

# GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE *Cucumis sativus* APLICANDO UN CAMPO ELÉCTRICO EMPLEANDO SUPERFICIES MODIFICADAS CON ÓXIDOS DE METALES DE TRANSICIÓN

## GERMINATION AND GROWTH OF *Cucumis sativus* APPLYING AN ELECTRIC FIELD USING MODIFIED SURFACES WITH TRANSITION METAL OXIDES

Omar Pimentel<sup>1</sup>, Gustavo Acosta<sup>1,2</sup>, Jazmín Acuña<sup>1</sup>, Erika Bustos<sup>1\*</sup>

(1) Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C., Parque Tecnológico Querétaro s/n, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, Qro. 76703, México

(2) Universidad de Castilla – La Mancha, Edificio Enrique Costa Novella | Avenida Camilo José Cela No.12, 13005, Ciudad Real, España

\*autor de correspondencia (e-mail: ebustos@cideteq.mx)

Recibido: 18/08/2018 - Evaluado: 12/10/2018 - Aceptado: 13/11/2018

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue desarrollar un protocolo para incrementar la tasa de germinación y crecimiento de pepino (*Cucumis sativus*), aplicando un campo eléctrico en presencia de superficies modificadas como ánodos: IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>|Ti. El electrocultivo se desarrolló empleando un arreglo de electrodos 1D, manteniendo los tratamientos en una cámara de crecimiento con luz artificial, la cual cuenta con las condiciones apropiadas para la realización del experimento sin mitigar el desarrollo óptimo de las plantas. De acuerdo con los resultados obtenidos, se obtuvo un mejor tiempo de emergencia, incremento de la altura de las plantas e incremento de la longitud de la raíz, en comparación con los resultados obtenidos en las plantas que no fueron expuestas al electrocultivo.

### ABSTRACT

The objective of this study was to develop a protocol to increase the germination and growth rate of cucumber (*Cucumis sativus*) by applying an electric field in presence of modified surfaces as anodes: IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> | Ti. The electrofarming was developed using an array of 1D electrodes, maintaining the treatments in a growing chamber with artificial light, which has the appropriate conditions for getting the experiment without mitigating of the optimal development of the plants. According to the results obtained, it was obtained a best time of emergency, increasing the height of plants and increase in the length of the root, in comparison with the results obtained in the plants that were not exposed to the electrofarming.

Palabras clave: pepino, campo eléctrico, superficies modificadas, electrocultivo

Keywords: cucumber, electric field, modified surfaces, electrofarming

## INTRODUCCIÓN

El actual incremento demográfico a nivel mundial es absolutamente proporcional a las necesidades básicas de la población, en las cuales se incluye y con absoluta relevancia la alimentación, por ende, el incremento de producción de alimento debe evolucionar para lograr satisfacer las exigencias de un mundo en constante crecimiento y desarrollo. Esto a su vez implica un punto de suma importancia en los últimos años, la ecología. La búsqueda de nuevas tecnologías para el desarrollo alimentario tiene implícito el hecho de un desarrollo sustentable y ambientalmente responsable.

Dado lo anterior, se busca generar una mayor cantidad de alimento con el menor daño posible al medio que nos rodea, esto solo se logra con la ayuda de tecnologías "verdes", haciendo referencia al mínimo o nulo daño que existe para el medio en el que se emplea. Una propiedad fundamental de todos los organismos vivos es su capacidad para recolectar 'información' del medio ambiente y expresar procesos fisiológicos que están destinados a optimizar su rendimiento bajo las condiciones ambientales que perciben, y por estos medios mantienen la homeostasis. La aplicación de electricidad, el magnetismo, la luz monocromática y el sonido pueden estimular el crecimiento de las plantas hasta cierto punto (Acosta-Santoyo *et al.*, 2016; Acosta-Santoyo *et al.*, 2017; Acosta-Santoyo *et al.*, 2018).

La idea de una estimulación por inducción de campo eléctrico es una iniciativa, con altos rangos de aplicación en el sector agroalimentario, que promueve el desarrollo de la producción de materia vegetal (hortalizas, gramíneas, etc.) para el consumo por parte de la población y de igual forma el aporte directo al mantenimiento del medio ambiente que puede ser considerada como una característica intrínseca para la mencionada tecnología.

En conjunto se pretende minimizar los costos de producción, así como los tiempos, pero de manera proporcional propiciar un aumento considerable en cuanto a la producción de material vegetal, esto a través del aumento de ciclos de producción, lo cual tendría de igual forma una consecuencia positiva en cuanto al mercado y apertura comercial, generación de empleos y oportunidades comerciales en el mercado correspondiente.

Con la implementación de este proyecto de investigación se pretende dotar de una nueva herramienta a los productores mexicanos e incluso internacionales con la finalidad de acelerar procesos de producción a nivel agrícola manteniendo el enfoque ambiental y ecológico como un punto de suma importancia. Pretendiendo que el uso de estas nuevas tecnologías resulte viable y redituable se espera que a futuro pueda ser implementada en niveles amplios de producción de diversos ramos (agrícola, forestal, ornamental).

El uso de energía eléctrica para influir sobre la respuesta de sistemas biológicos se ha estudiado desde hace tiempo, en donde se han hecho algunas investigaciones esporádicas en las cuales se analiza el efecto de la electricidad para aumentar el rendimiento y desarrollo de las plantas (Artem & Albertovna, 2012; Okumura *et al.*, 2010), aunque algunos reportes indican que no hay efecto alguno al aplicar corriente eléctrica a las semillas, o incluso había una disminución en la germinación y desarrollo de las plantas tratadas; esta técnica se conoce actualmente como electrocultivo (Gui *et al.*, 2013). Es así como el efecto que tiene la aplicación de electricidad al suelo durante el crecimiento vegetal se ha investigado desde principios del siglo pasado y se ha observado que induce la germinación de las semillas, aumenta y mejora el crecimiento de las plantas (Acosta-Santoyo *et al.*, 2016; Acosta-Santoyo *et al.*, 2017; Acosta-Santoyo *et al.*, 2018).

Debido a lo anteriormente expuesto, en esta investigación se desarrolló un protocolo para incrementar la tasa de germinación y crecimiento de pepino (*Cucumis sativus*), aplicando un campo eléctrico, para lo cual se utilizaron superficies modificadas de  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$  | Ti como ánodos, lo cual no había sido reportado hasta ahora. De acuerdo con los resultados obtenidos, se obtuvo un mejor tiempo de emergencia, incremento de la altura de las plantas e incremento de la longitud de la raíz, en comparación con los resultados obtenidos en las plantas que no fueron sometidas al tratamiento.

## METODOLOGÍA

Para este estudio se seleccionó al pepino (*Cucumis sativus*), que debido a la composición física de su fruto (90% agua) durante su cultivo, tiene una alta demanda de agua, además, tiene un período de desarrollo que oscila entre los 60 y 70 días, incluyendo los días destinados a su cosecha. Por otro lado, para un adecuado desarrollo de esta planta es necesario tener un suelo con un pH oscilante entre el 5.7 a 7.0, así como tener el cultivo aclimatado a temperaturas que van desde los 18°C hasta los 30°C. El pepino es una planta que crece, florece y fructifica con facilidad incluso en días cortos (con menos de 12 horas de luz, Figura 1), y la madurez de los frutos ocurren simultáneamente después del inicio del florecimiento (SQM, 2018). Adicionalmente, el pepino también soporta elevadas intensidades luminosas y a mayor cantidad de radiación solar, mayor es la producción.

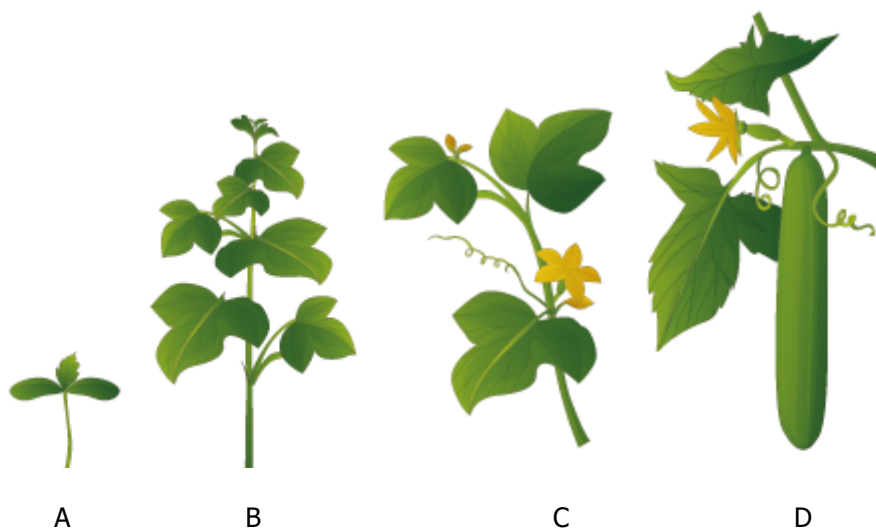


Fig. 1: Etapas de crecimiento del *Cucumis sativus*: germinación (A), desarrollo vegetativo (B), floración (C) y madurez (D) (SQM, 2018).

El pepino puede cultivarse en cualquier tipo de suelo de estructura suelta, bien drenado y con suficiente materia orgánica; es una planta medianamente tolerante a la salinidad (InfoAgro, 2018). La profundidad que requiere de siembra es de 3 a 4 cm, requiere una distancia entre planta y planta de 50 a 100 cm, germinando entre 8 y 12 días, alcanzando una altura aproximada de 20 cm teniendo su cosecha entre 50 y 60 días. Es así como los parámetros que se consideraron observar y medir durante la germinación y crecimiento de las plantas de pepino fueron:

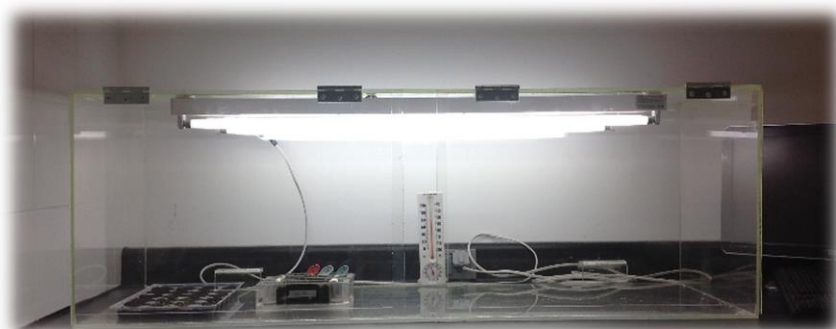
- ✓ *Cantidad de plántulas emergidas*: Bajo este criterio se determinó la tasa de germinación de las semillas y, de igual manera, se observó el comportamiento de ambos tratamientos (con y sin aplicación de campo eléctrico) contrastando la velocidad de germinación.
- ✓ *Porcentaje de semillas germinadas*: Bajo este parámetro se determinó la estimulación por inducción eléctrica que influyen para mitigar el proceso de dormancia o latencia de la semilla.
- ✓ *Longitud de cotiledones*: La longitud de los cotiledones representó una parte importante de la observación dado su valor en los procesos de fotosíntesis de la plántula y su alto aporte como fuente nutricional para la supervivencia de la misma. El correcto desarrollo de los cotiledones influyó directamente en la calidad y evolución de la planta.
- ✓ *Grosor del Tallo*: Este aspecto a observar dentro del desarrollo del cultivo se realizó con ayuda de un vernier para determinar en centímetros el desarrollo del diámetro del tallo de la planta estimulada, la finalidad de considerar este parámetro es conocer el vigor de la planta, debido a la capacidad de desplazamiento de nutrientes, lo cual favorece el desarrollo de un tallo de mayor diámetro. El grosor del tallo fue comparado

- con la muestra control, para determinar si la estimulación propicia el crecimiento más allá de lo que promueve solo una nutrición estándar utilizando fertilizantes para el cultivo de pepino.
- ✓ *Elongación del Tallo:* El parámetro de elongación de tallo es fundamental para el aspecto de la producción, tanto de follaje como para la floración y por consiguiente para el desarrollo de fruto, entre más crezca la planta mayor será el número de nudos de producción, lo cual puede o no aumentar la producción de fruto, así como aumentar la cantidad de follaje en la planta y como consecuencia existir un aumento de fotosíntesis y una mayor nutrición de la misma. Este se realizó con la ayuda de una regla en unidades de cm. El promedio de crecimiento total de la planta es de 3.5 metros para su producción frutal óptima.
  - ✓ *Desarrollo de hoja verdadera:* Durante la observación enfocada en este parámetro se contabilizaron los días que le tomó a la plántula desarrollar la primera hoja verdadera para realizar comparativas de tiempo en contraste con la plántula control y con la plántula sometida a un ambiente con nutrición (almacigo).
  - ✓ *Desarrollo de la Raíz:* El desarrollo de la raíz es absolutamente primordial a observar en el progreso del cultivo bajo la estimulación eléctrica, esto se debe a la gran importancia que tiene la raíz en el desarrollo de la planta en general, la raíz ayuda directamente a la movilidad de los nutrientes en la planta, una planta con mejor desarrollo radicular propicia un crecimiento sano de la misma, lo cual deriva directamente en un mejor desempeño de producción y un aumento considerable en la calidad del cultivo en general. Utilizando una regla se realizó la medición de la raíz cuando se crea adecuado hacerlo, se obtuvo el promedio de longitud de la raíz control y estimulada.
  - ✓ *Coloración de las primeras hojas verdaderas:* La coloración de hojas es un aspecto cualitativo que se debe tomar en cuenta debido al papel que desempeña la clorofila en la fotosíntesis y esta a su vez en la producción de carbohidratos que ayudan al desarrollo óptimo de la planta. Debido a que no se contó con la instrumentación para realizar un conteo de clorofila, la observación se realizó bajo el criterio de un ingeniero agrónomo.

El electrocultivo se desarrolló empleando un arreglo de electrodos 1D (Méndez *et al.*, 2012), manteniendo los tratamientos en una cámara de crecimiento con luz artificial (Figura 2A), la cual cuenta con las condiciones apropiadas para la realización del experimento sin mitigar el desarrollo óptimo de las plantas. Esta cámara cuenta con dos lámparas que proveen las condiciones similares necesarias para la planta que provee la luz solar, de igual manera cuenta con un microclima con temperaturas oscilantes entre los 27°C y los 30°C durante el día y de 18°C a 20°C durante la noche, una humedad relativa del 30 al 40 % durante el día y de un 70 a 80 % durante la noche (Acosta-Santoyo *et al.*, 2016).

La elección de los recipientes para contener la semilla (Figura 2B) se realizó con base en el ancho de los electrodos, esto para evitar el contacto entre los mismos, de igual forma se seleccionaron pensando en el desarrollo de la raíz de la plántula, un recipiente con facilidad de extracción para tener una mejor posibilidad de extraer el tejido radicular sin causar una ruptura o daño del mismo. En total fueron seleccionados 20 recipientes, 10 de ellos destinados a la estimulación eléctrica y los otros 10 para el control. De esta manera, se seleccionaron los recipientes correspondientes para la instalación de las semillas de control y las que fueron sometidas a una estimulación.

Posteriormente se realizó una selección de electrodos para conjuntar pares cumpliendo con el orden necesario de 1 cátodo (Ti) y 1 ánodo ( $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$  | Ti) con la finalidad de disponerlos en orden para realizar el procedimiento de electroestimulación para la germinación. Los electrodos cuentan con orificios en la mayoría de su área que facilita el contacto tanto de la solución humectante (agua) como del suelo mismo para promover una distribución más adecuada y concisa del campo eléctrico a través de toda la muestra durante su aplicación. Para la activación de electrodos modificados con  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$  | Ti, estos fueron expuestos a una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.5M aplicando 0.01 A durante 15 minutos. Enseguida, se les realizó un enjuague con agua desionizada y su secado correspondiente. Dicha activación se realizó para promover una limpieza del recubrimiento que está adherido a la superficie de Ti, así como tener los sitios activos dispuestos para cada experimento, como se ha descrito en reportes anteriores (Herrada *et al.*, 2016; Herrada *et al.*, 2018).



A



B

Fig. 2: Cámara de crecimiento (A) para la germinación de semillas y crecimiento de plantas de pepino (B).

La selección de semillas se llevó a cabo por observación de características, siguiendo los mismos parámetros mencionados con anterioridad cuando el experimento se llevó a cabo en las camas biointensivas, siguiendo el mencionado protocolo se seleccionaron las semillas con un mejor tamaño, con un grosor adecuado y evitando la presencia de daños físicos notables (rupturas en la parte externa, ausencia de parte de su físico). Posteriormente, para la siembra de semillas se utilizó suelo tipo Vertisol pélico. El nombre Vertisol deriva del latín *vertex* que significa mezclado y se refiere a suelos que presentan 30% o más de cantidad de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50 cm, tiene caras de deslizamiento, se encuentran agregados en forma de cuña y tienen grietas que se abren y se cierran periódicamente, de acuerdo con la cantidad de humedad del suelo; este contenido de arcilla puede llegar hasta 90%, como en los Vertisoles que se originan de depósitos piroclásticos. En general, los Vertisoles tienen un color oscuro y carecen de horizontes distintivos (Figura 3); las arcillas que dominan son las esmectitas, las cuales tienen una alta capacidad de intercambio catiónico, lo cual hace que estos suelos tengan una alta fertilidad natural (Coulombe *et al.*, 2000). Este tipo de suelo se encuentra catalogado como de los más productivos, dada su alta fertilidad natural, debida principalmente a la capacidad de intercambio catiónico y alta retención de humedad. Además, son excelentes para la producción de hortalizas como cebolla, sandía, jitomate y melón; incluso producen excelentes rendimientos de maíz, trigo y sorgo (Zech *et al.*, 2014). Por lo anteriormente mencionado, el suelo Vertisol pélico fue empleado en este proyecto de investigación considerando los parámetros fisicoquímicos que se muestran en la Tabla 1, los cuales fueron determinados de acuerdo con los procedimientos indicados en la NOM-021-RECNAT-2000 (Acuña, 2019), a los cuales se les hicieron las adecuaciones necesarias debido a las características del suelo empleado, para lo cual el suelo se secó y se pasó por una malla 10, con el fin de homogenizar el tamaño de partícula de 2 mm y tener una representatividad de los valores obtenidos en todas las determinaciones.

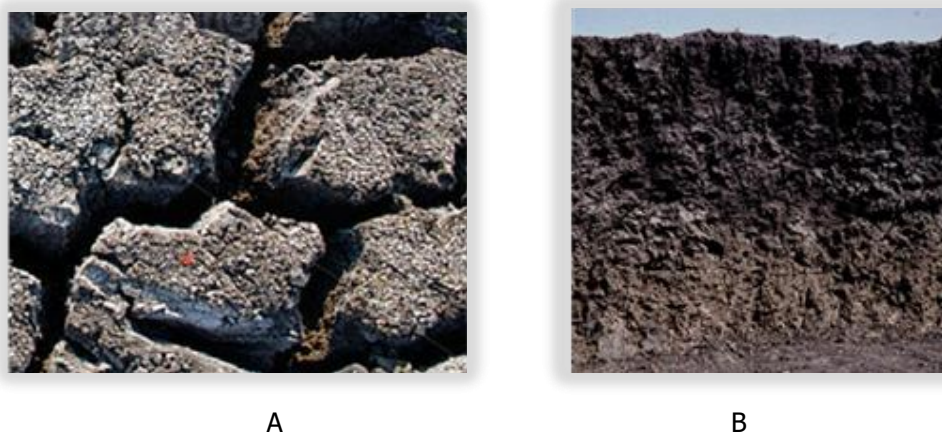


Fig. 3: Vista de la capa superficial con grietas y cuñas características (A), así como el perfil de suelo tipo Vertisol (B) (World Soil Resources Reports, 2006).

Tabla 1: Características fisicoquímicas del suelo Vertisol pélico empleado en este estudio de acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 (Acuña, 2019).

PARÁMETRO	VALOR		
Arcilla (%)	49.49	±	1.15
Arena (%)	34.51	±	3.06
Limo (%)	16.00	±	4.00
Humedad	5.26	±	0.38
Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	2.40	±	0.40
pH <sub>Agua</sub>	7.297	±	0.013
pH <sub>KCl</sub>	6.380	±	0.036
Capacidad de Intercambio Catiónico (mEq/100g)	37.450	±	0.346
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0.170	±	0.006
Materia Orgánica (%)	4.503	±	0.173
Ca <sup>2+</sup> (mEq/100g)	0.042	±	0.002
Mg <sup>2+</sup> (mEq/100g)	0.011	±	0.001
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mmol/L)	0.000	±	0.000
HCO <sub>3</sub> (mmol/L)	9.500	±	0.500
Cl <sup>-</sup> (mmol/L)	6.500	±	1.000
Na <sup>+</sup> (Cmol/Kg suelo)	1.196	±	0.049
K <sup>+</sup> (Cmol/Kg suelo)	1.028	±	0.038

Es así como se colocaron los electrodos activados de  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ , así como los de Ti, posteriormente se introdujeron en el suelo  $\frac{3}{4}$  de su longitud con la finalidad de abarcar un área mayor para la translocación de los nutrientes. Finalmente, se inició la estimulación eléctrica con ayuda de un rectificador que permite moderar la carga eléctrica. Durante los experimentos se empleó un campo eléctrico de 0.2 V/cm por cada par de electrodos y cada semilla colocada, el lapso de tiempo del experimento fue de cuatro horas continuas; se programó el controlador de tiempo para las horas de luz (16 h) y noche (8 h) para que las semillas tuvieran las condiciones adecuadas para su mejor desarrollo en la cámara de crecimiento (Figura 1). Es importante mencionar que todas las pruebas del electrocultivo y su respectivo control se hicieron por duplicado, así que los resultados que se muestran en este trabajo son el promedio de los resultados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez aplicado el campo eléctrico correspondiente, las semillas de pepino rompieron el estado de dormancia y germinaron de manera óptima durante el tiempo establecido para cada experimento como se explicó anteriormente, incluso se registró un crecimiento mayor al esperado, presentando un desarrollo de incluso 2.5 cm por muestra, tanto de control como de las plantas estimuladas. Estos resultados implican que las semillas germinaron en el segundo día de su siembra (Figura 4). De esta manera, se comenzaron a tomar las mediciones pertinentes sobre los aspectos más importantes a comparar entre control y estimulación, como: número de semillas germinadas, desarrollo de cotiledones, emergencia total de plántulas y grosor del tallo.

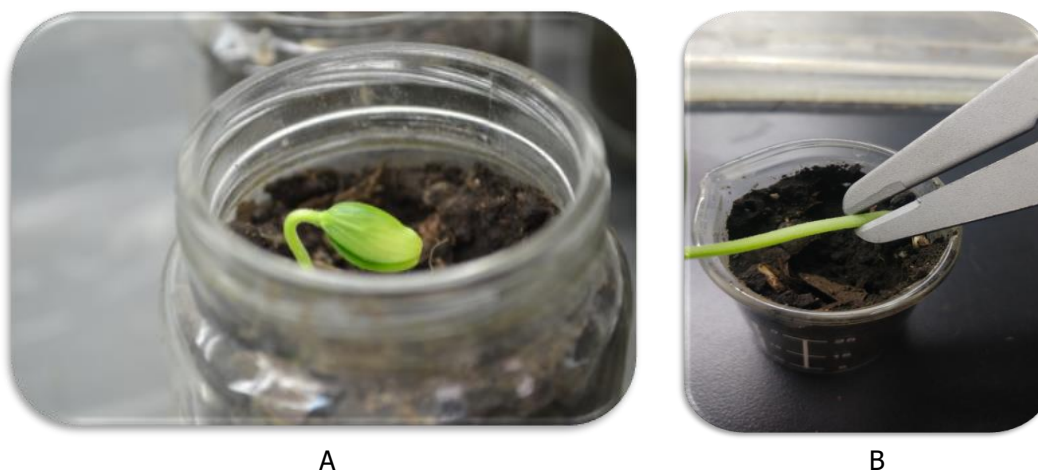


Fig. 4: Germinación de las semillas de pepino en el segundo día de su siembra.

Debido a la temprana edad de las plántulas, únicamente se hizo una valoración visual para determinar que todas las plántulas contaban con sus cotiledones adecuadamente desarrollados. Además, la emergencia en plantas control fue del 100% con un promedio (de emergencia total del suelo) de 3.6 días, la emergencia en plantas estimuladas fue del 100% con un promedio de 3.4 días (Figura 5A). Asimismo, el grosor del tallo de la plántula (Figura 5B) se determinó aun cuando las plántulas no alcanzaban la total emergencia del suelo, sin embargo, al existir una parte del tallo expuesta se tomó la decisión de hacer una medición del grosor del tallo para valorar el desarrollo a lo largo de la etapa de maduración de la planta. En la planta control se dio un promedio de 0.13 cm de grosor y en las plantas estimuladas se presentó un promedio de 0.15 cm de grosor. La raíz presentó un desarrollo de 2.5 cm aproximadamente, ya que el estímulo eléctrico propicia la disponibilidad para el tejido radicular, así como la traslocación de ciertos nutrientes, que para el caso del pepino los macronutrientes son N, P, K, Ca y Mg y los micronutrientes son B, Cu, Fe, Mn y Zn (SQM, 2018).

Por otra parte, se realizaron observaciones para determinar si las plántulas se desarrollaron adecuadamente de sus cotiledones (Figura 6) y de igual forma para apreciar si se dio una emergencia total en todas las muestras. Todas las plántulas emergieron de manera adecuada y sana, de igual forma desplegaron los cotiledones

sanamente, no presentan manchas cloróticas ni nervaduras centrales amarillas, cuenta con un color verde oscuro que denota claramente su buen estado de salud, nutrición y condiciones edafoclimáticas.



A B  
Fig. 5: Emergencia de la planta (A) y grosor del tallo (B).



Fig. 6: Desarrollo de cotiledones en la muestra sometida a un campo eléctrico.

Después de 13 días (a partir de la siembra) se detuvo la medición de parámetros, esto debido a que el crecimiento acelerado de la plántula la llevo a evolucionar a su siguiente etapa fenológica y dio paso a hojas verdaderas (Figura 7), lo cual la conformó como una planta y ya no más como una plántula, las cuales son fundamentales para el crecimiento pues se encargan de la mayor parte del proceso fotosintético para producir energía y alimento suficiente para su desarrollo. En la plántula estimulada eléctricamente hubo un promedio de 5.9 días a partir del día de siembra, mientras que en el control hubo un promedio de 6.1 días. De esta manera, la plántula formó dos hojas verdaderas de buen tamaño en un lapso de 12 días aproximadamente. El desarrollo de la hoja verdadera fue medido con la ayuda de un vernier, realizando la medición desde la parte basal de la hoja hasta la parte apical de la misma y de igual forma el ancho.



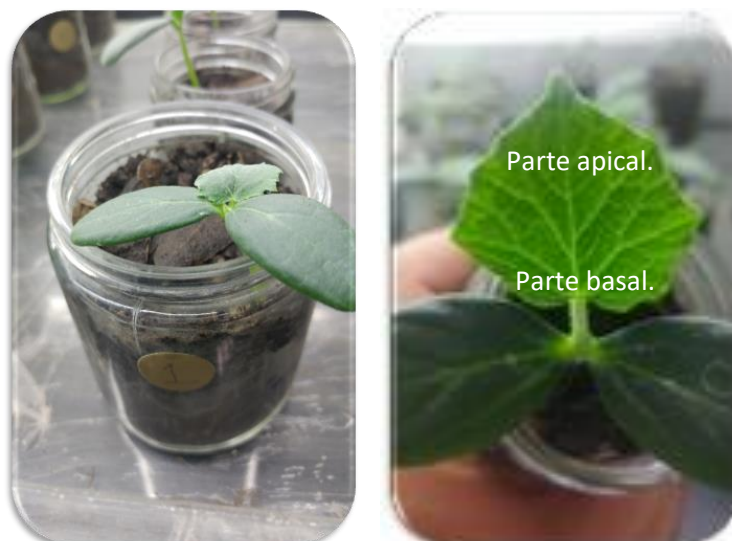


Fig. 7: Desarrollo de la primera hoja verdadera.

La longitud de la raíz y su estructuración es un parámetro fundamental en la realización del presente experimento, esto se debe a que es la interacción directa entre la planta y el estímulo eléctrico. Debido a que el estímulo propicia la traslocación de ciertos nutrientes (macronutrientes: N, P, K, Ca y Mg; micronutrientes: B, Cu, Fe, Mn y Zn; SQM, 2018), así como su disponibilidad para el tejido radicular de los mismos. Por lo tanto, los cambios más drásticos se deben apreciar directamente en la raíz, como se observó durante esta investigación bien desarrollada a través del cristal (Figura 8),

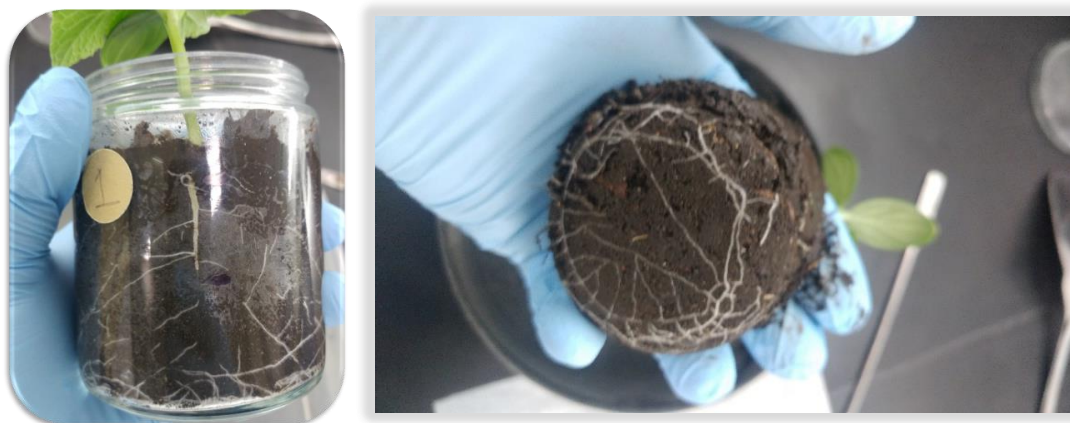


Fig. 8: Desarrollo y estructura de las raíces del pepino que se generaron al estimular su crecimiento eléctricamente.

En lo que este parámetro concierne se utilizaron 10 muestras para realizar la comparativa, cinco plantas estimuladas y cinco plantas control, en dichas plantas se realizó la medición de longitud de raíz. De igual forma, se observó para determinar si existía una nula, moderada o alta presencia de pelos absorbentes, así como ramificaciones en la misma, arrojando resultados con diferencias marcadas en cuanto a la longitud y el volumen en general del tejido radicular ya expuesto y libre de suelo residual. En el caso de las plantas estimuladas eléctricamente (Figura 9A) se aprecia la presencia de una mayor cantidad de ramificaciones y pelos absorbentes con un promedio de longitud de 32.6 cm, que en las plantas del control (Figura 9B).

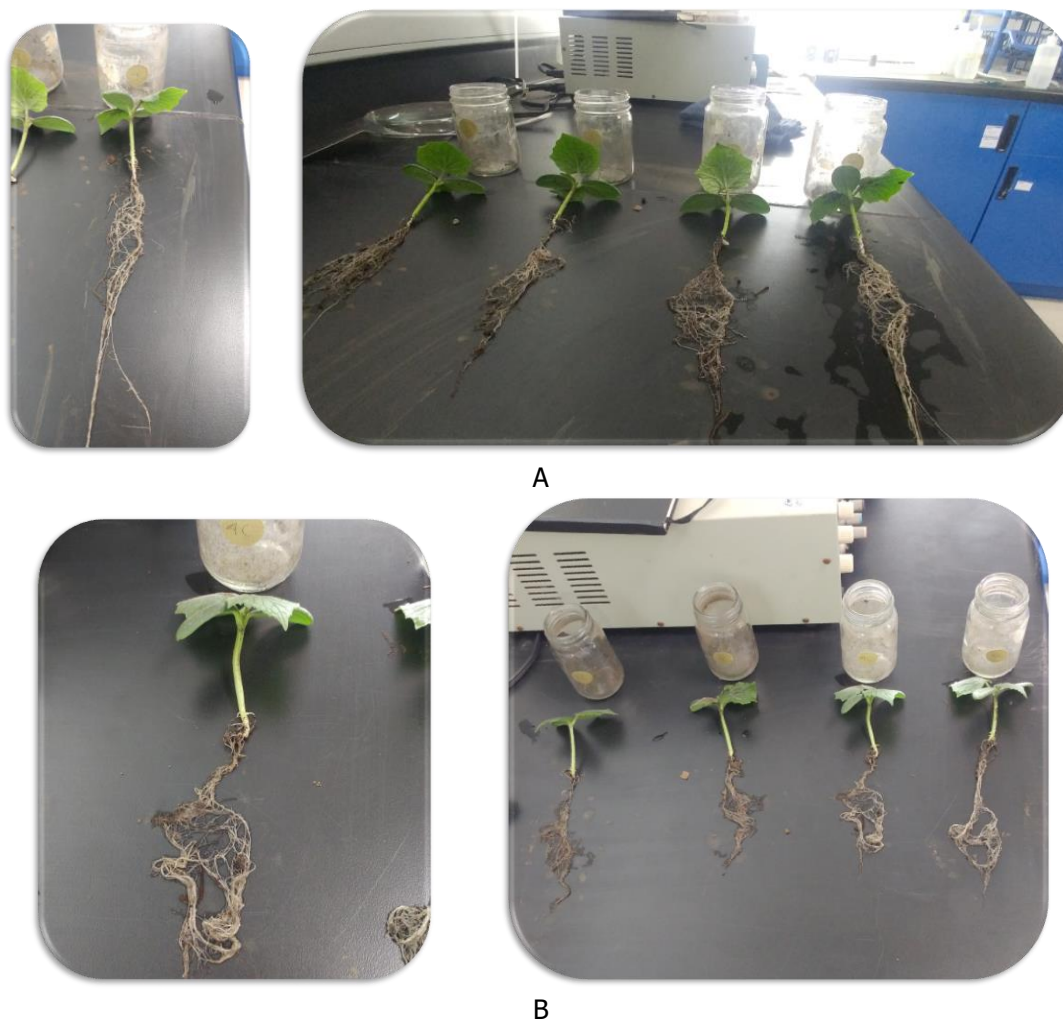


Fig. 9: Longitud de la raíz y estructuración en la muestra sometida a electrocultivo (A) y control (B).

En cuanto a las semillas germinadas, se estableció una población de semillas de 10 para control y 10 semillas para la estimulación eléctrica. Dichas semillas presentaron un 100% de germinación en ambas muestras (control y estimulación). La germinación en las semillas de estimulación se dio en aproximadamente dos días, lo cual en contraste con el control denota una clara ventaja en tiempos, esto propiciado directamente por la estimulación eléctrica generada con el electrocultivo empleando los electrodos modificados. Además, se contabilizó el número de plántulas emergidas para ambas poblaciones dando como resultado para las muestras estimuladas 10/10 al igual que en el control 10/10, esto quiere decir que de 10 semillas sembradas se obtuvo una germinación y emergencia del 100% de las muestras en ambas poblaciones. De esta manera, se realizó la comparativa de promedios de emergencia entre ambas muestras, obteniendo que para las semillas estimuladas eléctricamente se tuvo en 3.4 días, mientras que las del control en 3.6 días, teniendo una diferencia promedio de 0.2 días, mostrando una clara ventaja de crecimiento en la población de plantas electro estimuladas.

En cuanto al grosor del tallo se obtuvieron resultados que coincidieron con lo esperado, mostrando un desarrollo óptimo y uniforme en la población de plántulas estimuladas con un campo eléctrico, en contraste con las plántulas de control que tuvieron un desarrollo poco uniforme y con diversas irregularidades de evolución física. En la Tabla 2 se muestran las mediciones del grosor de la planta que se realizaron al primero y quinto día de desarrollo. De acuerdo con los de los promedios, se considera que la estimulación eléctrica promueve un desarrollo más uniforme

del tallo durante el desarrollo de la plántula, presentando una diferencia de 0.2 cm el primer día y 0.6 cm el quinto día de medición, resultado que tiene una importancia considerable si se toma en cuenta que los nutrientes son transportados a través del tallo hacia los cotiledones.

Tabla 2: Promedios del grosor de la plántula.

MUESTRA	GROSOR DE LA PLÁNTULA (cm)	
	Día 1	Día 5
Electrocultivo	0.15	0.20
Control	0.13	0.14
Diferencia	0.02	0.06

En cuanto a la elongación del tallo se refiere, los resultados en comparación de promedios de longitud resultaron favorables para la población sometida a las estimulaciones eléctricas, presentando una mayor altura en dichas plántulas (Tabla 3 y Figura 10). Las mediciones se dividieron en 5 días para tener una percepción más real del crecimiento de la plántula, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 3: Promedios de la altura de la plántula.

MUESTRA	ALTURA DE PLÁNTULA (cm)			
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 5
Electrocultivo	1.30	2.95	3.25	3.35
Control	0.95	2.90	2.85	2.85
Diferencia	0.35	0.05	0.40	0.50

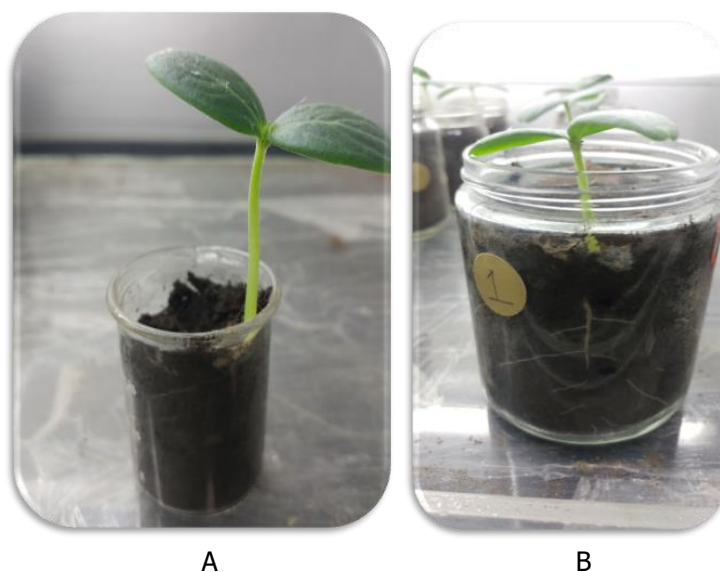


Fig. 10: Altura de la planta en la muestra sometida al campo eléctrico (A) y control (B).

En los resultados anteriores, se puede apreciar una clara ventaja de desarrollo en cuanto a la planta estimulada se refiere, de igual manera durante el último día de mediciones se logra percibir que la planta estimulada eléctricamente continuó su desarrollo mientras que la plántula de control mantuvo los mismos valores obtenidos dos días antes (Día 3), esto indica un mejor desarrollo de crecimiento propiciada por la aplicación de un campo eléctrico ya que ambas poblaciones cuentan con las mismas condiciones.

En cuanto a la longitud de los cotiledones, esta se midió durante 4 días diferentes con la finalidad de apreciar un desarrollo real en el crecimiento de estos, como consecuencia a que en ese punto se comenzó el desarrollo de las primeras hojas verdaderas. De esta manera, se compararon los promedios de longitud de ambas poblaciones para realizar una comparativa de los mismos. En el actual parámetro (Tabla 4 y Figura 11) no se aprecian diferencias considerables como en los anteriores, el desarrollo de los cotiledones en ambas pruebas fue casi idéntico, sin embargo, a pesar de que es una diferencia pequeña, existe un mejor desarrollo en el crecimiento de los cotiledones de la población que fue sometida a la estimulación eléctrica (2.16 cm), siendo éste más notorio en las mediciones del Día 2 (2.71 cm) y regulándose en el día de la última medición (2.86 cm).

Tabla 4: Promedios de la longitud de los cotiledones.

MUESTRA	LONGITUD DE LOS COTILEDONES (cm)		
	Día 1	Día 2	Día 4
Electrocultivo	2.16	2.71	2.86
Control	2.12	2.60	2.84
Diferencia	0.04	0.11	0.02

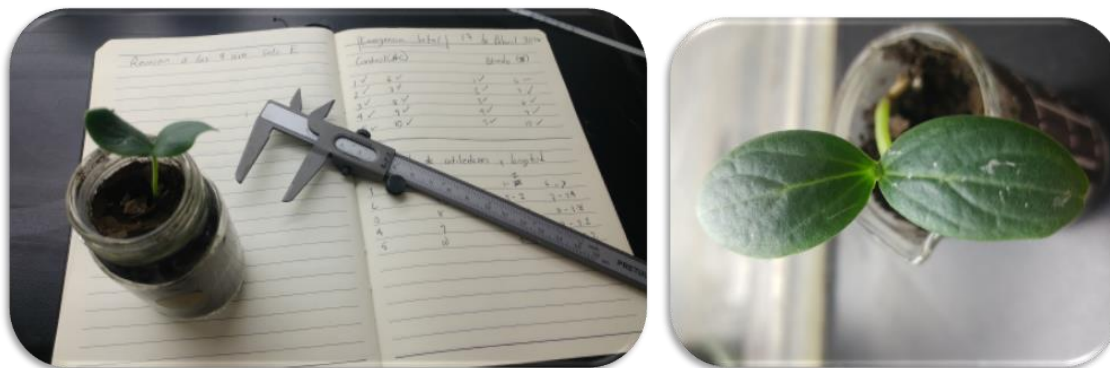


Fig. 11: Medición de la longitud de los cotiledones.

El tiempo de desarrollo de las primeras hojas verdaderas se comenzó a contabilizar a partir del día en el que se realizó la siembra de las semillas, y se detuvo el registro de días al momento de apreciar los primeros brotes de hojas verdaderas con un desarrollo apreciable. En este punto, la plántula comenzó otra etapa fenológica que concierne a una planta debido a la existencia de follaje como tal (los cotiledones no se cuentan como follaje), sin embargo, se procedió con el protocolo debido a que la iniciativa de un proceso comercial de plántulas como tal requiere que existan por lo menos las primeras hojas verdaderas para realizar un trasplante, por lo tanto, se consideraron las mismas para realizar mediciones pertinentes. La observación arrojó como resultado una comparativa del promedio de días que tardaron cada población en desarrollar las primeras hojas verdaderas, en donde la muestra sometida a electrocultivo lo hizo en 5.9 días, mientras que el control lo hizo en 6.1 días, teniendo una diferencia entre ambas muestras de 0.2 días. Dada la importancia de este factor en cuestiones de producción a niveles agrícolas, los resultados son benéficos, debido a que existe un acortamiento en cuando a los días que la

planta tarda en generar las primeras hojas verdaderas y que desarrollándose a un nivel de producción más alto permitiría acortar los tiempos de producción y trasplante. Tras la aparición de las primeras hojas verdaderas, se le dio seguimiento visual a su desarrollo, esto, con la finalidad de apreciar si existía algún cambio físico o de coloración que denotara alguna deficiencia de nutrientes, humedad o luminosidad, lo cual no se presentó a lo largo de la observación. Las hojas mantuvieron un color verde oscuro uniforme y sin inconsistencias, lo cual indica una buena salud en general para la planta. Las mediciones que se realizaron fueron con la finalidad de contabilizar o registrar el desarrollo de las hojas e identificar si existe alguna diferencia en cuanto al desarrollo del follaje. Las mediciones realizadas arrojaron una ligera diferencia de desarrollo en las hojas de las plantas estimuladas en contraste con las plantas control (Tabla 5), la diferencia fue benéfica para las plantas sometidas a una estimulación y fue de acuerdo a los objetivos planteados al inicio de esta investigación.

Tabla 5: Promedios de la longitud y ancho de las hojas verdaderas.

Promedio de longitud y ancho de las hojas verdaderas (cm)	
Electrocultivo	
Ancho	Largo
2.31	2.02
Control	
Ancho	Largo
2.26	1.98
Diferencia	
0.05	0.04

Por otra parte, para medir la longitud de la raíz se tomaron 5 plantas por cada población para realizar una comparativa y un promedio de longitud, de igual forma la observación física, los resultados fueron favorables para la prueba con estimulación, en esta ocasión con un promedio de longitud mucho mayor al obtenido en el control. Debido a que el tejido radicular se encuentra explícitamente relacionado con el suelo y este a su vez se encuentra en contacto directo con el campo eléctrico provee de una relevancia al actual parámetro y su observación provee de información sumamente útil para la determinación de los beneficios incluidos en la aplicación de la tecnología del electrocultivo. En la muestra que se le aplicó un campo eléctrico, esta mostró 32.6 cm de longitud promedio con alta presencia de ramificaciones y una cantidad alta de pelos radiculares, mientras que en la muestra control 25.8 cm de longitud promedio con moderada presencia de ramificaciones y alto contenido de pelos radiculares fue la que se presentó, existiendo una diferencia de 6.8 cm entre ellas.

De esta manera, la diferencia en cuanto al desarrollo de la longitud de la raíz resulta considerable si se compara con los parámetros anteriores en los cuales los promedios no reflejaban un contraste tan drástico. Al existir una diferencia de desarrollo de 6.8 cm se puede concluir que la estimulación eléctrica a nivel radicular tiene un impacto (positivo) considerable que promueve el mejor desarrollo de las raíces tanto la central como las ramificaciones, incluso se puede apreciar en el tallo indicios de desarrollo de raíces adventicias.

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que aplicando un campo eléctrico en presencia de superficies modificadas de  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ , la germinación y crecimiento de pepino (*Cucumis sativus*) muestra un mejor tiempo de emergencia, por lo cual se favorece al aplicar el campo eléctrico en la velocidad de germinación de las semillas (3.4 días), la altura de la planta (3.35 cm) y el desarrollo de la raíz (32.6 cm) que sin la estimulación eléctrica (3.6 días, 2.85 cm y 25.3 cm respectivamente). Además, el tiempo para la aparición de las hojas verdaderas se reduce (5.9 días) comparado con el control sin campo eléctrico (6.1 días), mostrando en ambos casos una longitud de cotiledones similar (2.86 cm y 2.84 cm respectivamente).

Enfocado a un sector económico dedicado a la producción de plántulas, el electrocultivo funge como una herramienta valiosa en el proceso de germinación y desarrollo de las semillas, contando con el potencial para conformar un paquete tecnológico capaz de disminuir los tiempos de germinación y desarrollo necesarios, esto claro, sin afectar negativamente la calidad del producto final, contrario a ello aportando un beneficio para la nutrición y desarrollo de este. Siendo así, la viabilidad del electrocultivo para desarrollarse como una tecnología eficaz y sustentable de proporciones considerables tomando en cuenta el auge de las tecnologías ambientalmente responsables.

## AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (CGeo – UNAM) y al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. (CIDETEQ), por la infraestructura que permitió el desarrollo de este trabajo de investigación, asimismo, agradecen al Nodo Binacional de Manufactura Avanzada (NoBi) de la National Science Foundation (NSF), CONACyT y Fondo de Cooperación Internacional en Ciencia y Tecnología (FONCICYT) por el financiamiento económico para el desarrollo de esta investigación.

## REFERENCIAS

Acosta-Santoyo, G., Herrada, R.A., De Folter, S. & Bustos, E. (2016). Enhanced Germination and Growth of *Arabidopsis thaliana* Using  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  as a Dimensional Stable Anode in the Electro-Culture Technique. *Geotech. Spec. Publ.*, 269, 33–41.

Acosta-Santoyo, G., Cameselle, C. & Bustos, E. (2017). Electrokinetic – Enhanced Ryegrass Cultures in Soils Polluted with Organic and Inorganic Compounds. *Environmental Research*, 158, 118-125.

Acosta-Santoyo, G., Herrada, R.A., de Folter, S. & Bustos, E. (2018). Stimulation of the Germination and Growth of Different Plant Species Using an Electric Field Treatment with  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  Electrodes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93 (5), 1488-1494.

Acuña, J. (2019) *Desarrollo de Superficies Modificadas de  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  y  $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  por Electroforesis para la Germinación de Semillas y Crecimiento de Plantas de *Zea mays* L.* Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología con la Especialidad de Ingeniería Ambiental, Querétaro, México, CIDETEQ.

Artem, A. & Albertovna, T.T. (2012). The effect of electricity on plant growth. 1535, 1-14. [http://sch35-2007.narod.ru/itogi\\_conf\\_2012/1\\_Barinov\\_1535.pdf](http://sch35-2007.narod.ru/itogi_conf_2012/1_Barinov_1535.pdf)

Coulombe, C.E., Wilding, L.P. & Dixon, J.B. (2000). *Handbook of Soil Science*. M. E. Sumner (ed.), 1a. edición, New York, NY, USA: CRC Press.

Gui, Z., Piras, A., Qiao, L., Gui, K. & Wang, B. (2013) Improving Germination of Seeds Soaked GA3 by Electrostatic Field Treatment. *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 2 (1), 133–136.

Herrada, R.A., Acosta-Santoyo, G., Sepúlveda-Guzmán, S., Brillas, E., Sirés, I. & Bustos, E. (2018).  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  Electrodes Prepared by Electrodeposition from Different Ir:Ta Ratios for the Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Electrochimica Acta*, 263, 353-361.

Herrada, R.A., Medel, A., Manríquez, F., Sirés, I. & Bustos, E. (2016). Preparation of  $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$  Electrodes by Immersion, Painting and Electrophoretic Deposition for the Electrochemical Removal of Hydrocarbons from Water. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 102-110.

InfoAgro (2018). <http://www.infoagro.com/hortalizas/pepino.htm>. (mayo 2018).

Méndez, E., Pérez, M., Romero, O., Beltrán, E.D., Castro, S., Corona, J.L. *et al.* (2012). Effects of Electrode Material on the Efficiency of Hydrocarbon Removal by an Electrokinetic Remediation Process. *Electrochimica Acta*, 86, 148-156.

NOM-021-RECNAT-2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, D.F.

Okumura, T., Muramoto, Y. & Shimizu, N. (2010). Acceleration of plant growth by D.C. an electric field. *10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Ger. pp. 1-4.

World Soil Resources Reports (2006). *World reference base for soil resources 2006*. A framework for international classification, correlation and communication. FAO. <http://www.fao.org/3/a-a0510e.pdf>. (mayo 2018).

SQM (2018). The Worldwide Business Formula: <http://www.sqm.com/es-es/productos/nutricionvegetaldeespecialidad/cultivos/pepino.aspx#tabs-4>. (mayo 2018).

Zech, W., Schad, P. & Hintermaier-Erhard, G. (2014). *Böden der Welt: Ein Bildatlas*. Springer Spektrum.

