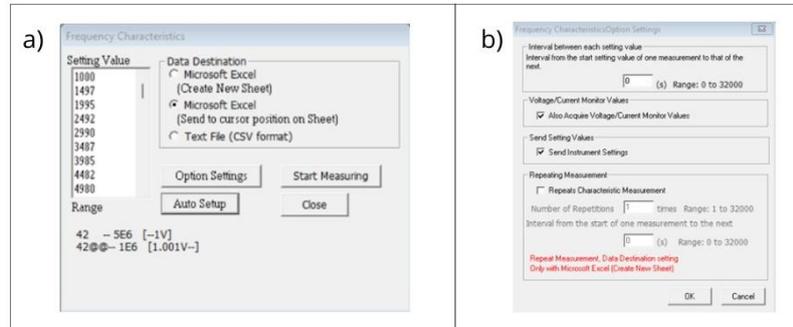


Fig. 2. a) Lista de las frecuencias que se aplican en las mediciones (1kHz a 100kHz), b) ventana de configuración de las características y los intervalos de tiempo entre cada medición.

La textura de las hojas de chile carnaval es suave y ligeramente cerosa en la superficie superior, mientras que la superficie inferior es áspera. La estructura interna de la hoja de chile carnaval está compuesta por tejidos, incluyendo la epidermis, el mesófilo y los tejidos vasculares. Por último, las muestras de hoja de chile carnaval están libre de daños graves, sin signos de enfermedades, insectos u otros problemas de salud de la planta, ya que hojas sanas y vigorosas son importantes para la realización correcta de las mediciones.

2.6. Sistema de medición

Se utilizó un método que consiste en realizar un barrido de frecuencias al par de electrodos en busca de cambios en la impedancia o el ángulo de fase en la hoja. Para ello, se utilizó el medidor de impedancia (LCR-HiTESTER 3532-50) con puente auto balanceado, utilizando el método de dos electrodos (bipolar) a través de un barrido de dos electrodos que se colocarán uno sobre la superficie de la hoja y otro en la parte inferior de esta. Los electrodos empleados son de la marca Bio Protech, modelo PE foam T716, fabricados con Ag/AgCl.

La Fig. 3 presenta el diagrama esquemático del sistema utilizado en las mediciones de la investigación, que es necesario establecer la comunicación entre el analizador de impedancia y la computadora, para lo cual se adquirió un cable USB-Serial, así como se fabricó un cable de conexión cruzada Db9-Db25. Estos dos cables, junto con el software LCR HIOKI, permiten la comunicación exitosa entre la computadora y el analizador de impedancia, posibilitando la transmisión de información entre ambos dispositivos.

Se observó que el protocolo de comunicación entre la computadora y el HIOKI sigue un patrón temporalmente medible, es decir la computadora transmite una secuencia de pulsos binarios para iniciar una medición de impedancia, ver Fig. 4, donde el primer flanco ascendente prepara al analizador de impedancia para realizar la medición. Por consiguiente, si se desean realizar dos mediciones, la secuencia de pulsos binarios se repetirá dos veces en la terminal TxD del conector Db9 del cable de comunicación entre la computadora y el HIOKI.

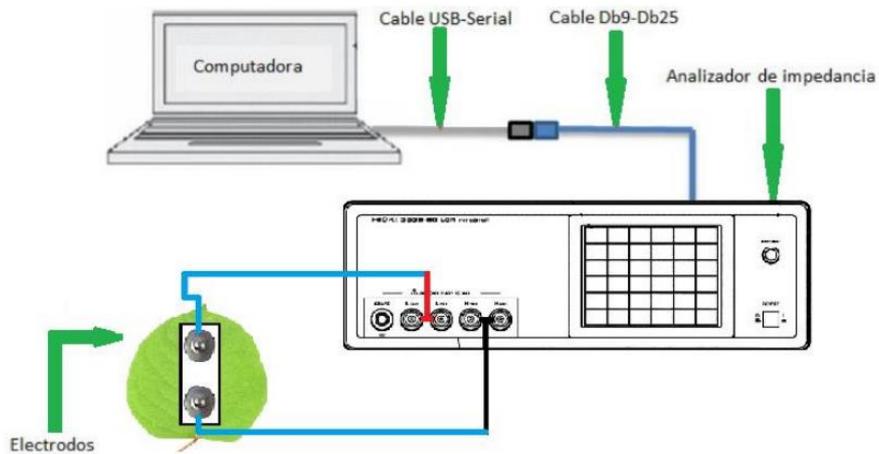


Fig. 3. Cadena de medición del sistema de medición de impedancia.



Fig. 4. Señal de inicialización de la medición.

El analizador de impedancia opera con rangos de voltaje para definir los niveles lógicos "alto" y "bajo". Así, un rango de voltaje que oscila entre 5V y 15V representa un nivel lógico alto, mientras que un nivel lógico bajo corresponde al voltaje situado entre -9V y -5V. Este hecho requiere una adaptación de la señal proveniente de la terminal TxD del conector Db9 para evitar posibles daños, lo que reduce la amplitud del voltaje en el nivel alto y transforma los voltajes negativos en cero voltios. De este modo, sincronizando el momento en que se debe activar correctamente el par de electrodos, garantizando así una medición precisa de la impedancia.

Una vez realizada la sincronización, se procedió a llevar a cabo las pruebas de medición de impedancia.

3. Resultados

La evaluación del estado fisiológico y la salud de las plantas mediante la medición de la impedancia eléctrica, especialmente en las hojas, está realizándose a la misma hoja en cada planta, constituyo así una herramienta significativa en la investigación botánica. La impedancia eléctrica, es influenciada por una gama de factores, entre los cuales se incluyen la salud general de la planta, su nivel de hidratación y la presencia de enfermedades, así como el estrés ambiental. En este contexto, la correlación entre los datos del módulo de impedancia eléctrica obtenidos y el estado de la hoja de la planta se presenta como un aspecto relevante.



Fig. 5. Plantas de chile carnaval.

Se realizaron tres pruebas en tres plantas de chile carnaval sometiéndolas a diferentes hidrataciones a cada una, siendo la primera cada 2 días, en estas condiciones, regar cada 2 días puede ayudar a mantener un nivel de humedad constante en el suelo, lo que es importante para el crecimiento saludable de la planta, la segunda cada 3 días, regar cada 3 días permite que el suelo se seque un poco entre riegos, lo que ayuda a prevenir problemas de encharcamiento y promueve el desarrollo de raíces más profundas y la tercera cada 4 días, regar cada 4 días permite que el suelo se seque más entre riegos, lo que puede ser beneficioso para promover un crecimiento más resistente y saludable de las raíces, cada una subministrándole 500 ml de agua esto con la finalidad de observar el cambio del módulo de impedancia, el uso de 500 ml es debido a que proporcionando suficiente humedad para sus necesidades sin saturar el suelo ni causar encharcamiento, lo que puede ser perjudicial para las raíces, presentado en los días posteriores, ver Fig 5.

Observando la gráfica, ver Fig. 6, se puede apreciar que se ha establecido un rango de frecuencias para tres especies vegetales con el fin de determinar la frecuencia óptima de medición para su evaluación. Se ha establecido que el rango óptimo se sitúa entre 1 kHz y 200 kHz en el eje X, La elección de una frecuencia de 1 kHz a 200 kHz para la frecuencia de hidratación se basó en la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas de chile carnaval, la cual está representado en una escala logarítmica.

En el eje Y, que representa el módulo de impedancia $|Z|$ en ohmios, se observa cómo varía la impedancia en función de la frecuencia. Este rango de frecuencias ha demostrado ser efectivo para evaluar cada una de las plantas de chile carnaval, mostrando niveles del módulo de impedancia que sugieren una respuesta adecuada a las mediciones realizadas. Es importante destacar que este rango ha sido seleccionado después de un análisis exhaustivo y se ha determinado como el más apropiado para llevar a cabo evaluaciones precisas y confiables de las especies en cuestión.

Se realizaron mediciones repetidas del módulo de impedancia $|Z|$ en cada cultivo cada dos días, durante 30 días, estableciendo siempre la misma hora para la medición, siendo ésta, las 11:00 A.M, ver Fig. 7.

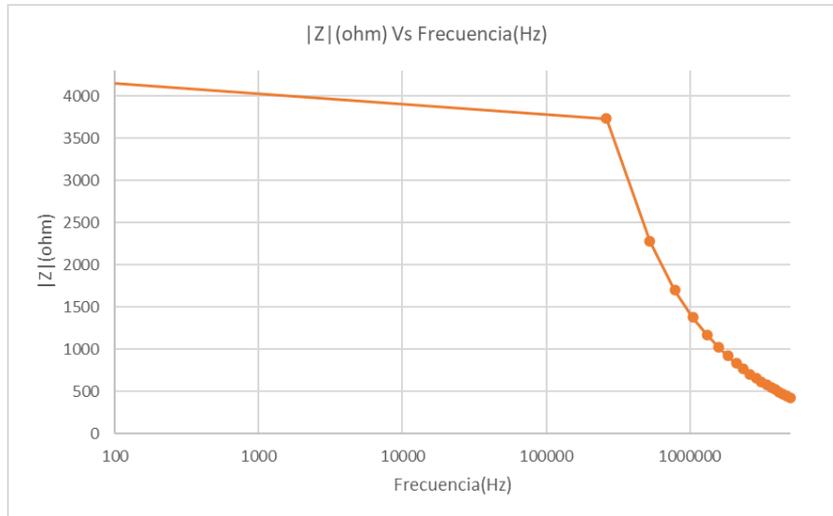


Fig. 6. Gráfica de frecuencia de trabajo óptima.

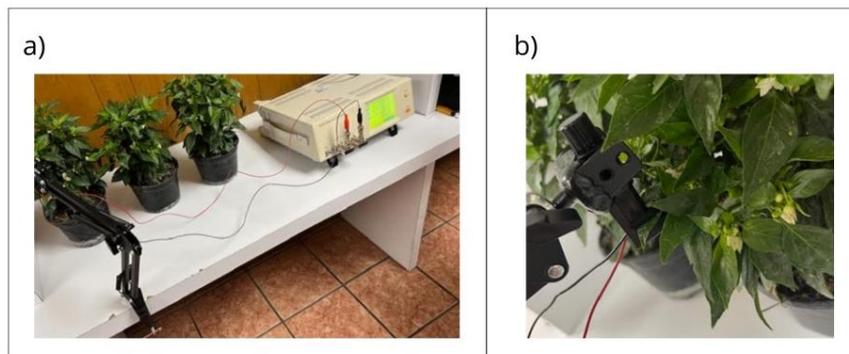


Fig. 7. a) Medición de cultivos con analizador de impedancias, b) Medición de hoja de cultivo con sensor.

Esto con el fin de observar su comportamiento a lo largo del período de estudio, desde el día 1 hasta el día 30, cuando se efectuó la última medición del módulo de impedancia $|Z|$.

Al comparar las dos gráficas del cultivo A, ver Fig. 8, se representa el módulo de impedancia $|Z|$ en función de la frecuencia (1 kHz a 200 kHz), se nota una ligera tendencia. Se observa que la primera medición del módulo de impedancia $|Z|$ tomada en el día 1, en comparación con la medición del día 30, muestra un ligero aumento en la impedancia en toda la gama de frecuencias evaluada.

Este aumento del módulo de impedancia $|Z|$ sugiere un incremento en la hidratación de la planta de chile carnaval a lo largo del período de medición. La respuesta de la planta a lo largo del tiempo muestra una mayor resistencia eléctrica, lo que indica un aumento en el contenido de agua en los tejidos vegetales. Este fenómeno está

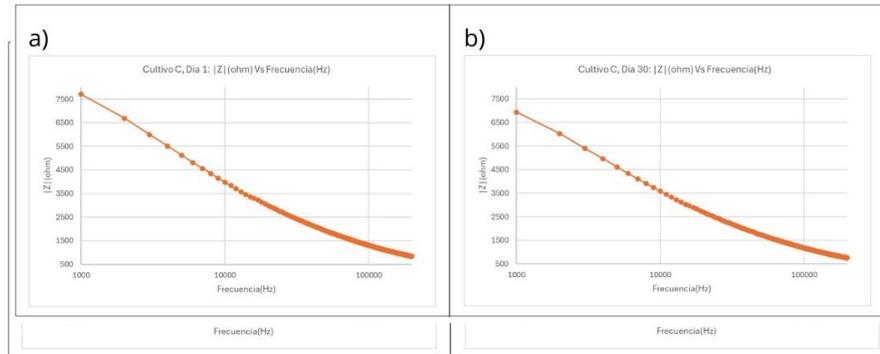


Fig. 8. Gráficas de cultivo A, día 1 y día 30: $|Z|$ vs frecuencia.

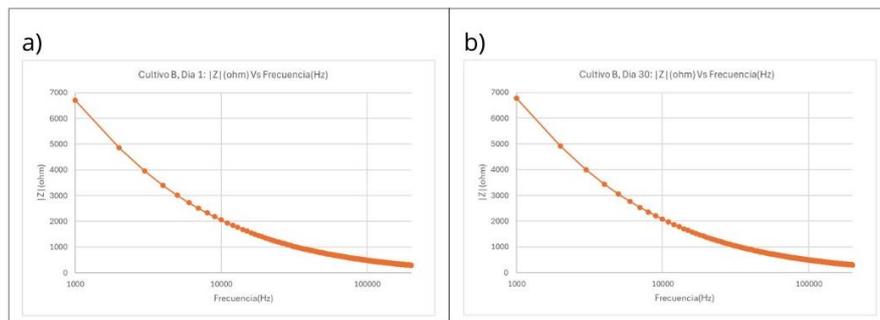


Fig. 9. Gráficas de cultivo B, día 1 y día 30: $|Z|$ vs frecuencia.

relacionado con la absorción gradual de agua por parte de las raíces de la planta y su distribución a través del sistema vascular. Este análisis comparativo proporciona información sobre el estado de hidratación del cultivo A, a lo largo del tiempo

Al comparar las dos gráficas del cultivo B, ver Fig. 9 se observa que la primera medición del módulo de impedancia $|Z|$ tomada en el día 1, en comparación con la medición del día 30, no muestra casi ninguna variación en el módulo de impedancia $|Z|$ en toda la gama de frecuencias evaluada.

Este casi nulo aumento en el módulo de impedancia $|Z|$ sugiere una hidratación ligera de la planta de chile carnaval a lo largo del período de medición. La respuesta de la planta a lo largo del tiempo muestra la misma resistencia eléctrica, lo que indica que no hubo un aumento en el contenido de agua en los tejidos vegetales.

Al analizar las últimas dos gráficas, ver Fig. 10. Se obtuvo una tendencia notable en la primera medición del módulo de impedancia $|Z|$ tomada en el día 1, en comparación con la medición del día 30, refleja un descenso del 10% del módulo de impedancia en toda la gama de frecuencias evaluada.

Este descenso en el módulo de impedancia $|Z|$ sugiere una disminución en la hidratación de la planta de chile carnaval durante el período de medición. La respuesta de la planta a lo largo del tiempo muestra una menor resistencia eléctrica, lo que indica una reducción en el contenido de agua en los tejidos vegetales.

4. Conclusión

La investigación revela que el estado de hidratación de la planta tiene un efecto substancial en su impedancia eléctrica, evidenciando una tendencia decreciente en condiciones de deshidratación. Este fenómeno se atribuye a la alteración de la conductividad eléctrica de los tejidos foliares. En contraste, se observa que el cultivo A y Cultivo B mantiene un nivel adecuado de hidratación que tiende a presentar un módulo de impedancia eléctrica más elevada y estable en comparación del cultivo C que presenta un decremento del módulo de impedancia eléctrica. Estos hallazgos apuntan a la importancia del equilibrio hídrico en la fisiología eléctrica de las plantas, lo cual constituye un aspecto relevante para la comprensión de su respuesta frente a condiciones ambientales fluctuantes. Además, se vislumbra un futuro prometedor para la aplicación de inteligencia artificial en la interpretación y predicción de los datos recopilados. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, se podría desarrollar un modelo predictivo que relacione los cambios en la impedancia eléctrica con el estado de hidratación de las plantas de chile carnaval. Este modelo podría ser utilizado para monitorear en tiempo real el estado de hidratación de las plantas y tomar decisiones de riego más precisas y eficientes. La combinación de la investigación tradicional con técnicas avanzadas de análisis de datos podría ofrecer nuevas perspectivas y soluciones innovadoras para mejorar el cultivo y la gestión agrícola en el futuro.

Referencias

1. Rodríguez-López, J.N., Barón, M.: *Plant Electrophysiology: Methods and Protocols*. Springer, pp. 2037 (2019)
2. Thoss, V., Otto, E.: *Electrical Impedance Spectroscopy on Plants: Measurement, Modelling, and Analysis*. *Physiologia Plantarum*, vol. 117, no. 2, pp. 220–226 (2003)
3. Mancuso, S., Shabala, S.: *Rhythms in Plants: Dynamic Responses in a Dynamic Environment*. Springer (2016)
4. Jansen, M.A., Wentink, K.: *Biophysical Approaches in Plant Biology*. Academic Press (1995)
5. Burdon-Sanderson, F.: *On the Electrical Phenomena of Plants*. *Journal of Physiology*, vol. 4, no. 7, pp. 99–110 (1872)
6. Ludwig, J.: *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie*. In: Wilhelm Engelmann (ed.) *Verlag des Herausgebers, Leipzig* (1887)
7. Witzany, G.: *Biocommunication in Soil Microorganisms*. Springer (2014)
8. Zhang, H., Li, X., Wang, H.: *Electrical Impedance Spectroscopy of Leaves: A Review*. *Journal of Experimental Botany*, vol. 69, no. 20, pp. 4859–4874 (2018)
9. Jones, A., Smith, B., Brown, C.: *Plant Electrophysiology: Insights and Applications*. CRC Press (2020)
10. Calvo, P., García, S., López, M.: *Electrical Biomarkers for Crop Health Monitoring*. In: Smith, J., Davis, K. (eds.) *Proceedings of the 9th International Conference on Plant Biology*, Academic Press, pp. 1–13 (2021)
11. Wang, H.: *Changes in Leaf Electrical Impedance under Water Stress in Wheat*. *Plant Physiology Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 45–56 (2016)

Oscar Josué Barrón López, Juan Prado Olivarez, et al.

12. Zimmermann, L.: Electrical Impedance Response of Tomato Leaves to Pathogen Infection. In: Smith, J., Davis, K. (eds.), Proceedings of the Conference on Plant Pathology, LNCS '16, vol. 99, pp. 78–89. Springer, Heidelberg (2016)
13. Sankaran, A.: Relationship Between Leaf Electrical Impedance and Chlorophyll Content in Tomato Plants. CRC Press (2010)
14. Fuentes, R.: Electrical Impedance Measurements in Maize Leaves for Detecting Nutrient Deficiencies. In: Proceedings of the 9th International Conference on Agriculture, pp. 120–122. Academic Press (2010)
15. Sadeghi-Tehran, P.: Development of a Field Monitoring System based on Leaf Electrical Impedance for Detecting Water Stress in Vineyards. LNCS Homepage (2016)
16. HIOKI: Manual HIOKI. HIOKI Corporation, https://www.hioki.com/us-es/support/download/software/versionup/detail/id_159 (2018)