



Educación
Secretaría de Educación Pública



TESIS

CON EL TEMA:

**“ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA ACLIMATACIÓN DE
VITROPLANTAS DE CAMOTE DE CERRO”**

QUE PRESENTAN:

**CARLIN FREGOSO HURTADO
JUAN MANUEL LANDEROS SAUCEDA
JAVIER SANDOVAL GUTIERREZ**

ASESOR

DRA. MAYRA ITZCALOTZIN MONTERO CORTES

REVISORES

**DR. MARTIN AVILA MIRANDA
DR. JOAQUIN ALEJANDRO QUI ZAPATA**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIEROS EN AGRONOMÍA

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. MAYO, 2026.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Tlajomulco
Dirección
Subdirección Académica

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 24/Marzo/2026
No. DE OFICIO: D.SA/DEP/455/2026

ASUNTO: Autorización de impresión
definitiva y digitalización.

C. CARLIN FREGOSO HURTADO
C. JUAN MANUEL LANDEROS SAUCEDA
C. JAVIER SANDOVAL GUTIERREZ
PASANTES DE LA CARRERA DE INGENIERIA EN AGRONOMÍA
P R E S E N T E S

Dado que el Comité dictaminó como **APROBADA** su TITULACIÓN INTEGRAL: OPCIÓN I (TESIS), con el tema
"ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAMOTE DE
CERRO" y determinó que dan cumplimiento con los requisitos establecidos, se les notifica que tienen la
autorización para su impresión definitiva y digitalización.

Sin otro particular quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

C. MARÍA ISABEL BECERRA RODRÍGUEZ
DIRECTORA DEL PLANTEL

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE TLAJOMULCO**
DIRECCION

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio
C.c.p.- ☒ Minutario. -
MIBR/IGL/ATR/mjhc*



2026
año de
**Margarita
Maza**



KM. 10 carretera a San Miguel Cuyutlán, Cto. Vicente Fernández Gómez C.P. 45640 Tlajomulco de Zúñiga, Jal.
Tel. 33 29 02 11 30 e-mail: plan_tlajomulco@tecnm.mx www.tlajomulco.tecnm.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Tlajomulco
Dirección
Subdirección Académica
Departamento de Ciencias Agropecuarias

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 23/Marzo/2026

No. DE OFICIO: D.SA/DCA/203/2026

ASUNTO: Liberación de proyecto para
la titulación integral.

ME. ANDREA TORRES RICO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

NOMBRE DEL ESTUDIANTE Y/O EGRESADO:	CARLIN FREGOSO HURTADO
NO. DE CONTROL:	21940014
PRODUCTO:	OPCIÓN I (TESIS)
CARRERA:	INGENIERÍA EN AGRONOMÍA
NOMBRE DEL PROYECTO:	"ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAMOTE DE CERRO"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

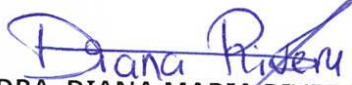
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro



S.E.P.
TECNM
14DIT0003B
TLAJOMULCO
CIENCIAS
AGROPECUARIAS


DRA. DIANA MARIA RIVERA RODRIGUEZ
RESPONSABLE DEL DEPARTAMENTO
DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

 DRA. MAYRA ITZCALOTZIN MONTERO CORTES Nombre y firma del asesor	 DR. MARTIN EDUARDO AVILA MIRANDA Nombre y firma del revisor	 DR. JOAQUIN ALEJANDRO QUI ZAPATA Nombre y firma del revisor
--	--	--

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio
C.c.p.- Minutario. -
DMRR/mjhc*



2026
año de
Margarita
Maza



KM. 10 carretera a San Miguel Cuyutlán, Cto. Vicente Fernández Gómez C.P. 45640 Tlajomulco de Zúñiga, Jal.
Tel. 33 29 02 11 30 e-mail: plan.tlajomulco@tecnm.mx www.tlajomulco.tecnm.mx



Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 23/Marzo/2026

No. DE OFICIO: D.SA/DCA/205/2026

ASUNTO: Liberación de proyecto para
la titulación integral.

ME. ANDREA TORRES RICO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

NOMBRE DEL ESTUDIANTE Y/O EGRESADO:	JUAN MANUEL LANDEROS SAUCEDA
NO. DE CONTROL:	C17061147
PRODUCTO:	OPCIÓN I (TESIS)
CARRERA:	INGENIERÍA EN AGRONOMÍA
NOMBRE DEL PROYECTO:	"ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAMOTE DE CERRO"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro

Diana Rivera

DRA. DIANA MARIA RIVERA RODRIGUEZ
RESPONSABLE DEL DEPARTAMENTO
DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



S.E.P.
TECNM
14DIT0003B
IT TLAJOMULCO
CIENCIAS
AGROPECUARIAS

<i>Mayra I Montalvo</i> DRA. MAYRA ITZCALOTZIN MONTERO CORTES Nombre y firma del asesor	<i>Martin Eduardo Avila</i> DR. MARTIN EDUARDO AVILA MIRANDA Nombre y firma del revisor	<i>Joaquin Alejandro Qui</i> DR. JOAQUIN ALEJANDRO QUI ZAPATA Nombre y firma del revisor
--	--	---

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio

C.c.p.- Minutario. -

DMRR/mjhc*



2026
año de
Margarita
Maza





Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 23/Marzo/2026

No. DE OFICIO: D.SA/DCA/204/2026

ASUNTO: Liberación de proyecto para la titulación integral.

ME. ANDREA TORRES RICO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

NOMBRE DEL ESTUDIANTE Y/O EGRESADO:	JAVIER SANDOVAL GUTIERREZ
NO. DE CONTROL:	18940120
PRODUCTO:	OPCIÓN I (TESIS)
CARRERA:	INGENIERÍA EN AGRONOMÍA
NOMBRE DEL PROYECTO:	"ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE CAMOTE DE CERRO"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro



Diana Rivera

DRA. DIANA MARIA RIVERA RODRIGUEZ
RESPONSABLE DEL DEPARTAMENTO
DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

S.E.P.
TECNM
14DIT0003B
IT Tlajomulco
CIENCIAS
AGROPECUARIAS

<i>Mayra Itzcalotzin Montero Cortes</i> DRA. MAYRA ITZCALOTZIN MONTERO CORTES Nombre y firma del asesor	<i>Martin Eduardo Avila Miranda</i> DR. MARTIN EDUARDO AVILA MIRANDA Nombre y firma del revisor	<i>Joaquin Alejandro Qui Zapata</i> DR. JOAQUIN ALEJANDRO QUI ZAPATA Nombre y firma del revisor
--	--	--

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio

C.c.p.- Minutario. -

DMRR/mjhc*



2026
año de
Margarita Maza



RESUMEN

El camote de cerro (*Dioscorea* sp.) es un tubérculo originario de México que posee un notable valor tanto alimenticio como medicinal. Sin embargo, su propagación y establecimiento en campo suelen verse limitados debido a la baja supervivencia de las plantas obtenidas mediante cultivo *in vitro*. La transferencia de vitroplantas de condiciones controladas a condiciones *ex vitro* provoca un fuerte estrés fisiológico, lo que reduce drásticamente la aclimatación de las plantas. Por ello, se vuelve indispensable desarrollar estrategias biotecnológicas que favorezcan su adaptación.

En este trabajo se evaluó el efecto de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la implementación de un sistema aeropónico como alternativas para mejorar la aclimatación de vitroplantas de camote de cerro. Para ello, se utilizaron plántulas de seis meses de edad obtenidas por cultivo *in vitro* y establecidas en un sustrato estéril compuesto por *peat moss* y agrolita (4:1), bajo condiciones controladas de temperatura ($25 \pm 2^{\circ}\text{C}$) y fotoperiodo de 16 horas. Se aplicaron tratamientos con micorrizas comerciales en dos concentraciones (T1: 0.1 g/L y T2: 0.5 g/L). Además, se diseñó un sistema hidroaeropónico utilizando hieleras adaptadas, boquillas de nebulización, una bomba de presión de 3.1 PSI y un circuito de recirculación para una solución nutritiva base (CE: 2.5 mS/cm, pH: 6.5), para estudios futuros.

La inoculación con micorrizas incrementó la supervivencia y el vigor de las vitroplantas frente al testigo presentando diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo del tiempo. Se generó un sistema aeropónico tanto a pequeña como a gran escala para realizar estudios futuros en la aclimatación de plantas de camote de cerro.

En conclusión, la adición de micorrizas arbusculares a bajas concentraciones representa una estrategia biotecnológica que podría eficientar la aclimatación de vitroplantas de camote de cerro, así como la implementación de sistemas hidroaeropónicos. Este enfoque no solo mejora la supervivencia de las plantas, sino que también ofrece una alternativa sustentable para la producción masiva y la

conservación de este valioso recurso fitogenético, de gran importancia económica y social en la región de Jalisco, México.

Palabras clave: *Dioscorea* sp., cultivo *in vitro*, aclimatación, micorrizas arbusculares, aeroponía, solución nutritiva, Jalisco.

ABSTRACT

The mountain sweet potato (*Dioscorea* sp.) is a tuber native to Mexico with significant nutritional and medicinal value. However, its propagation and establishment in the field are often limited due to the low survival rate of plants obtained through *in vitro* cultivation. The transition from controlled laboratory conditions to the natural environment causes severe physiological stress, which drastically reduces plant acclimatization. Therefore, it is essential to develop biotechnological strategies that promote plant adaptation.

This study evaluated the effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the implementation of an aeroponic system as alternatives to improve the acclimatization of mountain sweet potato *in vitro* plants. Six-month-old seedlings obtained through *in vitro* cultivation were used and planted in a sterile substrate composed of peat moss and agrolite (4:1), under controlled temperature conditions ($25 \pm 2^{\circ}\text{C}$) and a 16-hour photoperiod. Commercial mycorrhizal treatments were applied at two concentrations (T1: 0.1 g/L and T2: 0.5 g/L). In addition, a homemade hydroaeroponic system was designed using adapted coolers, misting nozzles, a 3.1 PSI pressure pump, and a recirculation loop with a base nutrient solution (EC: 2.5 mS/cm, pH: 6.5).

The results were clear: mycorrhizal inoculation significantly increased the survival and vigor of the *in vitro* plants compared to the control. In turn, the aeroponic system promoted more robust root development and uniform growth, which facilitated the transition to *ex vitro* conditions. Statistical analysis (ANOVA and Tukey's test, $p < 0.05$) confirmed significant differences between treatments over time.

In conclusion, the combination of arbuscular mycorrhizae and aeroponic systems represents an efficient biotechnological strategy for the acclimatization of wild sweet potato *in vitro* plants. This approach not only improves plant survival but also offers a sustainable alternative for the mass production and conservation of this valuable plant genetic resource, which is of great economic and social importance in the Jalisco region of Mexico.

Keywords: Dioscorea sp., *in vitro* culture, acclimatization, arbuscular mycorrhizae, aeroponics, nutrient solution, Jalisco.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. HIPÓTESIS	7
4.1 Hipótesis General	7
5. OBJETIVOS	8
5.1 Objetivo General	8
5.2 Objetivos Específicos.....	8
6. Marco teórico.....	9
6.1 Características e importancia del género <i>Dioscorea</i>	9
6.2 Propagación de <i>Dioscorea sp</i>	9
6.2.1 Propagación sexual	9
6.2.2 Propagación Asexual	9
6.3 Propagación biotecnológica (<i>In vitro</i>).....	10
6.4 Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) en Aclimatación	10
6.5 Sistemas Aeropónicos	10
6.6 Soluciones nutritivas para sistemas aeropónicos	11
7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	12
7.1 Localización y Condiciones Experimentales	12
7.2 Material Vegetal	12
7.2.1 Propagación de plantas de camote de cerro in vitro	12
7.2.2 Aclimatación de plantas de camote de cerro en condiciones controladas	12
7.3 Preparación de Inóculo Micorrízico.....	12
7.4 Experimento de aclimatación de plantas <i>in vitro</i> de camote de cerro	13
7.4.1 Tinción de raíces con azul de tripano.....	13
7.5 Diseño del Sistema Aeropónico.....	14
7.5.1 Sistema aeropónico a pequeña escala	14
7.6 Solución Nutritiva	18
7.7 Ensayo del funcionamiento del sistema hidroaerónico a gran escala.....	19
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
8.1 Establecimiento en sustrato de vitroplantas.....	20
8.2 Experimento de aclimatación de plantas <i>in vitro</i> de camote de cerro	21
8.3 Diseño del sistema Aeropónico a pequeña escala	26

8.4. Diseño de sistema aeropónico a gran escala	28
8.5 Discusión general	31
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
10. ANEXOS	43
10.1 Clave de símbolos y abreviaturas	43

Índice de Tablas

Cuadro 1. Solución nutritiva	18
Cuadro 2. Supervivencia de plantas de camote de cerro durante la aclimatación	21
Cuadro 3. Planta sana de camote de cerro durante la aclimatación	21
Cuadro 4. Clorosis de la planta del camote de cerro durante la aclimatación	22
Cuadro 5. Marchitez de la planta del camote de cerro durante la aclimatación	23
Cuadro 6. Contaminación de planta de camote de cerro durante la aclimatación	23
Cuadro 7. Evaluación de peso y longitud de tubérculo	23
Cuadro 8. Abreviaturas técnicas y científicas	43
Cuadro 9. Unidades de medida	43
Cuadro 10. Símbolos químicos y formulas	44
Cuadro 11. Términos especializados	44
Cuadro 12. Símbolos estadísticos	44
Cuadro 13. Tratamientos experimentales	45

Índice de figuras

Figura 1. Importancia medicinal (traducido de Wang et al 2023)	1
Figura 2. Sistema aeropónico a pequeña escala	15
Figura 3. Sistema aeropónico a gran escala	18
Figura 4. Aclimatación de vitroplantas (6 meses)	20
Figura 5. Efecto de la aplicación de micorrizas en la aclimatación de plantas de camote de cerro.	24
Figura 6. Micrografías de microscopía óptica de vesícula de micorriza arbuscular en raíces de plantas de camote de cerro	25
Figura 7. Sistema aeropónico a pequeña escala	28
Figura 8. Sistema aeropónico a gran escala	30
Figura 9. Solución nutritiva	46

1. INTRODUCCIÓN

El camote de cerro (*Dioscorea sp.*) es una planta silvestre y perenne perteneciente a la familia *Dioscoreaceae*, reconocida por su importancia dentro del contexto biocultural de México. Esta especie, valorada tanto por sus propiedades alimenticias como medicinales, ha sido empleada tradicionalmente en comunidades rurales como fuente de carbohidratos y, al mismo tiempo, como materia prima para la obtención de compuestos esteroides de interés farmacéutico. Esa doble función nutricional y medicinal convierte al camote de cerro en un recurso fitogenético estratégico, esencial para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico en distintas regiones del país.

Desde la perspectiva nutricional, los tubérculos de *Dioscorea sp.* aportan una cantidad considerable de carbohidratos complejos, fibra dietética y compuestos bioactivos con efectos antioxidantes. En el ámbito medicinal, diversas especies de este género han sido utilizadas desde tiempos antiguos por su contenido en diosgenina, un precursor clave en la síntesis de hormonas esteroideas como corticosteroides y hormonas sexuales (Figura 1).

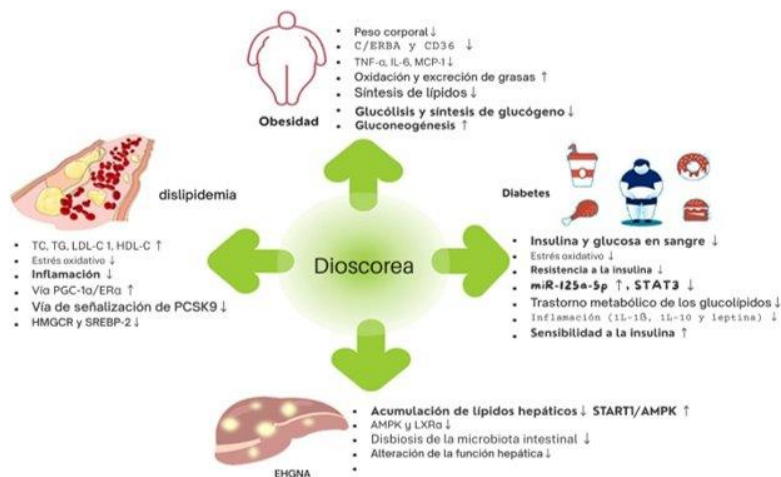


Figura 1. Importancia medicinal (traducido de Wang *et al.* 2023)

Pese a su relevancia, el camote de cerro enfrenta una situación preocupante: la extracción excesiva de poblaciones silvestres ha reducido drásticamente su presencia en los ecosistemas naturales. A ello se suman sus propias limitaciones biológicas, ya que se trata de una especie con un proceso de propagación lento y poco eficiente por métodos convencionales. La reproducción mediante tubérculos o bulbillos aéreos requiere largos periodos de tiempo y presenta bajos porcentajes de establecimiento en campo, además de una escasa capacidad de regeneración natural. En conjunto, estas restricciones han incrementado el riesgo de sobreexplotación y dificultan la recuperación de las poblaciones, poniendo en riesgo su conservación y aprovechamiento sostenible.

Frente a este panorama, el desarrollo de estrategias biotecnológicas se vuelve fundamental para producir plantas de camote de cerro de forma masiva y controlada, asegurando tanto la conservación del recurso como su aprovechamiento responsable. El cultivo *in vitro* ha surgido como una herramienta clave para la propagación clonal a gran escala, permitiendo obtener material vegetal genéticamente uniforme y libre de patógenos. No obstante, el principal obstáculo de esta técnica suele presentarse durante la aclimatación *ex vitro*, etapa en la que las vitroplantas enfrentan un alto nivel de estrés fisiológico al pasar de las condiciones controladas del laboratorio a un ambiente natural.

Para abordar este desafío, distintas investigaciones han explorado alternativas tecnológicas como el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la implementación de sistemas aeropónicos. Los HMA establecen asociaciones simbióticas con las raíces, mejorando la absorción de nutrientes y agua, además de incrementar la tolerancia al estrés biótico y abiótico. En paralelo, los sistemas aeropónicos ofrecen condiciones que optimizan el desarrollo radicular mediante la nebulización de soluciones nutritivas, reduciendo el estrés durante la transición y disminuyendo los riesgos fitosanitarios asociados con los sustratos convencionales.

La combinación de las siguientes herramientas: cultivo *in vitro*, la aplicación de micorrizas arbusculares y la aeroponía, representa una vía prometedora para

aumentar la disponibilidad de este recurso vegetal, al mismo tiempo que contribuye a conservar la biodiversidad, fortalecer la seguridad alimentaria y generar beneficios tangibles para las comunidades que dependen del camote de cerro como fuente de sustento e ingreso económico. En esta investigación, se busca evaluar dichas estrategias integradas para mejorar la aclimatación de vitroplantas de camote de cerro en la región de Jalisco, México, con el propósito de establecer protocolos eficientes que impulsen su conservación y uso sostenible.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El camote de cerro (*Dioscorea sp.*) constituye un recurso fitogenético de gran relevancia para México por su contribución a la seguridad alimentaria y su potencial farmacéutico. No obstante, enfrenta una problemática crítica: mientras aumenta el interés por sus propiedades nutricionales y medicinales, sus poblaciones silvestres disminuyen de manera acelerada, comprometiendo su conservación y aprovechamiento sostenible.

La principal amenaza es la extracción indiscriminada de tubérculos en poblaciones naturales, práctica que ha provocado una reducción significativa de ejemplares, particularmente en regiones de Jalisco. Esta pérdida no solo afecta la diversidad genética de la especie, sino que también impacta negativamente a comunidades rurales que dependen de ella como fuente de alimento e ingreso. A ello se suma su limitada capacidad de propagación por métodos convencionales: la reproducción sexual presenta baja germinación y crecimiento lento, mientras que la propagación vegetativa requiere largos periodos y ofrece bajos índices de multiplicación y establecimiento en campo.

Ante este escenario, el cultivo *in vitro* surge como una alternativa biotecnológica viable para la producción de material vegetal uniforme, libre de patógenos y genéticamente estable. Sin embargo, la etapa de aclimatación *ex vitro* representa una etapa crítica, debido al estrés fisiológico que enfrentan las vitroplantas al adaptarse a condiciones ambientales variables, lo que se traduce en tasas de mortalidad que pueden superar el 60 %.

Frente a estas limitantes, la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y el uso de sistemas hidropónicos o aeropónicos se perfilan como estrategias complementarias con alto potencial para mejorar la supervivencia y el vigor de las plantas. No obstante, la ausencia de protocolos estandarizados para *Dioscorea sp.* limita su implementación.

3. JUSTIFICACIÓN

La implementación de estrategias biotecnológicas para la aclimatación de vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea sp.*) se justifica por la necesidad de conservar y aprovechar de manera sostenible este recurso fitogenético de gran valor para México. Su importancia trasciende el ámbito académico, al ofrecer una respuesta concreta frente a los desafíos ambientales, sociales y económicos que enfrentan la región de Jalisco, donde esta especie forma parte del patrimonio biocultural y productivo.

El camote de cerro enfrenta un riesgo creciente de la pérdida genética debido a la sobreexplotación y a su limitada capacidad de propagación natural. Por ello, el desarrollo de protocolos de aclimatación basados en cultivo *in vitro*, aplicaciones de hongos micorrízicos y sistemas aeropónicos representa una herramienta clave para su conservación *ex situ*. Estas metodologías permiten producir plantas viables a gran escala, reducir la presión sobre las poblaciones silvestres y favorecer la preservación de la biodiversidad. La incorporación de hongos micorrízicos, además, mejora la adaptación de las vitroplantas y aumenta las posibilidades de éxito en su reintroducción al campo.

Desde la perspectiva tecnológica y científica, este trabajo busca optimizar la propagación de especies nativas mediante la integración de biotecnología vegetal, microbiología aplicada y sistemas de cultivo innovadores. El diseño de un sistema aeropónico artesanal y de bajo costo constituye una alternativa adaptable a contextos con recursos limitados, fortaleciendo las bases para un manejo sustentable de los recursos fitogenéticos.

En el plano socioeconómico, el camote de cerro es una fuente importante de alimento e ingresos para comunidades rurales. La producción de material vegetal de calidad impulsará sistemas productivos sostenibles, fortalecerá las economías locales y promoverá la valorización de especies nativas. A su vez, el alto contenido de diosgenina y otros compuestos bioactivos en los tubérculos de *Dioscorea sp.* ofrece un potencial significativo para las industrias farmacéutica y nutracéutica, fomentando el desarrollo agroindustrial y la generación de empleo.

Finalmente, esta investigación propone una alternativa integral que vincula la conservación biológica con la innovación tecnológica y el desarrollo social, constituyendo un modelo replicable para el aprovechamiento sustentable de los recursos fitogenéticos nativos de México.

En este contexto, el presente trabajo plantea desarrollar y validar estrategias biotecnológicas como la aplicación de hongos micorrízicos y el uso de sistemas aeropónicos para optimizar la aclimatación de vitroplantas de camote de cerro, contribuyendo a su conservación y aprovechamiento sustentable en Jalisco, México.

4. HIPÓTESIS

4.1 Hipótesis General

El uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) junto con un sistema de cultivo aeropónico mejorarán notablemente la supervivencia, el desarrollo de las raíces y el vigor general de las vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea* sp.) durante su etapa de aclimatación *ex vitro*.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la implementación de un sistema aeropónico para la supervivencia, desarrollo y aclimatación de vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea sp.*).

5.2 Objetivos Específicos

1. Desarrollar un protocolo de aclimatación de vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea sp.*) en sustrato en condiciones controladas.
2. Evaluar el efecto de dos concentraciones de inóculo micorrízico comercial sobre la supervivencia, y el desarrollo morfológico de las vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea sp.*)
3. Diseñar un sistema hidroaeropónico artesanal de bajo costo, adaptado a las necesidades del camote de cerro (*Dioscorea sp.*)

6. Marco teórico

6.1 Características e importancia del género *Dioscorea*

El género *Dioscorea*, perteneciente a la familia ***Dioscoreaceae***, agrupa cerca de 600 especies distribuidas principalmente en zonas tropicales y subtropicales del planeta (Lebot, 2009). En México, estas plantas son conocidas de manera popular como *camote de cerro* o *ñame mexicano*, destacando *Dioscorea remotiflora* y *Dioscorea* sp. como las especies más comunes en el estado de Jalisco (CONABIO, 2017). Se trata de plantas trepadoras perennes que desarrollan tubérculos subterráneos, apreciados tanto por su valor nutricional como por sus propiedades medicinales.

Desde una mirada etnobotánica, el camote de cerro ha ocupado un papel importante en la dieta y la medicina tradicional de comunidades indígenas y rurales, donde se consume como fuente de carbohidratos, fibra y diversos compuestos bioactivos (Medrano et al., 2008). Su interés farmacéutico no es menor: contiene **diosgenina**, un sapogenina esteroidal que sirve como precursor en la síntesis de corticosteroides, hormonas sexuales y anticonceptivos (Mizrahi, 2014).

6.2 Propagación de *Dioscorea* sp

6.2.1 Propagación sexual

La reproducción por semilla presenta bajos porcentajes de germinación (20-30%) y lento desarrollo, requiriendo de 2 a 3 años para la formación de tubérculos cosechables (Burkill, 1960).

6.2.2 Propagación Asexual

La multiplicación vegetativa mediante tubérculos y bulbillos aéreos muestra coeficientes de multiplicación reducidos (1:3 a 1:5 anual) y alta susceptibilidad a patógenos del suelo (Aighewi et al., 2015). Además, el agotamiento progresivo del material de siembra con cosechas sucesivas limita la sostenibilidad del sistema.

6.3 Propagación biotecnológica (*In vitro*)

El cultivo de tejidos vegetales representa una alternativa biotecnológica para la propagación masiva de *Dioscorea* sp, esta técnica permite:

- **Sanidad vegetal:** Obtención de material libre de virus y patógenos
- **Uniformidad genética:** Propagación clonal de genotipos superiores
- **Independencia estacional:** Producción continua durante todo el año
- **Alto coeficiente de multiplicación:** Hasta 10^4 plantas a partir de un explante inicial (Mantell et al., 1980)

El protocolo establecido por Hinojoso y Limón (2024) para *Dioscorea* sp. incluye las etapas de: establecimiento de explantes, multiplicación de brotes, enraizamiento *in vitro* y aclimatación *ex vitro*, siendo esta última fase la más crítica en el proceso.

6.4 Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) en Aclimatación

Los HMA establecen relaciones simbióticas mutualistas con el 80% de las especies vegetales, incluyendo *Dioscorea* sp. Sus beneficios en aclimatación incluyen:

- **Mejora en la nutrición mineral:** Incremento en la absorción de P, Zn, Cu y otros micronutrientes mediante el extenso sistema de hifas externas.
- **Tolerancia al estrés hídrico:** Las hifas fúngicas acceden a microporos del suelo inaccesibles para raíces, mejorando la eficiencia en el uso del agua.
- **Protección contra patógenos:** Inducción de resistencia sistémica y competencia por nichos ecológicos con patógenos radiculares.
- **Mejora en la estructura del suelo:** Producción de glomalina, proteína que contribuye a la agregación de partículas edáficas.
- Estudios en *Dioscorea* han demostrado incrementos del 40-60% en supervivencia post-trasplante con inoculación micorrízica (Hernández et al., 2023).

6.5 Sistemas Aeropónicos

- La aeroponía consiste en el cultivo de plantas con raíces suspendidas en aire y nebulización periódica de solución nutritiva. Sus ventajas en aclimatación incluyen:

- **Optimización del desarrollo radicular:** Alta oxigenación que promueve ramificación y elongación radical.
- **Eficiencia en uso de agua y nutrientes:** Reducción del 30-50% en consumo hídrico comparado con sistemas convencionales.
- **Control de patógenos:** Ausencia de suelo reduce incidencia de enfermedades radiculares.
- **Monitoreo no destructivo:** Acceso directo al sistema radical para evaluaciones morfológicas y fisiológicas.

El diseño de sistemas aeropónicos artesanales adaptados a condiciones locales representa una innovación tecnológica accesible para pequeños productores (García Ruiz et al., 2008).

6.6 Soluciones nutritivas para sistemas aeropónicos

Las soluciones nutritivas son utilizadas como fuente principal de nutrientes para los cultivos de importancia económica, con el fin de optimizar su desarrollo vegetativo, favorecer la formación de raíces y brotes saludables, y garantizar un crecimiento uniforme de las plantas durante el cultivo *in vitro* o *ex vitro*. Su correcta dosificación y balance nutricional resultan fundamentales para maximizar la eficiencia del proceso de propagación y asegurar plantas robustas para su posterior aclimatación.

Los estudios de García Ruiz et al. (2008) en la Ciénega de Chapala establecieron las bases para la formulación de soluciones nutritivas específicas para camote de cerro en condiciones controladas.

7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

7.1 Localización y Condiciones Experimentales

El estudio se realizó en el Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco, México (20°28'N, 103°27'W, 1,565 msnm), en el cuarto de cultivo ubicado en la planta piloto de procesos agroindustriales bajo condiciones controladas de temperatura (25 ± 2°C) y fotoperiodo (16 horas de luz).

7.2 Material Vegetal

7.2.1 Propagación de plantas de camote de cerro *in vitro*

Se utilizaron vitroplantas de camote de cerro (*Dioscorea* sp.) de seis meses de edad, obtenidas mediante cultivo *in vitro* según el protocolo establecido por Hinojosa y Limón (2024). Las plantas se mantuvieron en medio de cultivo MS (Murashige y Skoog, 1962) con 3% de sacarosa, en condiciones de fotoperiodo (16h luz), a una temperatura de 25°C antes de su transferencia a condiciones *ex vitro*.

7.2.2 Aclimatación de plantas de camote de cerro en condiciones controladas

Se preparó una mezcla de sustrato compuesta por *peat moss* y agrolita en una proporción 4:1 (v/v). De esta mezcla, se colocaron 40 g en frascos de vidrio con una capacidad de 445 mL, los cuales se esterilizaron en autoclave a 121 °C durante 20 minutos.

Durante la fase de aclimatación, las vitroplantas se mantuvieron en un sistema cerrado sin aireación durante la primera semana, mientras que de la segunda a la duodécima semana se utilizaron frascos con tapas provistas de filtro para permitir el intercambio gaseoso. Adicionalmente, se realizó una aplicación quincenal de 5 mL de medio MS (solamente los macronutrientes y micronutrientes).

7.3 Preparación de Inóculo Micorrízico

Se empleó el producto comercial Micover Mix® (Biotver) con concentración de 0.03% (p/p), equivalente a 20,000 propágulos/kg.

7.4 Experimento de aclimatación de plantas *in vitro* de camote de cerro

Las soluciones que se prepararon en la sección de “Preparación de inóculo micorrízico”, se homogenizaron mediante agitación continua durante 10 minutos antes de su aplicación.

Se establecieron tres tratamientos con tres repeticiones cada uno con 2 plantas:

- **T0 (Control):** 0 g/L de inóculo micorrízico
- **T1 (HMA Bajo):** 0.1 g/L de inóculo micorrízico
- **T2 (HMA Alto):** 0.5 g/L de inóculo micorrízico

Semanalmente se efectuaron evaluaciones de porcentaje de: 1) Supervivencia de la planta, 2) Planta sana, 3) Clorosis de la planta, 4) Marchitez de la planta, 5) Contaminación de la planta. Mientras que en el día 63 se evaluó el peso y la longitud del tubérculo.

7.4.1 Tinción de raíces con azul de tripano.

Las raíces de las plantas se recolectaron al final del experimento y se lavaron suavemente con agua destilada para eliminar las partículas de suelo, las raíces de cada plántula se colocaron en tubos Falcon de 15 mL y se blanquearon con 1,7 mol/L de KOH a 50 °C durante 30 min. A continuación, se enjuagaron con agua destilada estéril dos veces y 0,5 mol/L H₂O₂ a 50 °C durante 15 min y, finalmente, se tiñeron con azul tripano al 0,05 % (p/v) en lactoglicerol (ácido láctico: glicerol: H₂O = 1:1:1 v:v:v) a 50 °C durante 30 min. Se destiñeron con agua: glicerol estéril al 50 % (v/v) varias veces y se almacenaron a 4 °C, siguiendo el protocolo de Phillips *et al.* (1970), con una pequeña modificación. Las muestras se observaron con un microscopio óptico (Iroscope ® Modelo MG-30PL, Ciudad de México, México).

Los datos presentados corresponden a tres repeticiones, cada repetición con dos plantas. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). La comparación de medias fue determinada con la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software SPSS, versión 25.

7.5 Diseño del Sistema Aeropónico

7.5.1 Sistema aeropónico a pequeña escala

Se diseñó y construyó un sistema aeropónico de recirculación cerrado a pequeña escala (Figura 2), integrado por un reservorio de solución nutritiva, unidad de bombeo, red de distribución, cámaras de crecimiento y sistema de drenaje.

Las cámaras de crecimiento se adaptaron a partir de hieleras de polipropileno con capacidad de 9.83 L. En cada tapa se realizaron seis perforaciones equidistantes para el establecimiento de las plantas, permitiendo aproximadamente 15 cm de profundidad para el desarrollo radical en suspensión. Las cámaras permanecieron cerradas durante la operación para mantener oscuridad en la zona radicular.

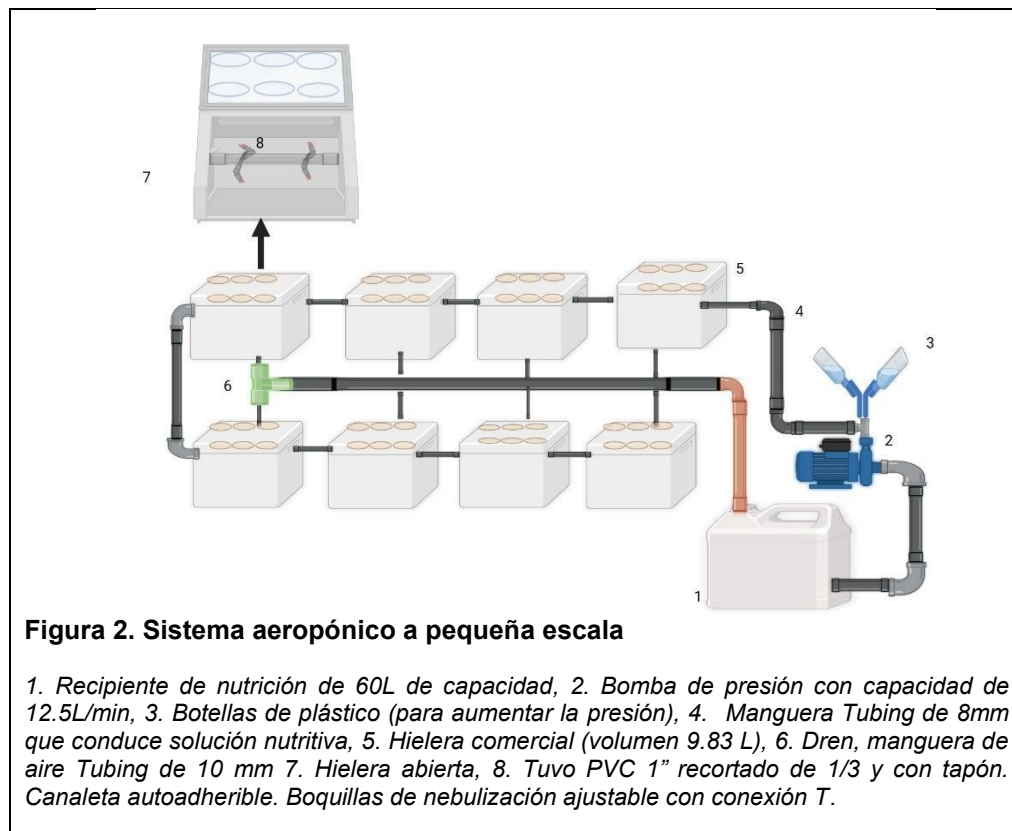
El sistema incluyó un reservorio principal de 19 L, desde el cual la solución nutritiva fue impulsada mediante una bomba de diafragma de desplazamiento positivo modelo SHURFLO 2088-594-154. La bomba operó a 115 V AC, con un consumo de 0.5–0.9 A y potencia aproximada de 104 W. Presentó un caudal máximo de 3.3 gal min^{-1} ($\approx 12.5 \text{ L min}^{-1}$) y un interruptor de presión interno calibrado para activarse a 25 psi y desactivarse a 45 psi, permitiendo operación automática según la demanda del sistema.

La distribución hidráulica se realizó con manguera plástica de 10 y 12 mm de diámetro y conexiones tipo “T” (10mm) para asegurar flujo uniforme hacia cada cámara. La nebulización se efectuó mediante dos boquillas ajustables por unidad, conectadas a una línea interna de PVC de 2” modificada longitudinalmente que sirve para retornar el excedente de solución nutritiva por gravedad al reservorio principal para su recirculación. El sistema se controlará con un temporizador digital programado para ciclos de riego de 15 minutos cada 4 horas, garantizando una humidificación radicular periódica y homogénea. El sistema de nebulización consistió en:

- Tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro
- 8 boquillas de nebulización con 4 salidas ajustables por cada cámara
- Conexiones en "T" (10x10x10mm) para distribución uniforme
- Bomba de presión de 3.1 PSI con capacidad de flujo de 12.5 L/min
- Coples inserción rápida de 12 mm como retorno
- Temporizador digital para ciclos de riego
- Manguera de jardín ½" con una malla como filtro en la succión

7.5.1.1 Componentes del Sistema

- Cámaras de crecimiento: Hieleras plásticas de 9.83 L de capacidad
- Sistema de nebulización: Boquillas ajustables con conexiones en T
- Bomba de presión: 3.1 PSI, flujo máximo de 12.5 L/min
- Tuberías: Manguera plástica de 10 mm y 12 mm de diámetro
- Control automático: Temporizador digital para ciclos de riego



7.5.1.2 Sistema aeropónico a gran escala

Se diseñó y construyó un sistema hidroaeropónico de recirculación a gran escala (Figura 3) con el objetivo de evaluar el crecimiento vegetal en condiciones controladas mediante la nebulización directa de la solución nutritiva sobre el sistema radical.

El sistema estuvo conformado por un tanque principal tipo IBC (contenedor industrial cúbico) con capacidad de 1000 L, el cual funcionó como cámara de crecimiento para el desarrollo radicular de las plantas. En la parte superior del tanque se instaló una lámina de poliéster reforzado con fibra de vidrio (2.41×1 m), perforada para permitir la colocación de las plántulas en un arreglo espacial uniforme. Esta superficie sirvió como soporte estructural para el establecimiento del cultivo, manteniendo las raíces suspendidas dentro de la cámara de nebulización.

La distribución de la solución nutritiva se realizó mediante un sistema de nebulización conformado por 21 boquillas atomizadoras, espaciadas a intervalos de 27.5 cm a lo largo de las líneas internas de conducción. Este arreglo permitió generar una neblina fina y homogénea en el interior del tanque, favoreciendo el contacto eficiente de la solución nutritiva con el sistema radical.

La solución nutritiva fue suministrada mediante una bomba conectada a una red de manguera de aire tubing de 10 mm de diámetro, la cual impulsó el flujo hacia las líneas de nebulización. El sistema incluyó un mecanismo de recirculación compuesto por dos tambos plásticos de 60 L utilizados para procesos de sedimentación y succión, permitiendo recuperar la solución no absorbida y reducir la acumulación de partículas o sedimentos en las boquillas.

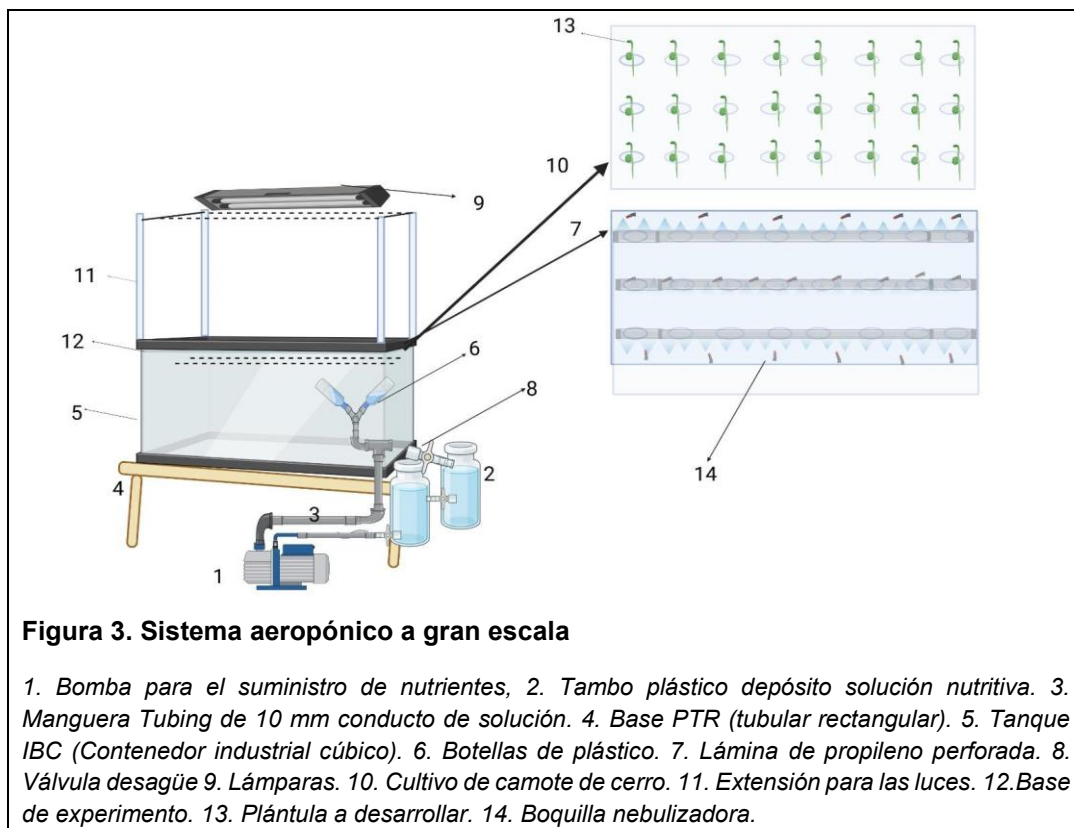
El módulo experimental se montó sobre una base estructural tipo PTR (perfil tubular rectangular) para proporcionar estabilidad al sistema y facilitar las operaciones de mantenimiento. Adicionalmente, se instalaron lámparas en la parte superior de la estructura para proporcionar iluminación suplementaria al cultivo.

Este sistema permitió mantener un suministro continuo y homogéneo de solución nutritiva en forma de microgotas, optimizando la disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes en la zona radicular y favoreciendo condiciones adecuadas para el crecimiento vegetal.

En el sistema hidroaeropónico a gran escala se implementó un módulo con los siguientes elementos:

7.5.3 Componentes del sistema aeropónico a gran escala

- Tubo CPVC 2" perforado
- Manguera de 1/2" de diámetro
- Tanque principal IBC de 1000 L de capacidad
- Sistema de nebulización: Boquillas ajustables con conexiones en T
- Bomba de presión: 3.1 PSI, flujo máximo de 12.5 L/min
- Tuberías: Manguera plástica tubing de 8 mm y 10 mm de diámetro
- Control automático: Temporizador digital para ciclos de riego
- Lámina de poliéster reforzado con fibra de vidrio (2.41 × 1 m)
- 21 boquillas de nebulización espaciadas a 27.5 cm
- Sistema de recirculación con dos tambos de 60 L para sedimentación y succión
- Conexión brida plástica
- Botellas de refresco



7.6 Solución Nutritiva

Durante el proceso experimental se controlaron las condiciones fisicoquímicas de la solución nutritiva, manteniendo una conductividad eléctrica de 2.5 ± 0.2 mS/cm, un pH de 6.5 ± 0.2 y una temperatura de 22 ± 2 °C. Estos parámetros se establecieron para asegurar un entorno óptimo que favoreciera el desarrollo adecuado de las vitroplantas. Se preparó una solución nutritiva con los siguientes componentes:

Cuadro 1. Solución nutritiva

Fertilizante	Concentración (mg/L)	Aporte Principal
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	945	Ca, NO_3
KNO_3	404	K, NO_3
KH_2PO_4	136	P, K
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	493	Mg, S
H_3PO_4	0.15 mL/L	P
HNO_3	0.10 mL/L	N

7.7 Ensayo del funcionamiento del sistema hidroaerónico a gran escala

Se realizó un primer ensayo, donde se emplearon 3 plantas de camote de cerro generadas a partir de un tubérculo de 10g, las cuales se colocaron en el sistema, programándose cuatro riegos cada 4 horas al día con duración de 15 minutos durante 72 horas.

Se efectuó un segundo ensayo, en el que se colocó solamente una planta de camote de cerro generada a partir de un tubérculo de 10g, las cuales se colocaron en el sistema, programándose siete riegos cada 4 horas al día con duración de 15 minutos durante 72 horas.

En ambos ensayos se monitoreó el adecuado funcionamiento del sistema y la supervivencia de la planta.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Establecimiento en sustrato de vitroplantas

Al realizar el proceso de establecimiento de vitroplantas de camote de cerro *ex vitro* se tomaron plantas de 6 meses de edad en condiciones *in vitro*, en medio de cultivo MS (Figura 4A), las cuales se trasplantaron en un sistema cerrado en frascos de vidrio con sustrato, tapa sin filtro (Figura 4B), transcurrido una semana se cambió la tapa con un filtro que permitía el intercambio gaseoso, sistema semiabierto (figura 4C), posteriormente se quitó la tapa con filtro, estableciendo un sistema abierto, en el que se colocó un plástico con huecos (Figura 4D), como se puede observar en la figura 3A-3D este proceso no afectó a la vitroplanta de forma negativa



Figura 4. Aclimatación de vitroplantas (6 meses)

A. Vitroplanta de seis meses; B) Vitroplanta en sistema cerrado (tapa sin filtro); C) Vitroplanta en sistema semiabierto (tapa con filtro); D) Vitroplanta en sistema abierto (plástico con huecos).

8.2 Experimento de aclimatación de plantas *in vitro* de camote de cerro

Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la supervivencia de vitroplantas entre los tratamientos T0 y T2, así como entre el tratamiento T1 y T2 a lo largo del período experimental de 35 y 63 días. El tratamiento control (T0) mantuvo una supervivencia del 100% durante las primeras tres semanas, mientras que los tratamientos con micorrizas (T1 y T2) presentaron supervivencias iniciales del 66.67% en las primeras dos semanas (Cuadro 2). Sin embargo, a partir de la quinta semana se observó una inversión en esta tendencia presentando una supervivencia de 33.33 en los tratamientos T0 y T1 en el día 63, y en el caso del tratamiento T2 en ese mismo día no sobrevivió ninguna planta, Figura 5.

Cuadro 2. Supervivencia de plantas de camote de cerro durante la aclimatación

T	7 [Día]*	14 [día]*	21 [día]*	35 [día]*	49 [día]*	63 [día]*
T0	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A	66.66±16.66 ^{AB}	33.33±16.66 ^{BC}	33.33±16.66 ^B _C
T1	66.66±33.33 ^{AB}	66.66±33.33 ^{AB}	50.00±28.86 ^{AB} _C	50.00±28.86 ^{AB} _C	50.00±28.86 ^{AB} _C	33.33±16.66 ^B _C
T2	66.66±33.33 ^{AB}	66.66±33.33 ^{AB}	33.33±16.66 ^{AB}	00.00±00.00 ^C	00.00±00.00 ^C	00.00±00.00 ^C

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*
Describir tabla

Durante la evaluación del porcentaje de plantas sanas, T1 es el tratamiento más efectivo con plantas sanas por más tiempo (día 49), aunque no evita la pérdida total, mientras que T0 muestra una disminución rápida, con desaparición de plantas sanas desde el día 35, mientras que el T2 presentó los valores más bajos de plantas sanas a lo largo del experimento comparado con los tratamientos T0 y T1, Cuadro 3, Figura 5.

Cuadro 3. Planta sana de camote de cerro durante la aclimatación

T	7 [día]*	14 [día]*	21 [día]*	35 [día]*	49 [día]*	63 [día]*
T0	66.66±33.33 ^A	33.33±33.33 ^{AB}	33.33±33.33 ^{AB}	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B
T1	66.66±33.33 ^A	66.66±33.33 ^A	50.00±28.86 ^{AB}	16.66±16.66 ^{AB}	16.66±16.66 ^{AB}	0.00±0.00 ^B
T2	16.66±16.66 ^{AB}	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B	0.00±0.00 ^B

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*

En cuanto al porcentaje de clorosis en la planta (Cuadro 4) el T0 (control): Inicia con 33.33% de clorosis y aumenta progresivamente, alcanzando el 100% de clorosis en el día 35. La clorosis se presenta de manera rápida y casi total desde la mitad del periodo. En el caso del T1 comienza igual que el T0 y se observa una clorosis más lenta en el día 21 con 66.66% y en el día 35 alcanza el 83.33% finalizando con un 100% en el día 63. Este tratamiento retrasa la progresión de la clorosis respecto a T0 y T2.

En el T2, se observa una clorosis en el día 7 de 50.28% y aumenta rápidamente en el día 21, con un porcentaje de 83.33%, alcanzando una clorosis del 100% en el día 35, siendo el tratamiento con una progresión más acelerada de clorosis.

En resumen, la clorosis afecta a todas las plantas durante la aclimatación, pero el avance de la clorosis depende del tratamiento aplicado (Figura 5).

Cuadro 4. Clorosis de la planta del camote de cerro durante la aclimatación

T	7 [Día]*	14 [día]*	21 [día]*	35 [día]*	49 [día]*	63 [día]*
T0	33.33±33.33 ^A	66.66±33.33 ^A	66.66±33.33 ^A	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A
T1	33.33±33.33 ^A	33.33±33.33 ^A	50.28±28.86 ^A	66.66±33.33 ^A	83.33±16.66 ^A	100.00±0.00 ^A
T2	50.28±28.86 ^A	66.66±33.33 ^A	83.33±16.66 ^A	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*

Con respecto a la marchitez de la planta (Cuadro 5) el tratamiento T0 (control): La marchitez inicia en 33.33% y se mantiene igual hasta el día 14 con un aumento del 66.66% en el día 21 y 35, llegando al 100% desde el día 49 en adelante. Esto muestra que sin tratamiento la marchitez progresa rápidamente y todas las plantas terminan afectadas.

T1: Igual que T0 en los primeros 14 días se comporta igual y en el día 21 y 35 se mantienen en un 50% mostrando un retraso progresivo y aumenta a un 66.66% en el día 49 llegando finalmente al 100% en el día 63. Este tratamiento retrasa la marchitez, pero no la evita.

T2: Al igual que T1 y T0 los primeros 14 días tiene un comportamiento de 33.33% teniendo un aumento en el día 21 con un 66.66% y el día 35 alcanza el 100% y se

mantiene así. Este tratamiento acelera la marchitez en comparación con T1 y T0, Figura 5.

Cuadro 5. Marchitez de la planta del camote de cerro durante la aclimatación

T	7 [Día]*	14 [día]*	21 [día]*	35 [día]*	49 [día]*	63 [día]*
T0	33.33±16.66 ^B	33.33±16.66 ^B	66.66±16.66 ^{AB}	66.66±16.66 ^{AB}	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A
T1	33.33±16.66 ^B	33.33±16.66 ^B	50.00±0.00 ^B	50.00±0.00 ^B	66.66±16.66 ^{AB}	100.00±0.00 ^A
T2	33.33±16.66 ^B	33.33±16.66 ^B	66.66±16.66 ^{AB}	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A	100.00±0.00 ^A

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*

La contaminación por hongos mostró un incremento en todos los tratamientos, siendo más acelerado en los tratamientos con mayor concentración de micorrizas (Cuadro 6). El tratamiento T2 (0.5 g/L) alcanzó el 100% de contaminación a los 21 días, mientras que T0 y T1 mostraron una progresión más lenta, llegando al 100% a los 49 y 63 días respectivamente (Figura 5).

Cuadro 6. Contaminación de planta de camote de cerro durante la aclimatación

T	7 [Día]	14 [día]	21 [día]	35 [día]	49 [día]	63 [día]
T0	33.33±16.67 ^C	33.33±16.67 ^C	33.33±16.67 ^C	83.33±16.67 ^{AB}	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A
T1	33.33±16.67 ^C	33.33±16.67 ^C	50.00±28.87 ^{AB}	50.00±28.87 ^B	83.33±16.67 ^{AB}	100±0.00 ^A
T2	83.33±16.67 ^{AB}	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A	100±0.00 ^A

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*

En la evaluación de los pesos y longitud de desarrollo de tubérculo el tratamiento T0 mostro mayor peso mientras que el tratamiento T1 mostro mayor longitud hasta el día 49 (Figura 5).

Cuadro 7. Evaluación de peso y longitud de tubérculo

T	Peso [g]	Longitud [cm]
T0	0,30±0,30 ^A	0,36±0,36 ^A
T1	0,15±0,22 ^A	0,37±0,19 ^A
T2	0,00±0,00 ^A	0,00±0,00 ^A

**En el cuadro se representa la media ± el error estándar, las diferentes letras representan diferencias significativas a través del tiempo entre tratamientos*

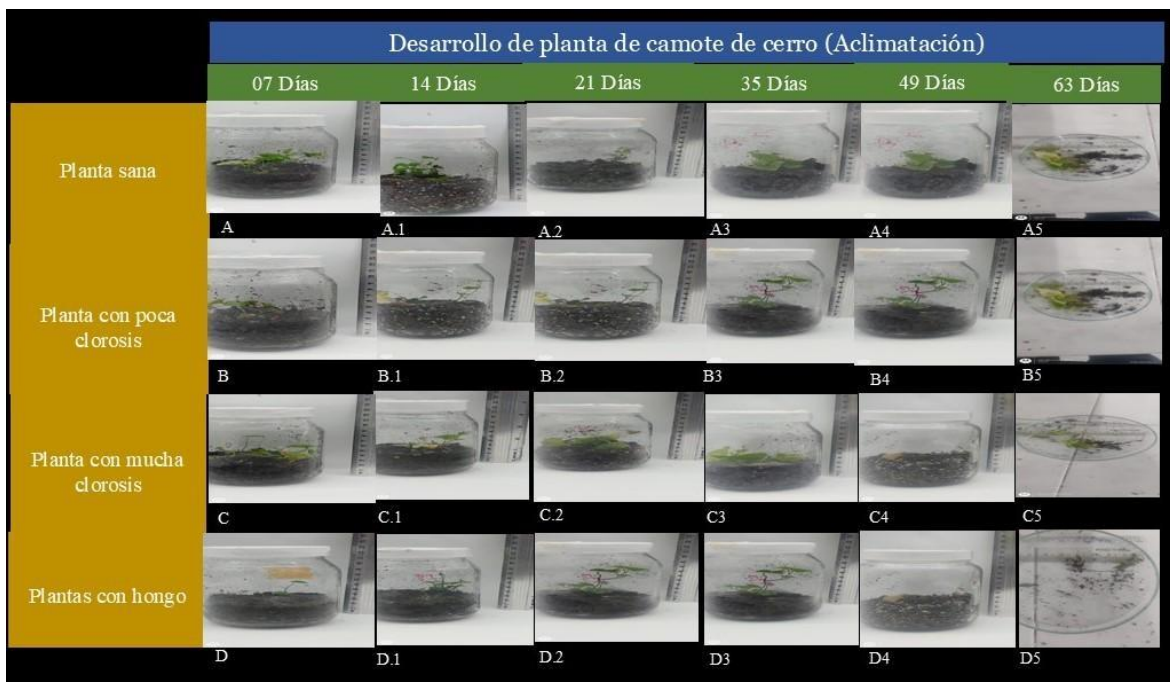


Figura 5. Efecto de la aplicación de micorrizas en la aclimatación de plantas de camote de cerro.

A. Planta sana; B. Planta con poca clorosis; C. Planta con mucha clorosis; D. Planta contaminada (hongo).

Se identificó predominantemente contaminación fúngica, además de crecimiento de algas en la superficie del sustrato en los tratamientos con mayor humedad.

La evaluación radicular de las plantas tratadas con Mix Cover confirmó la colonización efectiva por hongos micorrízicos arbusculares. Como se observa en la **Figura 6**, los cortes realizados muestran estructuras fúngicas (vesículas) integradas en el tejido radicular del camote de cerro, lo que valida la simbiosis hongo-raíz y la eficacia de la interacción."

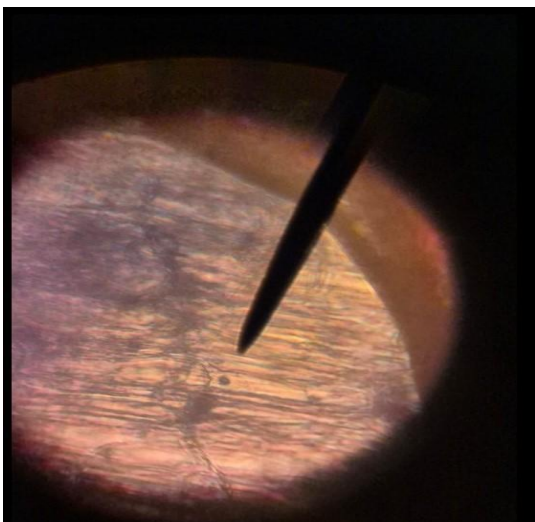


Figura 6. Micrografías de microscopía óptica de vesícula de micorriza arbuscular en raíces de plantas de camote de cerro

La mayor incidencia de contaminación en tratamientos micorrízicos podría deberse a la presencia de propágulos fúngicos no micorrízicos en el inóculo comercial o a condiciones de humedad favorables para el desarrollo de patógenos. Ng (2014) reporta desafíos similares en la aclimatación de *Dioscorea* spp. con inóculos microbianos.

Durante la aclimatación del camote de cerro se observaron cambios progresivos en tres parámetros fisiológicos: porcentaje de plantas sanas, incidencia de clorosis y grado de marchitez. En conjunto, los resultados muestran un deterioro inevitable de las plantas, aunque con diferencias en los tiempos de pérdida de planta según el tratamiento aplicado.

8.3 Diseño del sistema Aeropónico a pequeña escala

Durante las pruebas iniciales de funcionamiento del sistema aeropónico de recirculación cerrado se identificaron limitaciones hidráulicas asociadas principalmente al sistema de drenaje y retorno de la solución nutritiva. Inicialmente, la salida de drenaje de cada cámara de crecimiento se conformó mediante una tubería tipo tubing de 8 mm conectada a una manguera de 10 mm; sin embargo, esta configuración provocó una acumulación de solución nutritiva dentro de las hieleras, generando obstrucciones parciales y dificultades en el flujo de retorno hacia el reservorio principal. Como consecuencia, la solución nutritiva contenida en el tanque de nutrición llegaba a agotarse debido a la falta de recirculación eficiente, comprometiendo la estabilidad hidráulica del sistema y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Derivado de estas observaciones, se realizaron modificaciones estructurales en el sistema de drenaje con la finalidad de mejorar la circulación de la solución nutritiva. La tubería de salida fue sustituida por tubing de 12 mm conectado directamente a un tubo recolector de PVC de 2 pulgadas, lo que permitió incrementar la capacidad de conducción y disminuir la acumulación de solución en las cámaras de crecimiento. Esta modificación favoreció un retorno más uniforme y continuo de la solución nutritiva hacia el reservorio principal, mejorando la eficiencia del sistema de recirculación y evitando pérdidas por desbordamiento o saturación interna de las unidades de cultivo.

Asimismo, se modificó la altura de salida del drenaje dentro de las hieleras. Inicialmente, el punto de salida se encontraba ubicado en la parte inferior del recipiente; posteriormente se elevó aproximadamente a 5 cm desde el fondo de la cámara de crecimiento. Esta modificación permitió mantener un pequeño reservorio de solución nutritiva en el interior de cada unidad, funcionando como una reserva temporal de agua y nutrientes para las plantas en caso de interrupciones eléctricas o fallas en el funcionamiento de la bomba. De esta manera, se buscó reducir el riesgo de deshidratación radicular y estrés hídrico durante periodos sin recirculación activa.

Durante la operación del sistema también se detectó que la presión generada por la bomba no era suficiente para lograr una nebulización homogénea en todas las cámaras de crecimiento. La baja presión ocasionaba una dispersión irregular de la solución nutritiva y limitaba la formación de una niebla fina adecuada para el desarrollo del sistema radical suspendido. Para corregir esta limitación, se incorporó un dispositivo de sobrepresión elaborado de manera experimental mediante la integración de dos botellas de plástico de 600 mL al sistema hidráulico. Esta modificación permitió incrementar la presión interna y mejorar la distribución de la solución nutritiva hacia las boquillas de nebulización, obteniéndose una aspersion más uniforme dentro de las cámaras aeropónicas.

Por otra parte, durante las pruebas de nebulización se observó que la ubicación inicial de los aspersores en la parte inferior de las cámaras limitaba la distribución homogénea de la solución nutritiva sobre el sistema radical. En respuesta a ello, los aspersores fueron reubicados hacia la parte superior interna de las cámaras, incorporándose boquillas de nebulización Netafim Micronet 4 salidas ajustables. Esta modificación permitió una dispersión más uniforme de la solución nutritiva en forma de niebla fina dentro de la cámara radicular, favoreciendo una mejor humidificación de las raíces suspendidas y optimizando las condiciones de oxigenación propias del sistema aeropónico.

Las adecuaciones realizadas durante la etapa experimental permitieron mejorar considerablemente la operación hidráulica y funcional del sistema aeropónico a pequeña escala. El sistema final logró mantener una recirculación continua y estable de la solución nutritiva, además de proporcionar una distribución más homogénea de la nebulización y una mayor seguridad operativa frente a posibles interrupciones en el suministro eléctrico. Estas modificaciones contribuyeron al adecuado funcionamiento del sistema y sentaron las bases para futuras evaluaciones del crecimiento y desarrollo de las plantas bajo condiciones aeropónicas controladas.

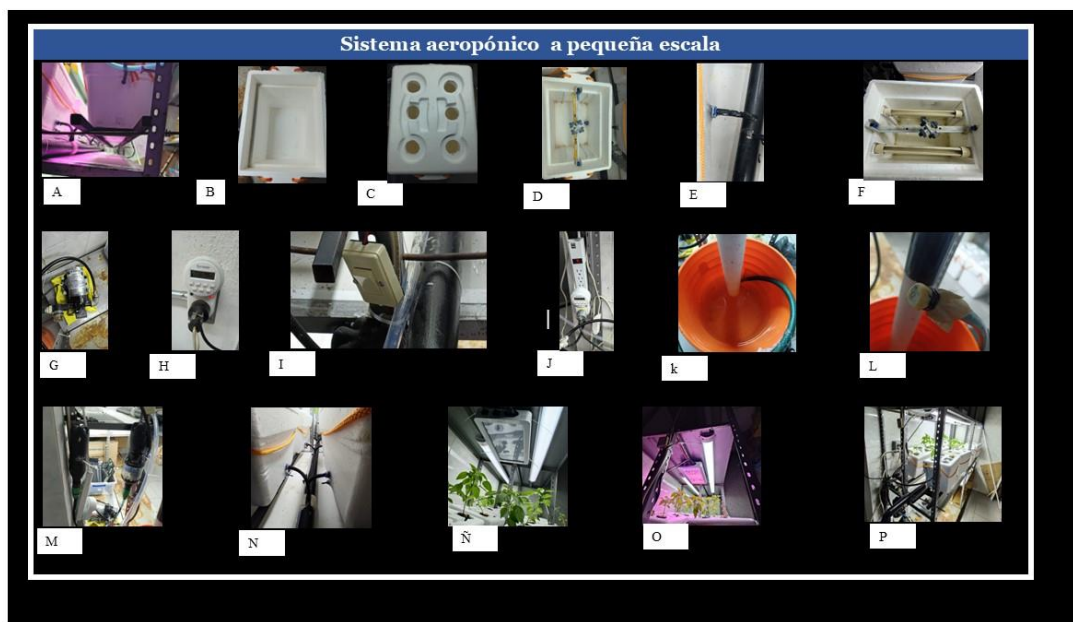


Figura 7. Sistema aeropónico a pequeña escala

A. Soporte de hieleras con desnivel B. Hieleras con capacidad de 9.83 L, C Tapa de hieleras con 6 orificios, D. Boquilla nebulizadora, E. Cople de inserción rápida para la salida de agua, F. Hielera con conexiones completa (especificar), G. Bomba de fertilización, H. Temporizador de riegos de ocho tiempos, I. Interruptor de luces, J. Fuente de energía, K. Cubeta de fertilizante con capacidad de 19 L, L. Cedazo de la succión de agua, M. Botellas de 600mL para aumentar la presión del sistema, N. Tubo PVC 2" recolector de agua con nutrición, Ñ. Luz led blanca, O. Luz led violeta y roja, P. Estante para el experimento

8.4. Diseño de sistema aeropónico a gran escala

Durante el proceso de diseño y evaluación del sistema hidroaeropónico de recirculación a gran escala se identificaron diversos aspectos técnicos que requirieron modificaciones para optimizar el funcionamiento hidráulico y la eficiencia de la nebulización dentro de la cámara de crecimiento. En las pruebas iniciales se observó que la presión generada por la bomba no era suficiente para mantener una nebulización homogénea en las 21 boquillas distribuidas dentro del tanque principal IBC de 1000 L. Esta limitación provocaba una dispersión irregular de la solución nutritiva y una cobertura insuficiente sobre el sistema radical suspendido.

Con la finalidad de incrementar la presión interna del sistema y mejorar la distribución de la solución nutritiva, se implementó un dispositivo de sobrepresión elaborado experimentalmente mediante la incorporación de dos botellas de plástico de 600 mL integradas al sistema hidráulico. La inclusión de este dispositivo permitió

aumentar la presión de trabajo dentro de las líneas de conducción, favoreciendo una emisión más uniforme de microgotas a través de las boquillas atomizadoras. Como resultado, se logró una nebulización más homogénea en el interior de la cámara radicular, mejorando el contacto de la solución nutritiva con las raíces y optimizando las condiciones de oxigenación y disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Durante las primeras etapas de operación también se detectaron fugas en diferentes conexiones del sistema hidráulico, en el drenaje que retorna al reservorio de la solución nutritiva, el cual no estaba bien sellado. Esta fuga ocasionaban pérdidas de solución nutritiva ya no se logró la recirculación de la misma en el sistema. Conforme avanzaron las pruebas experimentales, dichas fugas fueron corregidas mediante ajustes y sellado de conexiones, permitiendo estabilizar el funcionamiento del sistema y mantener un flujo continuo y uniforme de solución nutritiva.

Para minimizar el crecimiento de algas por la presencia de luz, se instaló una lámina de propileno adicional sobre la superficie del sistema, la cual fue pintada de color negro con el objetivo de reducir el paso de luz hacia el interior del tanque. Esta modificación permitirá disminuir las condiciones favorables para la proliferación de algas en la solución nutritiva y favorecer el crecimiento del sistema radicular, así como contribuir al mantenimiento de mejores condiciones sanitarias dentro del sistema hidroaeropónico.

Adicionalmente, se implementó un sistema de iluminación suplementaria mediante lámparas LED colocadas en la parte superior de la estructura. La incorporación de estas luces permite mejorar la distribución y disponibilidad de luz sobre las plantas, favoreciendo condiciones más uniformes de crecimiento y desarrollo vegetal dentro del sistema experimental. El uso de iluminación LED también contribuye a una mayor eficiencia energética y a un mejor control de las condiciones ambientales del cultivo.

Las adecuaciones realizadas durante la etapa experimental permitieron mejorar progresivamente el desempeño del sistema hidroaeropónico a gran escala. La incorporación del dispositivo de sobrepresión, la corrección de fugas hidráulicas, la

implementación de barreras para limitar el crecimiento de algas y el uso de iluminación LED favorecieron una operación más estable y eficiente del sistema. En conjunto, estas modificaciones contribuyeron a mantener una nebulización continua y homogénea, optimizando las condiciones de suministro de agua, oxígeno y nutrientes para el desarrollo de las plantas bajo condiciones controladas.



Figura 8. Sistema aeropónico a gran escala

Las letras A, B,C. Corresponden a la estructura armada y cubo IBS (base cubica plástica) con el plástico, membrana negra, D. Bomba de fertilización, E. Conexiones y manguera para aire 10mm, F. Boquillas nebulizadoras cónica de latón, G. Botellas de 600mL para aumentar la presión, H. válvula de desagüe, I. Tanques con capacidad de 60 L para solución nutritiva, J. Tubos de PVC para la reserva de solución nutritiva, K. Planta muerta por deshidratación, L. Lámparas led blanca roja y azul, Las letras M,N corresponde a la segunda prueba, Ñ. modificación en lámina base de la planta (pintura negra).

Resultados del 1er ensayo

La primera prueba se realizó con tres plantas de camote de cerro, previamente establecidas con un mes de crecimiento. El sistema de riego se encendió correctamente: las boquillas funcionaron de manera adecuada y el retorno del agua hacia el tambo de recolección de solución se presentó sin inconvenientes. El riego se mantuvo activo durante todo el fin de semana; sin embargo, al revisar el sistema el día lunes por la mañana se detectó una fuga en la cisterna cúbica, lo que ocasionó el vaciado del tambo de solución. Como consecuencia, las plantas se deshidrataron y murieron, concluyendo así la primera prueba.

Resultados del 2do ensayo

Tras identificar y corregir los contratiempos del primer ensayo, se procedió a realizar una segunda prueba con dos plantas de camote de cerro. El sistema se mantuvo en operación durante el fin de semana, pero en esta ocasión el problema fue la interrupción del suministro eléctrico, lo que impidió el funcionamiento del riego el domingo y el lunes. Al igual que en el ensayo anterior, las plantas se deshidrataron y murieron. La experiencia obtenida evidencia la necesidad de mantener una vigilancia constante y contar con un plan alternativo, así como con el equipo adecuado, para asegurar la continuidad del experimento y aumentar las probabilidades de éxito en futuras aplicaciones.

9. Discusión general

La aclimatación de vitroplantas representa una de las etapas más críticas dentro del proceso de micropropagación, debido al alto estrés fisiológico que experimentan las plantas al pasar de condiciones controladas de laboratorio a ambientes externos. En este estudio, la evaluación de tratamientos con hongos micorrízicos arbusculares durante la aclimatación de plantas de camote de cerro mostró diferencias en la supervivencia y en la progresión de síntomas fisiológicos a lo largo del periodo experimental. Los resultados indican que el tratamiento con menor concentración de micorrizas (T1) permitió mantener plantas sanas por mayor tiempo en comparación con el tratamiento control y con la concentración más alta evaluada, lo que sugiere un efecto positivo de la micorrización en las primeras etapas de establecimiento.

En el tratamiento T1 presenta una menor pérdida de plantas, este tratamiento, es el tratamiento que tiene una menor concentración de micorriza, el cual puede tener un efecto benéfico en la plántula de camote de cerro mejorando la aclimatación de plantas *in vitro* (Niemira et al, 1995, Vosátka y Gryndler) e incrementando el rendimiento y tamaño de los tubérculos, lo que coincide con algunos estudios en cultivos de tubérculo como papa, yuca y ñame (Duffy y Cassells, 2000; O'Herlihy et al. 2003; Azcón-aguilar et al., 1997; IITA, 2007), sin embargo, también es importante

considerar que durante el proceso de aclimatación se debe mejorar la asepsia durante la aclimatación de las plantas, para disminuir los porcentajes de contaminación, ya que también se observó contaminación en el tratamiento T0 (control), que es el que se inoculó con agua estéril. En el caso del tratamiento T3 se presentó mayor porcentaje de contaminación el cual puede ser debido a que se empleó una mayor concentración de micorriza. Lo que se sugiere emplear concentraciones menores al tratamiento T1 para optimizar el proceso de aclimatación.

Sin embargo, a pesar de las diferencias observadas entre tratamientos, todos los grupos experimentales presentaron finalmente síntomas de deterioro fisiológico como clorosis y marchitez, lo que evidencia la complejidad del proceso de aclimatación en esta especie. Estos resultados confirman que, aunque las micorrizas pueden contribuir a mejorar la adaptación inicial, otros factores ambientales y de manejo también influyen de manera importante en la supervivencia de las vitroplantas.

Uno de los aspectos relevantes observados durante el experimento fue la importancia del intercambio gaseoso durante la fase inicial de aclimatación. El cambio de tapa por un sistema con filtro permitió la entrada de oxígeno y el intercambio de gases, lo que favoreció la adaptación inicial de las plantas sin generar efectos negativos visibles. Este tipo de modificaciones puede ayudar a reducir el estrés fisiológico que enfrentan las plantas al abandonar las condiciones completamente cerradas del cultivo *in vitro*.

No obstante, durante el desarrollo del estudio también se identificaron factores que pudieron influir en los resultados obtenidos. Entre ellos destaca la presencia de contaminación en algunos tratamientos, asociada principalmente a limitaciones en los procedimientos de asepsia durante el manejo de las plantas y los cambios realizados durante la aclimatación. Asimismo, la falta de un área completamente aislada para el manejo experimental y el ingreso de personas ajenas al proyecto pudieron incrementar el riesgo de contaminación microbiológica.

La implementación del sistema aeropónico a pequeña escala evidenció la necesidad de realizar ajustes técnicos para garantizar su correcto funcionamiento. El cambio del retorno de la solución nutritiva, de un tubo de 8 mm a uno de 2 pulgadas, permitió mejorar significativamente la circulación del líquido y evitar acumulaciones en las hieleras. Este ajuste muestra cómo la selección adecuada de materiales y dimensiones es determinante para la eficiencia del sistema.

De igual manera, la sustitución de las boquillas cónicas por boquillas nebulizadoras de cuatro salidas representó una mejora sustancial en la cobertura del riego, adaptándose mejor a las necesidades del cultivo. Sin embargo, esta modificación implicó también la reconfiguración de las conexiones, lo que generó un nuevo desafío relacionado con la presión requerida para mantener un riego uniforme. La solución implementada mediante botellas auxiliares permitió estabilizar la presión y asegurar la operación del sistema, aunque también puso de manifiesto la importancia de prever los efectos secundarios de cada ajuste.

En conjunto, las modificaciones realizadas reflejan un proceso de aprendizaje iterativo, en el que cada problema detectado condujo a una mejora en el diseño. Aunque estas pruebas se realizaron a pequeña escala, los resultados ofrecen información valiosa para el desarrollo de sistemas aeropónicos más robustos y confiables. La experiencia demuestra que la eficiencia del riego depende tanto de la elección de los componentes como de la capacidad de adaptación frente a las limitaciones técnicas que surgen durante la implementación.

Los dos ensayos realizados evidencian que, más allá del comportamiento fisiológico de las plantas de camote de cerro, el éxito del experimento depende en gran medida de la confiabilidad del sistema de riego y de las condiciones externas que aseguren su funcionamiento continuo. En el primer ensayo, la falla mecánica de la cisterna provocó la pérdida total de la solución nutritiva, mientras que en el segundo ensayo la interrupción del suministro eléctrico impidió el riego durante dos días consecutivos. En ambos casos, las plantas se deshidrataron y murieron, lo que demuestra que la vulnerabilidad del sistema no estuvo relacionada con la especie vegetal, sino con factores técnicos y operativos.

Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de implementar medidas de prevención y redundancia en los sistemas de riego automatizados. La falta de un plan alternativo frente a contingencias como fugas o cortes de energía limita la viabilidad de los experimentos y compromete la validez de los resultados. Asimismo, se resalta la importancia de la supervisión constante, ya que la ausencia de monitoreo durante lapsos prolongados (como fines de semana) incrementa el riesgo de fallas críticas.

En términos metodológicos, los ensayos aportan información valiosa para el diseño de futuros experimentos. Se recomienda incorporar sistemas de respaldo, como depósitos auxiliares, alarmas de nivel de solución, o fuentes de energía alternativas, que permitan mantener la continuidad del riego. De igual manera, establecer protocolos de revisión periódica contribuiría a reducir la probabilidad de pérdidas totales de las muestras.

10. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten concluir que la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares durante la etapa de aclimatación de vitroplantas de camote de cerro tuvo un efecto favorable en la adaptación inicial de las plantas, particularmente en el tratamiento con menor concentración de micorriza (T1). Este tratamiento presentó una menor pérdida de plantas y un mayor tiempo de permanencia de plantas sanas en comparación con el tratamiento control y con las concentraciones más altas evaluadas, lo que evidencia que la micorrización puede contribuir positivamente al establecimiento inicial de las vitroplantas bajo condiciones ex vitro.

Asimismo, los resultados sugieren que concentraciones elevadas de micorrizas no necesariamente generan mejores respuestas durante la aclimatación, ya que el tratamiento T3 presentó mayores niveles de contaminación y deterioro fisiológico. Esto indica que el éxito de la micorrización depende no solo de la presencia del hongo, sino también de la concentración aplicada y de las condiciones de manejo durante el proceso de aclimatación. En este sentido, se recomienda evaluar

concentraciones menores o similares al tratamiento T1, con el fin de optimizar la supervivencia y reducir riesgos de contaminación.

A pesar de las diferencias observadas entre tratamientos, todas las plantas presentaron finalmente síntomas de estrés fisiológico, como clorosis y marchitez, lo que demuestra que la aclimatación continúa siendo una etapa compleja y crítica en la micropropagación del camote de cerro. Estos resultados ponen de manifiesto que, además de la inoculación micorrízica, existen otros factores ambientales y de manejo que influyen significativamente en la supervivencia y desarrollo de las vitroplantas, entre ellos la humedad, ventilación, calidad sanitaria y condiciones del área de trabajo.

Otro aspecto importante identificado en esta investigación fue la relevancia del intercambio gaseoso durante las primeras etapas de aclimatación. La implementación de un sistema con filtro para permitir la entrada de oxígeno y el intercambio de gases favoreció la adaptación inicial de las plantas sin causar efectos negativos visibles. Este tipo de estrategias puede representar una alternativa viable para disminuir el estrés fisiológico derivado de la transición de condiciones in vitro a ex vitro.

Finalmente, se concluye que las condiciones de asepsia y el control sanitario representan factores determinantes en el éxito de la aclimatación. La presencia de contaminación incluso en el tratamiento control evidencia la necesidad de fortalecer los protocolos de desinfección, así como contar con áreas de manejo más aisladas y controladas para reducir el ingreso de contaminantes externos. Por lo tanto, futuras investigaciones deberán enfocarse tanto en la optimización de las concentraciones de micorrizas como en el mejoramiento de las condiciones ambientales y sanitarias, con el propósito de incrementar la eficiencia del proceso de aclimatación de plantas de camote de cerro propagadas in vitro.

Durante la implementación del sistema aeropónico a pequeña escala fue necesario realizar diversas modificaciones para optimizar su funcionamiento. En un inicio, el retorno de la solución nutritiva se efectuaba mediante un tubo de 8 mm de diámetro, lo que ocasionaba que las hieleras retuvieran gran parte de la solución. Para corregir

esta limitación se sustituyó por un tubo de 2 pulgadas, logrando un mejor retorno del líquido.

Asimismo, las boquillas cónicas utilizadas inicialmente no cumplían con los requerimientos del cultivo, por lo que se reemplazaron por boquillas nebulizadoras de cuatro salidas, con una cobertura más adecuada. Este cambio implicó también la sustitución de las conexiones originales de 8 mm y 6 mm, quedando finalmente en diámetros de 10 mm y 12 mm.

Sin embargo, la nueva configuración generó un problema adicional relacionado con la presión necesaria para mantener un riego eficiente. Para solucionarlo se implementó un ajuste mediante la colocación de botellas auxiliares, lo que permitió estabilizar la presión y garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Con estas modificaciones, el sistema aeropónico quedó listo para la realización del primer experimento, estableciendo una base técnica más sólida y confiable para futuras pruebas.

La implementación del sistema aeropónico a gran escala permitió identificar tanto fortalezas como limitaciones en su diseño inicial. El uso de una cisterna de 1000 L, estructura tubular PTR, aspersores, iluminación LED y bombas de presión constituyó una base sólida para el montaje del sistema; sin embargo, fue necesario realizar ajustes, como el pintado de la lámina transparente de color negro, con el fin de favorecer el desarrollo radicular.

Los ensayos realizados con plantas de camote de cerro evidenciaron que las principales dificultades no se relacionaron con el cultivo en sí, sino con la infraestructura y las condiciones técnicas del sistema de riego. Las fallas mecánicas y eléctricas resaltaron la importancia de contar con mecanismos de respaldo y protocolos de supervisión continua.

Aunque los resultados no fueron exitosos en términos de supervivencia de las plantas, la experiencia adquirida constituye un aprendizaje fundamental. Este conocimiento permitirá optimizar la metodología, mejorar la confiabilidad del sistema

y aumentar la probabilidad de éxito en futuras aplicaciones de sistemas aeropónicos a gran escala para el cultivo de camote de cerro.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Niemira, B.A., Safir, G.R., Hammerschmidt, R., Bird, G., 1995. Production of prenuclear minitubers of potato with peat-based arbuscular mycorrhizal fungal inoculum. *Agron. J.* 87, 942–946.

Vosátka, M., Gryndler, M., 2000. Response of micropropagated potatoes transplanted to peat media to post-vitro inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria. *Appl. Soil Ecol.* 15, 145–152.

Duffy, E.M., Cassells, A.C., 2000. The effect of inoculation of potato (*Solanum tuberosum* L.) microplants with arbuscular mycorrhizal fungi on tuber. *Appl. Soil Ecol.* 15, 137–144.

O'Herlihy, E.A., Duffy, E.M., Cassells, A.C., 2003. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi and chitosan sprays on yield and later blight resistance in potato crops from microplants. *Folia Geobot.* 38, 201–207.

Azcón-Aguilar, C., Cantos, M., Troncoso, A., Barea, J.M., 1997. Beneficial effects of arbuscular mycorrhizas on acclimatization of micropropagated cassava plantlets. *Sci. Hortic.* 72, 63–71.

IITA, 2007. Annual Report of the International Institute of Tropical Agriculture. Ibadan, Nigeria.

Wang, Z., Zhao, S., Tao, S., Hou, G., Zhao, F., Tan, S., & Meng, Q. (2023). *Dioscorea* spp.: Bioactive Compounds and Potential for the Treatment of Inflammatory and Metabolic Diseases. *Molecules*, 28(6), 2878. <https://doi.org/10.3390/molecules28062878>

Aighewi, B. A., Alcoroda, M. O., Asiedu, R., & Maroya, N. (2015). Improved propagation methods to raise the productivity of yam (*Dioscorea* spp.). *Food Security*, 7(4), 823–834. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0481-6>

Ayensu, E. S. (1972). *Dioscoreaceae*. En *Flora of West Tropical Africa* (2da ed., Vol.

- Baíza, A. M., Vázquez-Ramos, J. M., & Sánchez de Jiménez, E. (1989). DNA synthesis and cell division in embryonic maize tissues during germination. *Journal of Plant Physiology*, 135(4), 416–421. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80097-5](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80097-5)
- Belin, C., Megies, C., Hauserova, E., & Lopez-Molina, L. (2009). Absciscic acid represses growth of the Arabidopsis embryonic axis after germination by enhancing auxin signaling. *Plant Cell*, 21(8), 2253–2268. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.067702>
- Berthouly, M., & Etienne, H. (2005). Temporary immersion system: A new concept for use of liquid medium in mass propagation. En A. K. Hvoslef-Eide & W. Preil (Eds.), *Liquid Culture Systems for in vitro Plant Propagation* (pp. 165-195). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3200-5_13
- Burkill, I. H. (1960). The organography and the evolution of the Dioscoreaceae, the family of the yams. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 56(367), 319–412. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1960.tb02508.x>
- CONABIO. (2017). *Ficha técnica de Dioscorea sp.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx>
- Coste, R. (1968). *Le caféier*. G.P. Maisonneuve et Larose.
- Coursey, D. G. (1976). Yams: *Dioscorea* species. En N. W. Simmonds (Ed.), *Evolution of Crop Plants* (pp. 70–74). Longman.
- Eira, M. T. S., Amaral da Silva, E. A., de Castro, R. D., Dussert, S., Walters, C., Bewley, J. D., & Hilhorst, H. W. M. (2006). Coffee seed physiology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 149–163. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100011>
- Etienne, H., & Bertrand, B. (1999). Aportes de la biotecnología al mejoramiento genético del cafeto. En B. Bertrand & B. Rapidel (Eds.), *Desafíos de la caficultura en Centroamérica* (pp. 457-495). IICA.

Etienne-Barry, D., Bertrand, B., Vasquez, N., & Etienne, H. (1999). Direct sowing of *Coffea arabica* somatic embryos mass-produced in a bioreactor and regeneration of plants. *Plant Cell Reports*, 19(2), 111–117. <https://doi.org/10.1007/s002990050716>

García S., B. F. (2006). Factores que limitan la certificación de café orgánico en el esquema de comercio justo en cinco organizaciones de México. *Revista Mexicana del Caribe*, 11(19), 205-226.

García Ruiz, I., Cortez Madrigal, H., Montañez Soto, J. L., Machuca Núñez, J. A., & Guizar Miranda, A. (2008). *Estudios básicos para el aprovechamiento del camote del cerro (Dioscorea spp.) en la región Ciénega de Chapala, México*. Instituto Politécnico Nacional.

Haarer, A. E. (1958). *Modern Coffee Production*. Leonard Hill.

Hernández, B., Rodríguez Ventura, D., & Ubaldo, C. (2023). *Evaluación del efecto de microorganismos benéficos en la propagación de camote de cerro (Dioscorea remotiflora)*. Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Tecnológico Nacional de México. Repositorio Institucional TecNM.

Hinojosa, J. L., & Limón, M. A. (2024). *Protocolo de micropropagación de Dioscorea sp. para la conservación de recursos fitogenéticos nativos*. Instituto Tecnológico de Tlajomulco.

Kucera, B., Cohn, M. A., & Leubner-Metzger, G. (2005). Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. *Seed Science Research*, 15(4), 281–307. <https://doi.org/10.1079/SSR2005218>

Lebot, V. (2009). *Tropical root and tuber crops: Cassava, sweet potato, yams and aroids*. CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781845934242.0000>

Lorenzo, J. C., González, B. L., Escalona, M., Teisson, C., Espinosa, P., & Borroto, C. (1998). Sugarcane shoot formation in an improved temporary immersion system. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 54(3), 197-200. <https://doi.org/10.1023/A:100616870>

- Mantell, S. H., Haque, S. Q., & Whitehall, A. P. (1980). Clonal multiplication of yam (*Dioscorea alata* and *D. rotundata*) by tissue culture. *Journal of Horticultural Science*, 55(4), 459–466. <https://doi.org/10.1080/00221589.1980.11514952>
- Medrano, D., Pérez, C., & García, R. (2008). Conservación *in vitro* de especies de *Dioscorea* en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 125–133.
- Mizrahi, A. (2014). *Dioscorea composita* and diosgenin: Potential for new markets. *Industrial Crops and Products*, 61, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.035>
- Mordocco, A. M., Brumbley, J. A., & Lakshmanan, P. (2009). Development of a temporary immersion system (RITA®) for mass production of sugarcane (*Saccharum* spp. interspecific hybrids). *In vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 45*(4), 450–457. <https://doi.org/10.1007/s11627-009-9220-z>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Ng, S. Y. C. (2014). Application of bioreactor technology in yam micropropagation. *African Journal of Biotechnology*, 13(49), 4512–4520. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.14228>
- Nikolić, R., Mitić, N., Miletić, R., & Nešković, M. (2006). Effects of cytokinins on *in vitro* seed germination and early seedling morphogenesis in *Lotus corniculatus* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 25(3), 187–194. <https://doi.org/10.1007/s00344-005-0129-4>
- Quiroz-Figueroa, F. R., Rojas-Herrera, R., Galaz-Avalos, R. M., & Loyola-Vargas, V. M. (2006). Embryo production through somatic embryogenesis can be used to study cell differentiation in plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 86(3), 285–301. <https://doi.org/10.1007/s11240-006-9139-6>
- Reyes, J., Jiménez-García, L. F., González, M. A., & Vázquez-Ramos, J. M. (1991). Benzyladenine-stimulation of nuclear DNA synthesis and cell division in germinating

maize. *Seed Science Research*, 1(2), 113–117. <https://doi.org/10.1017/S096025850000074X>

SAGARPA. (2016). *Panorama Agroalimentario Café 2016*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.

SIA-SAGARPA. (2015). *Convención Internacional del Café en México*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Solano, W. (2001). *Efecto de las características de cultivo en suspensión sobre la producción de embriones somáticos de café (Coffea arabica L.)*. [Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica].

Subbiah, V., & Reddy, K. J. (2010). Interactions between ethylene, abscisic acid and cytokinin during germination and seedling establishment in Arabidopsis. *Journal of Biosciences*, 35(3), 451–458. <https://doi.org/10.1007/s12038-010-0050-2>

Toole, E. H., Hendricks, S. B., Borthwick, H. A., & Toole, V. K. (1956). Physiology of seed germination. *Annual Review of Plant Physiology*, 7(1), 299–324. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.07.060156.001503>

Vázquez-Ramos, J. M., & de la Paz Sánchez, M. (2003). The cell cycle and seed germination. *Seed Science Research*, 13(2), 113–130. <https://doi.org/10.1079/SSR2003130>

10. ANEXOS

10.1 Clave de símbolos y abreviaturas

Cuadro 8. Abreviaturas técnicas y científicas

Abreviatura	Término Completo	Descripción/Definición
HMA	Hongos Micorrízicos Arbusculares	Hongos formadores de simbiosis mutualista con raíces de plantas
MS	Medio de Cultivo Murashige y Skoog	Medio de cultivo estándar para propagación <i>in vitro</i>
<i>in vitro</i>	-	Cultivo en ambiente controlado fuera del organismo
<i>ex vitro</i>	-	Cultivo en condiciones naturales después de <i>in vitro</i>
ANOVA	Análisis de Varianza	Análisis estadístico para comparar medias entre grupos
EC/CE	Conductividad Eléctrica	Medida de concentración de sales en solución nutritiva
pH	Potencial de Hidrógeno	Medida de acidez o alcalinidad de una solución
PSI	Libras por Pulgada Cuadrada	Unidad de presión en sistema aeropónico
SIT	Sistema de Inmersión Temporal	Sistema de bioteror para propagación masiva
IAA	Ácido Indol-3-Acético	Fitohormona auxina natural
ZG	Germinación Zigótica	Germinación a partir de semilla sexual
FAA	Formaldehído-Alcohol-Ácido Acético	Fijador para tejidos vegetales
sp.	Especie (singular)	Abreviatura para una especie no especificada
spp.	Especies (plural)	Abreviatura para varias especies del mismo género

Cuadro 9. Unidades de medida

Símbolo	Término Completo	Aplicación
°C	Grados Celsius	Temperatura
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Micromol por metro cuadrado por segundo	Radiación fotosintéticamente activa
mg L^{-1}	Miligramos por litro	Concentración en solución nutritiva
g L^{-1}	Gramos por litro	Concentración de solutos
mL	Mililitro	Volumen
L	Litro	Volumen
mS/cm	Milisiemens por centímetro	Conductividad eléctrica
ppm	Partes por millón	Concentración
cm, mm	Centímetro, Milímetro	Longitud
H	Hora	Tiempo (fotoperiodo)

Cuadro 10. Símbolos químicos y formulas

Símbolo/Fórmula	Nombre	Uso en la Investigación
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Nitrato de Calcio Tetrahidratado	Fuente de Calcio y Nitrógeno
KNO_3	Nitrato de Potasio	Fuente de Potasio y Nitrógeno
KH_2PO_4	Fosfato Monopotásico	Fuente de Fósforo y Potasio
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Magnesio Heptahidratado	Fuente de Magnesio y Azufre
H_3PO_4	Ácido Fosfórico	Fuente de Fósforo y regulador de pH
HNO_3	Ácido Nítrico	Fuente de Nitrógeno y regulador de pH
NH_4^+	Ion Amonio	Forma de Nitrógeno disponible
NO_3^-	Ion Nitrato	Forma principal de Nitrógeno
PO_4^{3-}	Ion Fosfato	Forma de Fósforo disponible
K^+	Ion Potasio	Catión esencial
Ca^{2+}	Ion Calcio	Catión esencial
Mg^{2+}	Ion Magnesio	Catión esencial

Cuadro 11. Términos especializados

Término	Definición
Aeroponía	Sistema de cultivo donde raíces crecen en ambiente aireado con nebulización de nutrientes
Micorriza	Asociación simbiótica entre hongos y raíces de plantas
Vitroplanta	Planta obtenida mediante cultivo de tejidos <i>in vitro</i>
Aclimatación	Proceso de adaptación de plantas de condiciones <i>in vitro</i> a <i>ex vitro</i>
Peatmos	Sustrato orgánico derivado de turba
Agrolita	Sustrato inorgánico de roca volcánica expandida
Apresorio	Estructura de fijación de hongos patógenos en tejido vegetal
Biorreactor	Recipiente para cultivo de tejidos en medio líquido
Elicitor	Compuesto que induce respuestas de defensa en plantas
Diosgenina	Saponina esteroideal de interés farmacéutico en <i>Dioscorea</i>

Cuadro 12. Símbolos estadísticos

Símbolo	Significado
P	Valor de probabilidad en pruebas estadísticas
±	Más menos (indicador de desviación)
SD	Desviación Estándar
p/v	Peso por volumen
%	Porcentaje
R	Coefficiente de correlación
N	Número total de observaciones

Cuadro 13. Tratamientos experimentales

Símbolo	Tratamiento
T0	Testigo/Control (sin micorrizas)
T1	Micorrizas baja concentración (0.1 g/L)
T2	Micorrizas alta concentración (0.5 g/L)
R1, R2, ...	Repeticiones experimentales

Preparación de la solución Nutritiva												
			Aniones					Cationes				
			NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
100.0%			50% - 70%	3% - 20%	24% - 40%			5%-15%	30% - 40%	35% - 55%	15% - 30%	
Steiner 1980			55.0%	6.2%	28.3%		10.5%	5.0%	26.9%	34.6%	15.3%	18.2%
Sol. Nutritiva tomate			12.10	1.36	6.23	0.00	2.31	1.10	5.92	7.60	3.37	4.00
Aportes que ofrece el Agua			0.60	0.00	0.00	2.50	2.30		0.70	1.50	0.80	4.00
Fertilizante	Formula	me L ⁻¹	11.50	1.36	6.23	1.36	0.01	1.10	5.22	6.10	2.57	0.00
Nitrato Calcio	Ca(NO ₃) ₂ H ₂ O	6.10	6.10							6.10		
Acido Fosforico	H ₃ PO ₄	1.36		1.36		1.36						
Acido Nitrico	HNO ₃		0.00			0.00						
Acido Sulfurico	H ₂ SO ₄				0.00	0.00						
Nitrato De Potasio	KNO ₃	1.56	1.56						1.56			
Sulfato De potasio	K ₂ SO ₄	3.66			3.66				3.66			
Sulfato De Magnesio	MgSO ₄ 7H ₂ O	2.57			2.57						2.57	
Sulfato De Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄				0.00		0.00					
Fosfato Monopotasico	KH ₂ PO ₄			0.00				0.00				
Fosfato Monoamonico	NH ₄ H ₂ PO ₄			0.00			0.00					
Nitrato de Magnesio	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O		0.00								0.00	
Cloruro De Calcio	cadl						0.00			0.00		
Cloruro De Potasio	KCl						0.00		0.00			
Cloruro de Sodio	Sal				0.00	0.00						0.00
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	2.50	2.00					2.50				
Aportes me L ⁻¹			10.3	1.36	6.23	1.14	2.30	2.50	5.92	7.60	3.37	4.00
Aportes mmol L ⁻¹			10.26	1.36	3.12	1.14	2.30	2.50	5.92	3.80	1.69	4.00
Aportes ppm			636	131	299	91	82	155	231	152	41	92
Aportes ppm (elemento)			144	42	100	91	32	35	231	152	41	92
			1.84	0.00	0.00		0.01	-1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
Orden a seguir			3	5	4				6	1	2	
IDEALES	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺		
MAX	12.2	1.2	5.9	1.5	7.5	1.5	6.8	8.6	4.1	5		
MIN	11.2	0.6	4.9	0.5	4	0	5.8	7.6	3.2	1		
Optimo	11.7	0.9	5.4	1	5.75	0.75	6.3	8.1	3.65	3		

		Relacion Steiner		Optimo	Calculada	Real
		Ca/K		1.29	1.28	1.28
		K/Mg		1.75	1.76	1.76
		Ca/Mg		2.25	2.26	2.26
		K/N		1.2-1.8	1.4	1.3
		K/Ca+Mg		0.5 - 1.0	0.54	0.54

Figura 9. Solución nutritiva