

## The use of a didactic tool for environmental care: An approach from electrophysiology

### El uso de una herramienta didáctica para el cuidado del medio ambiente: Un enfoque desde la electrofisiología

Hernández-Belmontes, N.<sup>1\*</sup>, Cruz-Dominguez, O.<sup>2</sup>, Ortega-Sigala, J.<sup>1</sup>, Cardoso-Pérez, M.<sup>1</sup>,  
Badillo de Loera J.<sup>1</sup>, González-Ramírez, E.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas. Jdn. Juárez #147, Centro Histórico, 98000. Zacatecas.

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Zacatecas. Plan de Pardillo Sn, Parque Industrial, 99059. Zacatecas

\*Autor para correspondencia: [naramhbel@gmail.com](mailto:naramhbel@gmail.com)

Recibido: 05 de enero 2023

Aceptado: 20 de diciembre 2023

#### Resumen

La seguridad alimentaria y nutricional se mejora constantemente en beneficio de la población. Una forma de llevarlo a cabo es a través de la mejora de las prácticas agrícolas, logrando incrementar la calidad de los frutos que se recolectan, etc. Un método que ha resultado atractivo y de bajo costo es a través de la caracterización de la señal eléctrica generada por las plantas, para posteriormente asociarla con los efectos de estrés que se provocan en las plantas. Este estudio preliminar tiene el objetivo de caracterizar la señal eléctrica de una planta de fresa mediante el uso de series de Fourier y Arduino. En este trabajo se utilizó la técnica de medición extracelular para caracterizar la respuesta de una planta de fresas. Por lo que fue necesario desarrollar un sistema de medición de bajo costo basado en la tarjeta de adquisición de datos arduino. Para el sistema de amplificación de la señal eléctrica se utilizó el amplificador LM358P. Entre los principales resultados preliminares de este trabajo se encontró que la planta de fresa presenta una baja señal eléctrica y que debe ser estudiada mediante un análisis numérico. Sin embargo, tiene una respuesta definida cuando se estimula con diferentes frecuencias. Este tipo de estudio permitirá, a mediano plazo, mejorar la producción de plantas de fresa a través de la estimulación de señales eléctricas.

**Palabras clave:** Planta de fresas; Arduino; Series de Fourier.

#### Abstract

Food and nutrition security is constantly improving for the benefit of the population. One way to carry it out is through the improvement of agricultural practices, managing to increase the quality of the fruits that are collected, etc. A method that has been attractive and low cost is through the characterization of the electrical signal generated by the plants, to later associate it with the effects of stress that are caused in the plants. This preliminary study aims to characterize the electrical signal of a strawberry plant by using Fourier series and Arduino. In this work, the extracellular measurement technique was used to characterize the response of a strawberry plant. Therefore, it was necessary to develop a low-cost measurement system based on the arduino data acquisition board. For the electrical signal amplification system, the LM358P amplifier was used. Among the main preliminary results of this work, it was found that the strawberry plant has a low electrical signal and that it should be studied by numerical analysis. However, it has a definite response when stimulated with different frequencies. This type of study will allow, in the medium term, to improve the production of strawberry plants through the stimulation of electrical signals.

**Keywords:** Strawberry plant; Arduino; Fourier series.

## INTRODUCCIÓN

Durante varias décadas, se ha realizado investigación sobre las señales eléctricas en plantas (Xiaofei, 2009). La señal eléctrica (SE) es la señal física más importante en organismos, y es capaz de transmitir señales más rápidamente a largas distancias en comparación con las señales químicas (Ndung'u et al., 2021). Estudios muestran que la señal eléctrica es importante para muchas actividades fisiológicas, como la fotosíntesis. La fotosíntesis es la transformación de la energía luminosa en energía química, y es la base de la vida de las plantas. La regulación de la fotosíntesis en diferentes condiciones ambientales es una actividad fundamental para las plantas (Sukhov, 2016). La regulación de la fotosíntesis es especialmente importante en condiciones de estrés, por ejemplo, luz muy intensa, temperaturas altas y bajas y sequía (Zhang and Sharkey, 2009). Esta transformación también puede ser estimulada por agentes externos, como, por ejemplo, la temperatura, luz, presión osmótica, salinidad, hormonas, etc. Estos diferentes estímulos ambientales evocan respuestas específicas en células vivas que son capaces de transmitir una señal eléctrica a la región de respuesta (Ndung'u et al., 2021; Vetcha, 2021). Los estudios anteriores demuestran que las mediciones de respuesta eléctrica de la planta en tiempo real pueden anticipar acciones, y esto podría usarse para evitar que la planta alcance las condiciones extremas de estrés. Esto sería muy útil en la automatización de la agricultura, por ejemplo, en programar el riego (Ríos-Rojas et al., 2015; Zimmermann et al., 2013). En la Tabla 1 se identifica el efecto que generan distintos estímulos en las plantas.

También se ha encontrado que la electricidad generada por las plantas aumenta notablemente bajo la luz solar, y por tanto la fotosíntesis aumenta la actividad eléctrica en las plantas (Liu et al., 2019). Este tipo de investigaciones se han realizado en diferentes tipos de plantas. Los cuales fueron *Alstonia scholaris* (árbol de Pulai), *Musa acuminata* (árbol de plátano) y *Aloe Vera*. Además, se verificó que algunas de estas generan mayor voltaje en comparación con las anteriores, y pueden ser potencialmente útiles para encender dispositivos de ultra bajo consumo de energía. Mediante la señal eléctrica generada por plantas también es posible extraer energía eléctrica, por ejemplo, de un arce de hoja ancha (*Acer macrophyllum*) que alimentó a dos circuitos integrados nanoelectrónicos especializados. Se utilizó energía eléctrica extraída del árbol de pachira (acuática de Pachira) para alimentar un sistema inalámbrico de monitoreo de la salud de la planta. Otras investigaciones también muestran que se ha logrado obtener energía eléctrica de álamos (Ndung'u et al., 2021). Además, la señal eléctrica que generan las plantas

puede proporcionar información valiosa para monitorear las condiciones del medio ambiente, tal como contaminación atmosférica. Es decir, una planta puede ser utilizada como biosensor para monitorear la calidad del aire (Davies, 2006). Inclusive, en medios con grado de salinidad elevada, se encontró que el potencial eléctrico de árboles de cítricos tangor cambió su respuesta al estrés por salinidad y que están altamente correlacionados con el potencial hídrico del tallo (Nasratullah, 2021).

### **Métodos de medición del potencial eléctrico en plantas.**

Se utilizan dos métodos diferentes para medir el potencial eléctrico en plantas, intracelular y extracelular (Volkov and Shtessel, 2017; Vodeneev, et al 2015). En particular, las mediciones de potencial eléctrico extracelular, es decir en la superficie de plantas se han realizado con electrodos insertados con varias especies de árboles (Gurovich and Hermosilla, 2009). Insertándose un electrodo de referencia en el suelo. Cuando todos los canales están estabilizados eléctricamente, se pueden evaluar los siguientes tratamientos: secuencias de luz-oscuridad, ciclos de sequía-irrigación, heridas mecánicas, etc. La inserción de electrodos provoca inevitablemente reacciones, mientras que los registros de superficie no son invasivos. Se han utilizado varios microelectrodos para estudios electrofisiológicos en plantas. En la mayoría de las publicaciones, el potencial eléctrico se controla de forma constante utilizando microelectrodos de Ag/AgCl no polarizables (Ndung'u et al., 2021).

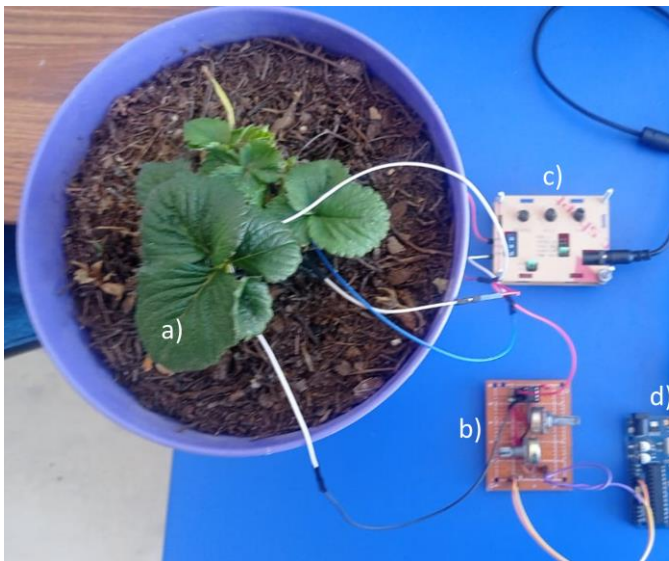
## MATERIALES Y MÉTODOS

Para obtener la señal eléctrica de la planta de fresas se desarrolló un arreglo electrónico, Figura 1. Sin embargo, existe una gran cantidad de técnicas para determinar la calidad de la fresa (González-Jiménez et al., 2020; González-Araiza, 2014). Este sistema consta de una tarjeta arduino (Figura 1-d), un circuito amplificador de señal (Figura 1-b) y un generador de funciones Xr2206. El cual es conectado a la planta de fresas (Figura 1-a), para posteriormente representar su señal eléctrica en una laptop mediante la interfaz de IDE Arduino (Figura 1-e).

**Tabla 1.** Análisis de la respuesta fisiológica en distintas plantas.

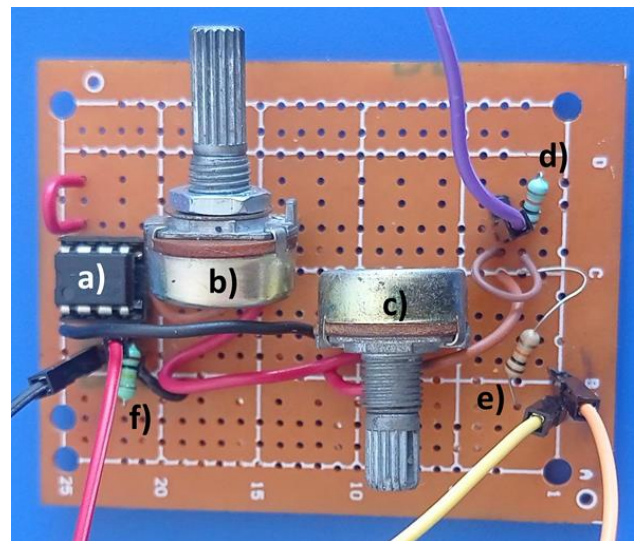
Planta	Estímulo	Respuesta fisiológica	Observaciones
Zea Mays L. (maíz)	Riego constante	Disminución de crecimiento de alargamiento del tallo	El potencial de acción generado por volver a regar las plantas en el suelo seco causa aumentos en el CO <sub>2</sub> y gas H <sub>2</sub> O (Fromm and Fei, 1998).
Lycopersicon esculentum Mill (Tomate)	Eléctrico	Inducción del pin 2 la expresión génica	Señal eléctrica propagada El estímulo eléctrico generado es eficaz para elevar el ARNm de pin2 niveles en tejidos distantes (Fromm and Lautner, 2007).
Jitomate	Electro-estimulación	Las respuestas aumentan con distancia decreciente entre electrodos de Pt en suelo.	Propagación de potenciales eléctricos entre raíces de plantas vecinas a través del suelo (Sukhov et al., 2017).

d)-e) 10k ohm y de f) 100k ohm.



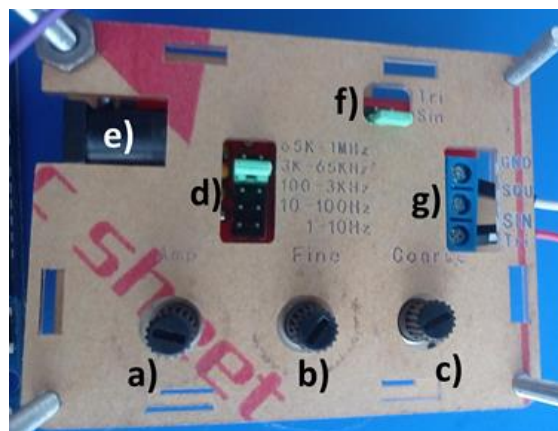
**Figura 1.** Arreglo electrónico para determinar la señal eléctrica generada por la planta de fresas. a) Planta de fresas, b) Circuito amplificador operacional lm358p, c) Generador de funciones Xr2206 y d) Arduino Uno.

El arreglo electrónico de amplificación de señal se muestra en la Figura 2, y consta de un amplificador operacional Lm358p, un potenciómetro de b) 100k ohm, c) 1M ohm y resistencias de



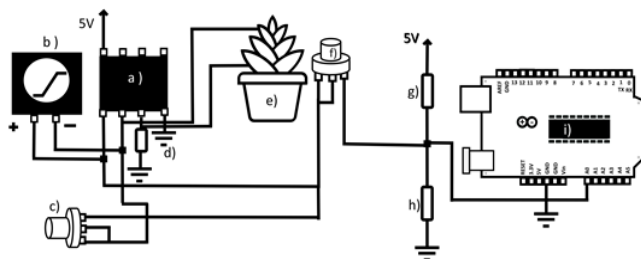
**Figura 2.** Arreglo electrónico de amplificación de señal. a) Amplificador operacional Lm358p. b) Potenciómetro de 100k ohm, c) Potenciómetro de 1M ohm, d) resistencia de 10k ohm, e) resistencia de 10k ohm, f) resistencia de 100k ohm.

Para estimular eléctricamente la planta de fresas se utilizó un generador de funciones Xr2206, Figura 3. Este consta de un potenciómetro para amplificar la señal (Figura 3-a), otro para afinar la señal (Figura 3-b) y otro para engrosar la señal (Figura 3-c). Además de contar con una clema de 3 pines (Figura 3-g).



**Figura 3.** Generador de funciones Xr2206. a) potenciómetro para amplificar la señal, b) Potenciómetro para afinar la señal, c) Potenciómetro para engrosar la señal, d) Conector Berg para ajustar la frecuencia de la onda, e) Plug de alimentación de 9v, f) Conector Berg para seleccionar el tipo de onda a utilizar, g) Clema de 3 pines para la tierra, la señal de sonido y salida de la onda senoidal.

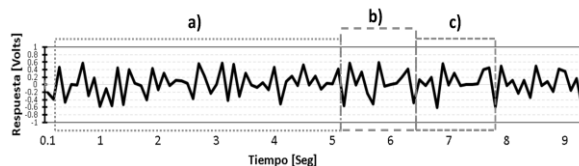
El diagrama electrónico completo del sistema de medición se representa en la Figura 4. Este comprende desde la conexión con la planta de fresas (Figura 4-e) hasta el sistema de amplificación de señal. Cabe mencionar que Arduino es ampliamente utilizado debido a los altos costos de equipo de laboratorio comercial (Guzmán-Fernández et al., 2021).



**Figura 4.** Diagrama electrónico para la determinación de la señal eléctrica generada por una planta de fresas. a) Amplificador Operacional 1m358p, b) Generador de Frecuencias, c) Potenciómetro de 100kΩ, d) Resistencia de 100kΩ e) Planta de fresas, f) Potenciómetro de 1MΩ, g) Resistencia de 10kΩ, h) Resistencia de 10kΩ, i) Arduino UNO.

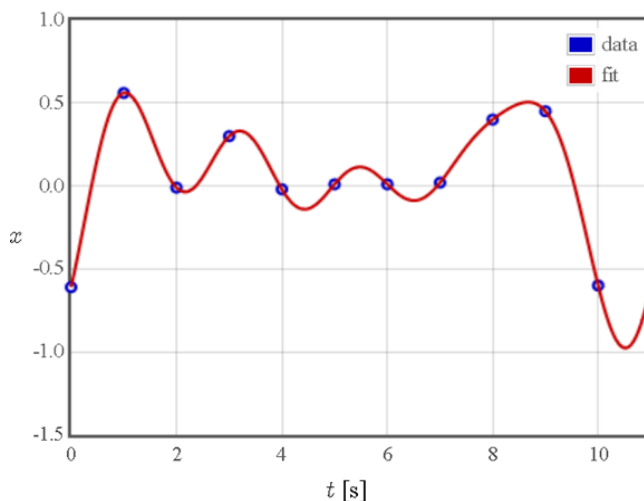
## RESULTADOS Y DISCUSION

La señal eléctrica generada por la planta se muestra en la Figura 5, y está compuesta por una parte de estabilización de señal (Figura 5-a), y la señal propia de la planta de fresas (Figura 5-b). La parte de estabilización de la señal eléctrica puede deberse a reacciones químicas que generan ruido eléctrico y que son producidas por los electrodos insertados en la planta.



**Figura 5.** Señal eléctrica de la planta de fresa. a) Ciclo para estabilizar la señal. b) Señal eléctrica de la planta de fresas.

La señal eléctrica de la planta de fresas fue analizada mediante el uso de series de Fourier (Figura 6). Mediante dicho análisis fue posible determinar sus coeficientes de ajuste numérico.



**Figura 6.** Ajuste numérico a la señal eléctrica utilizando series de Fourier.

**Tabla 2.** Coeficientes de la serie de Fourier

<i>Coeficientes de la Serie de Fourier</i>		
$n$	$a_n$	$b_n$
0	0.046363636	-4.0371746e-17
1	-0.10539596	0.014454637
2	-0.28537733	0.1409626
3	-0.13614382	0.2449322
4	-0.0089524230	0.2303007
5	-0.12049410	0.097511794

### CONCLUSIONES

En este estudio preliminar fue posible desarrollar una herramienta didáctica que permita caracterizar la señal eléctrica de una planta de fresas mediante la implementación de un arreglo experimental de bajo costo basado en arduino y su análisis numérico mediante el uso de series de Fourier. Mediante dicho arreglo experimental es posible cuidar el medio ambiente. Además, fue posible identificar que el tiempo estimado para que se logre estabilizar la señal eléctrica de la planta de fresas es de aproximadamente 5 segundos. Finalmente, mediante este estudio preliminar de este trabajo es posible sentar las bases para determinar el grado de estrés al que puede ser sometida una planta de fresas.

### REFERENCIAS

Davies E. (2006). Electrical signals in plants: facts and hypotheses. In: Volkov AG, editor. Plant electrophysiology. Berlin: Springer-Ver-lag; p. 407–22.

Fromm, J. and Fei, H. 1998. Electrical signaling and gas exchange in maize plants of drying soil. *Plant Science*, 132(2), 203-213.

Fromm, J. and Lautner, S. 2007. Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, cell & environment*, 30(3), 249-257.

González-Araiza, J. 2014. impedancia bio-eléctrica como técnica no-destructiva para medir la firmeza de la fresa (*fragaria x ananassa duch*) y su relación con técnicas convencionales. Tesis doctoral presentada a la Universidad Politécnica de Valencia.

González-Jiménez, Sandra L., Castillo-González, Ana

Ma., García-Mateos, Ma. del Rosario, Valdez-Aguilar, Luis A., Ybarra-Moncada, Carmen, & Avitia-García, Edilberto. 2020. Respuesta de fresa cv. Festival a la salinidad. *Revista fitotecnia mexicana*, 43(1), 53-60. Epub 28 de diciembre de 2020. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.53>

Gurovich L, Hermosilla P. (2009). Electric signaling in fruit trees in response to water applications and light–darkness conditions. *J Plant Physiol*; 166:290–300

Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J. 2021. Arduino: a Novel Solution to the Problem of High-Cost Experimental Equipment in Higher Education. *Exp Tech* 45, 613–625. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>

Nasratullah Habibi. (2021). EFFECTS OF SALINITY ON GROWTH, PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL RESPONSES OF TOMATO. *J. ISSAAS* Vol. 27, No. 2: 14-28.

Ndung'u Ruth W, Kamweru Paul K, Kirwa Abraham T. 2021. Action and variation potential electrical signals in higher plants. *J. Bio. Sc.* 3(1), 1-18 <https://doi.org/10.33472/AFJBS.3.1.2021.1-18>

Ríos-Rojas, L., Morales-Moraga, D., Alcalde, J.A. and Gurovich, L.A. 2015. Use of plant woody species electrical potential for irrigation scheduling. *Plant Signaling & Behavior*. 10(2).

Sukhov, V., Gaspirovich, V., Mysyagin, S. and Vodeneev, V. 2017. High-temperature tolerance of photosynthesis can be linked to local electrical responses in leaves of pea. *Frontiers in physiology*, 8, 763.

Sukhov, V. 2016. Electrical signals as mechanism of photosynthesis regulation in plants. *Photosynthesis Research*. 130(1-3), 373-387.

Liu, Y., Cheng, P., Li, T., Wang, R., Li, Y., Chang, S. Y. and Sun, B. 2019. Unraveling sunlight by transparent organic semiconductors toward photovoltaic and photosynthesis. *ACS nano*, 13(2), 1071-1077.

Vetcha Satya Lalitha Samhita. 2021. A Review on Plant Signal Processing. 7th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS). 978-1-6654-0521-8 ©2021 IEEE

Vodeneev, V., E. Akinchits, and V. Sukhov. (2015). “Variation potential in higher plants: Mechanisms of generation and propagation,” *Plant Signal. Behav.*, vol. 10, no. 9, <https://doi.org/10.1080/15592324.2015.1057365>

Volkov, A. and B Shtessel, Y. 2017. Electrotonic signal transduction between Aloe vera plants using underground pathways in soil: experimental and analytical study. *AIMS Biophysics*. 4(4).

Xiaofei Yan. (2009). Research progress on electrical signals in higher plants. *Progress in Natural Science* 19. 531–

541. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.08.009>

Zhang, R. and Sharkey, T. D. 2009. Photosynthetic electron transport and proton flux under moderate heat stress. *Photosynthesis Research*, 100(1), 29-43.

Zimmermann, U., Bitter, R., Marchiori, P.E.R., Rüger, S., Ehrenberger, W., Sukhorukov, V.L. and Ribeiro, R.V. 2013. A non-invasive plant-based probe for continuous monitoring of

water stress in real time: a new tool for irrigation scheduling and deeper insight into drought and salinity stress physiology. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 25(1), 2-11.