GRUPO BLR

BIOTECNOLOGÍA APLICADA A LA MICROPROPAGACIÓN DE BANANO

ISBN: 978-9907-802-22-1

Alexander Moreno Herrera
Sayda Noemí Herrera Reyes

2026

BIOTECNOLOGÍA APLICADA A LA MICROPROPAGACIÓN DE BANANO

Alexander Moreno Herrera

Sayda Noemí Herrera Reyes

AUTORES



UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Moreno, A., Herrera , S. (2026) Biotecnología aplicada a la micropropagación de banano. Grupo Editorial BLR.

© Alexander Moreno Herrera
Sayda Noemí Herrera Reyes

Biotecnología aplicada a la micropropagación de banano.

ISBN: 978-9907-802-22-1

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación de los autores

Alexander Moreno Herrera

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: amoreno@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8898-4195

Sayda Noemi Herrera Reyes

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: sherrera@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7226-5345

PRÓLOGO

La biotecnología aplicada a la micropropagación permite avances notables en el campo de la agricultura, especialmente en cultivos de alta importancia económica y alimentaria como el banano (*Musa spp*.). Este enfoque innovador no solo ofrece soluciones a los problemas tradicionales de reproducción y multiplicación, sino que también contribuye a la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y la conservación genética de las plantas. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), la biotecnología posee la capacidad de transformar los sistemas agrícolas, facilitando el desarrollo de cultivares con características agronómicas mejoradas y una mayor tolerancia frente a enfermedades y factores ambientales adversos.

El banano es un cultivo estratégico para muchos países tropicales. Según un estudio de la FAO (2020), se estima que más de 100 millones de toneladas de banano son producidas anualmente, y países como Ecuador, Filipinas y Costa Rica figuran como los principales exportadores. Sin embargo, los agricultores enfrentan grandes desafíos, como la propagación de enfermedades (por ejemplo, el Fusarium R4T) y la escasez de material de siembra de alta calidad genética. En este contexto, la micropropagación se ha consolidado como una herramienta esencial para la propagación de plantas libres de enfermedades y la multiplicación eficiente de los cultivos.

La micropropagación, una técnica basada en el cultivo de tejidos in vitro, permite obtener clones exactos de la planta madre en un ambiente

controlado. Este proceso, como señalan Niedz, et al. (2014), se ha utilizado con éxito en cultivos de alto valor, como el banano, para la producción masiva de plántulas con características genéticas uniformes, sin la transmisión de patógenos. Además, la capacidad de regenerar plantas a partir de una pequeña porción de tejido, como el meristemo o la yema axilar, ha sido fundamental para mantener la biodiversidad y garantizar la producción continua de esta fruta en condiciones más controladas.

Por otro lado, el desarrollo biotecnológico no solo se limita a la propagación, sino que también incluye la mejora de características agronómicas. El uso de la biotecnología en la micropropagación permite la conservación genética de variedades autóctonas y fomenta la resiliencia frente a las condiciones climáticas cambiantes. Según Smith et al. (2020), “las técnicas de biotecnología agrícola permiten a los agricultores aprovechar la variabilidad genética de las especies para adaptarse mejor a los desafíos ambientales y de mercado”.

Este libro aborda la aplicación de la biotecnología en la micropropagación del banano, desde los fundamentos de las técnicas de cultivo de tejidos hasta las aplicaciones prácticas en el campo.

Cada capítulo proporciona una visión clara y estructurada sobre los métodos empleados en la multiplicación de banano a través de la biotecnología, donde se destacan tanto sus beneficios como sus desafíos. Como concluyen Graham et al. (2018), “la integración de la biotecnología en los sistemas agrícolas modernos es indispensable para

enfrentar los retos de la globalización y el cambio climático, especialmente en cultivos estratégicos como el banano".

Objetivo General

El objetivo de este libro es proporcionar una comprensión profunda y detallada sobre las técnicas biotecnológicas aplicadas a la micropropagación de banano, para ello, abarca desde los principios fundamentales hasta las aplicaciones prácticas en el campo agrícola. Esta obra busca equipar al lector con los conocimientos necesarios para comprender y aplicar las herramientas biotecnológicas, los métodos utilizados en el cultivo in vitro y las posibilidades de mejora que ofrece la biotecnología para la industria bananera.

Estructura del Libro

El libro está dividido en **cuatro capítulos** principales, cada uno dedicado a un aspecto específico de la biotecnología y la micropropagación del banano:

1. **Fundamentos de la Biotecnología en la Agricultura**
   Introducción a la biotecnología y su aplicación en la agricultura, con énfasis en los cultivos tropicales.

2. **Técnicas de Micropropagación Aplicadas al Banano**
   Descripción detallada de las etapas y metodologías utilizadas en la micropropagación del banano, desde la selección de explantes hasta el enraizamiento.

3. **Cultivo de Células y Tejidos en Banano**
   Un análisis de las técnicas avanzadas de cultivo de células y tejidos, que permiten una mayor multiplicación y mejora genética del banano.

4. **Aclimatación del Banano Micropropagado y Endurecimiento**
   La etapa final del proceso, donde las plántulas micropropagadas se adaptan al ambiente ex vitro, lo que asegura su supervivencia y crecimiento en campo.

Características Pedagógicas

Este libro ha sido diseñado con un enfoque pedagógico claro para facilitar el aprendizaje tanto de estudiantes como a profesionales de las área agrícola, biotecnológica y científica. Entre sus características didácticas se incluyen:

- **Explicaciones claras y accesibles**: El texto emplea un lenguaje técnico pero comprensible, apoyado en definiciones y ejemplos precisos que facilitan la comprensión de conceptos complejos.

- **Recursos visuales y didácticos:** Cada capítulo incluye diagramas, tablas y esquemas diseñados para facilitar la comprensión visual de los procesos y técnicas descritas.

- **Casos prácticos y estudios de caso:** La obra presenta ejemplos reales de la aplicación de técnicas de micropropagación y biotecnología, los cuales ilustran su impacto directo en la producción bananera.

- **Síntesis y reflexión:** Para consolidar el aprendizaje, cada capítulo concluye con un resumen de sus puntos clave y preguntas de reflexión diseñadas para fomentar el análisis crítico.

- **Enfoque aplicado**: Este libro se orienta a la solución de problemas prácticos, con el objetivo de que los lectores puedan aplicar los conocimientos adquiridos en el desarrollo de proyectos reales de micropropagación.

Con estas características, esta obra aspira a ser una herramienta de consulta indispensable para estudiantes, investigadores y profesionales interesados en la biotecnología agrícola, y especialmente en la mejora del cultivo de banano, un recurso fundamental para la alimentación mundial.

ÍNDICE

PRÓLOGO ..... **i**

ÍNDICE ..... **vi**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **x**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

CAPÍTULO I **17**

1 FUNDAMENTOS DE LA BIOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA **17**

1.1 Definición y principios de la biotecnología 18

1.2 Aplicaciones de la biotecnología en el cultivo de banano 19

1.3 Biotecnología y sostenibilidad agrícola 20

1.4 Desafíos y perspectivas futuras de la biotecnología bananera 23

1.5 La micropropagación alternativa de innovación tecnológica aplicada a banano 49

1.6 Resumen 53

1.7 Preguntas de reflexión 55

1.8 Actividad práctica 57

CAPÍTULO II **62**

2 TÉCNICAS DE MICROPROPAGACIÓN APLICADAS AL BANANO 62

2.1 Introducción a la micropropagación 62

2.2 Etapas del proceso de micropropagación 63

2.3 Las fases y el manejo para clones de banano 66

2.4 Factores que afectan la eficiencia del proceso de micropropagación 76

2.5 Resumen 80

2.6 Preguntas de reflexión 81

2.7 Actividad práctica sugerida 81

CAPÍTULO III 84

3 SISTEMAS DE INMERSIÓN TEMPORAL ALTERNATIVOS EN BANANO 84

3.1 Fundamentos del Sistema de Inmersión Temporal (SIT).. 84

3.2 Tipos de Sistemas de Inmersión Temporal 87

3.3 Aplicaciones de SIT en la Micropropagación del Banano 97

3.4 Parámetros Críticos para el Cultivo en SIT 100

3.5 Ventajas de los Sistemas de Inmersión Temporal 102

3.6 Desafíos y Limitaciones 104

3.7 Alternativas de sistemas de cultivo in vitro de banano ... 109

3.8 La micropropagación de banana, desempeño del prototipo PSITL 122

3.8 Eficiencia de Sistema RITA® en enraizamiento y valoración en aclimatación de genotipos de banano Williams 127

3.9 Implicaciones para la producción comercial de banano.. 131

3.10 Resumen 134

3.11 Preguntas de reflexión 135

3.12 Actividad práctica sugerida 136

CAPÍTULO IV 140

4 APLICACIONES COMERCIALES Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA 140

4.1 Producción a gran escala de vitroplantas 140

4.2 Modelos de transferencia tecnológica en banano para pequeños productores 143

4.3 Propuesta de Modelos de Transferencia Tecnológica para Pequeños Productores en la Provincia de El Oro 145

4.4 Costos, beneficios y sostenibilidad 149

4.5 Resumen 152

4.6 Preguntas de reflexión 153

4.7 Actividad práctica sugerida 154

BIBLIOGRAFÍA 157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado vegetativo en el contenido de fenoles solubles de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación. 32

Tabla 2.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado floral en el contenido de fenoles solubles de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación. 33

Tabla 3. Tabla 3.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado vegetativo en la actividad de antioxidante total de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación. 37

Tabla 4.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado floral en la actividad de antioxidante total de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación. 38

Tabla 5.Parámetros Críticos para el Cultivo en SIT..... 100

Tabla 6,Enfoques y aportes clave para combatir contaminantes. 106

Tabla 7.Condiciones para número de explantes, volumen de medio de cultivo y capacidad de contenedores por cada sistema de cultivo del ensayo in vitro en genotipos de banano 111

Tabla 8.Efectos de los sistemas de cultivo en crecimiento de pseudotallos de genotipos de banano Williams en las fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación... 113

Tabla 9.Efectos de los sistemas de cultivo en crecimiento foliar de genotipos de banano Williams en fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación 115

Tabla 10.. Efectos de los sistemas de cultivo en el peso de genotipos de banano Williams en fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación 116

Tabla 11.Efecto de los sistemas de cultivo en el contenido de fenoles solubles en órganos de banano Williams durante la multiplicación y enraizamiento in vitro y su posterior aclimatación. 118

Tabla 12,Efecto del sistema de cultivo durante las fases de multiplicación y enraizamiento in vitro en la actividad antioxidante (AA) de banano Williams en dichas fases y durante la aclimatación. 119

Tabla 13.Eficiencia de los sistemas de cultivo en la obtención de brotes en fase de multiplicación de genotipos de banano Willimas 120

Tabla 14.Efecto de los sistemas de cultivo en la respuesta in vitro y ex vitro de genotipos de banano Williams. 121

Tabla 15.Número de explantes, volumen de medio de cultivo y capacidad de contenedor por cada sistema de cultivo del ensayo de genotipos de banano Williams. 123

Tabla 16.Sistemas RITA® en fase de enraizamiento de genotipos de banano Williams 128

Tabla 17.Los SIT de tipo RITA® y el enraizamiento de genotipos de banano Williams 129

Tabla 18.Respuesta ex vitro de genotipos de banano Williams generadas en medio semisólido o mediante sistemas de inmersión temporal RITA® con 3, 6 y 8 inmersiones diarias. 132

Tabla 19.Modelos propuestos de producción a gran escala de vitroplantas 142

Tabla 20.Modelo de producción propuesto con implementación de SIT..... 151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Síntomas avanzados de marchitez por Fusarium Raza 4 Tropical (TR4) en plantas de banano, evidenciando clorosis foliar marginal, necrosis y desplome de hojas..... 18

Figura 2.Etapas de maduración y su efecto en técnica de edición genética 20

Figura 3.Modelo de evaluación fortificante de vitroplantas de Clon Williams en cond iciones de aclimatación para cada experimento. 28

Figura 4.Vitroplantas de Clon Williams para su valoración...... 29

Figura 5.Plantas de Moringa oleifera en estados fisiológicos de crecimiento vegetativo y floral, utilizdas como biofortificantes 29

Figura 6.Extractos de hojas de M. oleifera en desarrollo como biofortificante en genotipos de banano enraizados en sistemas sistemas de inmersión temporal RITA®. 45

Figura 7.Prototipo de SIT (Prototipo de Sistema de Inmersión Temporal Local (PSIT) 52

Figura 8.Sistema de biorreactor de inmersión temporal de nuevo desarrollo...... 52

Figura 9.El MATIS® es un innovador bio-reactor a inmersión temporal utilizado para la micro propagación de plantas in vitro de banano 53

Figura 10.Etapas del cultivo in vitro..... 64

Figura 11.Establecimiento in vitro de genotipos de banano (Musa AAA) cv. Williams cultivados en condiciones de El Oro. 67

Figura 12. Esquema del funcionamiento del sistema BIT®.. A (movimiento medio líquido a frasco donde están las plantas), B (medio líquido en reposo en frasco donde están las plantas, C (movimiento medio líquido a frasco libre de plantas. Tomado de Escalona et al, (1999). 71

Figura 13.Configuraciones de Sistemas de Inmersión Temporal . 85

Figura 14.Frasco de tipo RITA® 88

Figura 15.Fases del sistema de inmersión temporal automatizado RITA® 88

Figura 16.Vista esquemática del sistema RITA® Nota: Esquemática del sistema RITA® en configuración industrial, mostrando múltiples unidades dispuestas para la micropropagación escalable de plantas; la disposición en serie facilita operaciones continuas y mayor volumen de cultivo (CIRAD, 2025). 89

Figura 17.Estudio de Plantas de crisantemo y Cnidium officinale expuestos a sistema de inmersión temporal (SIT) SESIT®...... 90

Figura 18.Modelo de sistemas automatizados que integrar controladores digitales, sensores ambientales y software especializado..... 91

Figura 19,Sistemas automatizados control luz, CO2 y nutrientes 95

Figura 20.Sistema de inmersión temporal artesanal tipo PSITL.. 96

Figura 21.Sistema de inmersión temporal artesanal vidrio..... 96

Figura 22.Configuración de SIT casero empleada en la propagación de plantas tropicales 97

Figura 23. SIT de vidrio, Comparación del desarrollo morfológico de plántulas 97

Figura 24.Fase de multiplicación, comparación del desarrollo morfológico de vitroplantas de plántulas 98

Figura 25. Diagrama de elementos propuestos para el proceso de cultivo in vitro del banano. 107

Figura 26.Sistemas convencionales y de Inmersión Temporal en el cultivo in vitro de genotipos de banano (Musa AAA) cv. Williams de la provincia de El Oro. 110

Figura 27.Resultados de 21 multiplicación en banano (Musa. AAA cv. Williams) en distintos sistemas de cultivo in vitro: SS (A, E), RITA®. (B, F), PSITL (C, D y G). 123

Figura 28.Efecto del sistema de cultivo (convencional, RITA® y prototipo local de inmersión temporal) en el crecimiento de genotipos de banano Williams durante la fase de multiplicación 124

Figura 29.Efecto del sistema de cultivo (convencional, RITA® y prototipo local de inmersión temporal) en el tipo de brotes obtenidos en fase de multiplicación de genotipos de banano Williams..... 125

Figura 30.Compuestos fenólicos solubles totales (CFST) y actividad antioxidante (AA) de banano (Musa cv. Williams), letras distintas significan diferencias significativas entre sistemas..... 126

Figura 31.Los SIT y respuesta de los ciclo de inmersiones en el enraizamiento y respuesta ex vitro de genotipos de banano Williams...... 134

Figura 32.Modelos de transferencia de tecnología en banano. ... 144

CAPÍTULO I

1 FUNDAMENTOS DE LA BIOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA

El banano (Musa spp.) constituye uno de los cultivos frutales más relevantes a nivel mundial y desempeña un papel clave tanto en el comercio internacional como en la seguridad alimentaria de las regiones tropicales. No obstante, diversas amenazas comprometen su producción, especialmente la marchitez por Fusarium causada por la Raza Tropical 4 (TR4), reconocida como una de las enfermedades más destructivas que afectan al banano comercial (Dita et al., 2024).

En este escenario, la biotecnología agrícola asume un rol fundamental al ofrecer estrategias sostenibles para enfrentar estos desafíos. La micropropagación in vitro demuestra su eficacia al producir de manera masiva plantas libres de enfermedades, lo que fortalece la uniformidad genética y la sanidad vegetal (Erol et al., 2023). De igual forma, los avances en selección asistida por marcadores moleculares aceleran el mejoramiento genético y permiten identificar con mayor precisión genotipos resistentes a TR4 (Silva et al., 2024).



Figura 1.Síntomas avanzados de marchitez por Fusarium Raza 4 Tropical (TR4) en plantas de banano, evidenciando clorosis foliar marginal, necrosis y desplome de hojas

Fuente: Silva et al., 2024.

Este capítulo tiene como objetivo presentar los fundamentos científicos y tecnológicos de la biotecnología aplicada al cultivo del banano. Para lograrlo, expone las herramientas actuales, analiza los desafíos de su implementación y examina las implicaciones sociales y éticas. De este modo, el lector adquiere una comprensión integral de cómo estas tecnologías transforman el manejo fitosanitario y genético del banano y permiten avanzar hacia un sistema agrícola más resiliente.

1.1 Definición y principios de la biotecnología

La biotecnología aplicada al cultivo del banano emplea técnicas moleculares, celulares y genéticas para mejorar la productividad, la sanidad y la sostenibilidad del cultivo. Estas herramientas permiten enfrentar los desafíos fitosanitarios y genéticos que limitan su

desarrollo. Dado que la mayoría de los cultivares comerciales de banano, como ‘Cavendish’, son estériles y genéticamente uniformes, la biotecnología introduce variabilidad, resistencia a enfermedades y tolerancia a condiciones ambientales adversas (Tripathi et al., 2022).

A diferencia de otros cultivos que se mejoran mediante cruzamientos sexuales convencionales, el banano requiere enfoques alternativos debido a su escasa fertilidad y su propagación vegetativa. Por este motivo, la biotecnología moderna desempeña un papel esencial en los programas de mejoramiento y en el manejo sostenible del cultivo. A continuación, destaco los principios clave de la biotecnología aplicados específicamente al banano:

- **Variabilidad genética y selección:** Introducción de diversidad en cultivares comerciales estériles mediante cultivo de tejidos y mutagénesis in vitro.
- **Saneamiento vegetal:** Eliminación de patógenos sistémicos (virus y bacterias) a través de la micropropagación de meristemos.
- **Resistencia fitosanitaria:** Desarrollo de genotipos tolerantes a enfermedades limitantes mediante ingeniería genética y edición genómica.

1.2 Aplicaciones de la biotecnología en el cultivo de banano

Un ejemplo destacado de estas aplicaciones proviene de los investigadores de Tropic Biosciences (2025), quienes desarrollaron un banano editado genéticamente para resistir el pardeamiento. Para

lograrlo, utilizaron técnicas de edición génica y desactivaron la enzima responsable de este proceso, con el propósito de reducir el desperdicio alimentario y las emisiones de CO_2 asociadas (Figura 2a).

En un desarrollo paralelo, el mismo equipo de investigación creó otro banano que no se oscurece rápidamente al editar el gen de la enzima polifenol oxidasa, lo que prolonga su frescura y disminuye el desperdicio de alimentos (Figura 2b).

A) B)

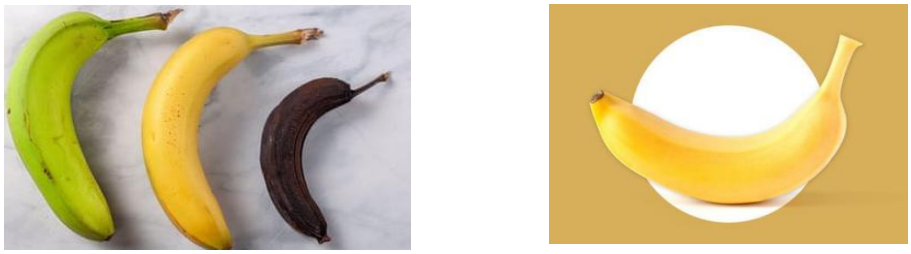


Figura 2.Etapas de maduración y su efecto en técnica de edición genética

Nota: a). Etapas de maduración sin técnica de edición genética. b) Banano con edición genética. Ilustración tomada de Tropic Biosciences (2025).

1.3 Biotecnología y sostenibilidad agrícola

En los últimos años, la biotecnología aplicada al cultivo de banano ha mostrado un gran potencial para promover prácticas agrícolas más sostenibles, ya que mejora tanto la productividad como la salud del ecosistema.

Un estudio de Tuz Guncay (2018) evaluó el uso de biocarbón y microorganismos eficientes en el manejo integrado del cultivo de banano (*Musa* × *paradisiaca* L.), clon Williams. Los resultados demostraron que estas prácticas mejoraron la calidad fitosanitaria del

cultivo y aumentaron su rendimiento. Esta mejora redujo la dependencia de fungicidas químicos y promovió la sostenibilidad ambiental al minimizar el impacto de estos productos en el entorno.

Por otro lado, Quintanilla Yánez (2022) analizó el efecto del hongo *Trichoderma* como biofertilizante en el cultivo de plátano (*Musa* × *paradisiaca*). Su investigación evidenció que la aplicación del microorganismo incrementó la absorción de nutrientes y redujo la necesidad de fertilizantes químicos. Esta práctica fortaleció la sostenibilidad del sistema productivo al mejorar la eficiencia en el uso de recursos y disminuir el empleo de insumos sintéticos, lo que favoreció un entorno agrícola más saludable.

En un enfoque distinto, Canto Canché (2017), desde el Centro de Investigación Científica de Yucatán, desarrolló metodologías para la detección temprana de la Sigatoka negra en cultivos de plátano. Esta técnica innovadora permitió disminuir el uso de fungicidas en campo, lo que redujo los costos de control y generó un impacto positivo al limitar la aplicación de productos químicos y proteger el medio ambiente.

Asimismo, Aguilar Martínez et al. (2023) evaluaron los efectos de bioestimulantes, como los aminoácidos, sobre el rendimiento agronómico del cultivo de banano en Ecuador. Sus resultados mostraron que estos bioestimulantes mejoraron el crecimiento de las plantas y redujeron la dependencia de insumos químicos, lo que contribuyó a una producción más sostenible y ambientalmente responsable.

El interés científico también ha valorado la utilidad de los extractos de *Moringa oleifera* en el cultivo de banano (*Musa spp*.), especialmente

por sus beneficios agronómicos y su contribución a prácticas agrícolas sostenibles. Investigaciones recientes han analizado estos extractos foliares como bioestimulantes y agentes fitosanitarios naturales capaces de mejorar el rendimiento, la salud y la sostenibilidad del cultivo. Su aplicación representa una alternativa agroecológica que disminuye la dependencia de agroquímicos sintéticos.

Estos extractos contienen fitohormonas naturales como zeatina (una citocinina), auxinas y giberelinas, que promueven la división celular, la elongación radicular y el desarrollo foliar en el banano (Sánchez et al., 2021). Algunos estudios demostraron que su aplicación aumenta la tasa de crecimiento, el área foliar y la producción de biomasa.

En cuanto al rendimiento y la calidad del fruto, el uso de extracto de moringa mejoró la uniformidad, el peso y el calibre de los frutos de banano, y aceleró el ciclo de desarrollo, lo que permitió cosechas más tempranas y productivas (Martínez & Espinoza, 2022).

Respecto a la tolerancia al estrés abiótico, los compuestos antioxidantes presentes en moringa como flavonoides, fenoles y vitamina C reducen el daño oxidativo asociado al estrés hídrico o salino. En banano, esta protección se traduce en una mayor tolerancia frente a condiciones climáticas adversas (García-Ruiz et al., 2023).

Además, los extractos acuosos de moringa han mostrado actividad antimicrobiana contra hongos fitopatógenos como *Fusarium oxysporum* y *Mycosphaerella fijiensis* (agente causal de la Sigatoka negra), lo que contribuye al manejo integrado de enfermedades y reduce la aplicación de fungicidas químicos (Jiménez & Ayala, 2020).

En conjunto, estos estudios evidencian que la biotecnología aplicada al cultivo de banano y plátano constituye una herramienta clave para avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles y para mejorar la salud de los cultivos y la del medio ambiente.

1.4 Desafíos y perspectivas futuras de la biotecnología bananera

1.4.1 Aplicaciones agrícolas

La biotecnología agrícola ha revolucionado el manejo y la mejora del cultivo de banano (*Musa spp.*) y ofrece herramientas para enfrentar enfermedades emergentes, incrementar la productividad y mejorar la sostenibilidad. Sin embargo, el avance de estas tecnologías enfrenta desafíos técnicos, sociales, económicos y regulatorios.

Uno de los principales desafíos consiste en controlar enfermedades devastadoras como la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza Tropical 4 (Foc TR4), que amenaza seriamente la producción mundial de banano, especialmente del cultivar Cavendish (Dita et al., 2024). A pesar de que las técnicas de transgénesis y edición génica mediante CRISPR/Cas9 han permitido desarrollar cultivares con resistencia potencial, aún persisten limitaciones en la disponibilidad de herramientas moleculares precisas para seleccionar y evaluar genotipos resistentes (Silva et al., 2024).

También surgen retos vinculados con la aceptación social y la regulación de cultivos genéticamente modificados. En muchos países productores y consumidores, la legislación sobre organismos genéticamente modificados restringe la liberación comercial de nuevas variedades, lo que dificulta su adopción (Tripathi et al., 2024). Esta

situación se agrava por la percepción pública, a menudo negativa, sobre la ingeniería genética, lo que exige mejorar la educación científica y fortalecer la comunicación sobre los beneficios y riesgos de estas tecnologías.

Desde el ámbito técnico, los países tropicales productores de banano requieren fortalecer sus capacidades de investigación y ampliar la infraestructura de laboratorios, bancos de germoplasma y programas de formación de talento humano, como ha señalado FAO (2019). Además, resulta necesario integrar tecnologías como la edición génica, la selección asistida por biomarcadores y el cultivo in vitro con prácticas agrícolas sostenibles ajustadas a las condiciones locales.

En cuanto a las perspectivas futuras, la biotecnología agrícola avanzará hacia una integración más estrecha con la agricultura digital. Esta convergencia permitirá identificar y seleccionar caracteres de interés mediante inteligencia artificial, sensores de campo y análisis genómicos de alto rendimiento. Estas herramientas facilitarán la obtención de nuevas variedades de banano con resistencia a enfermedades, tolerancia a estrés climático y mejores cualidades nutricionales y poscosecha (Smith et al., 2020; Tropic Biosciences, 2025).

Asimismo, se prevé un incremento en el uso de bioinsumos derivados de extractos vegetales y microorganismos benéficos, respaldados por desarrollos biotecnológicos, para reducir la dependencia de agroquímicos y mejorar la salud del suelo y de las plantas (García-Ruiz et al., 2023; Quintanilla Yánez, 2022).

1.4.2 Modelos alternativos

- **Utilización de Fortificantes en banano**

El cultivo de banano constituye uno de los sistemas agrícolas más importantes del mundo por su valor nutricional y su peso económico en los países tropicales. En este contexto, el uso de fortificantes derivados de extractos vegetales surge como una alternativa sostenible para mejorar la nutrición mineral, el rendimiento y la calidad del fruto. Estos extractos concentran compuestos bioactivos como aminoácidos, antioxidantes y fitohormonas que estimulan procesos fisiológicos beneficiosos para el cultivo (Rouphael & Colla, 2020). Su aplicación optimiza la absorción de nutrientes, fortalece el desarrollo radicular y contribuye a la biofortificación del fruto.

Los extractos vegetales utilizados como fortificantes contienen moléculas de alto valor biológico, entre ellas ácido salicílico, fenoles, flavonoides, carbohidratos complejos y reguladores de crecimiento como auxinas y citoquininas. Estos compuestos facilitan la movilización y asimilación de nutrientes esenciales, lo que incrementa la eficiencia en el uso de fertilizantes (Du Jardin, 2015). En el cultivo de banano, este efecto aumenta la disponibilidad de potasio, calcio, zinc y hierro, minerales fundamentales para la formación de tejidos estructurales, la calidad del racimo y la vida poscosecha.

Las fitohormonas y los ácidos orgánicos presentes en los extractos vegetales inducen respuestas fisiológicas que fortalecen el desarrollo de la planta. Las auxinas naturales estimulan la formación de raíces laterales y amplían el volumen efectivo de absorción. A su vez, los compuestos antioxidantes y los ácidos fenólicos activan rutas

metabólicas relacionadas con la síntesis de metabolitos secundarios, lo que incrementa la producción de antioxidantes, vitaminas y sólidos solubles en los frutos (Bulgari, 2019). De esta manera, los extractos mejoran tanto la nutrición como la calidad nutracéutica del banano.

Diversos estudios demuestran que la aplicación de extractos vegetales especialmente los provenientes de algas marinas y moringa incrementa el contenido mineral del banano y mejora parámetros físicos como la firmeza, la coloración y la resistencia al daño mecánico. Musabyimana et al. (2021) reportaron que la aplicación foliar de extractos naturales elevó los niveles de sólidos solubles, fortaleció la estructura celular y redujo las pérdidas poscosecha. Además, la presencia de bioestimulantes naturales favoreció el llenado del racimo y el aumento del peso de los frutos.

Los extractos vegetales representan una alternativa ecológica frente a los fertilizantes sintéticos, ya que reducen la contaminación del suelo y el riesgo de salinización. Su origen natural permite producirlos localmente, lo que disminuye costos y fortalece la agricultura sostenible. Su capacidad para mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes reduce la dependencia de la fertilización química sin afectar los rendimientos (Halpern, 2015). Esto resulta especialmente relevante para el banano, un cultivo con alta demanda nutricional.

1.4.3 Extractos de Moringa oleifera como fortificante en banano

El uso de extractos de *Moringa oleifera* ha ganado relevancia como alternativa biológica para mejorar el vigor y la tolerancia fisiológica en el cultivo de banano. Esta planta concentra compuestos bioactivos —

como zeatina, vitaminas, minerales y aminoácidos esenciales— que actúan como estimulantes del crecimiento vegetal y moduladores del metabolismo celular. Estudios en cultivos tropicales han demostrado que las aplicaciones foliares de extracto de moringa incrementan la fotosíntesis, la retención de clorofila y el crecimiento vegetativo, efectos especialmente beneficiosos en etapas tempranas del banano (Nouman et al., 2014). Asimismo, otros estudios han observado que los extractos acuosos de moringa mejoran la absorción de nutrientes y la eficiencia fisiológica bajo condiciones de estrés hídrico o térmico (Yameogo et al., 2011).

En el cultivo de banano, los extractos de moringa pueden actuar como fortificantes al estimular procesos antioxidantes y reforzar los mecanismos de defensa natural de la planta. La presencia de fitohormonas, en especial citocininas, se ha asociado con un aumento en la división celular y con un crecimiento más uniforme del pseudotallo, lo que contribuye al desarrollo de plantas más robustas y con mayor capacidad para sostener racimos de buena calidad (Foidl et al., 2001). Por su carácter biodegradable y su bajo costo, los extractos de moringa constituyen una herramienta sostenible para mejorar la productividad del banano, en particular en sistemas de agricultura ecológica o de bajos insumos.

En un estudio de caso, Moreno (2023) evaluó el efecto fortificante de extractos de *M. oleifera* en vitroplantas de banano durante la aclimatación, con el fin de identificar alternativas sustentables que reduzcan el uso de insumos externos sin comprometer la productividad. El estudio destacó el potencial de los biofortificantes derivados de extractos vegetales, especialmente los de *Moringa oleifera*, lo que permitió su ejecución en ambientes controlados, como se muestra en la Figura 3. En un invernadero y bajo un diseño completamente al azar, se aplicaron cinco concentraciones del extracto (0 %, 30 %, 60 %, 90 % y 100 %), tanto en estado vegetativo como en estado foliar, de manera foliar y en distintos intervalos de tiempo. Posteriormente, las vitroplantas fueron llevadas al laboratorio para su análisis, tal como se observa en la Figura 3.

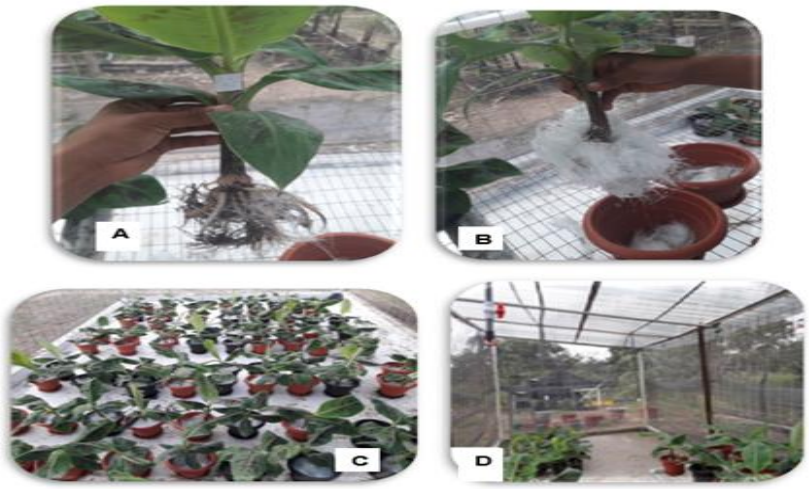


Figura 3.Modelo de evaluación fortificante de vitroplantas de Clon Williams en cond iciones de aclimatación para cada experimento.

Nota: A: Vitroplantas de banano libres de sustrato B: Sustrato de soporte artificial y solución nutritiva utilizados C: Vitroplantas de banano expuestas a extractos acuosos de M. oleifera de fase vegetativa y floral. D: Condiciones de invernadero. Tomado de Ugarte-Barco et al. (2018).

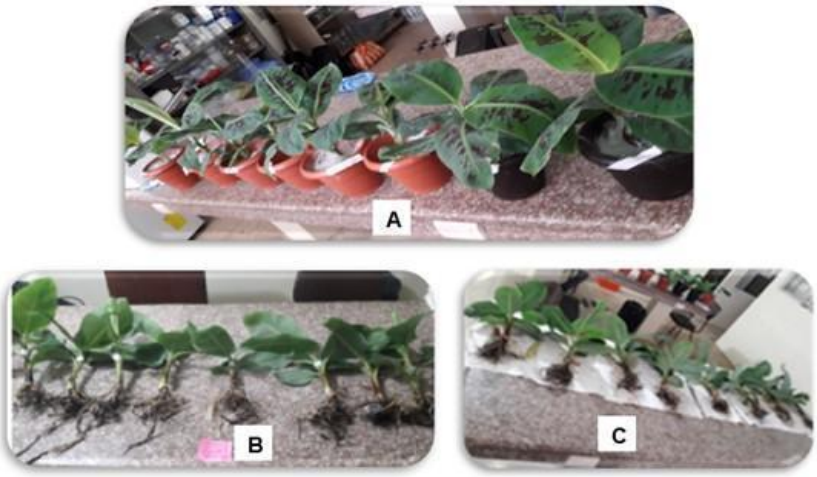


Figura 4.Vitroplantas de Clon Williams para su valoración.

Nota: A: Eliminación de soporte artificial. B: Secado en papel de filtro C: Vitroplantas de banano en macetas listas para análisis bioquímico. Tomado de Ugarte-Barco et al. (2018).

Los resultados obtenidos muestran que los extractos de *Moringa oleifera* influyen positivamente en diversos parámetros fisiológicos y bioquímicos de las vitroplantas de banano, tanto en órganos evaluados en estado vegetativo como en estado floral (Figura 5).



Figura 5.Plantas de Moringa oleifera en estados fisiológicos de crecimiento vegetativo y floral, utilizdas como biofortificantes

Nota: A. Plántulas de M. oleifera en estado vegetativo. B. Plantas de M. oleifera en estado floral. Tomado de Ugarte-Barco et al. (2018).

- ✓ **Contenido de fenoles solubles en banano**

El estudio evaluó el efecto de extractos acuosos de hojas de *Moringa oleifera* en estado vegetativo y floral sobre el contenido de fenoles solubles en hojas, pseudotallo y raíces de plantas de banano (*Musa AAA*, variedad Williams) durante 7, 14 y 21 días de aclimatación (Tablas 1 y 2).

1.4.4 Extracto en estado vegetativo

En hojas, a los 7 días las distintas concentraciones generaron diferencias significativas, excepto el 90 %, que registró valores similares al testigo. A los 14 días, las concentraciones del 30 % y 90 % aumentaron el contenido de fenoles en 43,49 % y 33,09 %, respectivamente. Sin embargo, a los 21 días el testigo mostró el mayor contenido, lo que indica que después de los 14 días el extracto deja de contribuir a la síntesis fenólica.

En pseudotallos, la concentración del 30 % produjo el mayor incremento a los 7 días (41,67 %). A los 14 días, el testigo alcanzó los valores más altos, mientras que a los 21 días la concentración del 60 % generó el mayor aumento (218,18 %).

En raíces, a los 7 días las concentraciones del 30 % y 100 % incrementaron el contenido de fenoles en 21,68 % y 9,09 %, respectivamente. A los 14 y 21 días, el extracto no mostró efectos sobre la producción de fenoles.

1.4.5 Extracto en estado floral

En hojas, la concentración del 60 % aumentó el contenido de fenoles a los 7 días en 36,03 % con respecto al testigo. A los 14 días, la concentración del 100 % generó el mayor incremento (17,27 %). A los 21 días, las concentraciones del 30 %, 60 %, 90 % y 100 % elevaron significativamente el contenido fenólico, con incrementos entre 116,37 % y 130,99 %.

En pseudotallos, a los 7 y 14 días las concentraciones del 60 % y 100 % no mostraron diferencias estadísticas respecto al testigo. Sin embargo, a los 21 días las concentraciones del 60 % y 90 % estimularon de manera marcada la producción de fenoles, con aumentos de 357,24 % y 412,87 %, respectivamente.

En raíces, a los 7 días la concentración del 100 % incrementó el contenido de fenoles en 25 %. A los 14 y 21 días no se registraron aumentos con respecto al testigo.

Síntesis general

Los extractos vegetativos ocasionaron los mayores contenidos de fenoles cuando se aplicaron:

- **Hojas:** 30 y 90% (14 días)
- **Pseudotallos:** 30% (7 días) y 60% (21 días)
- **Raíces:** 30% (7 días)

Los extractos florales fueron más efectivos en:

- **Hojas:** 60% (7 días), 100% (14 días), y 30–100% (21 días)
- **Pseudotallos:** 60 y 90% (21 días)
- **Raíces:** 100% (7 días)

En conjunto, los extractos de *M. oleifera* muestran un efecto variable dependiente del órgano evaluado, concentración aplicada y tiempo de exposición, destacándose que las respuestas más favorables se producen en los primeros 7–14 días de tratamiento.

Tabla 1.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado vegetativo en el contenido de fenoles solubles de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación.

Órganos	C. (%)	E. F. Vegetativo **Contenido Fenoles Solubles** (mg EAG/g peso seco)		
		7 DÍAS	**14 DÍAS**	**21 DÍAS**
H	0	3,12±0,06a	2,69±0,14b	9,76±0,24ª
	30	2,50±0,08b	3,86±0,16a	7,22±0,69b
	60	1,95±0,10c	2,92±0,12b	6,96±0,48bc
	90	2,85±0,07a	3,58±0,23a	5,37±0,06cd
	100	1,94±0,03c	1,71±0,03c	4,72±0,11d
	p-valor	0,000	0,000	0,000
P	0	1,44±0,19b	6,13±0,19a	1,54±0,07c
	30	2,04±0,05a	1,91±0,04c	1,38±0,05c
	60	1,40±0,03bc	1,62±0,21c	4,90±0,23ª
	90	1,00±0,02d	2,74±0,08b	3,07±0,08b
	100	1,02±0,04 cd	2,78±0,20b	1,09±0,03c

	p-valor	0,000	0,000	0,000
R	0	1,43±0,09b	2,95±0,07ab	3,27±0,07ab
	30	1,74±0,03a	3,34±0,21a	2,56±0,04 bc
	60	0,91±0,07c	1,90±0,08c	3,33±0,39[a]
	90	1,12±0,03c	2,67±0,06b	2,06±0,10cd
	100	1,56±0,06ab	2,47±0,02bc	1,71±0,04d
	p-valor	0,000	0,000	0,000

Nota: Los valores medios obtenidos, representan las muestras replicadas n=9, medias con letras diferentes indican diferencia significativa mediante prueba Tukey (p≤0,05). Estado fenológico (E.F.), hojas (H), pseudotallo (P), raíz (R), concentración (C), equivalentes de ácido gálico (EAG). Tomado de Moreno, (2023).

Tabla 2.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado floral en el contenido de fenoles solubles de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación.

Órganos	**C. (%)**	**E. F. Floral** **Contenido Fenoles Solubles** (mg EAG/g peso seco)		
		7 DÍAS	**14 DÍAS**	**21 DÍAS**
H	0	2,47±0,38b	4,40±0,21b	1,71±0,10b
	30	2,50±0,12b	3,40±0,12c	3,70±0,15a
	60	3,36±0,07a	4,09±0,10b	3,67±0,46a
	90	2,57±0,06b	4,53±0,15b	3,76±0,14a
	100	2,56±0,08b	5,16±0,11a	3,95±0,16a
	p-valor	0,024	0,000	0,005
P	0	1,60±0,04a	3,02±0,07a	1,52±0,09d
	30	1,03±0,04b	0,93±0,03b	3,14±0,12b
	60	1,61±0,05a	3,17±0,24a	6,95±0,12a

	90	0,92±0,07b	1,83±0,33b	7,06±0,12a
	100	0,81±0,02b	2,89±36a	2,31±0,28c
	p-valor	0,000	0,001	0,000
R	0	1,60±0,09bc	1,87±0,11ab	1,58±0,06a
	30	1,33±0,07d	1,39±0,08b	1,34±0,04bc
	60	1,43±0,07d	1,44±0,06b	1,61±0,08a
	90	1,79±0,10ab	1,59±0,11b	1,52±0,03ab
	100	2,00±0,07a	1,30±0,06b	1,23±0,06c
	p-valor	0,000	0,012	0,001

Nota: Los valores medios obtenidos, representan las muestras replicadas n=9, medias con letras diferentes indican diferencia significativa mediante prueba Tukey (p≤0,05). Estado fenológico (E.F.), hojas (H), pseudotallo (P), raíz (R), concentración (C), equivalentes de ácido gálico (EAG). Tomado de Moreno, (2023).

1.4.6 Actividad antioxidante total en órganos en banano

El estudio evaluó el efecto de extractos acuosos de hojas de *Moringa oleifera* en estado vegetativo y floral sobre la actividad antioxidante total en hojas, pseudotallo y raíces de plantas de banano (*Musa AAA*, variedad Williams), durante 7, 14 y 21 días de aclimatación (Tabla 3 y 4).

1.4.7 En extracto en estado vegetativo

Hojas

A los 7 días se observaron diferencias significativas entre tratamientos. A los 14 días no hubo diferencias estadísticas entre concentraciones. Para los 21 días, la concentración del 30% alcanzó el mayor valor

(133,92 µmol ET/g), con un incremento del 24,66% respecto al testigo, diferenciándose significativamente del resto.

Pseudotallo

A los 7 días, la concentración del 30% generó el mayor incremento (114,34 µmol ET/g), equivalente a un aumento del 320,55%.
A los 14 días, el testigo presentó el valor más alto, mientras que el 100% fue el único tratamiento que difirió de las concentraciones menores.
A los 21 días, la concentración de 60% produjo el mayor aumento (307,57 µmol ET/g), distinto estadísticamente y con un incremento del 223,49% respecto al testigo.

Raíces

A los 7 días, las concentraciones de 30, 90 y 100% incrementaron significativamente la actividad antioxidante (64,85%, 39,98% y 61,87%).
A los 14 días, el mayor valor se alcanzó con 90% (251,57 µmol ET/g, +13,73%).
A los 21 días, la concentración de 60% obtuvo el mayor valor (325,79 µmol ET/g), similar al testigo pero diferente a las demás concentraciones experimentales.

Extracto en estado floral

Hojas

A los 7 días, las concentraciones del 60 y 100% produjeron incrementos significativos (50,30% y 45,18%).

A los 14 días no se presentaron diferencias estadísticas, aunque los tratamientos con extracto mostraron valores superiores al testigo.
A los 21 días, la concentración del 100% alcanzó el mayor valor (80,01 µmol ET/g), con un incremento del 42,70%.

Pseudotallo

A los 7 y 14 días, las concentraciones de 60, 90 y 100% fueron superiores al testigo, con incrementos del 32,41–13,73% (7 días) y 28,69–35,10% (14 días).
A los 21 días, las concentraciones de 30, 60 y 90% incrementaron la actividad antioxidante en 30,23%, 32,32% y 22,45%, respectivamente.

Raíces

A los 7 días, la concentración del 100% produjo el mayor incremento (55,95%).
A los 14 días, las concentraciones de 60 y 100% mostraron incrementos de 15,08% y 14,61%.
A los 21 días, todos los tratamientos superaron significativamente al testigo; sin embargo, la concentración del 100% destacó con un incremento del 239,80%.

Síntesis general

Los extractos de *M. oleifera* mostraron efectos diferenciados según el estado fenológico, concentración y órgano analizado:

Extracto vegetativo

- **Hojas:** 30% (21 días)

- **Pseudotallos:** 30% (7 días) y 60% (21 días)
- **Raíces:** 30% (7 días), 90% (14 días) y 60% (21 días)

Extracto floral

- **Hojas:** 30 y 100% (7 días), 100% (21 días)
- **Pseudotallos:** ≥60% (7 y 14 días) y 30% (21 días)
- **Raíces:** 100% (7, 14 y 21 días)

En conjunto, los resultados sugieren que *M. oleifera* actúa como un bioestimulante capaz de incrementar compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en vitroplantas de banano, con mayor eficacia cuando los extractos provienen del estado floral y cuando se emplean concentraciones medias a altas. Estas respuestas permiten inferir que la moringa contribuye a fortalecer el estado metabólico y defensivo de las plantas durante su etapa de aclimatación, favoreciendo potencialmente su adaptación y crecimiento.

Tabla 3. Tabla 3.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado vegetativo en la actividad de antioxidante total de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación.

Órganos	**C. (%)**	**E. F. Vegetativo** **Actividad Antioxidante Total** (µmol ET/g peso seco)		
		7 DÍAS	**14 DÍAS**	**21 DÍAS**

H	0	79,30±11,55a	65,16±4,68a	107,43±8,52b
	30	49,61±3,65b	55,43±17,26a	133,92±2,08a
	60	61,18±4,80ab	39,88±3,35a	112,27±2,98b
	90	22,46±4,38c	66,71±3,54a	104,20±2,87b
	100	82,74±3,17a	55,48±7,03a	93,85±4,89b
	p-valor	0,000	0,065	0,001
P	0	35,67±2,96b	222,89±5,46a	95,08±9,11d
	30	114,34±2,65a	82,63±9,98c	140,26±5,97c
	60	13,09±2,42b	45,57±10,45d	307,57±13,54a
	90	33,24±9,00b	56,18±6,02cd	218,01±10,23b
	100	35,28±7,33b	155,96±2,60b	25,97±5,00e
	p-valor	0,001	0,000	0,000
R	0	82,30±2,96b	221,19±5,78bc	332,42±12,16a
	30	135,67±2,65a	217,10±13,5bc	298,30±10,62b
	60	39,27±2,42c	237,96±5,99ab	325,79±8,74a
	90	115,20±9,00a	251,57±2,83a	242,89±7,76c
	100	133,22±7,33a	201,67±4,07c	239,14±5,97c
	p-valor	0,000	0,003	0,000

***Los valores medios obtenidos, representan las muestras replicadas n=9, medias con letras diferentes indican diferencia significativa mediante prueba Tukey (p≤0.05). Estado fenológico (E.F.), hojas (H), pseudotallo (P), raíz (R), concentración (C), equivalentes de ácido gálico (EAG), equivalentes Trolox (ET). Tomado de Moreno, (2023*).**

Tabla 4.Efecto de extractos acuosos de hojas de M. oleifera en estado floral en la actividad de antioxidante total de plantas de banano (Musa AAA) variedad Williams, en condiciones de aclimatación.

Órganos	**E. F. Floral**

	C. (%)	**Actividad Antioxidante Total** (µmol ET/g peso seco)		
		7 DÍAS	**14 DÍAS**	**21 DÍAS**
H	0	57,42±3,36b	57,55±3,17a	56,07±1,72b
	30	52,22±8,12b	79,08±5,53a	66,90±2,85b
	60	86,30±5,33a	80,99±6,99a	62,65±2,11b
	90	68,61±2,12ab	74,84±12,00a	62,99±4,40b
	100	83,36±7,31a	66,08±5,20a	80,01±1,62a
	p-valor	0,000	0,066	0,002
P	0	70,77±3,08b	108,39±3,99b	78,27±2,52b
	30	61,69±12,28b	109,14±5,97b	101,93±2,09a
	60	93,71±4,28a	139,49±7,56a	103,57±3,93a
	90	79,85±1,88a	133,29±2,79a	95,84±3,17a
	100	80,49±5,11a	146,44±3,46a	76,38±1,73b
	p-valor	0,009	0,001	0,000
R	0	65,52±4,46b	94,31±2,69b	15,78±2,56c
	30	72,10±5,39b	100,90±1,25ab	41,30±2,66ab
	60	72,87±6,29b	108,53±3,87a	39,29±2,05b
	90	82,57±2,35b	89,32±3,99b	49,56±1,67ab
	100	102,18±4,09a	108,09±1,87a	53,62±5,73a
	p-valor	0,002	0,004	0,000

Los valores medios obtenidos, representan las muestras replicadas n=9, medias con letras diferentes indican diferencia significativa

mediante prueba Tukey (p≤0.05). Estado fenológico (E.F.), hojas (H), pseudotallo (P), raíz (R), concentración (C), equivalentes de ácido gálico (EAG), equivalentes Trolox (ET). Tomado de Moreno, (2023).

Este enfoque se alinea con estrategias de agricultura limpia y economía circular, contribuyendo a reducir la dependencia de fertilizantes químicos e impulsando sistemas productivos más sostenibles para el cultivo de banano en Ecuador y otras regiones productoras.

1.4.8 Extractos de algas como biofortificantes en banano

Los extractos de algas marinas, particularmente de especies pardas como *Ascophyllum* nodosum, se han utilizado ampliamente como bioestimulantes debido a su contenido de polisacáridos, hormonas naturales, polifenoles y micronutrientes esenciales. Estos compuestos favorecen la resistencia al estrés biótico y abiótico, estimulan el crecimiento radicular y mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes. Investigaciones demuestran que los extractos de algas incrementan la actividad enzimática antioxidante y la síntesis de compuestos osmoprotectores, lo cual fortalece a los cultivos frente a sequía, salinidad o altas temperaturas (Shukla et al., 2019).

En el caso del banano, los extractos de algas se emplean para mejorar el desarrollo radicular y la capacidad de absorción de nutrientes en suelos desgastados o con alta presión de enfermedades del sistema radical. Se ha reportado que su aplicación contribuye a una mayor emisión de raíces funcionales y a un incremento en la biomasa total de la planta, lo cual repercute positivamente en el tamaño del racimo y la calidad de los frutos (Khan et al., 2009). Además, los compuestos bioactivos presentes

en las algas favorecen respuestas de defensa inducida que ayudan a reducir el impacto de patógenos comunes del banano, como Fusarium spp., fortaleciendo la salud integral del cultivo.

1.4.9 Extractos de ortiga (Urtica dioica) como fortificante vegetal en banano

La ortiga es otra fuente importante de extractos vegetales utilizados como fortificantes por su alto contenido de minerales (hierro, calcio, magnesio), clorofila, fenoles y fitohormonas naturales. Los extractos de ortiga han sido tradicionalmente empleados en agricultura orgánica para mejorar la vitalidad de los cultivos, promover el crecimiento vegetativo y estimular mecanismos de defensa. Su perfil nutricional y bioquímico contribuye a una mayor actividad metabólica y a la fortificación de tejidos vegetales frente al ataque de insectos y hongos (Kulesza & Kocira, 2020).

Aunque existen menos estudios específicos en banano, la literatura demuestra que estos extractos mejoran el vigor vegetativo en cultivos frutales tropicales, incrementando la síntesis de clorofila y la eficiencia fotosintética. En banano, el uso de ortiga puede funcionar como un fortificante capaz de mejorar el equilibrio mineral y fortalecer el pseudotallo y las hojas, favoreciendo una mayor resistencia al vuelco y al daño mecánico. Adicionalmente, los metabolitos secundarios presentes en la ortiga han mostrado efectos repelentes y antifúngicos, lo cual representa una ventaja para la sanidad del cultivo sin recurrir a agroquímicos de alta residualidad (Bera et al., 2017).

- **Utilización de microorganismos**

La utilización de biofertilizantes en el cultivo de banano se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la productividad y sostenibilidad del sistema agrícola. Los biofertilizantes, definidos como productos que contienen microorganismos benéficos capaces de colonizar la rizosfera y potenciar la disponibilidad de nutrientes, han demostrado favorecer el crecimiento del banano, mejorar la estructura del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos. Esta práctica responde a la necesidad de desarrollar sistemas de producción más resilientes, considerando la alta demanda nutricional del banano y las limitaciones asociadas al uso intensivo de insumos químicos (Vessey, 2003).

Entre los microorganismos más utilizados destacan bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR), como *Azospirillum*, *Azotobacter* y *Bacillus*, así como hongos micorrízicos arbusculares del género *Glomus*. En banano, *Azospirillum* spp. ha mostrado capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y promover la elongación radicular, lo cual incrementa la absorción de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Ensayos de campo han demostrado que la coinoculación de bacterias fijadoras de nitrógeno con micorrizas mejora significativamente el vigor y la productividad, logrando aumentos en el peso del racimo y en el diámetro del pseudotallo (Rodríguez & García, 2018).

Asimismo, los hongos micorrízicos arbusculares representan uno de los biofertilizantes más eficaces en el cultivo de banano debido a su capacidad para mejorar la absorción de fósforo en suelos tropicales, donde este nutriente suele encontrarse fijado y poco disponible. La

simbiosis micorrízica incrementa la longitud y ramificación de las raíces absorbentes, mejora la tolerancia al estrés hídrico y contribuye a una mayor longevidad del sistema radical, factor determinante en la productividad del banano. Estudios demuestran que las plantas inoculadas con Glomus intraradices muestran mayor crecimiento vegetativo y tiempos más cortos para la emisión del racimo (Habte & Kumar, 2008).

Otro avance destacado en biofertilización de banano es la utilización de microorganismos solubilizadores de fósforo, como *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas fluorescens*. Estos microorganismos liberan ácidos orgánicos y enzimas que transforman el fósforo insoluble del suelo en formas disponibles para la planta, reduciendo significativamente los requerimientos de fertilización fosfórica. La aplicación de estas bacterias en banano ha demostrado incrementar el contenido foliar de fósforo, el número de hojas funcionales y el tamaño final del racimo (Mendes et al., 2014).

Finalmente, los biofertilizantes no solo aportan nutrientes sino que también fortalecen la salud del cultivo. Varias cepas de *Bacillus* y *Trichoderma* spp. ejercen efectos antagónicos sobre patógenos importantes del banano como *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, mejorando la tolerancia sistémica inducida y reduciendo la incidencia de enfermedades radiculares. Su uso complementa las prácticas de manejo integrado y contribuye a la conservación de la microbiota benéfica del suelo, un factor indispensable para la sostenibilidad del cultivo (Harman et al., 2010).

- **Biofotificantes en el cultivo in vitro de banano**

El cultivo in vitro de banano constituye una herramienta esencial para la propagación masiva de plantas libres de patógenos y con características genéticas uniformes. Sin embargo, las condiciones artificiales del laboratorio pueden generar estrés fisiológico, reducir el vigor de las plántulas y afectar su capacidad de adaptación en la etapa de aclimatación. En este contexto, el uso de biofortificantes como sustancias de origen biológico que mejoran la capacidad metabólica y el desarrollo vegetal, ha demostrado ser una estrategia eficaz para optimizar la micropropagación del banano y aumentar el rendimiento en las fases posteriores del cultivo (George et al., 2008).

Entre los biofortificantes más utilizados en sistemas in vitro destacan los extractos vegetales, los hidrolizados proteicos y los compuestos bioactivos derivados de microorganismos. Estas sustancias aportan fitohormonas naturales como auxinas, citocininas y giberelinas, así como antioxidantes y nutrientes esenciales que favorecen la división celular, el alargamiento de brotes y la formación de raíces. Estudios han demostrado que la inclusión de extractos vegetales ricos en citocininas puede aumentar significativamente el número de brotes regenerados en cultivos in vitro de banano, reduciendo el tiempo requerido para obtener material vegetativo de calidad (Arias et al., 2016).

En vitroplantas de banano utilizando sistemas de inmersión temporal, ha demostrado ser una estrategia eficaz para obtener plantas uniformes, con buen desarrollo radical y alta capacidad de adaptación. Dentro de estas plataformas, los sistemas RITA® han permitido optimizar la fase

de enraizamiento, especialmente cuando se incorporan compuestos bioactivos que favorecen la fortificación fisiológica de las vitroplantas. En este contexto, la utilización de extractos de *Moringa oleifera* ha tomado relevancia como alternativa natural para mejorar parámetros morfológicos y metabólicos durante el cultivo in vitro (Moreno, 2023).

Segun Moreno, (2023) la evaluación realizada durante tres semanas de cultivo en sistemas RITA® permitió comparar diferentes formulaciones de medios, entre ellos el medio basal MS, MS con etanol (MSE), MS con extracto etanólico de M. oleifera (MSEE) y MS suplementado con extracto acuoso de la misma especie (MSEA) como s emuestra en la figura 6. Aunque algunas variables, como la longitud del pseudotallo, el número de raíces y la longitud de hojas, no mostraron variaciones estadísticas significativas, otros parámetros resultaron altamente dependientes del tipo de medio empleado. En particular, el ancho del pseudotallo, el ancho de hoja y la longitud de la raíz mayor evidenciaron diferencias claras que permitieron establecer el efecto fortificante de cada tratamiento.

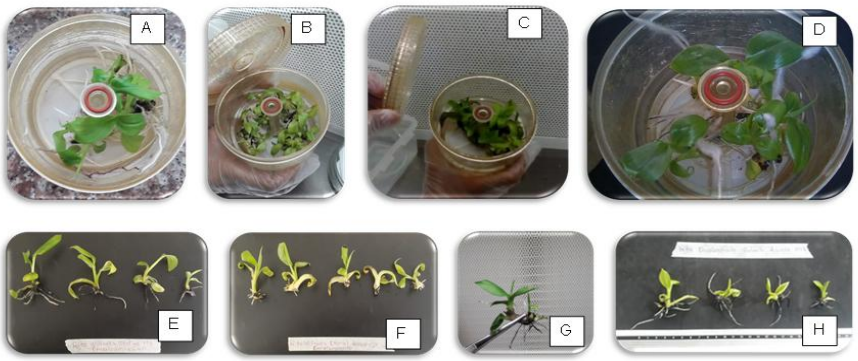


Figura 6.Extractos de hojas de M. oleifera en desarrollo como biofortificante en genotipos de banano enraizados en sistemas sistemas de inmersión temporal RITA®.

Nota: Sistemas en enraizamiento (3 semanas), frecuencias de exposición de vitroplantas a medios de cultivo en 8 ciclos y 4 minutos de inmersión. A) RITA® y medios MS, B) RITA® y medios MS más etanol 80% (MSE), C) RITA® y medio MS más extracto etanólico de M. oleifera (MSEE), D) RITA® y medio MS más extracto acuoso de M. oleifera (MSEA), E) Vitroplantas obtenidas en MS, F) Vitroplantas obtenidas en MSE, G) Vitroplantas obtenidas en MSEE, H) Vitroplantas obtenidas en MSEA. Tomado de Moreno, (2023).

Los resultados fueron especialmente favorables en los sistemas enriquecidos con extracto acuoso de *M. oleifera* (MSEA). Estos medios promovieron vitroplantas con pseudotallos más robustos, hojas de mayor vigor y raíces significativamente más largas en comparación con los demás tratamientos. Este comportamiento refleja la capacidad del extracto acuoso para estimular el crecimiento y fortalecer los órganos esenciales para el establecimiento ex vitro. Por el contrario, los medios que incluían etanol, tanto en su forma pura como en el extracto etanólico, mostraron un desempeño inferior. En estos tratamientos, las raíces fueron más cortas y menos desarrolladas, lo cual sugiere que la presencia de etanol limita tanto la actividad de los extractos vegetales como la calidad fisiológica del material propagado.

Las diferencias morfológicas fueron corroboradas por las observaciones visuales del área foliar. Mientras las vitroplantas cultivadas en MS evidenciaron hojas de color verde tenue y las mantenidas en MSE presentaron tonalidades amarillentas y endurecimiento del limbo foliar, las expuestas al extracto etanólico (MSEE) manifestaron oscurecimiento inicial de las primeras hojas. En contraste, el tratamiento MSEA destacó por generar hojas de color verde brillante y uniforme, lo cual se asocia directamente con un mayor vigor fisiológico y una interacción más

eficiente con los medios nutritivos y gaseosos del sistema de inmersión temporal.

Los resultados bioquímicos fortalecen esta interpretación. Tanto el contenido de fenoles solubles como la actividad antioxidante alcanzaron sus valores más altos en vitroplantas cultivadas con extracto acuoso de *M. oleifera*. Las diferencias estadísticas presentadas entre MSEA y los demás tratamientos evidencian un metabolismo secundario más activo y un mayor potencial antioxidante, factores que contribuyen a mejorar la respuesta de las plantas frente al estrés derivado de las condiciones in vitro. Nuevamente, los medios con etanol se asociaron con valores reducidos en estas variables, reforzando su efecto limitante sobre la calidad vegetal.

En conjunto, los resultados demuestran que el extracto acuoso de *M. oleifera* posee un notable efecto fortificante en la micropropagación de banano en sistemas RITA®. Su acción se refleja tanto en el desarrollo de estructuras clave—pseudotallo, hojas y raíces—como en el incremento de compuestos antioxidantes relacionados con la resiliencia fisiológica. Este desempeño lo posiciona como una alternativa viable para optimizar el enraizamiento y preparar plantas más vigorosas para la fase de aclimatación.

Asimismo, el uso de microorganismos beneficiosos y sus metabolitos ha cobrado importancia como biofortificantes en la fase in vitro. Sustancias derivadas de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, como *Bacillus* y *Pseudomonas*, pueden incorporarse de forma estéril al medio de cultivo para estimular el crecimiento y mejorar la tolerancia al estrés.

Investigaciones han evidenciado que los filtrados libres de células de *Bacillus subtilis* incrementan la elongación de brotes y fortalecen la estructura radicular del banano antes de la etapa de aclimatación, lo que se relaciona con la acción de compuestos como lipopeptinas y auxinas naturales (Singh et al., 2019).

Otro grupo relevante de biofortificantes lo constituyen los hidrolizados proteicos, que actúan como fuentes fácilmente disponibles de péptidos, aminoácidos y compuestos orgánicos que estimulan la actividad metabólica en condiciones de cultivo controlado. En banano, la adición de hidrolizados vegetales al medio de cultivo ha demostrado mejorar la tasa de multiplicación, aumentar la acumulación de biomasa fresca y promover una formación más uniforme de raíces, lo cual resulta esencial para el éxito de la adaptación ex vitro (Gómez & Alvarado, 2017).

El empleo de biofortificantes en el cultivo in vitro de banano también contribuye a reducir los efectos negativos del estrés oxidativo, común en las primeras fases de micropropagación por la alta concentración de sacarosa, luz artificial y condiciones asépticas. Componentes antioxidantes presentes en extractos vegetales o compuestos bioactivos microbianos ayudan a disminuir la acumulación de especies reactivas de oxígeno, lo que se traduce en un crecimiento más vigoroso y una mayor supervivencia durante la aclimatación (Hossain & Roslan, 2014). Este fortalecimiento fisiológico es especialmente importante para garantizar un establecimiento exitoso en vivero y reducir pérdidas en campo.

En síntesis, el futuro de la biotecnología en el cultivo de banano dependerá de la inversión en ciencia, el diálogo entre la ciencia y la

sociedad, y la formulación de políticas públicas que promuevan la innovación responsable, equitativa y sostenible.

1.5 La micropropagación alternativa de innovación tecnológica aplicada a banano

La micropropagación del banano (Musa spp.) es una herramienta biotecnológica ampliamente empleada para la obtención masiva de plantas sanas, genéticamente uniformes y libres de patógenos. Sin embargo, los métodos tradicionales basados en medios semisólidos presentan limitaciones importantes, como bajas tasas de multiplicación, altos costos de producción y problemas fisiológicos como la hiperhidricidad (Escalona et al., 1999).

Con el objetivo de superar estas limitaciones, se han desarrollado los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT), una tecnología que ha revolucionado los procesos de cultivo in vitro porque proporciona mejores condiciones de crecimiento y una mayor eficiencia productiva (Alvard et al., 1993).

Los SIT consisten en biorreactores que alternan periodos de inmersión de los explantes en un medio líquido con periodos de aireación. Esta intermitencia evita la inmersión continua que suele generar asfixia y vitrificación de los tejidos. Además, la mejor aireación favorece la disponibilidad de oxígeno y reduce el estrés oxidativo (Etienne & Berthouly, 2002). Estos sistemas pueden operar de forma automática mediante válvulas temporizadas o mecanismos neumáticos.

En comparación con los sistemas tradicionales, los SIT ofrecen múltiples ventajas:

Aumento de la tasa de multiplicación: Se ha reportado un incremento de hasta 4-6 veces en el número de brotes en sistemas como el RITA® (Escalona et al., 2003).

Reducción de la hiperhidricidad: La exposición periódica al medio líquido permite un mejor desarrollo morfológico (Roselló et al., 2010).

Reducción de costos: Se minimiza el uso de agar, recipientes y mano de obra (Jiménez, 2017).

Mejora en la calidad de las plántulas: Los brotes obtenidos presentan mayor vigor, elongación y uniformidad, lo cual facilita su aclimatación (Albarrán et al., 2005).

Entre los biorreactores más utilizados para la propagación de banano se destacan:

RITA® (Recipient for Automated Temporary Immersion): Uno de los sistemas más conocidos por su diseño simple y su eficiencia (Alvard et al., 1993).

SESIT®: Sistema automatizado con alta capacidad, utilizado principalmente en biofábricas comerciales.

SIT de bajo costo: Diseños artesanales adaptados en laboratorios de investigación, particularmente útiles en contextos de bajos recursos (Etienne & Berthouly, 2002; Ugarte-Barco et al., 2021).

Evidencia, retos y perspectivas en banano:

Estudios realizados en variedades comerciales de banano, como ‘FHIA-01’, ‘FHIA-18’ y ‘Gran Enano’, muestran que los SIT permiten multiplicar explantes con tasas superiores a 10 brotes por ciclo, en comparación con los 2-3 obtenidos en medios semisólidos (Jiménez, 2017). Además, se ha observado un desarrollo más equilibrado de raíces y tallos durante la fase de elongación y enraizamiento (Albarrán et al., 2005).

Aunque los SIT ofrecen grandes beneficios, también presentan desafíos, como la necesidad de adaptar los parámetros (tiempo de inmersión, frecuencia, volumen de medio) a cada genotipo, y el manejo técnico de los equipos (Etienne et al., 2018).

No obstante, el avance en la automatización, el monitoreo ambiental y la integración con técnicas moleculares auguran una adopción creciente de esta tecnología en programas de mejora y biofábricas.

El desarrollo de técnicas innovadoras, permite obtener clones de banano a gran escala utilizando medios y equipos adaptados a las condiciones locales. Se han propuesto diversos modelos de SIT, para el cultivo han sido pospuestos para el banano, como el que se muestra en la figura 7, 8 y 9.

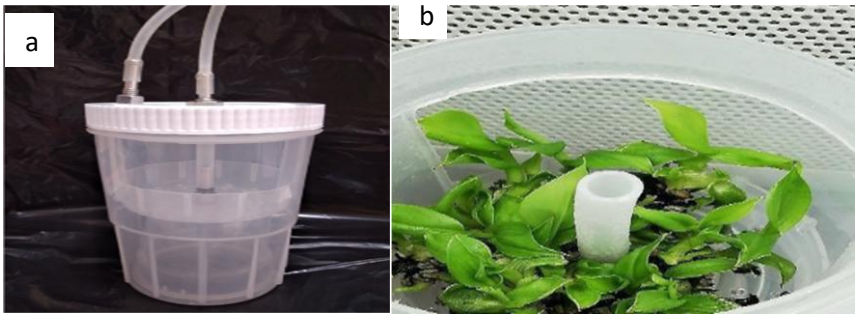


Figura 7.Prototipo de SIT (Prototipo de Sistema de Inmersión Temporal Local (PSIT)

Nota: a) Prototipo de SIT creado en el Laboratorio de Micropropgación Vegetal de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. b) Vitroplantas de banano. Tomado de Ugarte-Barco et al., (2021).

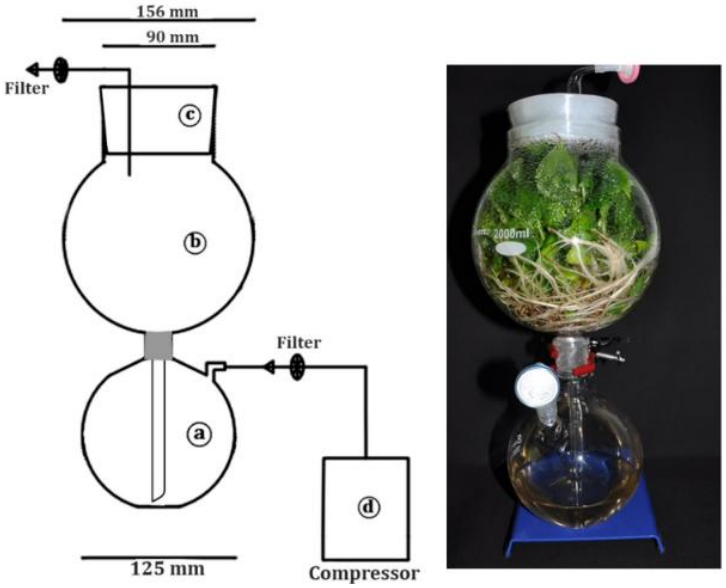


Figura 8.Sistema de biorreactor de inmersión temporal de nuevo desarrollo.

Nota: (a) Depósito de nutrientes, (b) cámara de crecimiento, (c) tapón de silicona, (d) compresor de aire. (Dibujo lineal realizado con AutoCAD 2015; imagen preparada con Microsoft Word). Tomado de Subbaraya et al., (2021).



Figura 9.El MATIS® es un innovador bio-reactor a inmersión temporal utilizado para la micro propagación de plantas in vitro de banano

Nota: (a) MATIS®, (b) vitroplanta de banano obtenida en MATIS®.), el bioreactor MATIS® es un sistema de inmersión temporal diseñado para la micropropagación vegetal Tomado de Bioreactor-Matis s.f., (2026).

1.6 Resumen

El Capítulo 1: Fundamentos de la Biotecnología en la Agricultura aborda la relevancia del banano (Musa spp.) como cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y el comercio internacional, particularmente en regiones tropicales.

A pesar de su importancia, enfrenta amenazas serias como la marchitez por Fusarium Raza Tropical 4 (TR4), una de las enfermedades más devastadoras del banano. Ante este panorama, la biotecnología agrícola surge como una herramienta clave para el desarrollo sostenible del cultivo.

Entre las principales técnicas destacan la micropropagación in vitro, que permite la producción masiva de plantas sanas y uniformes, y el uso de marcadores moleculares para acelerar el mejoramiento genético y la selección de genotipos resistentes.

La biotecnología aplicada al banano se basa en principios como la manipulación genética, la edición génica con CRISPR/Cas9, la selección asistida por marcadores, la introducción de microorganismos benéficos y el cultivo de tejidos. Estas estrategias permiten enfrentar las limitaciones del banano, especialmente por su escasa fertilidad y su propagación vegetativa.

Las aplicaciones biotecnológicas han generado avances significativos, como los bananos editados para evitar el pardeamiento que fueron desarrollados por Tropic Biosciences (2025), los cuales contribuyen a reducir el desperdicio alimentario.

Además, se destacan prácticas sostenibles como el uso de biocarbón, microorganismos eficientes, Trichoderma como biofertilizante, la detección temprana de la Sigatoka negra y el uso de bioestimulantes naturales como aminoácidos o extractos de moringa. Estos últimos, ricos en fitohormonas y antioxidantes, que mejoran el rendimiento del cultivo y su resistencia al estrés abiótico, lo que reduce el uso de agroquímicos.

A pesar de los logros, persisten desafíos técnicos, regulatorios y sociales. La aceptación pública de cultivos modificados genéticamente sigue siendo limitada, y muchas regiones carecen de la infraestructura y el personal capacitado necesario. No obstante, el futuro de la biotecnología bananera es prometedor, con perspectivas que incluyen la integración con la agricultura digital, el uso de inteligencia artificial y el desarrollo de nuevos bioinsumos.

Finalmente, se resalta la innovación en micropropagación a través de los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT), que superan las limitaciones de

los métodos tradicionales porque mejoran la multiplicación, calidad y sanidad de las plántulas.

Sistemas como RITA®, SESIT® o modelos de bajo costo han demostrado eficacia en la propagación de variedades comerciales, lo que abre nuevas oportunidades para biofábricas y programas de mejora genética adaptados a condiciones locales.

En resumen, este capítulo presenta una visión integral de cómo la biotecnología transforma el cultivo del banano hacia un modelo agrícola más resiliente, eficiente y sostenible.

1.7 Preguntas de reflexión

Aquí tienes algunas preguntas de reflexión basadas en el contenido del Capítulo 1:

Sobre la singularidad del banano:

- **Analice** las limitaciones biológicas (propagación vegetativa, esterilidad) del banano comercial. ¿De qué manera estas características hacen que la biotecnología no sea solo una opción, sino una herramienta indispensable para su mejora y sostenibilidad frente a otros cultivos de propagación sexual?
- **Compare y contraste** la micropropagación in vitro con la propagación tradicional mediante cormos o hijuelos. Evalúe las ventajas no solo en términos de tasa de multiplicación, sino también en fitosanidad, uniformidad genética y bioseguridad de una plantación comercial.

  A diferencia de la transgénesis, CRISPR/Cas9 permite realizar cambios genéticos sin introducir ADN foráneo. Argumente cómo

esta diferencia técnica podría ser clave para superar las barreras regulatorias y mejorar la aceptación pública, y de qué forma esto se vincula con una agricultura más sostenible.

- **Reflexione** sobre el impacto socioeconómico de introducir variedades de banano GM en países como Ecuador. ¿Qué dilemas éticos surgen en torno a las patentes, el acceso de los pequeños agricultores a esta tecnología y la conservación de la agrobiodiversidad local?
- **Evalúe** el rol de los bioinsumos en un programa de manejo integrado de plagas y enfermedades para el banano. ¿Considera que pueden reemplazar por completo a los agroquímicos sintéticos o su función es más bien complementaria? Justifique su respuesta con base en la evidencia presentada.
- **Discuta** los principales cuellos de botella (infraestructura, capital humano, políticas públicas) que limitan la adopción masiva de la biotecnología en las zonas productoras de banano. Proponga una estrategia integral para superar estas barreras.
- **Analice** la interrelación entre políticas públicas de fomento a la I+D, la percepción pública y la divulgación científica. ¿Cuál de estos tres factores considera usted que es el más determinante para el éxito de la biotecnología agrícola en un país?
- **Imagine** un escenario futuro de "agricultura 4.0" para el banano. Describa cómo la sinergia entre la genómica, la edición génica y las herramientas digitales (IA, drones, sensores) podría crear un sistema de producción más preciso, predictivo y resiliente.
- **Explique** por qué un biorreactor de inmersión temporal no es un sistema "universal". Relacione parámetros de diseño como la

frecuencia de inmersión y la aireación con problemas fisiológicos específicos del banano in vitro, como la hiperhidricidad y la asfixia.

1.8 Actividad práctica

Evaluación del Efecto Bioestimulante del Extracto de Moringa oleifera en la Micropropagación in vitro de Banano

Objetivo general:

Investigar los efectos del extracto foliar de *Moringa oleifera* como bioestimulante en la micropropagación in vitro del banano y evaluar su impacto en el crecimiento y la sanidad de los explantes frente a tratamientos convencionales.

Materiales necesarios:

Explantes de banano (meristemos apicales o yemas axilares).

Medio de cultivo Murashige y Skoog (MS) básico, sacarosa, agar, hipoclorito de sodio (1%), alcohol etílico (70%), agua destilada estéril.

Hojas frescas de moringa para preparar un extracto acuoso.

Autoclave, campana de flujo laminar, balanza analítica, potenciómetro.

Frascos o tubos de cultivo, probetas, matraces, gradillas, etiquetas, instrumental de disección estéril (pinzas, bisturí, cuchillas), equipo de filtración (si se opta por esterilización en frío).

Hoja de datos para el registro de variables.

Procedimiento:

1. Preparación del Extracto de Moringa:

Pese y triture hojas frescas de moringa con agua destilada estéril en una relación 1:10 (p/v).

Filtre la mezcla para obtener un extracto acuoso.

Se recomienda la esterilización por filtración (filtros de 0.22 µm) para preservar compuestos termolábiles. Si no es posible, realice pruebas de viabilidad con esterilización en autoclave.

A partir del extracto estéril, prepare las diluciones necesarias para los tratamientos.

2. Preparación de los Medios de Cultivo:

Prepare el medio de cultivo Murashige & Skoog (MS estándar) según las indicaciones del fabricante.

Divida el medio en tres lotes para los siguientes tratamientos:

Tratamiento 1 (Control): Medio MS sin extracto (0%).

Tratamiento 2: Medio MS suplementado con extracto de moringa al 5% (v/v).

Tratamiento 3: Medio MS suplementado con extracto de moringa al 10% (v/v).

Ajuste el pH de todos los medios a 5.8 antes de la gelificación y esterilización.

Vierta los medios en los frascos de cultivo y esterilícelos en autoclave.

3. Desinfección e Inoculación de Explantes:

Desinfecte superficialmente los meristemos: inmersión en alcohol al 70% por un minuto, seguido de una inmersión en hipoclorito de sodio al 1% por 10 minutos. Realice tres enjuagues con agua destilada estéril.

Bajo condiciones asépticas en la campana de flujo laminar, inocule un explante por frasco. Asegure un mínimo de 3 repeticiones por cada tratamiento.

Condiciones de Incubación y Evaluación

Condiciones de cultivo:

Fotoperiodo: 16 horas de luz / 8 horas de oscuridad.

Temperatura: 25 ± 2 °C.

Evaluación (tras 4 semanas):

Registre las siguientes variables morfométricas: número de brotes por explante, longitud del brote principal (cm), número de raíces formadas.

Realice una evaluación cualitativa, como: coloración y vigor de los tejidos (ej. escala de 1 a 5), y ausencia de síntomas de oxidación o necrosis.

Análisis de Resultados y Discusión

Organice los datos en una tabla comparativa que muestre los promedios y la desviación estándar por cada tratamiento.

Grafique los resultados de las variables cuantitativas (ej. gráficos de barras para el número de brotes promedio).

Discuta los resultados: ¿Qué concentración fue más beneficiosa y por qué? ¿Hubo diferencias significativas entre los tratamientos?

Preguntas para la Reflexión

¿Qué concentración de extracto de moringa mostró el mayor efecto bioestimulante y cómo se evidenció?

¿Observó algún signo de fitotoxicidad (ej. necrosis, enanismo) en la concentración más alta? ¿A qué podría deberse?

Basado en sus resultados, ¿qué implicaciones prácticas tiene el uso de moringa para una agricultura sostenible y de bajos insumos?

Compare los posibles mecanismos de acción del extracto de moringa con los de las fitohormonas sintéticas (ej. BAP, AIA). ¿Podría este bioinsumo ser un reemplazo parcial o total? Argumente su respuesta.

Analice los beneficios socioeconómicos que podría tener la adopción de esta tecnología en comunidades agrícolas con recursos limitados.

Extensión de la Actividad

Repetir el ensayo con otro bioinsumo (ej. extracto de algas, compost líquido).

Aplicar el extracto de moringa a plántulas en fase de aclimatación.

Estudiar la respuesta al estrés por salinidad en presencia de moringa.

Aprendizajes Esperados

Aplicar el concepto de bioestimulantes naturales en sistemas in vitro.

Comprender el impacto de compuestos naturales sobre el desarrollo vegetal.

Desarrollar habilidades en el diseño de ensayos experimentales y análisis de datos.

Fomentar el pensamiento crítico en torno a la sostenibilidad agrícola.

CAPÍTULO II

2 TÉCNICAS DE MICROPROPAGACIÓN APLICADAS AL BANANO

2.1 Introducción a la micropropagación

La micropropagación es una técnica biotecnológica fundamental para la producción masiva de plantas de banano (Musa spp.), especialmente en programas de mejoramiento y sanidad vegetal. Dado que la mayoría de los cultivares comerciales, como el 'Cavendish', se propagan vegetativamente y son genéticamente uniformes, esta técnica permite la multiplicación rápida de plantas libres de enfermedades y con alta calidad genética (Erol et al., 2023).

Mediante el cultivo in vitro de meristemos o yemas, es posible generar clones idénticos que garantizan uniformidad en el campo, mejorando la productividad y reduciendo el riesgo de propagación de patógenos (Tripathi et al., 2022). Además, la micropropagación es especialmente útil en zonas afectadas por enfermedades devastadoras como el marchitamiento por Fusarium oxysporum Raza Tropical 4 (TR4), ya que permite establecer plantaciones sanas desde el inicio (Dita et al., 2024).

En años recientes, los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) han revolucionado este proceso, al mejorar la aireación, reducir la hiperhidricidad y aumentar la eficiencia de multiplicación en comparación con medios semisólidos tradicionales (Subbaraya et al., 2021).

El objetivo de este capítulo es valorar esta técnica que según sus fundamentos, beneficios y aplicaciones en condiciones in vitro en el cultivo de banano (Musa spp.), como una estrategia biotecnológica clave para la producción de plantas sanas, genéticamente uniformes y libres de enfermedades, que contribuyan a la sostenibilidad y resiliencia agrícola.

2.2 Etapas del proceso de micropropagación

El éxito de la micropropagación del banano (Musa spp.) depende de la correcta ejecución y control de cada una de sus etapas (figura 10), desde el manejo de plantas madres hasta la confirmación del material vegetal en campo. Cada fase cumple un papel esencial en garantizar la calidad, sanidad y uniformidad genética de las plantas producidas.

En los programas de micropropagación de banano (Musa spp.), la planta madre constituye el punto de partida esencial para la obtención de explantes de alta calidad. Se trata de un individuo seleccionado por su sanidad, vigor y estabilidad genética, cuyas características serán clonadas y replicadas a gran escala mediante técnicas de cultivo in vitro. La elección adecuada de la planta madre es fundamental, ya que cualquier defecto genético o contaminación presente en ella se propagará a toda la descendencia clonal (Jiménez, 2017).

Asimismo, la planta madre representa una herramienta estratégica en la conservación de germoplasma y en la reproducción de genotipos mejorados, ya sea a través de micropropagación convencional o tecnologías avanzadas como la edición génica y la selección asistida por marcadores (Erol et al., 2023). Su calidad y trazabilidad genética

determinan el éxito de los programas de multiplicación masiva, biofábricas y mejoramiento biotecnológico.

La etapa de establecimiento es crucial para iniciar el cultivo con tejidos libres de contaminantes, lo que previene la pérdida de material vegetal y asegura un inicio saludable del proceso (Jiménez, 2017). Una desinfección eficiente y el uso de explantes bien seleccionados son determinantes para la viabilidad del cultivo in vitro



Figura 10.Etapas del cultivo in vitro

Nota: Elaboraboración propia.

Durante la fase de multiplicación, el uso adecuado de fitohormonas y condiciones de cultivo permite obtener un alto número de brotes a partir de una sola unidad de inicio. Esta etapa es clave para la producción masiva de plantas en biofábricas y viveros comerciales (Erol et al., 2023).

La fase de enraizamiento y elongación es indispensable para generar plántulas vigorosas, con estructuras morfológicas adecuadas para

sobrevivir fuera del ambiente in vitro. Aquí se evalúa el desarrollo radicular y la preparación fisiológica de las plantas para su transición al campo (Subbaraya et al., 2021).

Finalmente, la fase de aclimatación es fundamental para adaptar las plantas al ambiente natural. Una buena aclimatación reduce el estrés hídrico, mejora la tasa de supervivencia y asegura el éxito del establecimiento en campo definitivo (Albarrán et al., 2005).

La etapa de confirmación en la micropropagación de banano constituye un paso crítico para validar que las plantas obtenidas in vitro mantienen la identidad genética, fisiológica y fitosanitaria del material original. Tras los procesos de multiplicación, enraizamiento y aclimatación, es necesario confirmar que las plántulas regeneradas son clones fieles a la planta madre y están libres de mutaciones somaclonales o contaminaciones no detectadas previamente (Erol et al., 2023).

Esta validación puede incluir evaluaciones morfológicas, pruebas de sanidad vegetal mediante técnicas de diagnóstico molecular, y análisis genéticos usando marcadores moleculares (Silva et al., 2024). En contextos de biofábricas o bancos de germoplasma, la etapa de confirmación garantiza la trazabilidad y calidad del material propagado, asegurando su uso confiable en programas de cultivo comercial, exportación o mejoramiento genético.

La rigurosidad en esta fase final es clave para mantener la eficiencia y credibilidad de los sistemas de micropropagación, especialmente en cultivos estratégicos como el banano, donde la uniformidad genética y la resistencia a enfermedades como TR4 son fundamentales para la sostenibilidad agrícola (Tripathi et al., 2022).

2.3 Las fases y el manejo para clones de banano

2.3.1 Manejo planta madre:

El éxito del cultivo in vitro de banano (*Musa spp*.) comienza con una etapa clave: el manejo riguroso de la planta madre. Esta fase garantiza que el material vegetal a ser propagado cumpla con criterios de sanidad, uniformidad genética y vigor fisiológico (figura 2 A). Una planta madre adecuadamente gestionada reduce significativamente los riesgos de contaminación, variabilidad somaclonal y fallos en el establecimiento in vitro (Vuylsteke, 1989; Escalona et al., 1999).

Las plantas madre se cultivan preferentemente en condiciones protegidas, como invernaderos con control de plagas y clima, donde reciben tratamientos preventivos contra patógenos, nutrición balanceada y podas sanitarias. Este entorno permite el desarrollo de tejidos meristemáticos limpios, que luego pueden ser utilizados como explantes (Vuylsteke & Swennen, 1993). El tamaño del explante es también importante: unidades demasiado grandes pueden retener microorganismos, mientras que unidades muy pequeñas presentan bajo vigor (Escalona et al., 1999).

Previo a su ingreso al laboratorio, los explantes derivados de la planta madre son sometidos a procesos de limpieza y desinfección externa con soluciones de hipoclorito de sodio, detergente neutro y alcohol, seguidos por enjuagues en agua estéril. Esta fase de saneamiento inicial es crítica para evitar contaminaciones en el medio de cultivo (Cote et al., 2000; Roselló et al., 2010).

Los meristemos apicales, yemas axilares o brotes laterales tomados de pseudotallos jóvenes de plantas madre sanas son los más utilizados en programas de propagación clonal, debido a su baja probabilidad de estar contaminados con patógenos sistémicos (Vuylsteke, 1989). Estos tejidos meristemáticos permiten una regeneración eficiente y reducen el riesgo de variación somaclonal.

Adicionalmente, se recomienda realizar diagnósticos moleculares o serológicos para descartar infecciones latentes por virus, como Banana Bunchy Top Virus (BBTV) o Banana Streak Virus (BSV), que comprometerían toda la descendencia clonal (Damasco et al., 1996; Pérez et al., 2018). Así, un adecuado manejo de la planta madre no solo mejora la eficiencia del cultivo in vitro, sino que también asegura la trazabilidad genética y la calidad sanitaria del material propagado.

2.3.2 Establecimiento in vitro

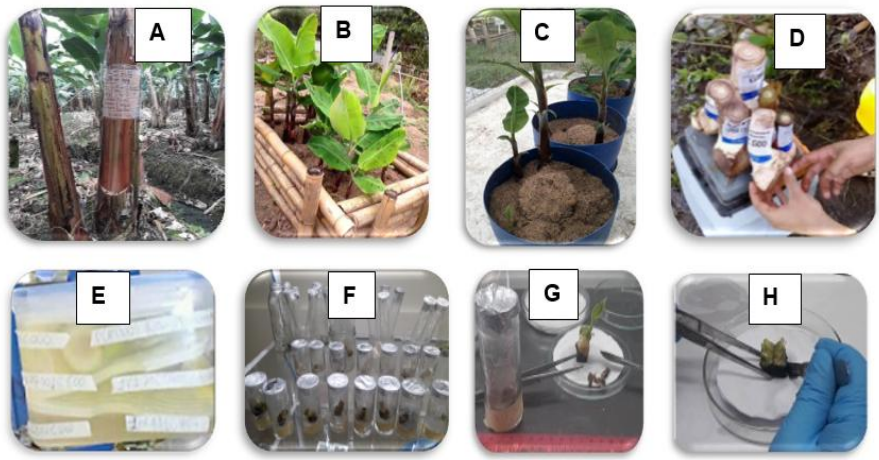


Figura 11.Establecimiento in vitro de genotipos de banano (Musa AAA) cv. Williams cultivados en condiciones de El Oro.

Nota: A) Plantas madre que crecen en sistemas productivos locales, B) Genotipos seleccionados establecidos en canteros experimentales de la UTMACH, C) Cultivo

de bananos sobre macetas en invernadero, D) Explantes para establecimiento in vitro, E) Paso de preesterilización en un agitador comercial, F) Explantes inoculados, G) Vitroplanta tres semanas después de la inoculación, H) Explante seccionado transversalmente para detectar contaminantes endógenos y eliminación dominancia apical. Tomada de Moreno, (2023).

1- Selección del material vegetal

- Seleccionar plantas madre sanas y libres de enfermedades, preferentemente cultivadas en invernaderos o áreas protegidas.
- Elegir brotes laterales o yemas axilares jóvenes como explantes (1–2 cm), con tejido meristemático visible.
- Limpieza inicial del explante (fase pre-laboratorio)
- Lavar los explantes bajo agua corriente durante 15–30 minutos para eliminar tierra y residuos.
- Sumergir en solución jabonosa (detergente neutro) durante 5 minutos con agitación suave.
- Enjuagar 3 veces con agua destilada estéril.

3. Desinfección en condiciones estériles (cabina de flujo laminar) por Pérez et al., (2018):

- Ingresar los explantes a una cabina de flujo laminar.
- Sumergir en alcohol al 70 % por 30 segundos.
- Luego, colocar en hipoclorito de sodio al 1–2 % (con 1–2 gotas de Tween-20 como surfactante) durante 10–15 minutos.
- Agitar ocasionalmente.
- Enjuagar cuidadosamente 3 a 5 veces con agua destilada estéril.

4. Corte y preparación del explante

- Retirar capas externas dañadas u oxidadas.
- Seccionar cuidadosamente el explante para conservar el meristemo apical central o la yema axilar.

5. Cultivo en medio de establecimiento

Utilizar medio de cultivo MS (Murashige & Skoog) con:

- 30 g/L de sacarosa
- 3–5 mg/L de BAP (benzilaminopurina)
    - mg/L de AIA o ANA
- 100 mg/L de ácido ascórbico (para reducir oxidación fenólica)
- 8 g/L de agar
- pH ajustado a 5.8
- Verter en frascos o tubos de cultivo previamente esterilizados.

6. Condiciones de incubación (Roselló et al., 2010)

- Temperatura: 25 ± 2 °C
- Fotoperiodo: 16 horas luz / 8 horas oscuridad
- Intensidad lumínica: 30–50 µmol/m²/s

7. Monitoreo y control

- Observar crecimiento de brotes, cambios de color y presencia de contaminantes durante las 2–3 primeras semanas.
- Remover frascos contaminados inmediatamente.
- Si se presenta oxidación, transferir explantes a medio fresco con antioxidantes.

8-Criterios de éxito:

Explantes sin contaminación fúngica o bacteriana.

- Brotes activos visibles al cabo de 2–4 semanas.
- Ausencia de necrosis o oxidación severa.

2.3.3 Multiplicación y proliferación de brotes

La fase de multiplicación y proliferación de brotes es una etapa clave en la micropropagación del banano (Musa spp.), ya que permite generar un número elevado de plantas a partir de un solo explante inicial. Esta etapa se basa en la inducción de brotación múltiple mediante el uso de reguladores del crecimiento aplicados en medios de cultivo específicos.

Uno de los compuestos más utilizados es la benzilaminopurina (BAP), una citocinina que estimula la división celular y la formación de brotes axilares y adventicios. Concentraciones entre 3 y 5 mg/L de BAP han demostrado ser eficaces en el cultivo de banano, especialmente en cultivares como ‘Cavendish’, ‘FHIA-01’ y ‘Williams’ (Jiménez, 2017; Erol et al., 2023).

Durante esta fase, los explantes se transfieren periódicamente a medios frescos (cada 3–4 semanas), manteniendo condiciones controladas de luz (16 h fotoperiodo) y temperatura (25 ± 2 °C). A lo largo de varios subcultivos, se logra la proliferación exponencial de brotes, lo que permite alcanzar tasas de multiplicación superiores a 5–10 brotes por ciclo, especialmente cuando se emplean Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) como el RITA® o SESIT® (Subbaraya et al., 2021; Roselló et al., 2010) o los Bioreactores de Inmersión Temporal (BIT®)

como se puede observar en la figura 12.

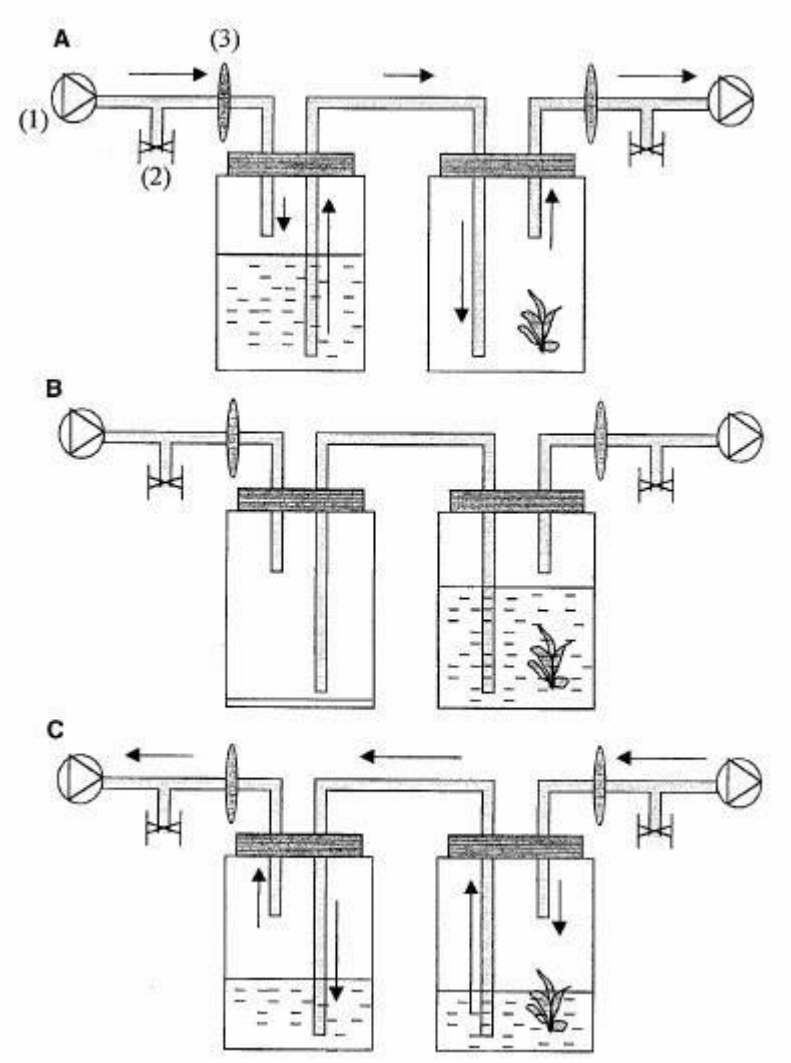


Figura 12. Esquema del funcionamiento del sistema BIT®.. A (movimiento medio líquido a frasco donde están las plantas), B (medio líquido en reposo en frasco donde están las plantas, C (movimiento medio líquido a frasco libre de plantas. Tomado de Escalona et al, (1999).

Nota:Para mantener la estabilidad genética, se recomienda no extender los ciclos de subcultivo por más de 6–8 generaciones sin realizar pruebas moleculares, ya que el exceso de proliferación puede inducir variaciones somaclonales

Fuente: (Damasco et al., 1996).

2.3.4 Enraizamiento

El objetivo de inducir el desarrollo de raíces funcionales y estructuralmente completas en brotes previamente multiplicados in vitro, con el fin de obtener plántulas vigorosas capaces de adaptarse al ambiente ex vitro (vivero). En esta fase las vitroplantas de banano deben responder:

Tipo de material vegetal:

- Brotes individuales de 2–4 cm de longitud
- Con base ligeramente ensanchada
- Preferiblemente sin signos de hiperhidricidad
- Obtenidos de 3–4 subcultivos previos de multiplicación

Medio de cultivo recomendado

Basal: MS (Murashige y Skoog)

Azúcar: 30 g/L de sacarosa

Agar: 6–8 g/L

pH: 5.7–5.8

Auxinas (una de las siguientes):

Ácido indolbutírico (AIB): 1.0–2.0 mg/L (más frecuente)

Ácido naftalénacético (ANA): 0.5–1.5 mg/L

Ácido indolacético (AIA): menos estable, pero funcional a 0.5 mg/L

Condiciones ambientales

Temperatura: 24–26 °C

Fotoperiodo: 16 h luz / 8 h oscuridad

Intensidad lumínica: 40–60 µmol/m²/s

Duración del enraizamiento: 2–4 semanas

Aclimatación

La aclimatación es la fase final y una de las más críticas en el proceso de micropropagación del banano (Musa spp.), ya que consiste en la adaptación gradual de las vitroplantas —producidas en condiciones in vitro— al ambiente ex vitro. Durante esta etapa, las plántulas deben superar un cambio brusco en factores como humedad, luminosidad, microbiota ambiental y disponibilidad de nutrientes del sustrato (Jiménez, 2017). Subbaraya et al. (2021) y Albarrán et al. (2005) destacan que esta fase mejora la resistencia fisiológica y activa mecanismos de defensa frente al ambiente externo.

Las plantas obtenidas in vitro, aunque bien desarrolladas morfológicamente, presentan características fisiológicas particulares: estomas no funcionales, cutícula delgada, tejidos blandos y dependencia total del ambiente controlado del laboratorio. Por ello, un manejo progresivo del estrés ambiental es esencial para evitar marchitez, infecciones o mortalidad durante la transición al vivero (Erol et al., 2023).

El proceso suele realizarse en dos fases:

Preaclimatación (bajo condiciones controladas):

- Las vitroplantas enraizadas se extraen cuidadosamente del medio de cultivo y se lavan con agua estéril para eliminar restos de agar y contaminantes.
- Se trasplantan en bandejas con sustratos estériles como turba, perlita, vermiculita o combinaciones 1:1.
- Se mantienen en cámaras de humedad o túneles plásticos (95–100 % de HR) durante 1–2 semanas.
- Se reducen gradualmente la humedad y se aumenta la ventilación para estimular el funcionamiento de estomas.
- Aclimatación en vivero (transición a condiciones naturales):
- Las plantas se trasladan a condiciones de luz natural parcial o malla sombra (30–50 %).
- Se aplica riego frecuente y bioinsumos preventivos (como Trichoderma o extracto de moringa).
- Se fertiliza con soluciones diluidas de macro y micronutrientes para estimular el desarrollo del sistema radicular.
- El tiempo promedio de aclimatación completa es de 4–6 semanas, dependiendo del genotipo y la calidad de la vitroplanta. Según Roselló et al. (2010), una buena aclimatación puede lograr tasas de supervivencia superiores al 90 % en cultivares comerciales si el enraizamiento fue exitoso.

Criterios de éxito en la aclimatación:

- Raíces activas y bien distribuidas
- Hojas firmes, sin marchitez ni necrosis
- Crecimiento de nuevas hojas
- Adaptación al sustrato y luz natural

- Baja incidencia de enfermedades

Conformación

La confirmación de vitroplantas es una etapa crítica posterior al proceso de micropropagación, cuya finalidad es verificar la identidad genética, la sanidad vegetal y la calidad morfológica de las plantas producidas in vitro. En el caso del banano, esta etapa es aún más importante debido a su modo de reproducción vegetativa y a la alta demanda de material clonal libre de enfermedades (Vuylsteke & Swennen, 1993; Cote et al., 2000).

2.3.5 Componentes principales de la confirmación

1. Verificación genética

La reproducción clonal a través de múltiples subcultivos puede inducir variaciones somaclonales, especialmente cuando se utilizan altos niveles de reguladores de crecimiento. Para evitar esto, se aplican técnicas moleculares como marcadores SSR, AFLP y RAPD, que permiten confirmar la identidad genética entre la vitroplanta y la planta madre (Ude et al., 2002; Nwauzoma & Jaja, 2013).

2. Evaluación sanitaria

Las vitroplantas deben estar libres de virus como el Banana Bunchy Top Virus (BBTV) o el Banana Streak Virus (BSV). Las técnicas más empleadas para el diagnóstico son la PCR, RT-PCR y ELISA, que permiten detectar infecciones latentes antes de llevar las plantas al campo (Carlier et al., 2009).

3**. Evaluación morfológica**

- La evaluación visual y fisiológica incluye aspectos como:
- Uniformidad de tamaño y número de hojas
- Ausencia de anormalidades (enanismo, deformaciones foliares)
- Vigor radicular y foliar
- Tasa de crecimiento en vivero
- Esta evaluación complementa el análisis genético y sanitario para asegurar que las plantas cumplen los estándares de calidad para distribución comercial o siembra masiva (Vuylsteke, 1989)

2.4 Factores que afectan la eficiencia del proceso de micropropagación

La eficiencia del proceso de micropropagación de banano depende de múltiples factores interrelacionados que pueden influir tanto en la tasa de multiplicación como en la calidad de las vitroplantas obtenidas. Comprender y optimizar estos factores es fundamental para lograr un sistema de propagación confiable, rentable y escalable, especialmente en biofábricas o programas de mejoramiento genético.

1. Genotipo del cultivar

La respuesta a las condiciones in vitro varía entre cultivares. Algunos, como 'Grand Naine' o 'FHIA-01', presentan alta capacidad de multiplicación, mientras que otros tienen respuestas más lentas o propensión a la formación de callos o vitrificación (Vuylsteke & Swennen, 1993; Tripathi et al., 2022).

2. Tipo y tamaño del explante

Explantes como meristemos apicales o yemas axilares jóvenes suelen tener mayor potencial regenerativo y menor riesgo de contaminación. El

tamaño también influye: explantes demasiado grandes dificultan la penetración del medio; muy pequeños pueden oxidarse o morir (Roselló et al., 2010).

3. Composición del medio de cultivo

La concentración de sales minerales, la fuente de carbono (sacarosa, glucosa) y el tipo y dosis de reguladores del crecimiento (como BAP, AIA, ANA, AIB) tienen un impacto directo en la tasa de proliferación, elongación y enraizamiento. Un exceso de citoquininas, por ejemplo, puede inducir vitrificación o variaciones somaclonales (Erol et al., 2023).

4. Condiciones de cultivo in vitro

- Factores físicos como:
- Temperatura (óptima entre 24–26 °C)
- Fotoperiodo (16 h luz/8 h oscuridad)
- Intensidad lumínica (30–60 µmol/m²/s)

afectan el crecimiento y desarrollo morfofisiológico de los brotes. Variaciones fuera del rango óptimo pueden ralentizar la multiplicación o inducir estrés oxidativo (Jiménez, 2017).

5. Número de subcultivos

Aunque el subcultivo sucesivo es necesario para la multiplicación masiva, un número elevado de ciclos (>6–8) puede incrementar el riesgo de variación genética no deseada (variación somaclonal). Por ello, se recomienda controlar el número de pases y realizar pruebas de estabilidad genética (Damasco et al., 1996).

6. Contaminación microbiana

La presencia de bacterias, hongos o virus puede provocar la pérdida del cultivo y comprometer la sanidad del sistema. La selección de plantas madre libres de patógenos y una desinfección efectiva de los explantes son esenciales (Pérez et al., 2018).

7. Sistema de propagación

El uso de biorreactores de inmersión temporal (SIT) ha demostrado mejorar significativamente la eficiencia del proceso, reduciendo la hiperhidricidad, aumentando la multiplicación y mejorando la calidad fisiológica de las plántulas (Subbaraya et al., 2021).

2.4.1 Ventajas y limitaciones de la micropropagación del banano

La micropropagación es una biotecnología vegetal clave para la producción comercial de banano, especialmente frente a los desafíos actuales como enfermedades emergentes y demanda de cultivos sostenibles. A pesar de su efectividad, este proceso también enfrenta retos técnicos, económicos y genéticos que deben ser considerados en su implementación.

Ventajas

- Alta eficiencia en la producción de plantas sanas y uniformes: Permite multiplicar miles de plantas libres de patógenos, con homogeneidad genética, a partir de una planta madre seleccionada. Esto es crucial para enfrentar amenazas como Fusarium oxysporum TR4 y BBTV (Tripathi et al., 2022).

- Herramienta clave en programas de mejoramiento y conservación: Favorece la propagación rápida de cultivares mejorados, resistentes o de interés agronómico, y la conservación de germoplasma en bancos de recursos genéticos (Ntui et al., 2021; Erol et al., 2023).
- Uso de sistemas automatizados y de bajo costo: La incorporación de biorreactores de inmersión temporal (SIT) ha mejorado la eficiencia del cultivo in vitro, reduciendo hiperhidricidad y aumentando la tasa de multiplicación (Subbaraya et al., 2021).
- Reducción de agroquímicos y mejora de la bioseguridad vegetal: Al iniciar los cultivos con plantas libres de enfermedades, se minimiza la necesidad de fungicidas en vivero y campo, favoreciendo prácticas más sostenibles (Dita et al., 2024).

Limitaciones

- Elevados costos iniciales de infraestructura y materiales: Los equipos, medios de cultivo, mano de obra calificada y control ambiental representan una inversión significativa, especialmente en países en desarrollo (Arinaitwe et al., 2021).
- Variación somaclonal en subcultivos prolongados: El uso excesivo de reguladores de crecimiento o subcultivos repetidos puede inducir alteraciones genéticas no deseadas en las plántulas regeneradas (Ntui et al., 2021).
- Contaminaciones microbianas y latentes: La contaminación por bacterias u hongos durante la fase de establecimiento puede comprometer lotes enteros de vitroplantas si no se implementan controles estrictos (Pérez et al., 2022).

- Fase crítica de aclimatación: La transición de condiciones in vitro a ex vitro requiere protocolos rigurosos y puede generar pérdimkdas si no se controlan factores como humedad, luz y patógenos del suelo (Erol et al., 2023; Tropic Biosciences, 2025).

2.5 Resumen

La micropropagación es una técnica biotecnológica fundamental para la producción masiva de plantas de banano sanas, uniformes y libres de enfermedades. Esta técnica permite multiplicar plantas vegetativamente, garantizando la uniformidad genética, lo cual es vital para cultivares comerciales como el 'Cavendish'. El proceso inicia con la selección y manejo adecuado de plantas madre saludables, que aseguran la calidad y sanidad del material vegetal a propagar. La fase de establecimiento in vitro implica la desinfección y cultivo de explantes en medios nutritivos controlados para evitar contaminaciones y asegurar la viabilidad de los tejidos. Posteriormente, en la etapa de multiplicación, se utilizan fitohormonas como la benzilaminopurina para estimular la producción de múltiples brotes a partir de un solo explante. La incorporación de sistemas automatizados de inmersión temporal ha mejorado la eficiencia de esta fase. En la fase de enraizamiento, se inducen raíces funcionales mediante el uso de auxinas, preparando a las plantas para la adaptación fuera del laboratorio. La aclimatación es crítica para adaptar las vitroplantas al ambiente natural, donde se reducen condiciones de humedad y se aumenta la ventilación para mejorar la supervivencia. Finalmente, la confirmación genética, sanitaria y morfológica garantiza que las plantas propagadas sean clones fieles y libres de virus, asegurando la calidad para su uso comercial. La eficiencia del proceso

depende del genotipo, tipo de explante, condiciones del medio, manejo de subcultivos y control de contaminaciones. Aunque la micropropagación ofrece ventajas como alta producción y bioseguridad, enfrenta limitaciones en costos, riesgo de variaciones genéticas y desafíos en la aclimatación.

2.6 Preguntas de reflexión

¿Por qué es fundamental seleccionar adecuadamente la planta madre en los programas de micropropagación del banano?

¿Cómo contribuye la micropropagación a la sanidad vegetal y a la prevención de enfermedades en cultivos comerciales de banano?

¿Qué ventajas ofrecen los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) frente a los métodos tradicionales de cultivo in vitro?

¿Cuáles son los principales factores que pueden afectar la eficiencia y calidad de las vitroplantas durante el proceso de micropropagación?

¿Por qué es crítica la fase de aclimatación y qué riesgos pueden presentarse si no se realiza adecuadamente?

¿Qué métodos se emplean para confirmar la identidad genética y sanidad de las plantas micropropagadas, y por qué son importantes?

¿Cuáles son las limitaciones económicas y técnicas que pueden afectar la implementación masiva de la micropropagación del banano?

¿Cómo puede la micropropagación apoyar la sostenibilidad y resiliencia agrícola en cultivos de banano frente a enfermedades emergentes?

2.7 Actividad práctica sugerida

Simulación del proceso de micropropagación en laboratorio

Objetivo:

Comprender y aplicar las etapas básicas del proceso de micropropagación in vitro utilizando materiales simulados o un modelo experimental sencillo.

Materiales:

- Explantes vegetales (pueden ser pequeñas yemas o brotes de una planta común, si no se dispone de banano)
- Placas o frascos con medio de cultivo simulado (puede usarse gelatina con nutrientes básicos para la práctica)
- Soluciones para limpieza (agua, detergente, alcohol)
- Instrumentos de corte esterilizados (bisturí, tijeras)
- Guantes y cabina o espacio limpio para simular ambiente estéril

Procedimiento:

- **Selección y preparación del explante:** Elegir una yema o brote joven, limpiarlo con agua y detergente, y desinfectar superficialmente con alcohol (simulado).
- **Corte y asepsia:** Bajo condiciones lo más limpias posibles, cortar el explante para conservar el meristemo y eliminar partes dañadas.
- Siembra en medio de cultivo: Colocar el explante en el medio nutritivo preparado (gelatina + nutrientes).
- **Observación:** Simular el crecimiento de brotes y discutir los factores que influirían en la multiplicación, enraizamiento y aclimatación.

- **Discusión:** Analizar las condiciones óptimas para el éxito del cultivo in vitro y posibles problemas (contaminación, variabilidad, estrés).

Resultados esperados:

Comprensión del manejo y cuidado necesario en cada etapa de la micropropagación, importancia de la asepsia y factores ambientales que afectan el crecimiento vegetal in vitro.

CAPÍTULO III

3 SISTEMAS DE INMERSIÓN TEMPORAL ALTERNATIVOS EN BANANO

3.1 Fundamentos del Sistema de Inmersión Temporal (SIT)

El SIT es una técnica avanzada de cultivo in vitro que revoluciona la eficiencia en la micropropagación vegetal, particularmente en cultivos de interés comercial como el banano (*Musa spp*.). A diferencia de los métodos tradicionales en medio semisólido, el SIT emplea medios líquidos en los que los explantes se sumergen de forma intermitente, lo que permite una mayor oxigenación, mejor absorción de nutrientes y una significativa reducción de la hiperhidricidad.

Este sistema surge como respuesta a las limitaciones del cultivo in vitro convencional, como el bajo índice de multiplicación, la acumulación de metabolitos tóxicos en el medio y los problemas fisiológicos asociados al contacto permanente con medios líquidos o sólidos. En el SIT los explantes se alojan en un recipiente cerrado conectado a un sistema que controla los ciclos de inmersión por lo general mediante presión de aire o vacío lo cual facilita un entorno más dinámico y controlado.

Diversos dispositivos de SIT han sido desarrollados y adaptados a nivel comercial y académico (Figura 1), entre los cuales destacan el RITA® (Recipient for Automated Temporary Inmersión), el SESIT® (System for Temporary Immersion in liquid media) y los sistemas caseros basados en frascos de vidrio o PVC. Estos sistemas permiten escalar la producción in vitro de plántulas de banano con mayor uniformidad, reduciendo la mano de obra y los costos operativos asociados.

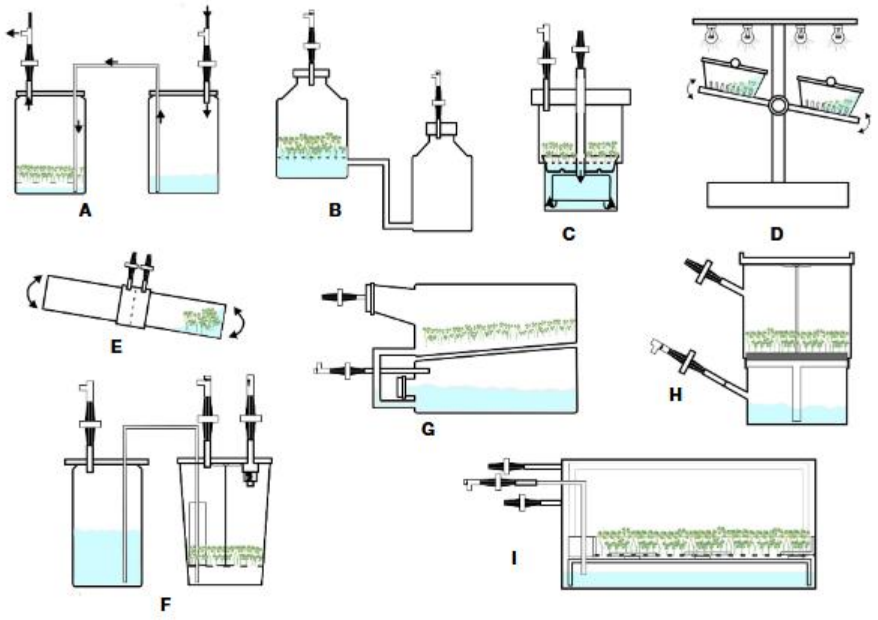


Figura 13.Configuraciones de Sistemas de Inmersión Temporal

Nota: (A) Biorreactor de matraces gemelos; (B) Biorreactor de flujo y reflujo (ebb and flow); (C) Biorreactor RITA; (D) Sistema de balanceo (rocker system); (E) Biorreactor Bio-MINT; (F) Biorreactor RALM; (G) Biorreactor SETIS; (H) Sistema PLANTIMA; (I) Biorreactor PLANTFORM. Tomado de Murthy et al., 2023

Los principios fundamentales del SIT se pueden resumir en los siguientes aspectos:

Intermitencia controlada: Los explantes no están en contacto permanente con el medio, lo cual evita la anoxia y promueve la diferenciación celular.

Mayor tasa de multiplicación: Algunos estudios han demostrado que los SIT pueden duplicar o triplicar el número de brotes en comparación con medios sólidos.

Reducción de contaminación: Al trabajar en sistemas cerrados, el riesgo de contaminación exógena se reduce significativamente.

Facilidad de automatización: Los SIT pueden ser programados para ciclos automáticos, lo cual es ideal para la producción a gran escala.

Investigaciones recientes reportan que el uso de SIT en banano permite mejorar la calidad morfológica de las plántulas, acortar los ciclos de multiplicación y facilitar el manejo fisiológico de las vitroplantas durante la aclimatación (Albarrán et al., 2005; Escalona et al., 2013). Además, el sistema favorece el uso eficiente de recursos, alineándose con los principios de sostenibilidad en la agricultura intensiva. Su funcionamiento se basa en:

- Inmersiones breves y controladas (de segundos a minutos).
- Intervalos definidos (cada pocas horas).
- Aireación adecuada.
- Separación física del medio y las plantas durante el tiempo no sumergido.

Estos sistemas promueven un crecimiento más homogéneo y reducen problemas como la vitrificación **y** la hiperhidratación**.**

3.2 Tipos de Sistemas de Inmersión Temporal

El desarrollo de los SIT ha permitido una mejora significativa en los procesos de micropropagación vegetal, incluyendo cultivos estratégicos como el banano (Musa spp.). Estos sistemas se fundamentan en la inmersión intermitente de los explantes en un medio líquido nutritivo, lo cual optimiza la absorción de nutrientes, mejora la oxigenación del tejido vegetal y reduce la hiperhidricidad (Escalona et al., 2013).

Existen diferentes tipos de SIT, desde modelos comerciales altamente especializados hasta versiones artesanales diseñadas para contextos de bajos recursos. A continuación, se describen los principales sistemas utilizados en la propagación in vitro de plantas:

- **RITA® (Recipient for Automated Temporary Immersion)**

El sistema RITA® como se observan en las forma de frasco (figuras 14), fases del sistema (figuras 15) y vista esquematica del sistema (figuras 16), desarrollado en Francia por CIRAD (Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), es uno de los más utilizados a nivel académico y comercial. Este dispositivo consta de dos compartimentos separados para el medio de cultivo y los explantes, unidos por un sistema que permite el flujo controlado de líquido mediante presión de aire (Albarrán et al., 2005). Se ha utilizado exitosamente en la propagación de Musa spp., lo que permite una alta tasa de multiplicación y una buena calidad morfofisiológica de las plántulas.



Figura 14.Frasco de tipo RITA®

Nota: Frasco de tipo RITA® mostrando el compartimento para el medio líquido, la cámara de cultivo y el sistema de presión controlada (mangueras silicom y filtros millipore para inmersión intermitente (Kasalab, 2025).

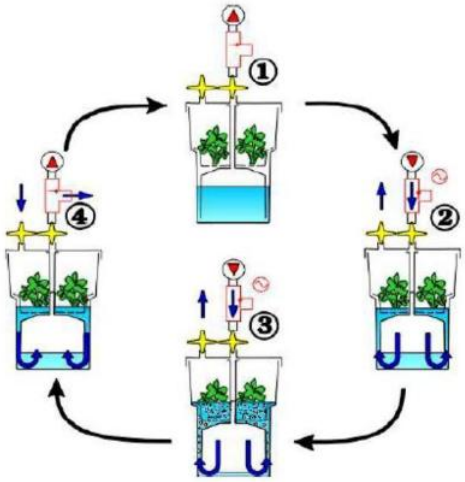


Figura 15.Fases del sistema de inmersión temporal automatizado RITA®

Nota: Fases del sistema de inmersión temporal automatizado RITA. Fase emergida.1) Los explantes están colocados sobre un disco. Fase sumergida. 2) Una sobrepresión de aire estéril sube el medio de cultivo a la parte alta donde se encuentran los explantes. 3) El aire inyectado permite la oxigenación del medio. El aire de la parte alta se renueva totalmente. 4) La bomba de aire se apaga y el medio de cultivo vuelve a bajar por gravedad a la parte inferior. Tomado de Méndez Alegría (2014).

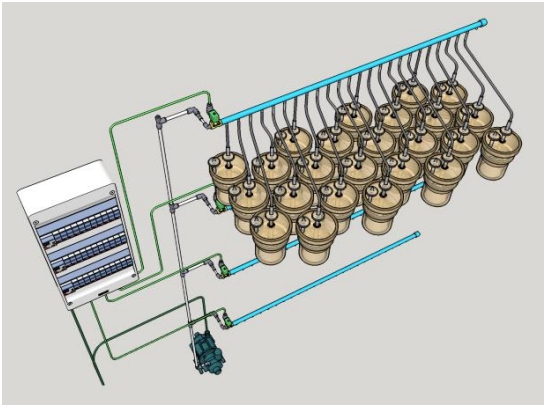


Figura 16.Vista esquemática del sistema RITA®

Nota: Esquemática del sistema RITA® en configuración industrial, mostrando múltiples unidades dispuestas para la micropropagación escalable de plantas; la disposición en serie facilita operaciones continuas y mayor volumen de cultivo (CIRAD, 2025).

- **SESIT® (System for Temporary Immersion in liquid media)**

Diseñado para la producción a gran escala, el sistema SESIT® (figura 17) ofrece mayor capacidad volumétrica y modularidad en comparación con el RITA®. Es particularmente útil para centros de producción de vitroplantas comerciales debido a su eficiencia y facilidad de operación (Watt, 2012). Además, permite reducir la mano de obra asociada al cultivo in vitro, lo que lo hace económicamente atractivo.

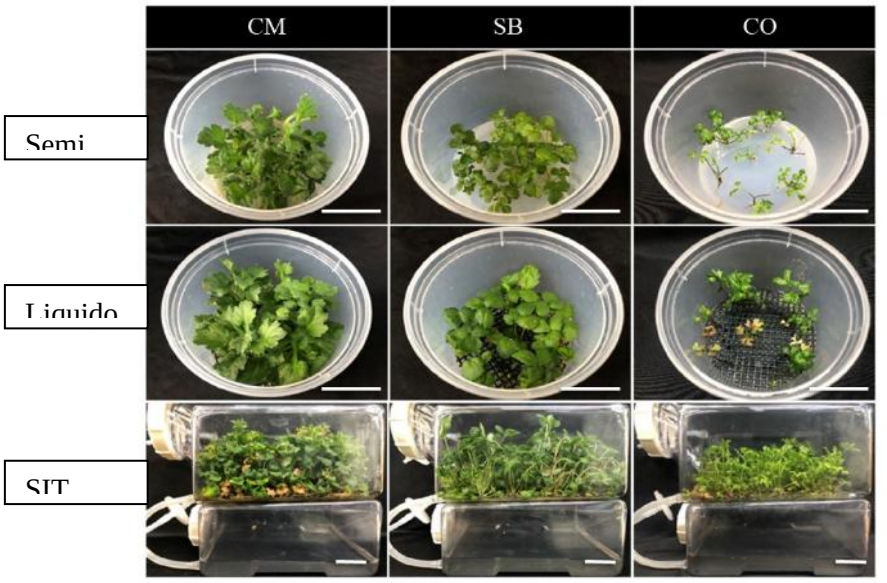


Figura 17.Estudio de Plantas de crisantemo y Cnidium officinale expuestos a sistema de inmersión temporal (SIT) SESIT®.

Nota: Plantas de crisantemo (CM), fresa (SB) y* Cnidium officinale *(CO) después de 4 semanas en cultivos en medio semisólido, líquido y en sistema de inmersión temporal (TIS). Barras de escala = 5 cm.* Tomado de *(Hwang et al., 2022).

- **MASIT® (Modular Automated Temporary Immersion System)**

Este modelo de sistema es una versión automatizada y modular del RITA®, con mejoras que permiten mayor control del entorno y la adaptación a distintos tipos de explantes. Su implementación en la micropropagación de banano ha demostrado eficacia en la producción uniforme de brotes y en el mantenimiento de la calidad genética del material vegetal.

Estos modelos automatizados capaces de integrar controladores digitales, sensores ambientales y software especializado (figura 18). Esta combinación tecnológica permite mejorar el suministro de nutrientes, la disponibilidad gaseosa y la estabilidad fisiológica del cultivo in vitro. El diseño propuesto presenta un sistema de inmersión temporal controlado mediante un microcontrolador, el cual gestiona funciones críticas como la alimentación, la aireación y el manejo preciso de la concentración de dióxido de carbono (CO_2), optimizando así el comportamiento de los explantes en cultivo (Woowong y Piladaeng, 2022).

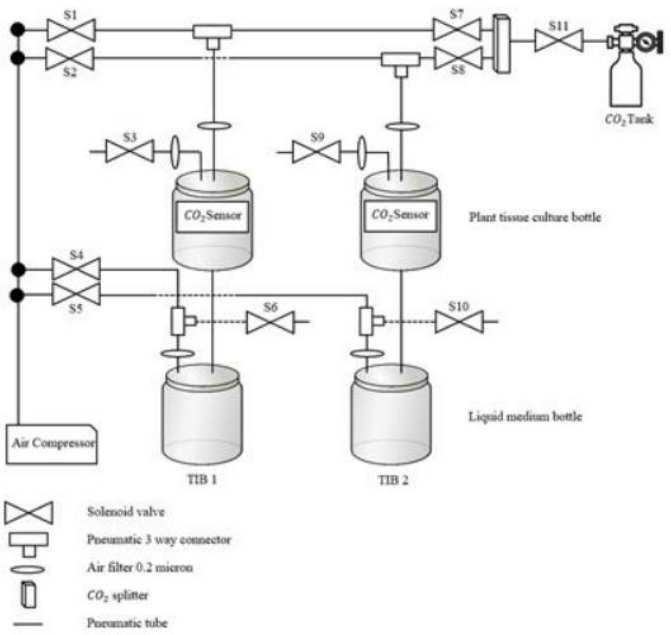


Figura 18.Modelo de sistemas automatizados que integrar controladores digitales, sensores ambientales y software especializado

Nota: Tomado de Woowong y Piladaeng, (2022).

El sistema de alimentación funciona mediante un microcontrolador capaz de ejecutar ciclos programados de inmersión y retorno del medio.

Según el diseño descrito por, el usuario establece los tiempos mediante una aplicación web, la cual envía instrucciones al microcontrolador para activar combinaciones específicas de válvulas. Cuando inicia el ciclo de alimentación, el sistema dirige aire comprimido hacia los contenedores de alimento, empujando el medio hacia los recipientes de cultivo. Este principio de inmersión temporal coincide con lo señalado por Hwang et al. (2022), quienes destacan que los ciclos controlados de suministro de nutrientes aumentan la eficiencia fisiológica y reducen el estrés de los explantes en bioreactores automatizados.

Una vez que el nutriente se agota, el sistema continúa enviando aire a los contenedores para generar burbujeo dentro de los recipientes de cultivo, un proceso que aumenta la oxigenación del tejido vegetal y mejora la actividad metabólica. Este mecanismo de aireación intermitente es fundamental para mantener la calidad de los explantes, tal como también lo han observado Hwang et al. (2022) en sistemas avanzados de inmersión temporal. Al finalizar el tiempo programado, las válvulas se reconfiguran para permitir que el medio retorne a los depósitos por gravedad, y el sistema vuelve a su estado de espera para el siguiente ciclo (Woowong y Piladaeng, 2022).

El control de CO_2 es fundamental para cultivos que requieren condiciones fotoautotróficas o un adecuado equilibrio gaseoso. La importancia de regular este gas ha sido ampliamente demostrada en sistemas de cultivo in vitro, donde niveles adecuados de CO_2 favorecen la fotosíntesis, reducen la dependencia de sacarosa y mejoran la vigorosidad de las plántulas. En el sistema descrito por Woowong y Piladaeng (2022), sensores instalados dentro de los contenedores envían

continuamente la información al microcontrolador, el cual determina si debe incrementar o disminuir la concentración interna del gas.

Cuando la concentración de CO_2 cae por debajo del valor programado, el microcontrolador activa válvulas que permiten el ingreso de CO_2 desde un tanque externo hacia los recipientes, aumentando así la disponibilidad del gas para los procesos fotosintéticos. Esto concuerda con lo descrito por Murthy et al. (2023), quienes destacan que los sistemas fotoautotróficos in vitro se benefician de una suplementación controlada de CO_2 para mejorar el rendimiento fotosintético y la calidad de las plantas regeneradas. En contraste, si los niveles exceden los valores adecuados, el sistema introduce aire comprimido para desplazar el CO_2, reduciendo su concentración hasta volver al rango deseado, coincidiendo con reportes previos sobre la necesidad de evitar acumulaciones excesivas que pueden inhibir la actividad estomática y provocar estrés gaseoso.

Cuando el valor medido se encuentra dentro del límite programado, todas las válvulas permanecen cerradas en estado de espera. Esta regulación dinámica asegura un ambiente controlado, estable y fisiológicamente favorable para el desarrollo del cultivo, lo que coincide con estudios que resaltan la importancia de una atmósfera regulada para mantener condiciones óptimas en biorreactores de inmersión temporal (Murthy et al., 2023).

Una de las características más destacadas del sistema es su interfaz web, diseñada para permitir al usuario controlar el biorreactor de forma remota. La plataforma se divide en tres módulos principales: control de

alimentación, control de CO_2 y monitorización general. El sistema almacena los tiempos programados en una base de datos, lo que facilita la repetición automática de los ciclos sin necesidad de nuevos ajustes. Esto coincide con las tendencias actuales de de modernización en biofábricas, donde la digitalización permite mejorar la reproducibilidad, trazabilidad y eficiencia operativa (Murthy et al., 2023).

En el módulo de CO_2, el usuario define tanto la concentración como los intervalos de operación del control gaseoso, donde la sección de visualización muestra la concentración actual de CO_2, los valores programados y el estado operativo del sistema en tiempo real. La integración entre sensores, software y microcontroladores facilita la gestión de cultivos fotoautotróficos, aumentando su estabilidad y reduciendo la necesidad de intervenciones manuales. Esta integración convierte al sistema en una plataforma altamente funcional para laboratorios y biofábricas, permitiendo una supervisión simplificada y operaciones precisas de manera continua. En la figura 7 se propone un proptotipo de inteligente que se considera clave para el desarrollo escalable de SIT inteligentes aplicados a la micropropagación moderna (Murthy et al., 2023).

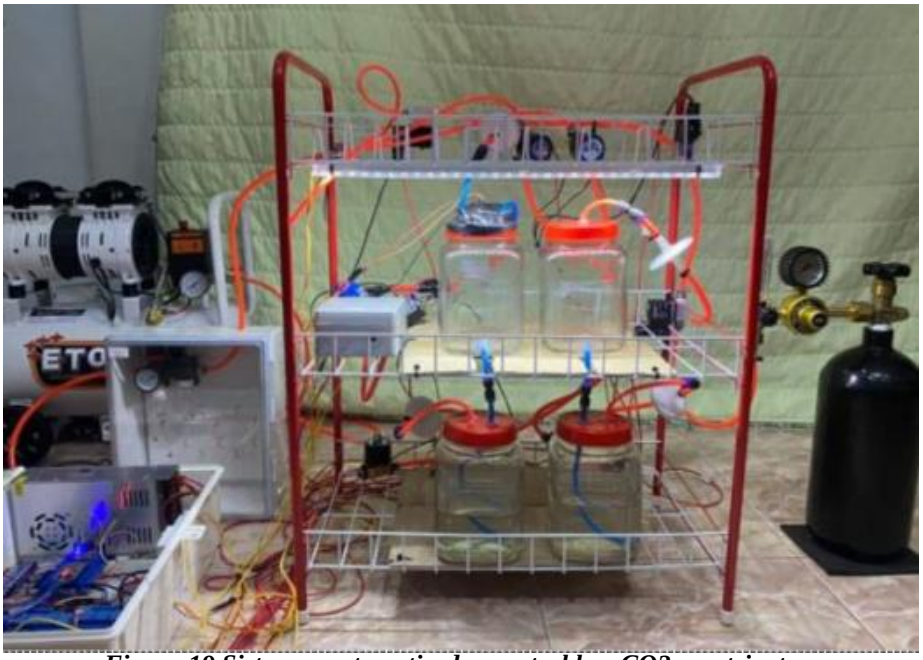


Figura 19,Sistemas automatizados control luz, CO2 y nutrientes

Nota: Tomado de Murthy et al., (2023).

- **Sistemas artesanales o caseros**

En contextos con recursos limitados, como se ilustra en figuras 20, 21, 22 y 23 que en numerosos laboratorios han desarrollado versiones artesanales del SIT utilizando frascos de plastico de mercados locales, vidrio, tubos de PVC, válvulas de acuario y bombas de aire. Aunque estos sistemas presentan menor precisión, su bajo costo y adaptabilidad los hacen valiosos para proyectos educativos y pilotos de investigación (Lorenzo et al., 2015). La clave para su éxito radica en el control de la esterilidad y la frecuencia de inmersión.



Figura 20.Sistema de inmersión temporal artesanal tipo PSITL

Nota: Prototipo de sistema de inmersión temporal local (PSITL) de plastico. A) Sistemas (PSITL), B) recipiente externo y material para confección de canasta superior, C) Recipiente interno compuesto por canasta superior como soporte de plantas fijado con perno a canasta inferior para permitir volumen de medios de cultivo líquido, D) Tapa con pernos conductores de entrada y salida de aire. Tomado de Ugarte-Barco et al., (2021).



Figura 21.Sistema de inmersión temporal artesanal vidrio

Nota: Sistema de inmersión temporal artesanal es utilizado para la micropropagación de banano en laboratorio, este diseño usa frascos de vidrio, válvulas y bombas de aire como alternativa económica al SIT comercial. Tomado de Sattayasai et al.,(2023).



Figura 22.Configuración de SIT casero empleada en la propagación de plantas tropicales

Nota: Estos sistemas muestran adaptaciones funcionales para optimizar el proceso de inmersión intermitente en entornos con recursos limitados . Tomado de Sattayasai et al.,(2023).

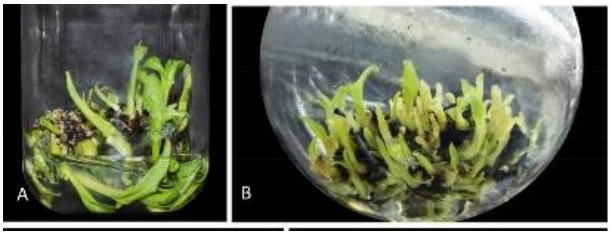


Figura 23. SIT de vidrio, Comparación del desarrollo morfológico de plántulas

Nota: Plántulas cultivadas en medio sólido (izquierda: A) y en sistema de inmersión temporal (derecha: B). Tomado de Albarrán et al., (2005).

3.3 Aplicaciones de SIT en la Micropropagación del Banano

El uso de SIT en banano ha demostrado ser efectivo en las fases de:

Multiplicación de brotes:

Incrementa la tasa de formación de brotes por explante destacándose en los últimos años (figura 12), diversos equipos que han impulsado

avances notables en la implementación del SIT para la micropropagación del banano, donde Uma et al. (2023) desarrollaron un sistema de inmersión temporal para la multiplicación masiva de *Rasthali* AAB Silk, integrando herramientas de evaluación genética como el Simple Sequence Repeats (SSR), también conocidos como microsatélites y citometría de flujo. Por su parte, Bello-Bello et al. (2019) diseñaron un SIT adaptado para uso comercial con la variedad *Grand Naine* AAA.



Figura 24.Fase de multiplicación, comparación del desarrollo morfológico de vitroplantas de plántulas

Nota: La imagen compara el desarrollo morfológico de plántulas cultivadas en medio sólido (izquierda: C) y en sistema de inmersión temporal (derecha: D), donde las plantas propagadas en SIT presentan mayor vigor y uniformidad (Albarrán et al., 2005).

En Tailandia, Thanonkeo et al. (2024) aplicaron exitosamente el sistema SIT a la variedad Kluai Numwa Pakchong 50, agregando escalabilidad al proceso. Investigadores como Roles et al. (2005) profundizaron en la optimización del SIT para plantas (*Musa AAB*), mientras que Georgiev et al. (2014) han ofrecido una evaluación crítica y técnica del desarrollo de estos sistemas en biotecnología vegetal.

Crecimiento y elongación: Los SIT han demostrado favorecer la producción de vitroplantas más vigorosas y con mayor uniformidad morfológica que las obtenidas en medios semisólidos. Este efecto se atribuye a una mejor disponibilidad y renovación de nutrientes, así como a una oxigenación más eficiente de los tejidos durante las fases de inmersión, lo que estimula la división y expansión celular. Estudios recientes confirman que plántulas de Musa cultivadas en SIT presentan tallos más largos, hojas más desarrolladas y mayor biomasa fresca, características que se traducen en un mejor establecimiento en las etapas de aclimatación (Uma et al., 2021; Bello-Bello et al., 2019).

Pre-enraizamiento: En la micropropagación del banano (Musa spp.), los SIT se han consolidado como una tecnología eficiente para la producción masiva de plántulas, debido a su capacidad para mejorar el crecimiento y desarrollo vegetal en condiciones controladas (Pérez et al., 2020). En este contexto, el pre-enraizamiento mediante SIT es una etapa fundamental para fortalecer las plántulas antes del enraizamiento definitivo en medio semisólido o ex vitro.

Los SIT funcionan mediante la inmersión breve y periódica de las plantas en un medio líquido que contiene nutrientes y reguladores de crecimiento, optimizando la absorción y el intercambio gaseoso (López & Sánchez, 2019). En banano, este sistema favorece la inducción y diferenciación de raíces adventicias, gracias a la exposición controlada a auxinas como el ácido indolbutírico (AIB), que estimulan el desarrollo radicular inicial (Ramírez et al., 2021).

Además, los SIT contribuyen a minimizar problemas comunes en cultivos líquidos estáticos, como la hiperhidricidad, permitiendo que las plántulas mantengan una estructura celular más firme y funcional (García et al., 2018). Esta condición mejora el vigor de las vitroplantas y su capacidad para adaptarse a condiciones ex vitro, reduciendo la mortalidad durante la aclimatación (Méndez et al., 2022).

Por lo tanto, el pre-enraizamiento en sistemas de inmersión temporal representa un paso estratégico que permite optimizar la micropropagación del banano, incrementando la calidad, supervivencia y eficiencia en la producción de plantas listas para su establecimiento en campo o invernadero (Torres & Villacís, 2023).

3.4 Parámetros Críticos para el Cultivo en SIT

Para lograr un desarrollo óptimo, es necesario controlar cuidadosamente las condiciones ambientales**:** temperatura (24–26°C), fotoperíodo (16 h luz / 8 h oscuridad) y luz moderada. Así como el control de otros parámetros como se muestra en la tabla 5

Tabla 5.Parámetros Críticos para el Cultivo en SIT

Parámetro	**Rango / Valor típico**	**Descripción / Importancia**	**Referencia (APA 7)**
Frecuencia de inmersión	1 a 4 veces por día	Controla la disponibilidad del medio y evita el estrés por falta o exceso de humedad en los explantes.	Etienne et al., 2013
Duración de inmersión	1 a 10 minutos por ciclo	Duración breve para evitar hipoxia y favorecer el intercambio gaseoso adecuado.	George et al., 2014

Volumen de medio nutritivo	Suficiente para cubrir explantes	Volumen suficiente para nutrir, pero sin exceso que impida aireación o genere hipoxia.	Loyola-Vargas & Vázquez-Flota, 2006
Número de explantes por unidad	30 a 50 explantes por recipiente	Evita competencia por nutrientes y espacio, favoreciendo un desarrollo homogéneo.	Etienne & Berthouly, 2002

Nota: Aspectos a tener en cuenta para parámetros críticos en SIT.

1. **Frecuencia de inmersión**

Debe ajustarse para balancear la disponibilidad de nutrientes con la necesidad de oxígeno. Frecuencias muy bajas pueden causar estrés hídrico y deficiencia de nutrientes; mientras que frecuencias muy altas pueden provocar hipoxia y contaminación microbiana (Etienne & Berthouly, 2002; Etienne et al., 2013).

2. **Duración de la inmersión**

Períodos cortos (1-10 minutos) aseguran un suministro adecuado de nutrientes sin causar asfixia o daños por exceso de humedad (George, Hall & De Klerk, 2014).

3. **Volumen del medio nutritivo**

Suficiente para cubrir los explantes, pero no en exceso, para evitar problemas de intercambio gaseoso y acumulación de gases fitotóxicos como el etileno (Loyola-Vargas & Vázquez-Flota, 2006).

4. **Número de explantes por recipiente**

Debe limitarse para evitar competencia por espacio y nutrientes, promoviendo crecimiento homogéneo y plantas de mejor calidad (Etienne & Berthouly, 2002).

3.5 Ventajas de los Sistemas de Inmersión Temporal

Los SIT representan una innovación significativa en la micropropagación, especialmente en cultivos como el banano, al combinar los beneficios de los sistemas líquidos con un control preciso del contacto entre el explante y el medio nutritivo. Su diseño permite sumergir los tejidos vegetales en medio líquido de manera intermitente, evitando los problemas de anoxia y la hiperhidricidad, característicos de la inmersión continua.

Entre las principales ventajas documentadas se encuentran:

Mayor tasa de multiplicación: La intermitencia de la inmersión optimiza la absorción de nutrientes y reguladores de crecimiento, generando tasas de proliferación superiores a las obtenidas en medios semisólidos (Albarrán et al., 2005; Escalona et al., 2013).

Reducción de hiperhidricidad (vitrificación): El control de la duración y frecuencia de inmersión limita la saturación hídrica de los tejidos, minimizando deformaciones morfológicas y mejorando la calidad de las vitroplantas (Etienne & Berthouly, 2002; Georgiev et al., 2014).

Mejor uniformidad y vigor de las plantas: Los SIT favorecen un crecimiento homogéneo gracias a la distribución equitativa de nutrientes y la aireación controlada, generando plántulas más vigorosas y con

mayor éxito en aclimatación (Teisson & Alvard, 1995; Etienne et al., 2013).

Ahorro en medio de cultivo y mano de obra: Se reduce el volumen de medio requerido y la frecuencia de manipulación, disminuyendo costos operativos y riesgos de contaminación (Berthouly & Etienne, 2005; Georgiev et al., 2014).

Facilidad de escalamiento: Su diseño modular permite adaptarse desde pequeñas unidades experimentales hasta sistemas de producción a gran escala para biofábricas de vitroplantas (Escalona et al., 2013; Teisson & Alvard, 1995).

Reducción del uso de agar y su impacto en costos: Uno de los beneficios más destacados de los Sistemas de Inmersión Temporal es la eliminación o drástica reducción del uso de agar como agente gelificante, ya que el cultivo se desarrolla en medio líquido. El agar, además de ser un insumo de alto costo, presenta variaciones de calidad entre lotes y puede contener impurezas que afectan el crecimiento in vitro (George et al., 2014).

La sustitución del medio semisólido por medio líquido en SIT conlleva varias ventajas económicas y técnicas:

- Menor gasto en insumos**,** el uso de agar puede representar entre el 15 y 30 % del costo de los medios de cultivo (Berthouly & Etienne, 2005).
- Mayor homogeneidad en la disponibilidad de nutrientes, ya que estos se disuelven completamente en el medio líquido y no quedan atrapados en la matriz gelificada.

- Facilidad de preparación y esterilización del medio, reduciendo tiempos de producción y consumo energético.

- Menor generación de residuos sólidos, simplificando la limpieza y el manejo postcultivo.

En producciones a gran escala, como en biofábricas de vitroplantas de banano, esta optimización de recursos puede traducirse en reducciones de costos operativos superiores al 20 %, dependiendo del volumen de producción (Georgiev et al., 2014; Escalona et al., 2013). Estas características hacen del SIT una herramienta ideal para programas de mejoramiento genético, propagación masiva y bancos de germoplasma.

3.6 Desafíos y Limitaciones

A pesar de sus múltiples beneficios, el uso de SIT presenta desafíos como:

Contaminación por microorganismos: A pesar de las ventajas de los SIT, uno de los principales desafíos en su implementación a escala comercial es el riesgo de contaminación microbiana, principalmente por bacterias y hongos. En los SIT, el medio de cultivo se encuentra en estado líquido y circula por todo el sistema durante las inmersiones. Esta condición, si bien favorece la distribución homogénea de nutrientes, también facilita la propagación rápida de contaminantes en caso de que se introduzcan durante la manipulación o a partir de explantes no desinfectados óptimamente (Etienne & Berthouly, 2002).

Los factores que aumentan el riesgo de contaminación en SIT incluyen:

- Mayor superficie de contacto del medio con el explante durante la inmersión, lo que amplifica la posibilidad de transferencia de esporas o células microbianas.

- Circulación compartida del medio para múltiples explantes en un mismo recipiente, lo que facilita la diseminación de patógenos en todo el lote.

- Duración de los ciclos de producción más largos en algunos cultivos, lo que aumenta la probabilidad de aparición de contaminantes oportunistas (Georgiev et al., 2014).

- El impacto de la contaminación en SIT es más severo que en medios semisólidos, ya que el patógeno puede diseminarse rápidamente a todas las plantas del sistema, provocando la pérdida total del lote (Escalona et al., 2013).

Para mitigar este problema de contaminación, se recomiendan estrategias como:

- Uso de explantes con preacondicionamiento fitosanitario y tratamientos antifúngicos o antibacterianos preventivos.

- Estricta esterilización del medio y de los componentes del sistema, incluyendo filtros de aire de alta eficiencia.

- Implementación de protocolos de manejo aséptico y reducción de la frecuencia de aperturas del sistema (Berthouly & Etienne, 2005).

Estudios recientes sobre diversidad y control microbiano en SIT:

Un análisis más técnico identificó una gran diversidad de bacterias contaminantes en cultivos in vitro, tales como en sistemas de micropropagación de Prunus. En estudios realizados (2024–2001), se evaluaron nanocompuestos (como grafeno disminuido con cobre-plata y plata-selenio) para eliminar específicamente *Curtobacterium sp*. sin afectar al explante, logrando inhibición total a concentraciones seguras (~200 mg L^{-1} de plata) como se plantea en la tabla 6.

Tabla 6,Enfoques y aportes clave para combatir contaminantes.

Autor / Referencia	**Aporte principal**
Tekielska et al. (2024) / Mirzabe et al. (2022)	Propuesta de soluciones novedosas (nanocompuestos antimicrobianos) para combatir contaminantes específicos en SIT
Herman (2017)	Revisión de posibles efectos beneficiosos de microorganismos y cuestionamiento del ideal de cultivos axénicos
Cassells (2001)	Identificación de fuentes (biofilms, endófitos, vectores), énfasis en prácticas asépticas y diagnóstico rutinario

Nota: Aportes de nuevas tecnologías para evitar contaminación en SIT.

Diseño y mantenimiento técnico:

En la actualidad, el desarrollo de SIT está acompañado de una sofisticación técnica que demanda conocimiento en automatización, biotecnología vegetal y operaciones asépticas. Murthy et al. (2023) subrayan que la complejidad de los biorreactores exige personal formado no solo en cultivo, sino también en sistemas de control, programación y mantenimiento técnico. Mirzabe et al. (2022). aportan que la selección y diseño de un SIT deben considerar la facilidad de

montaje y desmontaje, resistencia de los materiales y ergonomía de operación; cada uno es un factor clave para asegurar que el personal pueda trabajar de manera eficiente y segura. Asimismo, Le et al. (2023), al comparar medios semisólidos y SIT en arándanos, mencionan que el éxito depende en gran medida de protocolos operacionales adecuados y del personal capacitado en técnicas de inmersión y normas de asepsia.

A continuación en la figura 25, se detalla un diseño propuesto para cultivo de banana en la provincial del Oro:

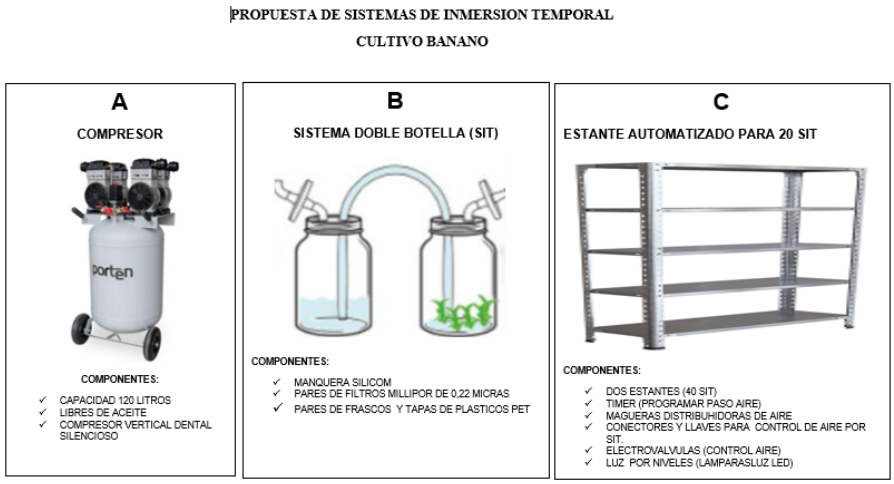


Figura 25. Diagrama de elementos propuestos para el proceso de cultivo in vitro del banano.

Nota: Elaboración propia (2026).

Costo inicial de implementación

Uno de los desafíos más importantes de los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) es el costo inicial de implementación, que suele ser significativamente mayor que el de los sistemas tradicionales basados en medios semisólidos. Este gasto incluye:

- **Adquisición de biorreactores SIT:** equipos con componentes automatizados como válvulas, temporizadores, bombas y sistemas de aireación, cuya fabricación y calibración especializada incrementan el precio inicial (Georgiev et al., 2014; Murthy et al., 2023).

- **Instrumental auxiliar y esterilización:** autoclaves de mayor capacidad, filtros HEPA, sistemas de control de temperatura y humedad, así como recipientes de acero inoxidable o acrílico resistentes a la esterilización repetida.

- **Capacitación del personal:** formación específica en operación de biorreactores, mantenimiento preventivo y técnicas de asepsia, que representa un costo indirecto importante (Mirzabe et al., 2022; Le et al., 2023).

- A pesar de este costo inicial elevado, varios autores destacan que la inversión se compensa a mediano y largo plazo, debido a:

- **Reducción del uso de medio semisólido y agar**, disminuyendo costos recurrentes de insumos.

- **Aumento de la productividad** y homogeneidad de las vitroplantas, lo que mejora el rendimiento y disminuye pérdidas por contaminación o plántulas de baja calidad.

- **Menor consumo de mano de obra,** por el carácter automatizado del sistema, especialmente en producciones a gran escala (Escalona et al., 2013; Georgiev et al., 2014).

Por lo tanto, la evaluación del costo inicial debe considerarse dentro de un análisis integral de inversión, incluyendo beneficios económicos y técnicos a largo plazo, para justificar la adopción de SIT en programas de micropropagación de banano y otras especies vegetales.

3.7 Alternativas de sistemas de cultivo in vitro de banano

En trabajos de Moreno, (2023) se desarrolló el cultivo automatizado de banano, en el establecimiento y primeros subcultivos. Las comparaciones se realizaron con explantes de tipo I provenientes del tercer subcultivo de multiplicación en medio semisólido, siempre decapitados y con cortes en el ápice meristemático. El cambio de Medio Semi Solido (MSS) en jarras de cristal (figura 14) a medio líquido en RITA® (www.vitropic.fr), sistema de inmersión temporal PLANTFORM ™ (www.plantform.se) y contenedores locales adaptados sistemas de inmersión temporal local de dos frascos (SITL), fue uno de los principios que se estableció para valorar la respuesta de las vitroplantas durante las fases automatizadas de multiplicación y enraizamiento, así como el efecto en aclimatación. Estos sistemas han sido empleados en Musa acuminata group AAA (Alvard et al., 1993), en sauce (Regueira et al., 2018) y en piña (Escalona et al., 1999), respectivamente. Este último fue adaptado a SITL de doble contenedor de vidrio de 3 litros diseñado en nuestro laboratorio.

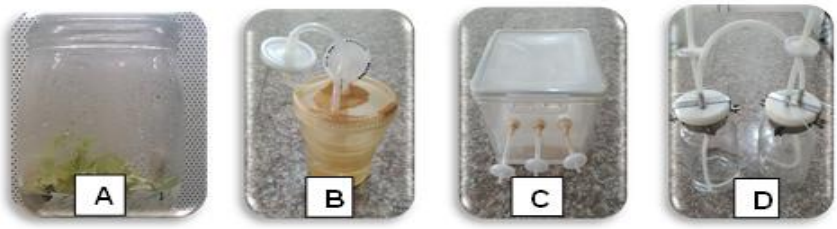


Figura 26.Sistemas convencionales y de Inmersión Temporal en el cultivo in vitro de genotipos de banano (Musa AAA) cv. Williams de la provincia de El Oro.

Nota: A) Jarras de cristal con medio semisólido, B) sistemas de inmersión temporal RITA®, C) sistema de inmersión temporal PLANTFORM ™, D) sistemas de inmersión temporal local de dos frascos (SITL). Tomado de Moreno, (2023).

Los diferentes sistemas fueron programados para 8 ciclos por día y con tiempo de 4 minutos de inmersión (Roels et al., 2005), condición que permitió exponer las vitroplantas a medios de cultivo líquido y renovación de la fase aérea en los contenedores. Los medios de cultivo estuvieron constituidos por el medio MSS constituido por medio líquido MS (Murashige & Skoog, 1962) con vitaminas que fue elaborado a partir de reactivos de 99% de pureza (MERCK). Como reguladores de crecimiento se añadieron 2 mg L^{-1} de 6-BAP (Arbeláez et al., 2016), 0,123 mg L^{-1} de ácido indol-3-butírico(Pérez et al., 2002), y como fuente de carbono sacarosa (3%). El pH se ajustó a 5,8., pero sin agente gelificante en el caso de los cultivos en SIT y con 1,9 gL^{-1} de Gellex® en las jarras. El contenido hormonal utilizado en medios de multiplicación fue de 0,65 mg L^{-1} AIA y 2 mgL^{-1} 6-BAP y en medios de enraizamiento se utilizó 1,30 mg L^{-1} de AIA (Cejas et al., 2011). Los volúmenes de medios siempre respondieron a la relación de 50 mL por explante, como se ha manifestado en otras especies según (Lorenzo et al., 1998), y como se observa en la Tabla 3.

Tabla 7.Condiciones para número de explantes, volumen de medio de cultivo y capacidad de contenedores por cada sistema de cultivo del ensayo in vitro en genotipos de banano

Sistemas	**NE** (unidades)	**VMC** (mL)	**CC** (mL)
MSS	4	200	500
RITA®	4	200	1000
PLANTFORM	10	500	3500
SITL	20	1000	3000

MSS, Medio Semisólido; SITL, Sistema de Inmersión Temporal Local; NE, Número de explantes; VMC, volumen de medio de cultivo; CC, capacidad de contenedores. Tomado de Moreno, (2023).

La autonomía de los sistemas permite programar los ciclos e inmersiones de las vitroplantas estos se realizó mediante temporizadores digitales (Woods®, E.U.A.) para activar las válvulas solenoides trifásicas que dieron el ingreso de presión positiva de aire, controlado por un manómetro desde un compresor libre de aceite (oil free air compressor, JYK35, 2012). El compresor fue de carga continua de aire con una capacidad de 40 litros. La distribución de aire a los estantes y biorreactores se realizó mediante manguera de polietileno rígido de 3/8'' y conectores plásticos regulables. El paso de aire a los sistemas se controló con llaves plásticas locales, que regularon presiones antes de los filtros (HEPA-VENT microfibra 0,3 µm de la empresa General Electric), que garantizan la esterilidad e impidieron el ingreso de agentes contaminantes a los biorreactores.

Los sistemas para programar los ciclos e inmersiones de las vitroplantas se realizaron mediante temporizadores digitales (Woods®, E.U.A.) para activar las válvulas solenoides trifásicas que dieron el ingreso de presión positiva de aire, controlado por un manómetro desde un compresor libre de aceite (oil free air compressor, JYK35, 2012). El compresor fue de carga continua de aire con una capacidad de 40 litros. La distribución de aire a los estantes y biorreactores se realizó mediante manguera de polietileno rígido de 3/8'' y conectores plásticos regulables. El paso de aire a los sistemas se controló con llaves plásticas locales, que regularon presiones antes de los filtros (HEPA-VENT microfibra 0,3 µm de la empresa General Electric), que garantizan la esterilidad e impidieron el ingreso de agentes contaminantes a los biorreactores.

La evaluación comparativa de estos cuatro sistemas de cultivo medio semisólido (MSS), y los sistemas de inmersión temporal RITA®, PLANTFORM™ y SITL, permitió determinar el comportamiento morfofisiológico del banano cv. Williams durante las fases de multiplicación, enraizamiento y aclimatación. En la fase de multiplicación (21 días), la longitud del pseudotallo (Tabla 8) mostró diferencias significativas entre sistemas, siendo los medios líquidos los que favorecieron un mayor crecimiento, especialmente PLANTFORM™ y SITL, mientras que el ancho del pseudotallo se mantuvo similar entre tratamientos. Estos resultados evidencian que la inmersión temporal potencia el crecimiento inicial del tallo, aun cuando el sistema MSS mantiene un desarrollo más conservador.

Tabla 8.Efectos de los sistemas de cultivo en crecimiento de pseudotallos de genotipos de banano Williams en las fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación

FASES	SISTEMAS	LP (cm)	AP (cm)
Multiplicación	**MSS**	1,6±0,23b	0,6±0,05a
	RITA®	2,1±0,09ab	0,6±0,02a
	PLANTFORM™	2,5±0,13a	0,7±0,05a
	SITL	2,4±0,22a	0,7±0,06a
	p-valor	0,006	0,272
Enraizamiento	**MSS**	4,3±0,24a	1,0±0,04a
	RITA®	3,4±0,18bc	0,7±0,05bc
	PLANTFORM™	3,5±0,24ab	0,6±0,03bc
	SITL	2,6±0,13c	0,5±0,03c
	p-valor	0,001	0,001
Aclimatación	**MSS**	6,2±0,34a	0,9±0,04a
	RITA®	4,6±0,41b	0,8±0,01a
	PLANTFORM™	5,0±0,36ab	0,9±0,04a
	SITL	4,0±0,19b	0,8±0,02a
	p-valor	0,002	0,086

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL). Longitud pseudotallo (LP), ancho pseudotallo (AP). Los valores representan la media±error estándar a partir de tres repeticiones de sistemas, valorando cuatro brotes de tipo I en cada una para cada variable en fases de multiplicación así como 10 vitroplantas en fases de enraizamiento y aclimatación.Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas por fase del cultivo para un p-valor≤0,05 (prueba de Tukey). Tomado de Moreno, (2023).

Durante el enraizamiento, los sistemas de cultivo expresaron contrastes más marcados. El MSS generó las mayores longitudes de pseudotallo, mientras que SITL produjo valores inferiores; sin embargo, en

parámetros como el ancho del pseudotallo, los sistemas líquidos fueron homogéneos entre sí y difirieron significativamente del sistema semisólido. En conjunto, estos resultados señalan que la arquitectura de la parte aérea depende de la fase del cultivo y del sistema empleado, con ventajas evidentes del MSS en el grosor de los tallos, pero con mayor longitud obtenida en sistemas de inmersión temporal.

En la aclimatación (42 días), las diferencias entre sistemas persistieron, aunque el ancho del pseudotallo tendió a homogeneizarse. La longitud del pseudotallo fue mayor en MSS, pero los sistemas PLANTFORM™, RITA® y SITL mostraron desempeños similares entre sí, lo que indica que los medios líquidos mantienen ventajas en crecimiento longitudinal incluso tras la transición ex vitro. De forma general, el uso de medios líquidos mejoró el crecimiento inicial del pseudotallo, y aunque MSS promovió tallos más gruesos, PLANTFORM™ alcanzó rendimientos comparables, mostrando su eficiencia estructural.

En cuanto al desarrollo foliar (Tabla 9), las diferencias entre sistemas fueron menos evidentes en la multiplicación, donde el número, longitud y ancho de hojas se mantuvieron similares. No obstante, en el enraizamiento y aclimatación, los sistemas líquidos, y especialmente PLANTFORM™ y RITA®, promovieron mayores longitudes y anchos foliares, diferenciándose significativamente del SITL en estas fases. Así, los sistemas de inmersión temporal demostraron ser más eficaces en la formación de láminas foliares amplias y funcionales.

Tabla 9.Efectos de los sistemas de cultivo en crecimiento foliar de genotipos de banano Williams en fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación

FASES	SISTEMAS	NH (unidades)	LH (cm)	AH (cm)
Multiplicación	**MSS**	3,14±0,14a	1,7±0,29a	1,1±0,18a
	RITA®	3,85±0,40a	2,2±0,32a	1,4±0,16a
	PLANTFORM™	4,14±0,34a	2,5±0,22a	1,54±0,12a
	SITL	4,00±0,49a	2,6±0,21a	1,6±0,74a
	p-valor	0,248	0,085	0,113
Enraizamiento	**MSS**	6,70±0,34a	2,2±0,11b	1,3±0,08b
	RITA®	6,90±0,38a	4,1±0,21a	2,0±0,08a
	PLANTFORM™	5,80±0,55ab	4,1±0,27a	2,1±0,12a
	SITL	4,60±0,40b	2,9±0,21b	1,6±0,10b
	p-valor	0,002	0,001	0,001
Aclimatación	**MSS**	5,50±0,17a	13,9±0,37a	5,9±0,35a
	RITA®	5,00±0,14a	13,2±0,64a	5,7±0,33a
	PLANTFORM™	5,60±0,27a	13,6±0,42a	6,2±0,24a
	SITL	5,30±0,01a	11,0±0,40b	4,6±0,21b
	p-valor	0,236	0,001	0,003

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL). Número hojas (NH), longitud hoja (LH), ancho hoja (AH). Los valores representan la media±error estándar a partir de tres repeticiones de sistemas, valorando cuatro brotes de tipo I en cada una para cada variable en fases de

multiplicación así como 10 vitroplantas en fases de enraizamiento, aclimatación. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas por fase del cultivo para un p-valor≤0,05 (prueba de Tukey). Tomado de Moreno, (2023).

Los análisis biométricos complementarios confirmaron estas tendencias (Tabla 10). En la multiplicación, SITL destacó con mayor peso fresco y seco, mientras que el mayor contenido de cenizas se observó en PLANTFORM™, reflejando una mayor acumulación de minerales. Durante el enraizamiento, MSS mostró los mayores pesos frescos, aunque los pesos secos fueron similares entre la mayoría de los sistemas. En la aclimatación, RITA® alcanzó el mayor peso fresco y contenidos elevados de cenizas, lo que indica su influencia en la acumulación de materia inorgánica durante la fase ex vitro.

Tabla 10.. Efectos de los sistemas de cultivo en el peso de genotipos de banano Williams en fases de multiplicación, enraizamiento y su influencia en aclimatación

FASES	**SISTEMAS**	**PF** (gramos)	**PS** (gramos)	**PC** (gramos)
Multiplicación	**MSS**	1,5±0,12bc	0,1±0,006b	0,008±0,001bc
	RITA®	1,0±0,11c	0,1±0,008b	0,003±0,001c
	PLANTFORM™	1,9±0,24ab	0,1±0,014ab	0,018±0,003a
	SITL	2,6±0,32a	0,3±0,120a	0,012±0,002ab
	p-valor	0,001	0,012	0,001
Enraizamiento	**MSS**	3,6±0,34a	0,2±0.009a	0,015±0,007bc
	RITA®	2,8±0,15ab	0,1±0,001b	0,015±0,003c
	PLANTFORM™	2,3±0,30bc	0,2±0,02ab	0,040±0,009b

	SITL	1,8±0,12c	0,2±0,01ab	0,192±0,002a
	p-valor	0,001	0,013	0,001
Aclimatación	**MSS**	13,0±0,20b	0,7±0,02b	0,561±0,02d
	RITA®	14,3±0,22a	0,8±0,01a	0,715±0,001a
	PLANTFORM™	11,9±0,01c	0,8±0,01ab	0,616±0,001b
	SITL	7,6±0,42d	0,6±0,02c	0,424±0,001c
	p-valor	0,001	0,001	0,001

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL). Peso fresco (PF), peso seco (PS), peso cenizas (PC). Los valores representan la media±error estándar a partir de tres repeticiones de sistemas, valorando cuatro brotes de tipo I en cada una para cada variable en fases de multiplicación así como 10 vitroplantas en fases de enraizamiento y aclimatación. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas por fase del cultivo para un p-valor≤0,05 (prueba de Tukey). Tomado de Moreno, (2023).

Desde el punto de vista bioquímico, los contenidos de fenoles solubles (Tabla 11) y la actividad antioxidante (Tabla 12) fueron superiores en los sistemas líquidos durante las fases in vitro. En la multiplicación, los mayores valores se registraron en hojas de SITL y pseudotallos de RITA®, mientras que en el enraizamiento los valores más altos aparecieron en tratamientos con medio líquido, confirmando la relación entre inmersión temporal y activación metabólica. En la aclimatación, aunque los niveles fenolicos disminuyeron en todos los sistemas, RITA® mantuvo los valores más altos en hojas y pseudotallos. La actividad peroxidasa reveló que PLANTFORM™ y SITL promovieron mayor respuesta antioxidante durante la multiplicación y el

enraizamiento, mientras que en la fase ex vitro los sistemas que provenían de medios líquidos mostraron mayor estabilidad enzimática.

Tabla 11.Efecto de los sistemas de cultivo en el contenido de fenoles solubles en órganos de banano Williams durante la multiplicación y enraizamiento in vitro y su posterior aclimatación.

FASES	SISTEMAS	CFS (mg GAE/ g PF)		
		Hojas	**Pseudotallo**	**Tallo**
Multiplicación	**MSS**	1,91±0,02ab	0,61±0,01c	1,50±0,02a
	RITA®	1,97±0,02ab	2,16±0,07a	1,08±0,02ab
	PLANTFORM™	1,49±0,03b	1,47±0,02ab	0,49±0,01b
	SITL	2,98±0,04a	0,66±0,01bc	0,47±0,01b
	p-valor	0,000	0,000	0,000
Enraizamiento	**MSS**	1,12±0,02b	0,60±0,02b	2,44±0,13bc
	RITA®	3,85±0,06a	0,19±0,06b	2,77±0,04ab
	PLANTFORM™	2,80±0,01ab	0,84±0,01ab	3,45±0,02a
	SITL	3,95±0,04a	1,08±0,04a	1,75±0,03c
	p-valor	0,000	0,000	0,000
Aclimatación	**MSS**	0,18±0,002b	0,01±0,001b	0,09±0,005a
	RITA®	0,31±0,01a	0,05±0,001a	0,03±0,005c
	PLANTFORM™	0,28±0,001ab	0,01±0,004b	0,07±0,001ab
	SITL	0,11±0,001b	0,01±0,003ab	0,05±0,001bc
	p-valor	0,000	0,003	0,000

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL), contenido de fenoles solubles (CFS), equivalentes ácido gálico (GAE), peso seco (PS). Los valores representan la media ± error estándar a partir de 3 repeticiones de sistemas, valorando 3 brotes de tipo I (multiplicación) o vitroplanta (enraizamiento y aclimatación) en cada una para cada variable. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas por fase

del cultivo para un p-valor≤0,05 (prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes). Tomado de Moreno, (2023).

Tabla 12,Efecto del sistema de cultivo durante las fases de multiplicación y enraizamiento in vitro en la actividad antioxidante (AA) de banano Williams en dichas fases y durante la aclimatación.

FASES	SISTEMAS	AA (µmolTE/ g PF)		
		Hojas	Pseudotallo	Tallo
Multiplicación	**MSS**	194,12±0,65b	107,70±0,51c	130,52±7,82ab
	RITA®	280,01±8,43a	177,45±2,44ab	161,71±1,97a
	PLANTFORM™	232,32±6,46ab	213,62±1,00a	94,04±4,60bc
	SITL	257,15±2,17a	130,05±1,41bc	72,38±2,01c
	p-valor	0,000	0,000	0,000
Enraizamiento	**MSS**	174,89±1,65bc	92,64±2,32ab	205,03±1,39b
	RITA®	288,71±1,23a	52,86±2,84c	250,00±5,26a
	PLANTFORM™	239,58±1,31ab	69,10±2,00bc	235,10±1,81a
	SITL	286,19±0,56a	152,61±0,60a	231,15±2,01ab
	p-valor	0,000	0,000	0,001
Aclimatación	**MSS**	9,76±0,74c	11,06±0,36a	9,18±0,36b
	RITA®	18,33±1,62ab	13,27±0,37a	16,70±0,75a
	PLANTFORM™	13,06±1,22bc	13,38±1,06a	12,93±0,99ab
	SITL	13,56±0,69bc	13,09±0,17a	16,70±0,20a
	p-valor	0,003	0,057	0,000

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL), actividad antioxidante (AA), equivalentes trolox (TE), peso seco (PS). Los valores representan la media ± error estándar a partir de 3 repeticiones de sistemas, valorando órganos de 3 brotes de tipo I (multiplicación) o vitroplantas (enraizamiento y aclimatación) en cada una para cada variable. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas por fase del cultivo para un p-valor≤0,05 (prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes). Tomado de Moreno, (2023).

Finalmente, como muestra la Tabla 13, los coeficientes de multiplicación evidenciaron que todos los sistemas generaron brotes tipo I de manera similar. Sin embargo, RITA® destacó por producir significativamente más brotes tipo II y III y por alcanzar el mayor índice global de multiplicación, lo que demuestra su eficacia para la propagación masiva y clonal de cultivares de banano.

Tabla 13.Eficiencia de los sistemas de cultivo en la obtención de brotes en fase de multiplicación de genotipos de banano Willimas

Sistemas	**BROTES** (unidades)			**CM** (unidades)
	Tipo I	**Tipo II**	**Tipo III**	
MSS	1,82±0,30a	0,45±0,25b	0,64±0,24b	2,91±0,62b
RITA®	2,36±0,39a	2,27±0,56a	7,36±2,13a	12,00±2,30a
PLANTFORM™	1,64±0,31a	1,18±0,33ab	3,00±1,05ab	5,82±1,15ab
SITL	1,27±0,19a	0,73±0,30ab	2,55±0,82ab	4,55±1,06ab
p-valor	0,122	0,02	0,005	0,002

Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal PLANTFORM™, sistema de inmersión temporal local (SITL). Brotes de diametro $>$3 mm (BROTES Tipo I), brotes de diametro $<$3 mm (BROTES Tipo II), brotes con pseudotallos sin hojas (BROTES Tipo III), coeficiente de multiplicación (CM). Los valores representan la media ± error estándar considerando tres repeticiones de de sistemas por cada tipo de brote. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas para un p-valor≤0,05 (prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes). Tomado de Moreno, (2023).

En conjunto, los resultados demuestran que los sistemas de inmersión temporal superan a los métodos semisólidos en la mayoría de variables de crecimiento estructural, fisiológico y bioquímico, destacándose PLANTFORM™ y RITA® así como su calidad como muestra la figura 15, y se consolidan como una alternativa altamente eficiente para la micropropagación de banano Williams, tanto en producción in vitro como en la respuesta durante la aclimatación ex vitro,

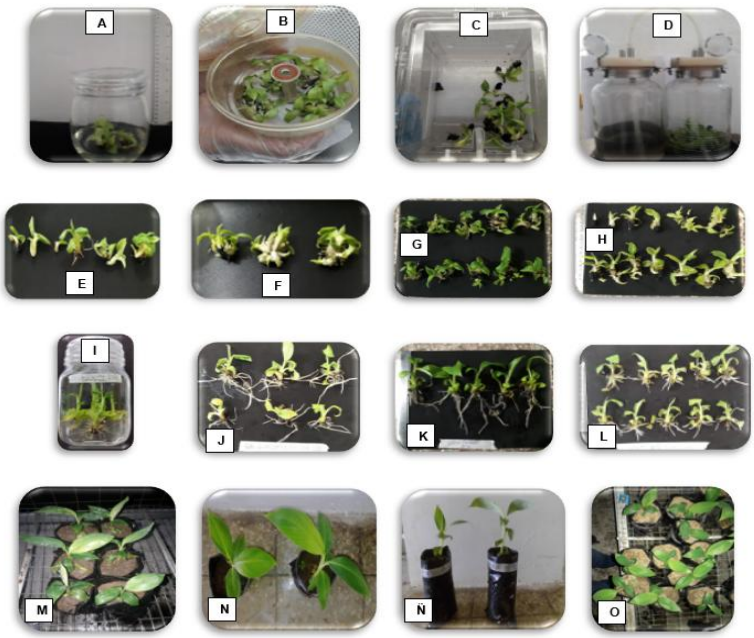


Tabla 14.Efecto de los sistemas de cultivo en la respuesta in vitro y ex vitro de genotipos de banano Williams.

Nota: Fase de multiplicación (21 días): A) Sistema con medios de cultivo semisólido. B) Sistema de inmersión temporal RITA®. C) Sistema de inmersión temporal PLANTFORM™. D) Sistemas de inmersión temporal local (SITL). E) Clústeres obtenidas en semisólido. F) Clústeres obtenidas en RITA®; G) Clústeres obtenidas en PLANTFORM™. H) Clústeres obtenidas en SITL; vitroplantas en fase de enraizamiento (21 días): I) Cultivadas en semisólido. J) Cultivadas en RITA®, K) Cultivadas en PLANTFORM™. L) Cultivadas en SITL; vitroplantas en fase de aclimatación (42 días). M) Originadas en

semisólido. N) Originadas en RITA®. Ñ) Originadas en PLANTFORM™. O) Originadas en SITL. Tomado de Moreno, (2023).

3.8 La micropropagación de banana, desempeño del prototipo PSITL

La micropropagación de banano constituye una herramienta clave para sostener la demanda de plantas sanas y de alta calidad en los sistemas productivos modernos. Entre las técnicas disponibles, la organogénesis directa genera altos volúmenes de plantas en espacios reducidos y mantiene una elevada uniformidad genética. No obstante, los sistemas de cultivo en medio semisólido (SS) generan limitaciones relacionadas con el estrés oxidativo, la acumulación de compuestos fenólicos y la restricción en el intercambio gaseoso. Estas condiciones reducen la eficiencia del proceso y afectan el vigor de las vitroplantas (Colmenares & Giménez, 2003; Arencibia et al., 2008), citados en Ugarte-Barco et al. (2021).

Para superar estas limitaciones, los SIT emplean un principio basado en la alternancia controlada entre periodos de inmersión en el medio líquido y periodos de aireación. Este manejo dinámico reduce el estrés del tejido y mejora la absorción de nutrientes. En este estudio, el PSITL, el sistema comercial RITA® y el método tradicional SS operaron bajo condiciones equivalentes en cuanto al número de explantes por volumen de medio de cultivo y la capacidad del contenedor, como se muestra en la tabla 15. Los investigadores evaluaron parámetros como la tasa de multiplicación, la longitud del pseudotallo y de la hoja 1, el número total de raíces, el contenido de cenizas, los fenoles solubles totales (CFST) y la actividad antioxidante (AA).

Tabla 15.Número de explantes, volumen de medio de cultivo y capacidad de contenedor por cada sistema de cultivo del ensayo de genotipos de banano Williams.

Sistema	Número de explantes (U)	Volumen de medio de cultivo (mL)	Capacidad de contenedor (mL)
SS	4	200	500
RITA®	4	200	500
PSITL	9	450	1500

Fuente:.Tomado de Ugarte-Barco et al., (2021).

Los resultados mostraron que, aunque la tasa de multiplicación total no varió significativamente entre los sistemas, la calidad morfológica sí evidenció diferencias marcadas. Las vitroplantas cultivadas en PSITL (figura 16) exhibieron un crecimiento más vigoroso, una coloración verde más intensa y una mayor uniformidad general en comparación con las obtenidas en RITA® y SS.

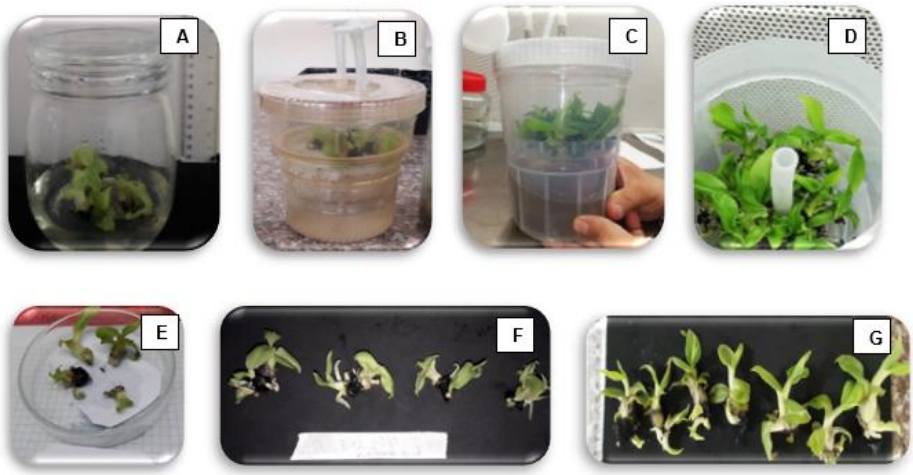


Figura 27.Resultados de 21 multiplicación en banano (Musa. AAA cv. Williams) en distintos sistemas de cultivo in vitro: SS (A, E), RITA®. (B, F), PSITL (C, D y G).

Fuente: Tomado de Ugarte-Barco et al., (2021).

Además (Tabla 28), las mayores longitudes de pseudotallo se registró en el PSITL, así como los niveles más altos de contenido de cenizas, lo que indica una mayor acumulación de nutrientes esenciales durante el proceso de multiplicación.

Figura 28.Efecto del sistema de cultivo (convencional, RITA® y prototipo local de inmersión temporal) en el crecimiento de genotipos de banano Williams durante la fase de multiplicación

SISTEMAS	**LP** (cm)	**NR** (unidades)	**PF** (gramos)	**PC** (gramos)
MSS	1,7±2,29b	1,09±0,31ab	1,6±0,1028a	0,008±0,0010b
RITA®	2,1±0,80b	4,81±0,94a	1,0±0,0917b	0,003±0,0005b
PSITL	2,9±1,43a	0,00±0,00b	1,2±0,0264ab	0,069±0,0036a
p-valor	0,000	0,001	0,007	0,000

Nota: Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA®, sistema de inmersión temporal de prototipo local (PSITL). Longitud de pseudotallo (LP), peso fresco (PF), peso de cenizas (PC). Los valores representan la media ± error estándar a partir de tres repeticiones valorando cuatro brotes de tipo I en cada una para cada variable. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas para un p-valor≤0,05 (prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes). Tomado de Moreno, (2023).

Además de las diferencias mostradas en la tabla anterior, el sistema de cultivo influyó de manera significativa en el tipo de brotes formados y en el coeficiente de multiplicación (Tabla 29). Los biorreactores RITA® generaron una mayor cantidad de brotes tipo I y tipo III, mientras que el sistema PSITL produjo más brotes tipo II que los demás sistemas. RITA® y PSITL alcanzaron los coeficientes de multiplicación más

altos, mientras que el método en medio semisólido registró valores significativamente menores. En conjunto, los sistemas de inmersión temporal ofrecieron los mejores resultados durante la fase de multiplicación.

Figura 29.Efecto del sistema de cultivo (convencional, RITA® y prototipo local de inmersión temporal) en el tipo de brotes obtenidos en fase de multiplicación de genotipos de banano Williams

SISTEMAS	**BROTES DE BANANO** (unidades)			**CM** (unidades)
	Tipo I	**Tipo II**	**Tipo III**	
MSS	1,81±0,30ab	0,45±0,25b	0,63±0,24b	2,90±0,62b
RITA®	2,36±0,39a	2,27±0,56a	7,36±2,13a	12,00±2,31a
PSITL	1,09±0,28b	2,90±0,48a	4,81±0,74a	8,81±0,69a
p-valor	0,044	0,002	0,000	0,000

Nota: Sistema con medio de cultivo semisólido (MSS), sistema de inmersión temporal RITA® (RITA®), sistema de inmersión temporal de prototipo local (PSITL). Brotes de diámetro >3 mm (BROTES Tipo I), brotes de diámetro <3 mm (BROTES Tipo II), brotes con pseudotallos sin hojas (BROTES Tipo III), coeficiente de multiplicación (CM). Los valores representan la media ± error estándar considerando tres repeticiones por cada tipo de brote. Letras diferentes en cada variable, indican diferencias significativas entre sistemas para un p-valor≤0,05 (prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes). Tomado de Moreno, (2023).

Desde el punto de vista bioquímico, el PSITL destacó porque incrementó de manera significativa el contenido de fenoles solubles totales y la actividad antioxidante (Figura). Este comportamiento coincide con estudios previos que vinculan el estrés moderado y la mejor aireación del tejido con la activación de rutas metabólicas responsables de la síntesis de compuestos antioxidantes. Estos resultados demuestran

que los flavonoides y otros fenoles cumplen funciones clave en la protección frente al estrés mecánico y oxidativo, especialmente bajo condiciones de inmersión intermitente (Szopa et al., 2019; Oyeyinka & Afolayan, 2020).

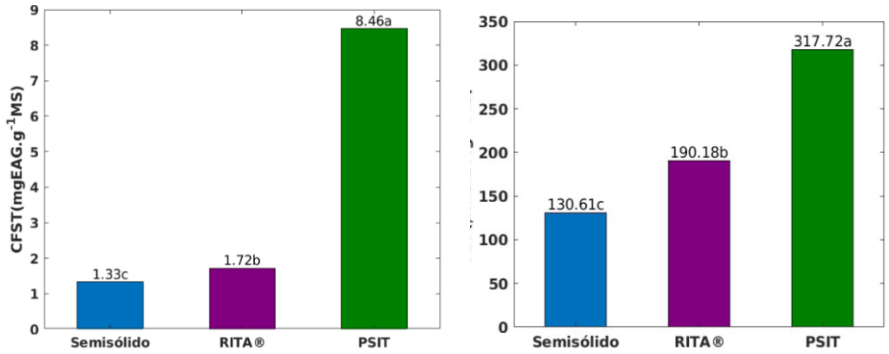


Figura 30.Compuestos fenólicos solubles totales (CFST) y actividad antioxidante (AA) de banano (Musa cv. Williams), letras distintas significan diferencias significativas entre sistemas

Nota: Según prueba de comparación de rangos múltiples de Duncan ($p < 0.05$). Tomado de Ugarte-Barco et al., (2021).

En síntesis, el prototipo PSITL no solo iguala la eficiencia operacional de los SIT comerciales, sino que ofrece una calidad superior de vitroplantas y fortalece parámetros metabólicos y fisiológicos decisivos para el éxito del establecimiento en suelo. Donde los PSITL representan una mejora significativa frente a sistemas tradicionalmente empleados en la micropropagación de banano. Aunque la tasa de multiplicación no se modifica entre sistemas, esto no constituye un aspecto limitante, ya que el principal valor agregado del PSITL radica en la calidad fisiológica y metabólica de las vitroplantas. En micropropagación, la calidad del material vegetal es tan relevante como la cantidad, especialmente en cultivos como el banano, cuya productividad en campo depende fuertemente del vigor inicial de la planta.

El aumento significativo en fenoles solubles y la actividad antioxidante en PSITL es uno de los resultados más relevantes. Los fenoles son componentes esenciales para la defensa celular, la regulación del estrés oxidativo y la integridad estructural del tejido vegetal. La correlación directa entre fenoles totales y actividad antioxidante, ampliamente confirmada en Musa spp. (China et al., 2011; Oyeyinka & Afolayan, 2020), refuerza la afirmación de que el PSITL promueve una mayor resiliencia fisiológica.

La aparición de estos efectos metabólicos también sugiere que el PSITL mejora la oxigenación del tejido y reduce la acumulación de sustancias tóxicas, problemas comúnmente asociados al cultivo en medio semisólido. Además, la mayor coloración verde y el vigor observado en las vitroplantas del PSITL apuntan a una mejor eficiencia fotosintética y a una absorción nutrimental más adecuada. Lo que permite manifestar en contraste, los sistemas SS y RITA® mostran desempeños adecuados pero inferiores en cuanto a vigor y parámetros bioquímicos ante los PSITL. El desempeño del PSITL demuestra que los sistemas localmente desarrollados pueden ser tan eficientes o incluso superiores a los sistemas comerciales, siempre que se diseñen bajo principios adecuados de aireación, inmersión controlada y suministro metabólicamente favorable.

3.8 Eficiencia de Sistema RITA® en enraizamiento y valoración en aclimatación de genotipos de banano Williams

El proceso de enraizamiento se evaluó utilizando un medio MS suplementado con 1,30 mg L^{-1} de AIA. Se comparó el comportamiento de las vitroplantas en medio semisólido (MSS) frente a tres frecuencias

de inmersión en RITA® (3, 6 y 8 ciclos diarios) como se muestra en la tabla 16. La evaluación incluyó parámetros morfológicos, número de raíces y biomasa, con el fin de establecer el ciclo de inmersión óptimo.

Tabla 16.Sistemas RITA® en fase de enraizamiento de genotipos de banano Williams

Sistema	**IN** (ciclos)	**TI** (minutos)	**VME** (mL)	**VMS** (mL)
MSS	*	*	50	200
RITA®	3 6 8	4	50	200

Nota: Medio semisólido (MSS), Sistema de inmersión temporal RITA®, inmersiones (IN), tiempo de inmersión (TI), volumen de medio de cultivo por explante (VMCE), volumen de medio de cultivo en sistemas (VMS)., * (permanente). Tomado de Moreno, (2023).

3.8.1 Respuesta morfológica y capacidad de enraizamiento

Los resultados mostraron (Tabla 15) que, excepto en el número de hojas, todas las variables evaluadas presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Las vitroplantas cultivadas en RITA® desarrollaron hojas más grandes y raíces más largas que las obtenidas en MSS, lo que confirma el efecto positivo del medio líquido y de la mayor renovación gaseosa característica de los SIT.

En contraste, el ancho del pseudotallo aumentó en MSS, probablemente debido a la mayor resistencia mecánica que ofrece el medio sólido. Sin

embargo, los pseudotallos más delgados en los sistemas líquidos no redujeron el vigor de las vitroplantas, ya que estas mostraron mejor desarrollo foliar y radicular.

Entre los tratamientos evaluados, el sistema con 3 inmersiones diarias resultó el menos eficiente, ya que produjo los valores más bajos de longitud del brote y peso fresco. Por el contrario, los sistemas con 6 y 8 ciclos generaron plantas más equilibradas, con mayor desarrollo radicular y, en general, con mejor calidad fisiológica.

Los datos confirman que los sistemas de inmersión temporal favorecen el desarrollo morfológico, especialmente en órganos clave para la supervivencia ex vitro, como raíces y hojas. El medio líquido mejora la absorción de nutrientes y hormonas, mientras que la aireación cíclica disminuye el estrés hipóxico común en sustratos saturados.

Tabla 17.Los SIT de tipo RITA® y el enraizamiento de genotipos de banano Williams

Sistemas	**IN (ciclos)**	**LH** (cm)	**AH** (cm)	**LRM** (cm)	**PF** (gramos)
MSS	0	2,1±0,21b	1,3±0,10b	2,3±0,14c	2,82±0,001 a
RITA®	3	3,0±0,28a	1,7±0,13a	6,3±0,19b	1,76±0,007 d
	6	3,3±0,32a	1,9±0,17a	6,7±0,79b	2,37±0,001 c
	8	3,7±0,19a	1,8±0,09a	13,0±1,5a	2,75±0,039 b
p-valor		0,004	0,012	0,001	0,001

Nota: Sistemas de medios de cultivo semisólido (MSS), sistemas de inmersión temporal (RITA®). Inmersiones (IN), longitud de hoja (LH), ancho de hoja (AH),

longitud de raíz mayor (LRM), peso fresco (PF). Los valores representan la media ± error estándar a partir de 3 repeticiones con 4 brotes tipo I cada una para cada variable. Letras diferentes en cada variable, indican diferencia significativa entre sistemas/ciclos de inmersión para p-valor≤0,05 (prueba de Duncan). Tomado de Moreno, (2023).

3.8.2 Aclimatación de vitroplantas procedentes de sistemas RITA®

Tras completar el enraizamiento, las vitroplantas provenientes de MSS y de los tres ciclos de inmersión en RITA® fueron sometidas a un proceso estandarizado de aclimatación. Éste consistió en tres fases:

- **Microtúnel (14 días):** ambiente de alta humedad y radiación controlada.
- **Bandejas (7 días):** transición a condiciones moderadas de ventilación y luz.
- **Fundas de polipropileno (21 días):** fortalecimiento fisiológico previo a vivero.

La evaluación se realizó a los 21 y 42 días, considerando variables como número de hojas, longitud y ancho de pseudotallo y dimensiones foliares.

3.8.3 Respuesta a los 21 días de aclimatación

En esta etapa (Tabla 18), aunque el número de hojas no mostró diferencias significativas, sí se encontraron variaciones en la longitud y ancho de pseudotallo y en las dimensiones foliares.

Las plantas provenientes de RITA® con 6 ciclos presentaron el mayor desarrollo foliar, lo cual contribuyó a una supervivencia del 100% durante las primeras semanas ex vitro.

El tratamiento con 3 inmersiones mostró nuevamente los valores más bajos, confirmando su menor eficiencia fisiológica durante la etapa de enraizamiento.

3.8.4 Respuesta a los 42 días de aclimatación

En salida de vivero (Tabla 18), se observaron marcadas diferencias entre tratamientos:

Las vitroplantas generadas con 8 ciclos de inmersión alcanzaron la mayor calidad global, caracterizadas por pseudotallos más largos y anchos.

En términos de desarrollo foliar, los sistemas líquidos mostraron valores comparables al MSS, pero con mayor uniformidad y vigor.

Los tratamientos de 6 ciclos mantuvieron un buen desempeño, mientras que el de 3 ciclos fue el menos favorable.

Estos resultados confirman que el número de inmersiones influye directamente en el desempeño ex vitro, siendo las 6–8 inmersiones las condiciones óptimas en el sistema RITA®.

3.9 Implicaciones para la producción comercial de banano

Los hallazgos de este estudio (Tabla 15), destacan que:

- El sistema RITA® es altamente eficiente para el enraizamiento de vitroplantas de banano, siempre que se utilicen ciclos adecuados de inmersión.

- Las plantas provenientes de sistemas líquidos muestran un mejor desarrollo radicular y foliar, lo que aumenta la probabilidad de supervivencia durante la aclimatación.

- Los ciclos de inmersión 6 y 8 ofrecen los mejores resultados tanto in vitro como ex vitro, convirtiéndolos en parámetros recomendables para protocolos de producción a escala comercial.

- El desempeño fisiológico superior de las plantas producidas en RITA® representa una ventaja competitiva frente a los sistemas tradicionales en MSS, las variables longitud y ancho de pseudotallo al momento de salida de aclimatación confirmaron la calidad de las vitroplantas. Resultados que brindan efectividad en estos procesos biológicos y especialmente para laboratorios que buscan optimizar tiempos, calidad y rendimiento.

Tabla 18.Respuesta ex vitro de genotipos de banano Williams generadas en medio semisólido o mediante sistemas de inmersión temporal RITA® con 3, 6 y 8 inmersiones diarias.

Aclimatación (días)	**Sistemas**	**IN (ciclos)**	**LP** (cm)	**AP** (cm)	**AH** (cm)
21	**MSS**	0	3,2±2,69b	0,66±0,02ab	2,7±0,18b
	RITA®	3	5,7±0,18a	0,60±0,02b	2,7±0,03b
		6	3,1±0,25b	0,72±0,02a	3,2±0,03a
		8	3,6±0,19b	0,63±0,01ab	2,8±0,13b
	p-valor		0,000	0,011	0,001
42	**MSS**	0	4,8±0,37bc	0,70±0,05b	5,6±0,59a

	3	5,3±0,01ab	0,70±0,01b	2,8±0,08b
RITA®	6	3,5±0,30c	0,74±0,02b	3,8±0,05ab
	8	5,9±0,02a	0,82±0,01a	5,7±0,03a
p-valor		0,001	0,007	0,001

Nota: Sistemas de medios de cultivo semisólido (MSS), sistemas de inmersión temporal (RITA®). Inmersiones por día (IN), longitud de pseudotallo (LP), ancho de pseudotallo (AP), ancho de hoja (AH). Los valores representan la media ± error estándar a partir de 3 repeticiones con 4 brotes tipo I cada una para cada variable. Letras diferentes en cada variable, indican diferencia significativa entre sistemas/ciclos de inmersión para p ≤ 0,05 (prueba de Duncan) y en número hojas (NH) mediante prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes. Tomado de Moreno, (2023).

En la figura 17, se emuestra el vigor de las vitroplatas obtenidas en SIT evidenciaron un desarrollo notablemente superior del sistema radicular, tanto in vitro con raíces más largas y mejor estructuradas (Figura 17E–G)— como durante la fase ex vitro. Este comportamiento se acentuó especialmente en los tratamientos sometidos al mayor número de ciclos de inmersión, los cuales generaron plantas de mayor vigor, con un crecimiento más uniforme y una expresión morfológica sobresaliente a lo largo de todas las etapas de aclimatación (Figura 17G–K).

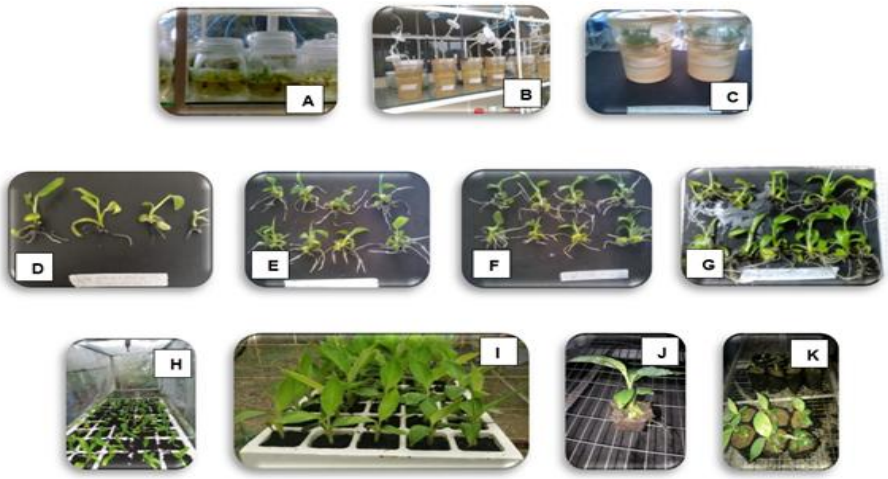


Figura 31.Los SIT y respuesta de los ciclo de inmersiones en el enraizamiento y respuesta ex vitro de genotipos de banano Williams.

Nota: El enraizamiento tuvo lugar durante 3 semanas en MMS o biorreactores con 4 minutos de inmersión 3, 6 o 8 veces al día. A) Sistemas de medios de cultivo semisólido (MSS), B) Sistemas de inmersión temporal RITA®, C) Sistemas de inmersión temporal RITA® con vitroplantas enraizadas, D) Vitroplantas obtenidas en MSS, E-G) Vitroplantas obtenidas en RITA® con 3 (E), 6 (F) y 8 (G) ciclos de inmersiones, H) Microtúnel de endurecimiento, I) Vitroplantas de 3 semanas en bandeja, J) Calidad de vitroplantas de 3 semanas para trasplante a funda, K) Vitroplantas (42 días de aclimatación) en funda de polipropileno. Tomado de Moreno, (2023).

3.10 Resumen

El Sistema de Inmersión Temporal (SIT) es una técnica avanzada de cultivo in vitro que ha optimizado la micropropagación de plantas comerciales como el banano. A diferencia de los métodos tradicionales en medios semisólidos, el SIT utiliza medios líquidos en los que los explantes se sumergen de forma intermitente, mejorando la oxigenación, absorción de nutrientes y reduciendo la hiperhidricidad. Este sistema surge para superar limitaciones del cultivo convencional, como baja tasa

de multiplicación, acumulación de metabolitos tóxicos y problemas fisiológicos por contacto constante con el medio. Los SIT comprenden sistemas comerciales como RITA®, SESIT® y MASIT®, así como versiones artesanales y biorreactores personalizados, que permiten adaptar el sistema a distintos contextos de producción o investigación. Sus principios fundamentales incluyen inmersiones breves y controladas, intervalos definidos, aireación adecuada y separación del medio durante el tiempo no sumergido, favoreciendo el crecimiento homogéneo y el vigor de las plántulas. El SIT ha demostrado eficacia en la multiplicación de brotes, crecimiento y elongación de vitroplantas, y pre-enraizamiento, fortaleciendo plántulas antes del enraizamiento definitivo y reduciendo problemas como la hiperhidricidad. Entre sus ventajas destacan mayor tasa de multiplicación, uniformidad y homogeneidad, ahorro de medio y mano de obra, reducción del uso de agar y facilidad de escalamiento. A pesar de sus beneficios, los SIT presentan desafíos como el riesgo de contaminación microbiana, la necesidad de mantenimiento técnico especializado, la capacitación del personal y alto costo inicial. En conclusión, los SIT constituye una herramienta estratégica para la micropropagación de banano, la optimizando de la productividad, la calidad de plántulas y la eficiencia de recursos, siendo clave para programas de mejoramiento genético y producción a gran escala.

3.11 Preguntas de reflexión

1. La fase de pre-enraizamiento en SIT fortalece las plántulas antes de su aclimatación. ¿Qué importancia tiene esta etapa para el éxito de la micropropagación a gran escala y la supervivencia en campo?

2. Considerando la contaminación microbiana como un desafío, ¿qué estrategias integrales implementarías para minimizar riesgos sin afectar la productividad en SIT?

3. Reflexiona sobre el impacto ambiental y económico de sustituir medios semisólidos por líquidos en SIT. ¿Qué beneficios y limitaciones implica esta decisión para laboratorios de producción vegetal?

4. Imagina que debes diseñar un SIT personalizado para una variedad de banano específica. ¿Qué parámetros críticos ajustarías y por qué?

5. ¿Cómo puede el uso de SIT contribuir a la sostenibilidad en la micropropagación de cultivos comerciales como el banano?

6. ¿Qué aprendizajes sobre automatización, manejo aséptico y control de parámetros crees que son esenciales para implementar exitosamente un sistema SIT en un laboratorio de biotecnología vegetal?

3.12 Actividad práctica sugerida

Evaluación de la Eficiencia de un Sistema de Inmersión Temporal Artesanal en Banano

Objetivo

Analizar el impacto de la frecuencia y duración de la inmersión en el crecimiento, vigor y pre-enraizamiento de plántulas de banano mediante el uso de un sistema de inmersión temporal (SIT) artesanal.

Materiales

- Explantes de banano (brotes jóvenes).
- Frascos de vidrio o recipientes plásticos transparentes.

- Bombas de aire y válvulas para regular la inmersión intermitente.
- Medio de cultivo líquido enriquecido con nutrientes y reguladores de crecimiento
- (incluyendo auxinas para promover el pre-enraizamiento).
- Cronómetro o temporizador para programar los ciclos de inmersión.
- Pinzas, guantes, mascarilla y materiales de esterilización (autoclave o alcohol al
- 70 %).
- Cámara de crecimiento o espacio con condiciones controladas de temperatura y luz.

Procedimiento

1. Construir el SIT artesanal conectando los frascos a las bombas de aire, asegurando la

esterilidad de todos los componentes mediante técnicas adecuadas de desinfección.

2. Colocar los explantes en los frascos con medio líquido, garantizando que no permanezcan completamente sumergidos de forma continua.

3. Establecer ciclos de inmersión intermitente con variaciones en frecuencia (por ejemplo, 2, 4 y 6 veces al día) y duración (1, 5 y 10 minutos).

4. Mantener condiciones ambientales controladas: temperatura entre 24-26°C, fotoperiodo de 16/8 horas (luz/oscuridad) y luz de intensidad moderada.

5. Realizar observaciones y registros semanales, evaluando los siguientes parámetros:

a) Número de brotes por explante.

b) Longitud de tallos y hojas.

c) Desarrollo de raíces adventicias (pre-enraizamiento).

d) Presencia de hiperhidricidad o vitrificación.

e) Comparar los resultados entre los distintos tratamientos de inmersión, documentando el crecimiento y la calidad general de las plántulas.

Resultados Esperados

- Identificación de la combinación óptima de frecuencia y duración de inmersión que maximice la multiplicación y el vigor de las plántulas.
- Obtención de plántulas con un desarrollo radicular adecuado y niveles mínimos de hiperhidricidad.
- Comprensión práctica de cómo los parámetros críticos del SIT influyen en el crecimiento y la calidad de las vitroplantas.

Reflexión

Reflexionar sobre cómo la intermitencia y el control del contacto con el medio líquido

afectan la eficiencia del sistema, así como la supervivencia y adaptación de las plántulas

durante el trasplante ex vitro.

CAPÍTULO IV

4 APLICACIONES COMERCIALES Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

4.1 Producción a gran escala de vitroplantas

La producción a gran escala de vitroplantas de banano se ha consolidado como una herramienta estratégica para suplir la creciente demanda de material de siembra de alta calidad, libre de patógenos y genéticamente uniforme. Este proceso ha evolucionado desde métodos tradicionales de cultivo en medios sólidos hacia sistemas más sofisticados, como los Sistemas de inmersión temporal (SIT), que permiten una multiplicación eficiente y reducción de costos operativos (Uma et al., 2023).

4.1.1 Etapas fundamentales

El proceso de micropropagación a gran escala se estructura en cuatro fases esenciales:

Inicio de cultivos asépticos: selección y esterilización de explantes provenientes de meristemos apicales o yemas laterales.

Multiplicación de brotes: se emplean reguladores como 6-bencilaminopurina (BAP) y thidiazuron (TDZ), que han mostrado tasas de multiplicación de hasta 9.16 brotes por explante en la variedad BatSITa (Kumari et al., 2025).

Enraizamiento in vitro: el uso de auxinas como ácido indolbutírico (IBA) y ácido naftalenacético (NAA) facilita un desarrollo radicular robusto y acelera la aclimatización (Plants, 2025).

Acondicionamiento ex vitro (aclimatización): etapa crítica donde las plántulas deben adaptarse gradualmente a condiciones de vivero, reduciendo las pérdidas tras la transferencia al campo.

4.1.2 Tecnologías de escalamiento

Los SIT han revolucionado la producción masiva al mejorar la aireación, reducir la hiperhidricidad y aumentar la tasa de multiplicación. En el cultivar Kluai Numwa Pakchong 50, el uso de medios líquidos con NAA o IBA (0.5–1.0 mg/L) generó raíces más largas y en mayor número que en medios semisólidos (Phytotechnology, 2023).

De igual forma, investigaciones en el cultivar Rasthali (AAB) demostraron que los SIT, combinados con monitoreo genético mediante SSR y citometría de flujo, garantizan alta fidelidad clonal, asegurando homogeneidad genética incluso en producción industrial (Uma et al., 2023).

4.1.3 Ventajas del escalamiento in vitro

- Producción continua y masiva de plántulas en períodos reducidos.
- Reducción de la variabilidad genética, garantizando homogeneidad en campo.
- Plántulas libres de virus, bacterias y hongos, condición esencial para mercados internacionales.

La optimización de costos mediante autonomía y uso de medios líquidos en lugar de sólidos.

4.1.4 Limitaciones y desafíos

- Contaminación microbiana, que puede comprometer lotes completos.
- Costos iniciales elevados en infraestructura y capacitación de personal especializado.
- Necesidad de protocolos específicos para cada cultivar, ya que la respuesta a los reguladores de crecimiento varía según el genotipo (Kumari et al., 2025).
- Etapa de aclimatización como punto crítico que determina el éxito final de la propagación.

4.1.5 Perspectivas futuras

Las investigaciones apuntan al desarrollo de biorreactores de bajo costo y a la incorporación de tecnologías de automatas inteligente, con sensores que monitorean pH, nutrientes y luminosidad como se muestra en los modelos en la tabla 19. Asimismo, se exploran enfoques combinados con edición genética (CRISPR/Cas9) para obtener plantas con mayor tolerancia a Fusarium TR4 y otras enfermedades emergentes (Plants, 2025).

Tabla 19.Modelos propuestos de producción a gran escala de vitroplantas

Modelo	**Capacidad productiva**	**Ventajas**	**Limitaciones**	**Ejemplo**
Medios sólidos	Miles – decenas de miles/año	Bajo costo inicial, sencillo	Mano de obra intensiva, menor eficiencia	BatSITa (ABB) con BAP+TDZ (Kumari et al., 2025)
SIT	Cientos de miles/año	Alta tasa de multiplicación	Requiere inversión	Kluai Numwa Pakchong 50 con

		, menor hiperhidricidad	media, protocolos específicos	IBA (Phytotechnology, 2023)
Industrial automatizado	Millones/año	Producción continua, reducción de costos, monitoreo avanzado	Alta inversión inicial	Empresas asiáticas con SIT automatizados (Uma et al., 2023; Plants, 2025)

Fuente: Elaboración propia

4.2 Modelos de transferencia tecnológica en banano para pequeños productores

4.2.1 La Agricultura 4.0 y su aplicabilidad en pequeños productores

La agricultura 4.0 representa una evolución de la agricultura de precisión mediante el uso de tecnologías como Internet de las Cosas (IoT), machine learning y análisis de datos. Estas herramientas se aplican en la cadena de valor del sector agropecuario, incluyendo la producción de banano. No obstante, lograr la meta de “Hambre Cero” requiere la integración de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) para que el sector primario impulse desarrollo económico y sostenible (Tovar-Quiroz, 2023).

A nivel internacional los modelos de innovación agrícolas responden a tres ejes fundamentales como se representa en la figura 32:

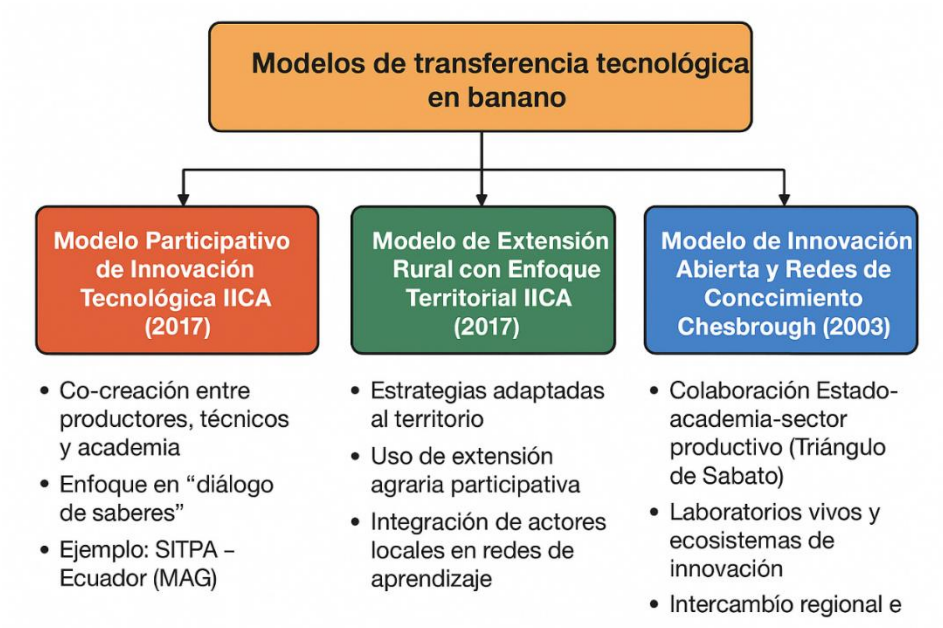


Figura 32.Modelos de transferencia de tecnología en banano.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Modelos de innovación agrícola en Ecuador

Los sistemas de innovación agrícola en Ecuador involucran diversos actores públicos y privados dentro de un entorno de instituciones, incentivos, tecnología y recursos, con el objetivo de mejorar la competitividad y sostenibilidad de la producción agrícola, incluyendo el banano (Moreno & Vergara, 2021). Propuestas de modelos aplicados y por aplicar son propuestos en la figura 1.

4.2.3 Innovación agroindustrial de banano orgánico

Proyectos en regiones como La Libertad y Piura han articulado organizaciones de productores con actores público-privados para

mejorar la competitividad. Se han implementado innovaciones tecnológicas al alcance de pequeños productores, logrando certificaciones para mercados internacionales (Cooperación Suiza en Perú, 2022).

4.2.4 Políticas públicas y estrategias institucionales

El Plan Estratégico Institucional del MAG 2021–2025 busca fortalecer la competitividad de pequeños productores de banano mediante incentivos agropecuarios, tecnificación y capacitación en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), con metas de certificación y formación para cientos de miles de productores (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2021).

4.3 Propuesta de Modelos de Transferencia Tecnológica para Pequeños Productores en la Provincia de El Oro

4.3.1 Modelo Participativo de Innovación Tecnológica

Este modelo promueve la colaboración activa entre productores, técnicos y centros de investigación para adaptar tecnologías a las condiciones locales. La co-creación de conocimiento permite que las innovaciones sean relevantes y fácilmente adoptables por los productores (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2021).

Aplicación en El Oro:

El MAG ha beneficiado a más de 1000 pequeños productores con paquetes tecnológicos y títulos de propiedad, lo que mejora la seguridad jurídica y el acceso a recursos (MAG, 2021).

4.3.2 Centros de Transferencia Tecnológica Locales

Estos centros funcionan como puntos estratégicos de capacitación, demostración y asistencia técnica. Permiten que los productores aprendan y adopten nuevas prácticas tecnológicas directamente en sus comunidades (MAG, 2021).

Ejemplo:

La implementación del **Proyecto Nacional de Innovación Tecnológica Participativa y Productividad Agrícola (PITPPA)** en El Guabo, El Oro. En el cantón El Guabo se estableció un centro de transferencia para productores bananeros, con apoyo del PITPPA, que optimiza la comercialización y reduce costos de transporte (MAG, 2016).

Modelo de Extensión Rural con Enfoque Territorial

Este enfoque adapta la transferencia tecnológica a las necesidades específicas de cada territorio, integrando a actores locales en la planificación y ejecución de actividades (MAG, 2021).

Aplicación en El Oro:

Se ha implementado en cantones como Arenillas, Atahualpa, Balsas, Piñas, Chilla y Las Lajas, entregando insumos y asistencia técnica para fortalecer la productividad y competitividad de los pequeños productores. Así como aplicado en Escuelas de Campo del MAG en Pasaje y Santa Rosa.

4.3.3 Alianzas Público-Privadas para la Innovación

Este modelo fomenta la cooperación entre entidades públicas, privadas y ONG para desarrollar y difundir tecnologías. Las alianzas permiten compartir recursos y experiencias, aumentando la eficacia de la trasferencia de tecnología (TT) (MAG, 2021).

Aplicación en El Oro:

Se han promovido alianzas para implementar tecnologías en cultivos de banano, incorporando prácticas sostenibles y mejorando la competitividad en mercados internacionales (MAG, 2021).

4.3.4 Modelo de Innovación Abierta y Redes de Conocimiento

Este modelo se basa en la creación de redes de intercambio de conocimiento entre productores, investigadores, universidades, empresas y organizaciones no gubernamentales. La idea central es que la innovación no se produce únicamente en laboratorios o centros de investigación, sino que se genera de manera colaborativa**,** permitiendo que las tecnologías se adapten rápidamente a las necesidades de los productores (Chesbrough, 2003).

Principales características:

- Co-creación de tecnologías entre múltiples actores.
- Difusión de conocimientos a través de plataformas digitales, talleres y comunidades de práctica.
- Promoción de buenas prácticas sostenibles y comercialización de productos.

Aplicación en la Provincia de El Oro

- **Red de productores de banano y cacao:** Intercambio de experiencias sobre control biológico de plagas y manejo de plántulas micropropagadas.

- **Colaboración con universidades y centros de investigación:** Adaptación de tecnologías de micropropagación (SIT), uso de bioinsumos y manejo agroecológico adaptado a condiciones localesy riego eficiente a condiciones locales.

- **Asistencia técnica y capacitaciones periódicas:** Uso de plataformas digitales y visitas de campo para mejorar la adopción tecnológica (MAG, 2021).

Recomendaciones Clave

- Realizar **diagnósticos participativos** para identificar necesidades y capacidades locales.

- Implementar **programas de capacitación continua** para fortalecer habilidades técnicas y empresariales.

- Establecer **sistemas de seguimiento y evaluación** que permitan ajustes en las estrategias de TT.

- Promover **prácticas agrícolas sostenibles** que garanticen la viabilidad a largo plazo (MAG, 2021; MAG, 2016).

- Plan Piloto de Innovación Rural en Machala.

4.4 Costos, beneficios y sostenibilidad

Costos

Los SIT permiten la producción masiva de vitroplantas de banano, pero requieren una **inversión inicial considerable** en infraestructura y equipamiento:

- **Infraestructura:** Biorreactores, sistemas de control ambiental, iluminación, bombas y tanques de inmersión.
- **Materiales y reactivos:** Medios de cultivo, reguladores de crecimiento, nutrientes y desinfectantes.
- **Mano de obra calificada:** Técnicos especializados en micropropagación y mantenimiento de sistemas de inmersión temporal.

Estudios recientes estiman que el **costo de producción por plántula en SIT** puede ser menor que el de métodos convencionales a gran escala debido a la eficiencia en la multiplicación, aunque depende de la escala de producción y optimización de recursos (Meneses Montesdeoca et al., 2011; Ugarte Barco et al., 2021) como se aprecia en el modelo de producción propuesto en la tabla 2.

2. Beneficios

Los SIT ofrecen múltiples ventajas frente a sistemas tradicionales de propagación in vitro:

- **Alta eficiencia de multiplicación:** Mayor número de plántulas por unidad de tiempo comparado con tubos de ensayo tradicionales (Posada-Pérez, 2003).

- **Mejora de la uniformidad y calidad:** Plántulas homogéneas y vigorosas, con menor variabilidad genética.

- **Reducción de costos de mano de obra:** Menor manipulación individual de plántulas, disminuyendo errores y contaminación.

- **Escalabilidad:** Posibilidad de producir grandes volúmenes de vitroplantas en menor tiempo, lo que facilita la comercialización y la distribución (Pérez, 2024).

- **Flexibilidad en el manejo:** Posibilidad de ajustar ciclos de inmersión y composición del medio según las necesidades del cultivar.

3. Sostenibilidad

Los SIT contribuyen a la sostenibilidad ambiental y económica en la micropropagación de banano:

- **Reducción de residuos sólidos:** Menor uso de recipientes y consumibles plásticos al centralizar la producción en biorreactores (Ontaneda, 2020).

- **Uso eficiente de nutrientes y agua:** Sistemas cerrados que permiten la recirculación del medio de cultivo.

- **Promoción de plantaciones sanas:** Plántulas libres de patógenos, reduciendo la necesidad de fitosanitarios químicos en campo.

- **Sostenibilidad económica:** A pesar de la inversión inicial, la reducción de costos operativos y la mayor productividad hacen rentable la tecnología a mediano y largo plazo (Colmenares, 2003; Meneses Montesdeoca et al., 2011).

Tabla 20.Modelo de producción propuesto con implementación de SIT

Aspecto	**Descripción**	**Referencia (últimos 5 años)**
Costos Iniciales	Inversión en laboratorio (equipamiento, biocámaras, autoclaves, SIT), medios de cultivo, insumos químicos, personal especializado. Estimación: USD 50,000 - 100,000 para una planta piloto.	Smith et al., 2021; Zhang et al., 2022
Costos Operativos	Mano de obra técnica, energía eléctrica, mantenimiento de sistemas de inmersión temporal, renovación de medios, control sanitario. Aproximadamente USD 0,50 por vitroplanta.	Kumar et al., 2020; Oliveira et al., 2023
Beneficios	Producción rápida de plantas uniformes y libres de patógenos. Mayor supervivencia en campo (>90%), reducción de ciclos vegetativos, posibilidad de exportación de plántulas certificadas.	Singh et al., 2021; Pérez et al., 2022
Retorno de Inversión (ROI)	Con una producción de 1 millón de vitroplantas/año, retorno estimado entre 12-18 meses.	Zhang et al., 2022

Sostenibilidad	Uso eficiente de recursos (agua, nutrientes, energía), reducción de pesticidas gracias a plántulas libres de virus, posibilidad de escalabilidad a sistemas industriales sin degradar el medio ambiente.	Oliveira et al., 2023; Pérez et al., 2022
Impacto Social	Generación de empleo técnico, fortalecimiento de la agricultura local, acceso a plántulas de calidad para pequeños productores.	Singh et al., 2021

Fuente: Elaboración propia

4.5 Resumen

El presente capítulo aborda las aplicaciones comerciales y la transferencia tecnológica en la micropropagación de banano, destacando la producción a gran escala de vitroplantas mediante sistemas avanzados como biorreactores de inmersión temporal (SIT). Este proceso asegura plántulas libres de patógenos, genéticamente uniformes y con alta tasa de multiplicación, estructurado en cuatro etapas: inicio de cultivos asépticos, multiplicación de brotes mediante reguladores como BAP y TDZ, enraizamiento in vitro con auxinas (IBA y NAA) y aclimatación ex vitro. Los SIT permiten escalabilidad, reducción de hiperhidricidad y alta fidelidad genética, aunque presentan desafíos como contaminación microbiana, alta inversión inicial y necesidad de protocolos específicos por cultivar. Las perspectivas futuras incluyen SIT de bajo costo, inteligente y edición genética (CRISPR/Cas9) para resistencia a enfermedades. En cuanto a la transferencia tecnológica para pequeños productores, se destacan modelos participativos, centros locales de transferencia, extensión rural con enfoque territorial, alianzas público-

privadas e innovación abierta mediante redes de conocimiento. Estas estrategias buscan mejorar la competitividad, promover buenas prácticas agrícolas y facilitar la adopción de tecnologías en la Provincia de El Oro, con ejemplos de implementación en cantones como El Guabo, Pasaje y Santa Rosa. Finalmente, el uso de SIT ofrece ventajas económicas, ambientales y sociales: producción rápida y escalable, reducción de costos y mano de obra, eficiencia en recursos, plántulas sanas y retorno de inversión estimado en 12–18 meses, generando además empleo técnico y fortalecimiento del sector agrícola local, consolidando la micropropagación como herramienta sostenible y estratégica en la producción de banano.

4.6 Preguntas de reflexión

En vista de fomentar el análisis crítico y conexión con la práctica se indica una serie de preguntas a ser razonadas por el lector:

1.¿De qué manera los sistemas de inmersión temporal (SIT) mejoran la eficiencia y calidad de las vitroplantas de banano en comparación con los métodos tradicionales?

2.¿Cuáles son los principales desafíos que enfrentan los pequeños productores al adoptar tecnologías de micropropagación y cómo podrían superarse?

3.¿Cómo contribuyen los modelos participativos de innovación tecnológica y las redes de conocimiento a la sostenibilidad y competitividad del sector bananero?

4.¿Qué impactos ambientales y sociales pueden derivarse del uso de Sistemas de Inmersión Temporal (SIT) en la producción de plántulas de banano?

5.¿En qué medida la integración de Agricultura 4.0 y herramientas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) puede transformar la producción y comercialización del banano en la provincia de El Oro?

6.Considerando la alta inversión inicial de los biorreactores y automatización, ¿cómo se podría garantizar el retorno de inversión para pequeños y medianos productores?

7.¿Qué papel juega la aclimatación ex vitro en el éxito final de la micropropagación y por qué se considera un punto crítico en el proceso?

8.¿Cómo podrían las políticas públicas y las alianzas público-privadas potenciar la adopción de tecnologías innovadoras entre los pequeños productores de banano?

4.7 Actividad práctica sugerida

Actividad práctica: Análisis y diseño de un modelo de transferencia tecnológica para pequeños productores de banano

Objetivo: Aplicar los conceptos de micropropagación y transferencia tecnológica para evaluar la viabilidad de implementar sistemas de vitropropagación y modelos de innovación en un contexto local.

Materiales y recursos:

- Acceso a información sobre cultivares locales de banano.

- Datos de costos, insumos y capacidad productiva de laboratorios o centros de micropropagación (reales o simulados).
- Plantilla para diseño de modelo de transferencia tecnológica (digital o impresa).
- Internet para consulta de ejemplos de TIB, SIT y Agricultura 4.0.

Procedimiento:

1. **Investigación:** Identificar los cultivares de banano más representativos en la región y sus necesidades tecnológicas.
2. **Evaluación de sistemas de micropropagación:** Comparar ventajas, limitaciones y costos de métodos tradicionales frente a TIB o SIT.
3. **Diseño del modelo de transferencia tecnológica:**

   - Seleccionar uno de los modelos: participativo, extensión rural, alianzas público-privadas o innovación abierta.
   - Determinar actores involucrados, recursos necesarios, etapas de capacitación y mecanismos de seguimiento.

4. **Propuesta de implementación:** Redactar un plan piloto indicando cómo los pequeños productores podrían adoptar la tecnología, mejorar la calidad de sus plántulas y aumentar la productividad.

5. **Presentación y discusión:** Exponer el modelo diseñado ante el grupo, identificando fortalezas, desafíos y estrategias de mitigación.

Resultados esperados:

- Comprensión de la micropropagación a gran escala y su escalabilidad.
- Capacidad de analizar costos, beneficios y sostenibilidad de los sistemas tecnológicos.
- Desarrollo de habilidades para diseñar estrategias de transferencia tecnológica adaptadas a productores locales.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Martínez, J. E., Quevedo Guerrero, J. N., Chabla Carrillo, J. E., & Barrezueta Unda, S. A. (2023).

Aguirre Villaroel, G., Baudoin, J.-P., & Leigue, L. (Eds.). (2016). Aplicación del cultivo de tejidos en la multiplicación y conservación de los recursos fitogenéticos. Universidad Mayor de San Simón. Recuperado de https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/212904/1/Aguirre%2C%20Baudoin%2C%20Leigue%20UMSS%202016.pdf

Albarrán, J., Bertrand, B., Etienne, H., Posada, H., & Lashermes, P. (2005).
Comparative histology of somatic embryogenesis in coffee and banana. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 80, 255–261.

Albarrán, J., Bertrand, B., Lartaud, M., & Etienne, H. (2005). Cycle characteristics in a temporary immersion bioreactor: Effects on plantain micropropagation. Plant Cell, SITsue and Organ Culture, 82(1), 51–59. https://doi.org/10.1007/s11240-004-6434-7

Albarrán, J., Bertrand, B., Lartaud, M., & Etienne, H. (2005). Temporary immersion system improves the multiplication rate and plantain quality in banana micropropagation. Plant Cell, SITsue and Organ Culture, 82(1), 1–9. https://doi.org/10.1007/s11240-004-7697-6

Arinaitwe, G., Nakato, G. V., & Tinzaara, W. (2021). Enhancing banana tissue culture systems for mass propagation and disease-free planting material. African Journal of Biotechnology, 20(3), 85–92.

Bello-Bello, J. J., Cruz-Cruz, C. A., & Pérez-Guerra, J. C. (2019). A temporary immersion

Benítez, J., Meneses, L. S., & Morillo, E. (2011). Validación de la micropropagación de banano Musa AAA var. Williams y mora de castilla sin espinas (Rubus glaucus Benth) bajo sistemas de inmersión temporal (SIT). INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Biotecnología. Recuperado de https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2464

Carlier, J., Caruana, M. L., & Pinel-Galzi, A. (2009). Diagnostic techniques for banana viruses. Musapedia: Encyclopedia of Banana. Bioversity International.

Cejas, I., Capote, A., Santos, R., Jiménez, E., & Pérez, N. (2011). Efecto del AIA en la rizogénesis de vitroplantas de plátano. Biotecnología Vegetal, 11(3), 159–165.

CIRAD. (s.f.). RITA®: Recipient for automated temporary immersion. CIRAD.

Colmenares, M., & Giménez, C. (2003). Estrés fisiológico y acumulación de fenoles en cultivos in vitro de plantas tropicales. Agronomía Tropical, 53(1), 57–66.

Colmenares, M., & Giménez, C. (2003). Multiplicación in vitro de Musa spp. mediante sistema de inmersión temporal. Revista de la Facultad de Agronomía, 20(4), 468–477. Recuperado de https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-78182003000400007&script=sci_arttext

Cote, F., Domergue, R., Monmarson, S., Schwendiman, J., Teisson, C., & Ganry, J. (2000).
Micropropagation of bananas and plantains (Musa spp.). Infomusa, 9(2), 6–10.

Craft, B. D., Kerrihard, A. L., Amarowicz, R., & Pegg, R. B. (2012). Phenolic compounds and antioxidant activity. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 11(2), 148–173.

Chesbrough, H. W. (2003). Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology. Harvard Business School Press.

China, V. H., Ramesh, B., & Karthikeyan, M. (2011). Antioxidant activity in Musa spp. during in vitro culture. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 20(2), 129–135.

Damasco, O. P., Graham, G. C., Henry, R. J., Adkins, S. W., Smith, M. K., & Godwin, I. D. (1996).
Random amplified polymorphic DNA (RAPD) detection of dwarf off-types in micropropagated Cavendish (AAA) bananas. Plant Cell Reports, 16(2), 118–123.

Dita, M., Pérez-Vicente, L., & Garming, H. (2024). Manejo integrado de enfermedades del banano: avances y desafíos. FAO.

Dita, M., Silva, S. J. da, & Viljoen, A. (2024). Fusarium Tropical Race 4 in Latin America and the Caribbean: Status and global research advances towards disease management. Frontiers in Plant Science, 14, 1397617. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397617

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, 196, 3–14.

Erol, M. H., Dönmez, D., Biçen, B., Şimşek, Ö., & Aka Kaçar, Y. (2023). Modern approaches to in vitro clonal banana production: Next-generation tissue culture systems. Horticulturae, 9(10), 1154. https://doi.org/10.3390/horticulturae9101154

Erol, O., Demir, Y., & Akin, M. (2023). Advances in micropropagation of banana (Musa spp.): A review. Plant Biotechnology Reports, 17(1), 23–32.

Escaleras-Medina, J. C., Castillo Herrera, S. E., & Sánchez-Urdaneta, A. B. (2022). Aclimatización de vitroplantas de banano con hongos micorrízicos arbusculares. Revista Científica Agroecosistemas, 10(2), 15–23. Recuperado de https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/535

Escalona, M., et al. (2013). Temporary immersion systems in plant micropropagation. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 113, 1–23. https://doi.org/10.1007/s11240-012-0256-3

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., & González, J. L. (2013). Aplicación del sistema de inmersión temporal para la propagación de Musa spp. Biotecnología Vegetal, 13(2), 89–95.

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., González, J. L., Desjardins, Y., & Borroto, C. G. (1999). Pineapple [Ananas comosus (L.) Merr.] micropropagation in temporary immersion systems. Plant Cell Reports, 18(9), 743–748.

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., González, J. L., Desjardins, Y., & Borroto, C. (1999). Pineapple (Ananas comosus L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. Plant Cell Reports, 18(9), 743–748.

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., González, J. L., Desjardins, Y., & Borroto, C. G. (2013). Pineapple micropropagation in temporary immersion systems. Plant Cell Reports, 22(1), 17–25.

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., González, J. L., Desjardins, Y., & Borroto, C. G. (1999). Pineapple (Ananas comosus L. Merr.) micropropagation in temporary immersion systems. Plant Cell Reports, 18, 743–748.

Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, J. L., Daquinta, M., González, B. L., & Borroto, C. G. (2003). Producción de vitroplantas de banano mediante sistemas de inmersión temporal. Biotecnología Vegetal, 3(1), 15–20.

Etienne, H., & Berthouly, M. (2002). Temporary immersion systems in plant micropropagation. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 69(3), 215–231.

Etienne, H., & Berthouly, M. (2002). Temporary immersion systems in plant micropropagation. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 69(3), 215–231.

Etienne, H., Berthouly, M., & Panta, S. (2013). Temporary immersion systems in plant micropropagation. Plant Biotechnology, 30(4), 295–306.

Etienne, H., Mulwa, R., & Swennen, R. (2018). The contribution of bioreactor technology to banana (Musa spp.) propagation and improvement. In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant, 54(6), 543–556.

FAO. (2019). Biotecnología y agricultura sostenible: Impacto en la producción agrícola mundial.

FAO. (2020). El impacto del banano en la economía agrícola mundial.

Foidl, N., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2001). The potential of Moringa oleifera for agricultural and industrial uses. Proceedings of the International Workshop on Moringa, 45–76.

García, M., López, R., & Herrera, J. (2018). Efecto de los sistemas de inmersión temporal en la reducción de la hiperhidricidad en cultivos in vitro de banano. Revista Colombiana de Biotecnología, 20(2), 45–52.

García-Ruiz, M., López-Bausitta, R., & Pérez-Jiménez, C. (2023). Potencial del extracto de Moringa oleifera como bioestimulante vegetal en cultivos tropicales. Revista Latinoamericana de Agroecología, 10(2), 145–158.

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G. (2008). Plant propagation by tissue culture (3rd ed.). Springer.

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G.-J. (2014). Plant propagation by tissue culture (3rd ed.). Springer.

Georgiev, V., Schumann, A., Pavlov, A., & Bley, T. (2014). Temporary immersion systems in plant biotechnology. Engineering in Life Sciences, 14(6), 607–613.

Gómez, L., & Alvarado, F. (2017). Efecto de hidrolizados proteicos en la multiplicación in vitro de musáceas. Cultivos Tropicales, 38(4), 52–60.

Graham, D., et al. (2018). Biotechnology in crop improvement: Bananas in the global context. Agricultural Sciences.

Habte, M., & Kumar, A. (2008). Mycorrhizal dependency of some tropical fruit crops. HortScience, 43(7), 2005–2008.

Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T., & Yermiyahu, U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake and quality. Plant and Soil, 383(1), 1–41.

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2010). Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. Plant Disease, 86(2), 190–204.

Herman, E. B. (2017). Plant tissue culture contamination: Challenges and opportunities. Acta Horticulturae, 1155, 269–278.

Hossain, M. A., & Roslan, H. A. (2014). Oxidative stress management during in vitro culture of plantlets: A review. Plant Cell Biotechnology Journal, 12(3), 89–104.

Hwang, H.-D., Kwon, S.-H., Murthy, H. N., Yun, S.-W., Pyo, S.-S., & Park, S.-Y. (2022). Temporary immersion bioreactor system as an efficient method for mass production of in vitro plants. Agronomy, 12(2), 346.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2017). Extensionismo Territorial en un Entorno de Innovación y Buenas Prácticas. México D.F. Recuperado de https://repositorio.iica.int/handle/11324/6975

Jiménez, H., & Ayala, R. (2020). Evaluación de extractos vegetales sobre Fusarium oxysporum f. sp. cubense en banano. Revista Fitopatológica Ecuatoriana, 39(1), 25–31.

Jiménez, V. M. (2017). Aplicaciones y avances en el cultivo in vitro del banano. Biotecnología Vegetal, 17(2), 93–100.

Jiménez, V. M. (2017). Biotecnología de banano y plátano: Fundamentos y aplicaciones. Editorial Universidad de Costa Rica.

Kasalab. (s.f.). El biorreactor RITA. Kasalab.

Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., et al. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. Journal of Plant Growth Regulation, 28, 386–399.

Kulesza, K., & Kocira, A. (2020). Plant-based extracts as eco-friendly biostimulants in agriculture. Sustainable Agriculture Reviews, 41, 215–240.

Kumari, P., Kumar, V. B., & Kumar, M. (2025). Standardization of in vitro micropropagation technique for multiplication of banana cv. BatSITa (ABB). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 14(2), 290–294. https://www.phytojournal.com/archives/2025.v14.i2.15300/

Le, K. C., Johnson, S., Aidun, C. K., & Egertsdotter, U. (2023). Temporary immersion bioreactor system for efficient micropropagation of Vaccinium corymbosum. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 153, 345–359.

Lorenzo, J. C., González, B., Escalona, M., & Daquinta, M. (2015). Producción masiva de vitroplantas de Musa spp. en sistemas de inmersión temporal. Biotecnología Aplicada, 32(3), 118–125.

Lorenzo, J. C., González, B., Escalona, M., Teisson, C., Espinosa, P., & Borroto, C. (1998). Sugarcane micropropagation using temporary immersion systems. Plant Cell Reports, 17(7), 527–531.

Loyola-Vargas, V. M., & Vázquez-Flota, F. (2006). Plant cell culture: Development and applications. Springer.

Martínez, M., & Espinoza, D. (2022). Aplicación foliar de extractos naturales sobre el rendimiento de banano (Musa AAA) en la región litoral. Agroinvestigación Ecuatoriana, 7(1), 89–97.

Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2014). The rhizosphere microbiome. FEMS Microbiology Reviews, 37(5), 634–663.

Méndez Alegría, A. Y. (2014). Uso de Recipientes de Inmersión Temporal Automatizados (RITA®) para la micropropagación comercial de vainilla... BUAP.

Méndez, P., Ramírez, L., & Cruz, E. (2022). Mejoras en la aclimatación de vitroplantas de banano utilizando pre-enraizamiento. Acta Agronómica, 71(1), 101–110.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2021). Plan Estratégico Institucional 2021–2025. https://www.agricultura.gob.ec/wp-

content/uploads/downloads/2023/07/PEI-MAG-2021-2025-22_04_2022-signed-signed-1_compressed.pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2016). Bananeros de El Guabo beneficiados con centro de transferencia. Recuperado de https://www.agricultura.gob.ec/bananeros-de-el-guabo-beneficiados-con-centro-de-transferencia/

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). Con paquetes tecnológicos y títulos de tierra se beneficia a productores de El Oro. Recuperado de https://www.agricultura.gob.ec/con-paquetes-tecnologicos-y-titulos-de-tierra-beneficia-a-productores-de-el-oro/

Mirzabe, A. H., Hajiahmad, A., Fadavi, A., & Rafiee, S. (2022). Temporary immersion systems (TIS): A comprehensive review. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 150, 413–427.

Moreno Herrera, A. (2023). Estudio sobre el efecto… (Tesis doctoral). Universidade da Coruña.

Moreno Silva, A., & Vergara, A. (2021). Sistemas de innovación agrícola: una mirada a la situación del sector agrícola ecuatoriano. Revista Científica ECOCIENCIA, 80(6). https://doi.org/10.21855/ecociencia.80.6

Moreno, A. (2023). Desarrollo de sistemas automatizados para el cultivo in vitro de banano. Universidad Técnica de Machala.

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum, 15(3), 473–497.

Murthy, H. N., Joseph, K. S., Paek, K. Y., & Park, S. Y. (2023). Bioreactor systems for micropropagation of plants. Frontiers in Plant Science, 14, 1159588.

Murthy, H. N., Joseph, K. S., Paek, K. Y., & Park, S. Y. (2023). Bioreactor systems for micropropagation of plants. Plants, 12(8), 1614.

Musabyimana, T., Samukange, T., & Tukamuhabwa, P. (2021). Enhancing nutrient density and postharvest quality in bananas through natural biostimulant extract applications. Journal of Food Composition and Analysis, 98, 103–117.

Niedz, R. P., et al. (2014). Advances in tissue culture for propagation of bananas and other crops. Horticultural Reviews.

Nouman, W., Basra, S. M. A., Farooq, M., Rehman, H. U., & Hussain, M. (2014). Moringa oleifera leaf extract: An innovative priming and foliar biostimulant. Journal of Agroforestry, 26(2), 1–9.

Ntui, V. O., Tripathi, L., & Tripathi, J. N. (2021). Regeneration and transformation of banana: Recent advances and future prospects. Biotechnology Advances, 50, 107769. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107769

Nwauzoma, A. B., & Jaja, E. T. (2013). A review of somaclonal variation in plant tissue culture. Asian Journal of Plant Sciences and Research, 3(1), 1–10.

Oyeyinka, S. A., & Afolayan, A. J. (2020). Comparative assessment of phenolic compounds and antioxidant activities of Musa spp. Journal of Food Quality, 2020, 1–11.

Pérez, J., Morales, D., & Quiroz, V. (2020). Producción masiva de vitroplantas de banano: revisión y perspectivas. Revista Ecuatoriana de Biotecnología, 9(3), 12–21.

Pérez, M. B. (2024). Propagación in vitro del cultivar de plátano burro 'INIVITPB' mediante el sistema de inmersión temporal. Bionatura Journal. Recuperado de https://bionaturajournal.com/2024.01.04.14.html

Pérez, N., Aguilar, M. J., & Jiménez, V. M. (2018). Virus detection in Musa spp. using RT-PCR and ELISA: A tool for healthy in vitro plant production. Acta Horticulturae, 1196, 17–22. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1196.3

Pérez, N., Escalona, M., & Capote, A. (2002). Efecto de reguladores de crecimiento en la rizogénesis de Musa spp. Biotecnología Vegetal, 2(1), 33–38.

Pérez, N., Morales, D., & Ayala, C. (2022). Protocolos de control de contaminación en el cultivo in vitro de banano. Revista de Biotecnología Tropical, 20(2), 112–120.

Phytotechnology. (2023). Temporary immersion bioreactor (TIB) system improves rooting and acclimatization of banana (Musa sp. cv. Kluai Numwa Pakchong 50). Horticulturae, 10(10), 1030. https://doi.org/10.3390/horticulturae10101030

Plants. (2025). Influence of triploid Musa spp. genome background and exogenous growth regulators on in vitro regeneration in plantains and bananas. Plants, 14(14), 2109. https://doi.org/10.3390/plants14142109

Quintanilla Yánez, A. D. (2022). Efecto del hongo Trichoderma como biofertilizante… Dspace UTB.

Ramírez, F., Delgado, M., & Soto, H. (2021). Influencia de auxinas en el pre-enraizamiento de banano. Journal of Plant Science and Biotechnology, 6(4), 178–186.

Regueira, M., Bogo, A., & Sánchez, C. (2018). Micropropagation of willow using temporary immersion bioreactors. Forestry Research, 2(1), 45–53.

Rodríguez, L., & García, M. (2018). Efecto de biofertilizantes microbianos... Revista de Ciencias Agrícolas, 35(2), 89–99.

Roels, S., Escalona, M., Cejas, I., Noceda, C., Rodriguez, R., Canal, M. J., & Debergh, P. (2005). Optimization of plantain micropropagation by temporary immersion bioreactor. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 82(1), 57–66.

Roles, S., Escalona, M., Cejas, I., Noceda, C., Rodríguez, R., Canal, M. J., Sandoval, J., & Debergh, P. (2005). Optimizing the temporary immersion system for Musa AAB micropropagation. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 82(1), 57–66.

Romero-García, C. V. (2025). Agricultura de precisión en la producción de banano. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología, 1(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S2665-03042025000100050&script=sci_arttext

Roselló, S., Lorenzo, J. C., & González, J. L. (2010). Establecimiento y multiplicación de yemas de banano en biorreactores de inmersión temporal. Cultivos Tropicales, 31(3), 33–38.

Roselló, S., Sánchez, C., & Escalona, M. (2010). Uso de biorreactores de inmersión temporal... Cultivos Tropicales, 31(4), 47–53.

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. Agronomy, 10(10), 146.

Sánchez, J. F., Rodríguez, N., & Loor, L. (2021). Efecto bioestimulante del extracto de Moringa oleifera... Ciencia y Agricultura, 18(3), 211–219.

Sattayasai, N., Wongkaew, A., & Luengwilai, K. (2023). Comparison of temporary immersion bioreactor and solid medium culture on banana cv. Kluai Numwa Pakchong 50. Horticulturae, 10(10), 1009.

Shukla, P. S., Borza, T., Critchley, A. T., Hiltz, D., & Prithiviraj, B. (2019). Seaweed extracts and agricultural sustainability: A review. Journal of Applied Phycology, 31, 1081–1095.

Silva, R. M., Vargas, A. O., & Pérez, J. C. (2024). Detección de variaciones somaclonales en banano mediante marcadores SSR. Revista de Biotecnología Tropical, 20(1), 45–53.

Silva, S. J. da, Dita, M., Amorim, E. P., & Ferreira, C. F. (2024). Toward marker-assisted selection... Journal of Fungi, 10(12), 839. https://doi.org/10.3390/jof10120839

Singh, R., Kumari, S., & Sachan, R. (2019). Role of microbial metabolites... Journal of Plant Biotechnology, 46(2), 115–124.

Smith, A., et al. (2020). Genetic improvement and climate resilience in banana cultivation. Journal of Agricultural Biotechnology.

Subbaraya, U., Karthic, R., Kalpana, S., Backiyarani, S., & Saraswathi, M. S. (2021).
A novel temporary immersion bioreactor system for large-scale multiplication of banana (Rasthali AAB—Silk). Scientific Reports, 11, 20371. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99923-4

Subbaraya, U., Karthic, R., Kalpana, S., Backiyarani, S., & Saraswathi, M. S. (2021). A novel temporary immersion bioreactor system... Scientific Reports, 11, 20371. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99923-4

Szopa, A., Kubica, P., Komisarczyk, A., Ekiert, H., & Ekiert, A. (2019). Production and accumulation of phenolic compounds under stress in plant in vitro cultures. Phytochemistry Reviews, 18(2), 425–447.

Teisson, C., & Alvard, D. (1995). A new concept of plant in vitro cultivation liquid medium: Temporary immersion. In Proceedings of the International Symposium on Automation and Environmental Control in Plant Tissue Culture (pp. 105–110).

Thanonkeo, S., Kitwetcharoen, H., Thanonkeo, P., & Klanrit, P. (2024). Large-scale micropropagation of banana using a temporary immersion bioreactor system. Agroindustrial Science, 14(3), 289–298.

Torres, A., & Villacís, C. (2023). Innovaciones en la micropropagación de banano. Revista Latinoamericana de Tecnología Vegetal, 14(2), 57–65.

Tovar-Quiroz, A. (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores. Informador Técnico, 87(2), 64–80. https://doi.org/10.23850/22565035.5536

Tripathi, J. N., Ntui, V. O., & Tripathi, L. (2022). CRISPR/Cas-based genome editing of banana for disease resistance and improved traits. Plant Cell Reports, 41(9), 1773–1783.

Tripathi, L., Ntui, V. O., & Tripathi, J. N. (2022). Regeneration and transformation of banana: Current status and future perspectives.

Plant Cell Reports, 41(4), 705–719. https://doi.org/10.1007/s00299-022-02841-z

Tripathi, L., Ntui, V. O., Tripathi, J. N., & Muiruri, S. (2022). CRISPR/Cas9… Frontiers in Plant Science, 13, 849480.

Tripathi, L., Ntui, V. O., Tripathi, J. N., & Muiruri, S. (2024). Application of genome editing technology... Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1395772.

Tropic Biosciences. (2025). Genetic improvement of banana for reduced browning and increased shelf life. Internal R&D Report.

Tropic Biosciences. (2025, marzo 7). Gene-edited non-browning banana... The Guardian.

Tuz Guncay, I. G. (2018). Uso de biocarbón y microorganismos eficientes... Repositorio Digital UTMACH.

Ude, G., Pillay, M., Nwakanma, D. C., & Tenkouano, A. (2002). Analysis of genetic diversity and sectional relationships in Musa using AFLP markers. Theoretical and Applied Genetics, 104(8), 1239–1245.

Ugarte Barco, F. A., Bernal Pita Da Vega, M. A., Vidal González, N. P., & Moreno Herrera, A. (2021). Prototipo de sistema de inmersión temporal en fase de multiplicación en banano Clon Williams. Revista Agroecosistemas, 9(1), 18–26.

Ugarte Barco, F. A., Bernal Pita Da Vega, M. A., Vidal González, N. P., & Moreno Herrera, A. (2021). Prototipo de sistema de inmersión temporal... Revista Científica Agroecosistemas, 9(1), 18–26.

Ugarte-Barco, F., Lima Morales, K. A., Bernal Pita, D. C. M. D. L. Ángeles, & Moreno-Herrera, M. A. (2018). Estudios preliminares del efecto fortificante… Revista Científica Agroecosistemas, 6(2), 47–55.

Uma, S., Karthic, R., Kalpana, S., & Backiyarani, S. (2023). Evaluation of temporary immersion bioreactors for in vitro micropropagation of banana (Musa spp.) and genetic fidelity assessment using flow cytometry and simple-sequence repeat markers. South African Journal of Botany, 157, 553–565. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.04.006

Uma, S., Karthic, R., Kalpana, S., Backiyarani, S., & Saraswathi, M. S. (2023). Novel temporary immersion bioreactor system for large-scale multiplication and genetic fidelity assessment in banana. Agroindustrial Science, 13(4), 345–356.

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. Plant and Soil, 255, 571–586.

Vuylsteke, D. (1989). Shoot-tip culture for the propagation, conservation, and exchange of Musa germplasm. IBPGR Training Manuals No. 2. International Board for Plant Genetic Resources.

Vuylsteke, D., & Swennen, R. (1993). Genetic improvement of plantain and banana for resistance to black sigatoka. In International Symposium on Genetic Improvement of Banana.

Watt, M. P. (2012). The status of temporary immersion system technology for plant micropropagation. African Journal of Biotechnology, 11(56), 12054–12061.

Woowong, A., & Piladaeng, N. (2022). Design and development of temporary immersion bioreactor system controlled by microcontroller. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 969, 012059.

Yameogo, C. W., Bengaly, M. D., Savadogo, A., Nikiema, P. A., & Traoré, S. A. (2011). Determination of chemical composition… Pakistan Journal of Nutrition, 10(3), 264–268.

Biotecnología aplicada a la micropropagación de banano, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-22-1

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE AUTORES

Alexander Moreno Herrera:
Doctor en Biotecnología Avanzada por la Universidad de A Coruña. Especialista en Biotecnología Vegetal, con experiencia en técnicas de cultivo in vitro y micropropagación de especies tropicales. Trabaja en proyectos de innovación agrobiotecnológica enfocados en la micropropagación del banano y otros cultivos de importancia regional. Actualmente se desempeña como docente, vinculado al laboratorio de micropropagación vegetal de la Universidad Técnica de Machala. Apasionado por la divulgación científica y la formación de jóvenes en ciencias agropecuarias.

Sayda Noemi Herrera Reyes:
Magíster en Bioquímica por la Universidad de Guayaquil. Actualmente se desempeña como docente investigadora en la Universidad Técnica de Machala, donde colabora activamente en el Laboratorio de Micropropagación y Sanidad Vegetal. Su labor científica se centra en el desarrollo de proyectos de innovación agroecológica orientados al control biotecnológico de hongos fitopatógenos en cultivos de relevancia económica como el cacao y el banano. Su línea de investigación combina herramientas bioquímicas y biotecnológicas para optimizar procesos de micropropagación vegetal y promover alternativas sostenibles para la agricultura regional. Además, impulsa la formación de nuevas generaciones de profesionales en el ámbito agropecuario, promoviendo una visión científica, ética y comprometida con la sostenibilidad y la seguridad alimentaria.

BIOTECNOLOGÍA APLICADA A LA MICROPROPAGACIÓN DE BANANO

Estimado lector, el banano es un cultivo estratégico a nivel mundial con una producción superior a 100 millones de toneladas anuales, pero enfrenta graves amenazas por la falta de material de siembra de calidad y la propagación de enfermedades como el Fusarium R4T. Frente a este escenario, la micropropagación mediante el cultivo de tejidos in vitro (usando meristemos o yemas axilares) permite clonar plantas de forma masiva, genéticamente uniformes y libres de patógenos. Más allá de la multiplicación vegetal, la biotecnología contribuye a la sostenibilidad, la resiliencia al cambio climático y la conservación de la variabilidad genética. En conjunto, el texto sirve como introducción a una obra que analiza exhaustivamente las bases y aplicaciones prácticas de estas técnicas biotecnológicas en el cultivo del banano.

A lo largo de sus capítulos, la obra detalla las seis fases fundamentales del ciclo de micropropagación clásica —desde la selección de la planta madre, establecimiento, multiplicación y enraizamiento, hasta la aclimatación y validación sanitaria/genética— y examina la eficiencia de los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT). Se analizan biorreactores comerciales (RITA®, MATIS®, BIT®) e innovaciones locales como el PSITL, demostrando que la biofortificación con extractos acuosos de $M. \text{ }oleifera$ en estos sistemas incrementa el vigor, la biomasa radicular y la respuesta antioxidante de las vitroplantas. Finalmente, el trabajo conecta la investigación científica con el sector productivo mediante modelos de transferencia tecnológica orientados a pequeños y medianos agricultores de la provincia de El Oro en Ecuador, ofreciendo una alternativa económicamente viable y agroecológica para masificar plantas de alta calidad fitosanitaria.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-22-1