

Matamoros-Quesada, Andrey; Mesén-Sequeira, Francisco; Jiménez-Alvarado, Luis Diego  
Efecto de fitohormonas y fertilizantes sobre el enraizamiento y crecimiento de mini-  
estaquillas de híbridos F1 de café (*Coffea arabica*)

Revista de Ciencias Ambientales, vol. 54, núm. 1, enero-junio, 2020, pp. 58-75

Universidad Nacional

Heredia, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070594004>

## Efecto de fitohormonas y fertilizantes sobre el enraizamiento y crecimiento de mini-estaquillas de híbridos F<sub>1</sub> de café (*Coffea arabica*)

### Effect of Fitohormones and Fertilizers on the Rooting and Growth of Mini-cuttings of Coffee (*Coffea arabica*) F<sub>1</sub> hybrids

Andrey Matamoros-Quesada<sup>1</sup>, Francisco Mesén-Sequeira<sup>2</sup>, Luis Diego Jiménez-Alvarado<sup>3</sup>

[Recibido: 12 de agosto 2019, Aceptado: 18 de octubre 2019, Corregido: 25 de octubre 2019, Publicado: 1 de enero 2020]

#### Resumen

**[Introducción]:** En el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) se está buscando optimizar la técnica hortícola de enraizamiento de mini-estaquillas de café para la multiplicación comercial de híbridos a escala masiva y bajo costo. **[Objetivo]:** El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de distintos fertilizantes y estimulantes hormonales sobre el éxito del enraizamiento y posterior crecimiento de las plantas resultantes. **[Metodología]:** Se utilizaron mini-estaquillas de tres híbridos de café, tratadas con distintas combinaciones de un bioestimulante, un enraizante, una fórmula a base de multiminerales, vitaminas y fitohormonas, y tres fertilizantes (NP, ZnP, solución hidropónica), las cuales fueron puestas a enraizar en túneles plásticos con irrigación. Las plantas enraizadas fueron trasplantadas a bolsas para un periodo de crecimiento en vivero de 3 meses. **[Resultados]:** La fase de enraizamiento concluyó a las 12 semanas, con un promedio general superior al 89 %, sin diferencias entre tratamientos ni entre híbridos. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para longitud de raíces, con superioridad de la combinación del enraizante con el fertilizante ZnP. En la fase de vivero hubo diferencias significativas entre tratamientos para altura de plantas, peso fresco de parte aérea, y peso fresco y seco de raíces, logrando destacar, en todos los casos, las combinaciones del enraizante con el complejo de multiminerales o con el fertilizante ZnP. El híbrido L12A28 sobresalió en casi todas las variables evaluadas. **[Conclusiones]:** El estudio mostró la importancia del uso de complementos auxínicos y nutricionales durante la fase de enraizamiento para optimizar el desempeño de las plantas en vivero. Asimismo, se confirmó la factibilidad de la técnica, enraizamiento de estaquillas, como un método simple y eficiente para la multiplicación de los híbridos.

**Palabras clave:** AIB; bioestimulantes; enraizantes; jardines clonales; propagación vegetativa

#### Abstract

**[Introduction]:** CATIE is seeking to optimize the horticultural technique of rooting coffee mini-cuttings for commercial multiplication of hybrids on a massive scale and at low cost. **[Objective]:** The study aimed to determine the effect of different fertilizers and hormonal stimulants on the rooting ability of cuttings and subsequent growth of the resulting plants. **[Methodology]:** Mini-cuttings of three coffee hybrids were used, treated with different combinations of a biostimulant, a rooting powder, a formula based on multiminerals, vitamins and phytohormones,

1 Tesiario, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. [andrey.jesus@costarricense.cr](mailto:andrey.jesus@costarricense.cr), <https://orcid.org/0000-0003-3195-9786>.

2 Jefe del Banco de Semillas Forestales, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica. [fmesen@catie.ac.cr](mailto:fmesen@catie.ac.cr) (autor para correspondencia), <https://orcid.org/0000-0002-8731-1172>.

3 Encargado de Operaciones, Banco de Semillas Forestales, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica. [djimenez@catie.ac.cr](mailto:djimenez@catie.ac.cr), <https://orcid.org/0000-0002-7553-3931>



and three fertilizers (NP, ZnP, hydroponic solution), and set to root in plastic tunnels with irrigation. Rooted plants were transplanted into bags for a 3-month nursery growth period. [Results]: The rooting phase concluded at 12 weeks, with a mean rooting percentage greater than 89 %, without differences between treatments or between hybrids. Significant differences were found between treatments for root length, with the superiority of the combination of the rooting powder with the ZnP fertilizer. In the nursery phase, significant differences were found between treatments for plant height, fresh weight of the aerial part, and fresh and dry root weight, highlighting in all cases the combinations of the rooting with the multiminer complex or with the ZnP fertilizer. The L12A28 hybrid stood out in almost all the variables evaluated. [Conclusions]: The study showed the importance of using auxinic and nutritional supplements during the rooting phase to optimize the performance of the plants in the nursery. Likewise, it showed the feasibility of the technique of rooting cuttings as a simple and efficient method for the multiplication of the hybrids.

**Keywords:** Biostimulants; clonal gardens; IBA; rooting promoters; vegetative propagation

## 1. Introducción

Durante el periodo 2018-2019, Costa Rica registró la producción más baja de café en 40 años: 1.7 millones de fanegas, comparado con el promedio histórico que supera los 2 millones de fanegas (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019). Esta disminución se atribuye al cambio climático, al fenómeno del Niño, a la caída de precios internacionales y al ataque de enfermedades, en particular la roya del café (*Hemileia vastatrix*) (de Melo & Astorga, 2015; ICAFE, 2019). En Centroamérica, cerca de 1.9 millones de personas dependen del café para su sustento, incluidos algunos de los trabajadores sin tierra más pobres de la región. Durante la epidemia de roya en las cosechas 2010-2011, se calcula que más de 373 000 personas fueron desplazadas como consecuencia del ataque. Se estima que las pérdidas en el sector cafetalero en Centroamérica fueron de unos 3.5 millones de sacos de café de 60 kg, equivalente a US\$ 499 millones (de Melo & Astorga, 2015). Para superar la crisis del sector, es necesario trabajar en la producción de variedades resistentes a las enfermedades, a las plagas y al cambio climático y, sobre todo, variedades de alta calidad (de Melo & Astorga, 2015; ICAFE, 2019).

En la década de 1990, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), en cooperación con el Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura (PROMECAFE), desarrollaron un programa de mejoramiento genético de café (*Coffea arabica*), que se basó mayormente en la producción de híbridos F<sub>1</sub>. Para esto se realizaron cruzamientos entre variedades tradicionales de América Central (Caturra, Catuai, Sarchimores) con accesiones silvestres seleccionadas de Etiopía y Sudán, utilizando ejemplares de la vasta colección de café del CATIE. El trabajo generó 98 híbridos, los cuales fueron evaluados a lo largo de más de 15 años en distintos ambientes y sistemas de cultivo en América Central. Finalmente fueron seleccionados y liberados seis híbridos con base en su alta productividad, calidad de taza y tolerancia a ciertas enfermedades y plagas, entre otros atributos (Bertrand *et al.*, 2011; Georget *et al.*, 2017; Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo



Tecnológico y Modernización de la Caficultura [PROMECAFE], 2005, 2011; Quijano, 2007). Tres de esos híbridos, denominados L12A28 “Milenio”, L13A44 “Centroamericano” y L4A5 “Esperanza” fueron incluidos en el presente trabajo.

Por su condición altamente heterocigota, los híbridos  $F_1$  no deben ser reproducidos por semilla, así que, tradicionalmente, se ha utilizado la técnica de embriogénesis somática para su reproducción. Esta requiere personal y laboratorios especializados y un tiempo largo, hasta 2 años desde su cultivo inicial, para la producción de las plantas (Etienne-Barry, Bertrand, Vásquez & Etienne, 1999). Todo esto incide en altos costos de producción, hasta de US\$3 por planta, lo cual ha impedido una mayor diseminación de los híbridos al sector cafetalero centroamericano. En la búsqueda de opciones complementarias más simples y económicas, el CATIE ha venido investigando y perfeccionando la técnica de multiplicación mediante mini-estaquillas enraizadas, a partir de “plantas madre” producidas *in vitro* y establecidas a altas densidades en jardines clonales hidropónicos. Mediante la cosecha de rebrotes, cada planta en estos jardines clonales puede generar 24-30 nuevas plantas por año durante un periodo de 3-4 años, bajando considerablemente los costos y tiempos de producción (Mesén & Jiménez, 2016). El proceso de reproducción de plantas por mini-estaquillas ha sido relativamente exitoso, pero se requiere mayor investigación para aumentar los porcentajes de enraizamiento de las estaquillas, mejorar la calidad del sistema radicular y el desarrollo posterior de las plantas en vivero.

Los productos hormonales y nutricionales desempeñan un papel fundamental en el éxito del enraizamiento (Blazich, 1998a, 1998b; Hartmann & Kester, 1983; Mesén, 1998). Por lo tanto, para este estudio se seleccionaron diversos productos con efectos nutricionales o con una combinación de efectos nutricionales y hormonales. El objetivo del trabajo fue evaluar los efectos de estos productos, tanto cada uno por separado como en diversas combinaciones, más un tratamiento sin aplicaciones, sobre el enraizamiento de estaquillas de tres híbridos  $F_1$  de café (L12A28, L13A44 y L4A5) y su crecimiento inicial en vivero.

## 2. Metodología

La investigación se realizó en las instalaciones del Banco de Semillas Forestales del CATIE, ubicado en el cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica, durante los meses de mayo a diciembre del 2016. El sitio se ubica dentro de la zona de vida del bosque pre-montano muy húmedo (Bolaños, Watson & Tosi, 2005), a una altitud de 646 m.s.n.m., con una temperatura media anual de 21 °C y una precipitación media anual de 2 593 mm (CATIE, 2017).

### 2.1 Detalle de los híbridos

Para este estudio se incluyeron tres híbridos que tienen una alta demanda en la actualidad: L12A28, conocido comercialmente como “Milenio”, originado del cruce de Sarchimor T5296 x Rume Sudán. Ha dado muy buenos resultados de adaptación y productividad a altitudes de 800-1 500 msnm, con calidad de taza similar o mejor que Caturra y Catuaí cuando se plantan en condiciones agroecológicas similares. L13A44, conocido como “Centroamericano”, resultó del



cruce de Sarchimor T5296 x Rume Sudán; muestra una productividad y calidad excepcionales, y se recomienda para altitudes de 800 a 1 500 msnm. L4A5, conocido como “Esperanza”, es el resultado del cruce entre Sarchimor T5296 y Etíope 25; es un híbrido muy vigoroso, recomendado para altitudes de 800-1 500 msnm, con muy buen comportamiento en la zona de Turrialba, Costa Rica y sitios similares (Mesén & Jiménez, 2016).

## 2.2 Obtención de estaquillas de híbridos

Las “plantas madre” de los híbridos fueron producidas por embriogénesis somática en el Laboratorio de Biotecnología del CATIE (Etienne-Barry *et al.*, 1999). Con ellas se establecieron jardines de multiplicación en camas hidropónicas con medio sólido. Las camas tenían una profundidad de 18 cm, un ancho de 1.2-1.5 m y longitud variable, ubicadas a 80 cm del suelo, dentro de invernaderos plásticos cerrados. Como sustrato de las camas se utilizó una mezcla de grava (0.5 -1 cm diámetro) y fibra de coco en proporción 70:30 respectivamente. A lo largo de las camas se colocaron mangueras de goteo con una separación de 10 cm entre sí, y las “plantas madre” se establecieron a una densidad de 10 x 10 cm. La fertilización de los jardines clonales se realizó, tanto mediante el sistema de riego por goteo, como mediante aplicaciones foliares y al sustrato, según el esquema descrito por Mesén & Jiménez (2016). Una vez que formaron tres nudos (una altura de aproximadamente 6-8 cm), a partir de las “plantas madre” se hicieron las cosechas de rebrotes para la preparación de las estaquillas. Los rebrotes se cortaron con tijeras podadoras y se trasladaron, de inmediato, al área de propagación sumergidos en recipientes con agua a 25 °C más fungicida (Propamocarb, 2.5 ml por litro).

## 2.3 Fase de enraizamiento

Una vez en el área de propagación, se prepararon las estaquillas de 5-7 cm de longitud, cortando justo arriba del tercer nudo, para dejar dos nudos, y se podaron las cuatro hojas de cada estaquilla para dejar 2.5-3 cm<sup>2</sup> de cada hoja. Las estaquillas fueron tratadas con AIB (ácido indolbutírico) al 0.3 % en polvo, se insertó la base de la estaquilla en el polvo y se sacudió el exceso, ya que cantidades excesivas pueden causar toxicidad en la estaquilla (Mesén, 1998). Una vez tratadas, las estaquillas se introdujeron en pellets “Jiffy” de 18 mm de diámetro por 4.5 cm de altura, colocados en bandejas de 200 celdas y se introdujeron en túneles forrados de plástico para la fase de enraizamiento.

Los túneles consistieron de un marco de metal de 3 m de largo, 1 m de ancho y 60 cm de altura, con una malla metálica en la base, y con patas para dar una altura de 80 cm desde el suelo. Los túneles fueron forrados en su totalidad con plástico, incluida la base, e internamente se colocaron 3 aspersores para irrigación en el techo del túnel. Las paredes laterales colgaban a manera de cortina para permitir el acceso al material, o realizar las aplicaciones y evaluaciones. El riego dentro de los túneles se realizó de manera automatizada, con aspersiones de 36 segundos cada 2 horas, entre las 7 a.m. y las 3 p.m. Además, se proporcionó sombra al área de enraizamiento con sarán del 50 %. La temperatura y humedad relativa dentro de los túneles se mantuvo entre 21-27 °C y 85-90 %, respectivamente a lo largo de toda la fase de enraizamiento.





## 2.4 Productos evaluados

Los siguientes productos fueron evaluados durante la fase de enraizamiento:

- Un “bioestimulante”, compuesto por aminoácidos libres 7 %, N 4 %,  $P_2O_5$  4 %,  $K_2O$  3 %, polisacáridos 3 %, Fe 0.4 %, Mn 0.1, B 0.1, Zn 0.085 %, Cu 0.02 y Mo 0.01 % (*Atlántica Agrícola, 2018*).
- Un “enraizante”, compuesto por N 4.0 %,  $P_2O_5$  8.0 %, sustancias húmicas 0.7 % y auxinas 0.3 %, soluble en agua, con acondicionadores específicos para mantenerse en solución de manera homogénea (*QUIMIA, 2018*).
- Una fórmula concentrada de multiminerales, vitaminas y fitohormonas, compuesta por N 9.1 %,  $P_2O_5$  6.6 %,  $K_2O$  5.0 %, S 1 250 ppm, B 332 ppm, Co 17 ppm, Zn 666 ppm, Cu 332 ppm, Mo 42 ppm, Ca 207 ppm, Mn 332 ppm, Fe 415 ppm, Mg 207 ppm, clorhidrato de tiamina 33 ppm y AIA 25 ppm (*Agrotico, 2019*).
- Un fertilizante (NP) con 41 g N, 66 g P y 431 g aminoácidos libres por l (*INAGROSA, 2018*).
- Una solución hidropónica, con dos componentes: hidropón mayor (N 5 %,  $P_2O_5$  4.6 %,  $K_2O$  4.81 %, Ca 2.8 %, Mg 1.3 %) e hidropón menor (Mg 28 000 ppm, S 20 180 ppm, Fe 1 560 ppm, Cu 100 ppm, B 375 ppm, Mn 400 ppm, Zn 352 ppm, Mo 24 ppm, Na 251 ppm, Cl 220 ppm). Además, la solución se complementó con una sal de N 3 %,  $K_2O$  15 %, Ca 14 %; microelementos (B 1.75 %, Mn 8.50 %, Zn 5.00 %, Fe 7.50 %, Cu 3.00 %, Mo 0.06 %, S 7.3 %) y CaO (35 %).
- Un fertilizante (ZnP) alto en Zn (11.2 %) y P (8 %  $P_2O_5$ ), que contiene, además, aminoácidos libres (11.2 %) y N (2.7 %), estimulador el crecimiento activo del vegetal y además, actúa como regulador de crecimiento a través del control de la síntesis del triptófano, precursor del ácido indolacético (*Adama, 2018*).
- Un tratamiento testigo, que recibió únicamente una aplicación de fungicida (Carboxin 37.5 % + Thiram 37.5 %) a los Jiffys antes de la inserción de las estaquillas.

El detalle de los tratamientos se muestra en el **Cuadro 1**. Las aplicaciones fueron foliares y se hicieron mensualmente para el fertilizante NP, y semanalmente para el bioestimulante, el enraizante, la fórmula multiminerales y el fertilizante ZnP, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes, cada producto se aplicó separadamente. En el caso de la solución hidropónica se siguió el esquema siguiente: hidropón mayor junto a la sal de N, K y Ca la semana 1; hidropón menor junto a los microelementos la semana 2; CaO la semana 3 y únicamente agua de riego la semana 4, para repetir el ciclo nuevamente las semanas siguientes.



**Cuadro 1.** Tratamientos evaluados durante la fase de enraizamiento en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 1.** Treatments evaluated during the rooting phase at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Descripción	Dosis
T1	Enraizante + NP	1.5 cc l <sup>-1</sup> , 5 cc l <sup>-1</sup>
T2	Enraizante + ZnP	5 cc l <sup>-1</sup> , 3 cc l <sup>-1</sup>
T3	Enraizante + Multiminerales/FH	5 cc l <sup>-1</sup> , 5 cc l <sup>-1</sup>
T4	Enraizante + NP + ZnP	1.5 cc l <sup>-1</sup> , 5 cc l <sup>-1</sup> , 3 cc l <sup>-1</sup>
T5	Bioestimulante + NP	2 cc l <sup>-1</sup> , 1.5 cc l <sup>-1</sup>
T6	Bioestimulante + ZnP	2 cc l <sup>-1</sup> , 3 cc l <sup>-1</sup>
T7	Bioestimulante + Multiminerales/FH	2 cc l <sup>-1</sup> , 5 cc l <sup>-1</sup>
T8	Bioestimulante + NP + ZnP	2 cc l <sup>-1</sup> , 1.5 cc l <sup>-1</sup> , 3 cc l <sup>-1</sup>
T9	Hidropón mayor, sales N, K, Ca.	5 cc l <sup>-1</sup> , 1g l <sup>-1</sup>
	Hidropón menor, micronutrientes.	5 cc l <sup>-1</sup> , 1g l <sup>-1</sup>
	CaO.	1g l <sup>-1</sup>
T10 Testigo	Carboxin 37.5 % + Thiram 37.5 %	5 ml l <sup>-1</sup>

Al final del periodo de enraizamiento se inició el proceso de aclimatación, que consistió en elevar las cortinas de los túneles de manera permanente para bajar la humedad relativa, y se dejaron las estaquillas en esa condición durante 5 días, antes de su trasplante a bolsas para la fase de vivero.

## 2.5 Fase de vivero

Para la fase de crecimiento en vivero, las estaquillas enraizadas y aclimatadas fueron trasplantadas a bolsas plásticas de almácigo de 9 x 20 cm, llenas con una mezcla de sustrato de 80 % suelo negro de bosque más 20 % de granza de arroz, y se mantuvieron durante tres meses en invernaderos con techo transparente, con riegos una vez al día. Se hicieron aplicaciones mensuales de 2 g de NPK 10-30-10 a cada bolsa, según las recomendaciones del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE, 2011). Durante los meses que duró la fase de vivero, la humedad relativa se mantuvo entre 85 y 90 %, la temperatura entre 18.6 y 30.4 °C, y la luminosidad entre 13.5 y 16.2 MJ m<sup>-2</sup> (CATIE, 2017).

## 2.6 Diseño experimental, variables y análisis estadístico

Para la fase de enraizamiento se utilizó un diseño irrestricto al azar con arreglo de tratamientos en parcelas divididas, donde las parcelas grandes fueron los distintos productos y la parcela pequeña los tres híbridos, con 4 repeticiones y unidades experimentales de 15 estaquillas.

Las variables evaluadas durante la fase de enraizamiento fueron a) porcentaje de sobrevivencia, b) porcentaje de plantas que enraizaron semanalmente, tomando como planta enraizada aquella que mostrara una o más raíces que emergían a través del Jiffy, c) tiempo requerido por las estaquillas para la emisión de raíces, d) número y longitud mayor de raíces por estaquilla, y e) pesos frescos y secos de raíces y parte aérea.



Para la evaluación de las variables 'd' y 'e' se utilizó una muestra destructiva de cuatro plantas por combinación de tratamiento x híbrido. Para la obtención del peso seco, las muestras fueron secadas en estufa a 65 °C por 24 horas.

Para la fase de vivero se utilizó un diseño similar al anterior, con 4 repeticiones y unidades experimentales de 8 estaquillas, considerando la reducción por los análisis destructivos y mortalidad durante la fase previa. No hubo aplicación adicional de productos durante esta fase, excepto la fertilización descrita anteriormente.

Las variables evaluadas durante esta fase fueron a) altura de las plantas, b) diámetro al cuello de raíz, c) número de hojas totales, y d) peso fresco y seco de la parte aérea y raíces, basado en una muestra destructiva de cuatro plantas por combinación de tratamiento x híbrido. En esta fase se realizó una sola evaluación al final de tres meses de permanencia en el vivero.

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza, y en caso de encontrarse diferencias se procedió a realizar pruebas de LSD (5 %) para la comparación de medias de tratamientos. Para datos de porcentaje se utilizó la transformación  $\arcsen \sqrt{\%}$ . Para los datos que no cumplieron los supuestos básicos y brindaron datos no paramétricos, se procedió a realizar la prueba no paramétrica Kruskal Wallis ( $p = 0.05$ ).

### 3. Resultados

La aparición de raíces a través de los pellets se inició en la semana 7, y al término de 12 semanas todas las estaquillas vivas habían emitido raíces, con lo cual se dio por finalizada esta fase. No hubo diferencias entre tratamientos en cuanto al tiempo de iniciación de raíces, pero sí entre híbridos, donde el híbrido L12A28 fue el que mostró mayores porcentajes de enraizamiento desde la semana 7 y mantuvo la superioridad hasta el final de esta fase. Los porcentajes de enraizamiento fueron superiores al 75 % en todos los casos, con un promedio global de 89.33 %, sin diferencias estadísticas entre tratamientos ni entre híbridos (**Cuadro 2**).

**Cuadro 2.** Porcentajes de enraizamiento de mini-estaquillas de café a las 12 semanas en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 2.** Rooting percentages of coffee mini-cuttings after 12 weeks at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Híbrido			Promedio tratamientos
	L12A28	L13A44	L4A5	
T1 Enraizante + NP	95.00	83.33	90.00	89.44
T2 Enraizante + ZnP	88.33	91.67	96.67	92.22
T3 Enraizante + multiminerales	96.67	85.00	93.33	91.67
T4 Enraizante + NP + ZnP	86.67	78.33	86.67	83.89
T5 Bioestimulante + NP	98.33	75.00	90.00	87.78
T6 Bioestimulante + ZnP	91.67	90.00	86.67	89.44
T7 Bioestimulante + multiminerales	98.33	78.33	88.33	88.33
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	95.00	91.67	86.67	91.11
T9 Sol. Hidropónica	96.67	83.33	93.33	91.11
T10 Testigo	96.67	81.67	86.67	88.33
<b>Promedio híbridos</b>	<b>94.33</b>	<b>83.83</b>	<b>89.83</b>	<b>89.33</b>





Al final de la fase de enraizamiento se encontraron diferencias significativas entre tratamientos únicamente para longitud de raíces, donde el tratamiento 2 (enraizante + ZnP) mostró el mayor valor (**Cuadro 3**).

**Cuadro 3.** Longitud máxima de raíces en estaquillas de café de los tres híbridos según tratamiento, al final de la fase de enraizamiento en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 3.** Maximum root length in coffee cuttings of three hybrids according to treatment, at the end of the rooting phase in CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Longitud máxima de raíces (cm)
T2 Enraizante + ZnP	6.26 a*
T7 Bioestimulante + multiminerales	5.95 ab
T5 Bioestimulante + NP	5.64 abc
T6 Bioestimulante + ZnP	5.57 abc
T3 Enraizante + multiminerales	5.53 abc
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	5.40 abcd
T1 Enraizante + NP	5.05 bcd
T10 Testigo	4.99 bcd
T9 Sol. Hidropónica	4.73 cd
T4 Enraizante + NP + ZnP	4.35 d

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).

A nivel de vivero hubo diferencias entre tratamientos para altura de plantas (**Cuadro 4**), peso fresco de parte aérea (**Cuadro 5**), peso fresco de raíces (**Cuadro 6**) y peso seco de raíces (**Cuadro 7**). En todas las variables se notó la superioridad de los tratamientos 3 (enraizante + multiminerales) y 2 (enraizante + ZnP). Los menores valores para estas variables en general fueron obtenidos por el testigo, y por las combinaciones de bioestimulantes con NP o ZnP.

**Cuadro 4.** Promedios de altura de plantas a 3 meses del trasplante en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 4.** Mean plant height 3 months after transplanting at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Altura de plantas (cm)
T3 Enraizante + multiminerales	11.49 a*
T2 Enraizante + ZnP	11.34 a
T1 Enraizante + NP	11.00 ab
T7 Bioestimulante + multiminerales	10.09 bc
T4 Enraizante + NP + ZnP	9.99 bc
T5 Bioestimulante + NP	9.95 bc
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	9.93 bc
T9 Sol. Hidropónica	9.75 c
T6 Bioestimulante + ZnP	9.53 c
T10 Testigo	9.18 c

\* Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).



**Cuadro 5.** Promedios de peso fresco de la parte aérea en plantas a 3 meses del trasplante en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 5.** Mean fresh weight of the aerial part in plants 3 months after transplanting at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Peso fresco parte aérea (g)
T3 Enraizante + multiminerales	12.87 a*
T2 Enraizante + ZnP	12.28 ab
T7 Bioestimulante + multiminerales	10.45 bc
T1 Enraizante + NP	10.35 bc
T9 Sol. Hidropónica	10.17 bc
T4 Enraizante + NP + ZnP	9.89 c
T6 Bioestimulante + ZnP	9.70 c
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	9.61 c
T5 Bioestimulante + NP	9.60 c
T10 Testigo	8.07 c

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 6.** Promedios de peso fresco de raíces en plantas a 3 meses del trasplante en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 6.** Mean root fresh weight of plants 3 months after transplanting at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Peso fresco raíces (g)
T3 Enraizante + multiminerales	4.08 a*
T2 Enraizante + ZnP	3.46 ab
T9 Sol. Hidropónica	3.25 bc
T7 Bioestimulante + multiminerales	3.18 bc
T4 Enraizante + NP + ZnP	3.17 bc
T6 Bioestimulante + ZnP	2.99 bc
T1 Enraizante + NP	2.97 bc
T10 Testigo	2.89 bc
T5 Bioestimulante + NP	2.88 bc
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	2.75 bc

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).



**Cuadro 7.** Promedios de peso seco de raíces de plantas a 3 meses del trasplante en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.  
**Table 7.** Mean root dry weight of plants 3 months after transplanting at CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Peso seco raíces (g)
T3 Enraizante + multiminerales	0.62 a*
T2 Enraizante + ZnP	0.53 ab
T7 Bioestimulante + multiminerales	0.47 bc
T4 Enraizante + NP + ZnP	0.47 bc
T9 Sol. Hidropónica	0.46 bc
T1 Enraizante + NP	0.45 bc
T6 Bioestimulante + ZnP	0.44 c
T10 Testigo	0.43 c
T5 Bioestimulante + NP	0.42 c
T8 Bioestimulante + NP + ZnP	0.41 c

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).

Con respecto a los híbridos, durante la fase de enraizamiento se encontraron diferencias significativas para todas las variables evaluadas en el muestreo destructivo (**Cuadro 8**), mientras que a nivel de vivero se encontraron diferencias significativas para las variables diámetro al cuello de raíz y, peso fresco y seco de raíces (**Cuadro 9**). En ambas fases destacó la superioridad del híbrido L12A28.

**Cuadro 8.** Promedios por híbrido para las variables evaluadas durante la fase de enraizamiento en el CATIE, Turrialba, Costa Rica.

**Table 8.** Mean values per hybrid for the variables evaluated during the rooting phase in CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Variable	Híbrido		
	L12A28	L13A44	L4A5
Número raíces	7.03 a*	5.02 b	4.84 b
Longitud raíces (cm)	6.12 a	4.52 b	5.40 c
Peso fresco parte aérea (g)	0.88 a	0.74 b	0.79 b
Peso fresco raíces (g)	0.30 a	0.22 c	0.26 b
Peso seco parte aérea (g)	0.18 a	0.16 b	0.17 ab
Peso seco raíces (g)	0.04 a	0.03 b	0.04 a

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).



**Cuadro 9.** Promedios por híbrido para las variables con diferencias significativas, evaluadas durante la fase de vivero en el CATIE, Turrialba, Costa Rica

**Table 9.** Mean values per hybrid for variables with significant differences, evaluated during the nursery phase in CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Variable	Híbrido		
	L12A28	L13A44	L4A5
Diámetro al cuello de raíz (mm)	2.39 a*	2.33 ab	2.29 b
Peso fresco raíces (g)	3.40 a	3.19 ab	2.90 b
Peso seco raíces (g)	0.49 a	0.49 a	0.43 b

\*Promedios con letra distinta son estadísticamente diferentes según la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ).

## 4. Discusión

### 4.1 Fase de enraizamiento

Los altos porcentajes de enraizamiento obtenidos en este trabajo demuestran que los híbridos incluidos pueden ser propagados con relativa facilidad mediante la técnica de enraizamiento de estaquillas, e indica que los procedimientos y el ambiente de propagación fueron adecuados para el enraizamiento.

En este tipo de propagación de estaquillas juveniles con hojas, se reconoce que el mantenimiento de la turgencia en las estaquillas es básico para el éxito del enraizamiento; ya que, por carecer de raíces durante los primeros días o semanas, fácilmente pueden desarrollar déficit hídrico e incluso morir (Grange & Loach, 1983; Leakey, 2014; Loach, 1988). Un procedimiento lógico para reducir el déficit hídrico, particularmente en la etapa previa a la emisión de raíces, es la poda foliar, con el fin de reducir el área de transpiración de las estaquillas. Sin embargo, la reducción del área foliar no debe ser excesiva, pues la hoja además cumple otras funciones, como producción de asimilados fotosintéticos, auxinas y otros cofactores importantes en la iniciación y desarrollo de nuevas raíces (Hartmann & Kester, 1983; Mesén, Newton & Leakey, 1997, 2001). Se ha demostrado que las estaquillas, efectivamente, son capaces de fotosintetizar antes de la emisión de raíces, y que incluso tasas fotosintéticas bajas pueden incidir en el éxito del enraizamiento (Davis, 1988; Mesén *et al.*, 1997; Newton, Dick, Mc Beath & Leakey, 2008). Con otras especies y en ambientes sombreados similares al usado en este trabajo, se han reportado tasas fotosintéticas netas positivas en las estaquillas, por ejemplo, de 2.21-4.96  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  en estaquillas de *Cordia alliodora* (Mesén *et al.*, 1997) y de hasta 6  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  en estaquillas de *Terminalia spinosa* (Newton *et al.*, 2008). Los altos índices de enraizamiento logrados pueden ser atribuidos parcialmente a la elección del área foliar utilizada en este estudio, que logró un balance óptimo entre los efectos negativos de la transpiración y los efectos positivos de la fotosíntesis. El área foliar fue definida con base en una serie de trabajos anteriores (Mesén & Jiménez, 2016).



El ambiente de propagación también desempeña un papel fundamental en el éxito del enraizamiento y, de acuerdo con Loach (1988), debe cumplir tres requisitos básicos: mantener una atmósfera con baja demanda evaporativa, que reduzca la transpiración de las estaquillas; mantener una temperatura adecuada que estimule el metabolismo en la base de las estaquillas; y mantener una iluminación que permita la fotosíntesis, pero sin causar aumentos excesivos de temperatura. El sistema de propagación cerrado y con irrigación frecuente, como el que se utilizó en este trabajo, cumplió con estos tres requisitos, pues mantuvo una humedad relativa alta (entre 85 y 90 %), y temperaturas de 21 a 27 °C, sin llegar a extremos (>35 °C) que pueden inhibir el enraizamiento e incluso causar la muerte de la estaquilla (Loach, 1988). La fotosíntesis no fue medida directamente en este estudio; sin embargo, aun bajos niveles de irradiación son suficientes para estimular fotosíntesis en estaquillas durante la propagación, y es posible que también ocurriera en el presente caso. De hecho, como lo indica Davis (1988), el aparato fotosintético en estaquillas se satura a niveles relativamente bajos de irradiación, y los altos niveles no solo no aumentan fotosíntesis, sino que pueden contribuir a la desecación de las estaquillas. El manejo de todos estos factores, área foliar, aplicación de auxinas en dosis adecuadas, cuidados durante el proceso y un ambiente óptimo, sin duda, contribuyeron al éxito del proceso de enraizamiento.

El hecho de que no se hayan obtenido diferencias entre tratamientos en cuanto a porcentaje de enraizamiento, incluyendo el testigo sin aplicaciones, sugiere que la iniciación de raíces, como lo indica Blazich (1988b), es un proceso mediado básicamente por la presencia de auxinas, ya sea endógenas o aplicadas, y no es afectado mayormente por aplicaciones nutricionales. El AIB aplicado de manera exógena ha resultado esencial para mejorar la calidad de los sistemas radiculares y acelerar la iniciación de raíces en muchas especies (Blazich, 1988a; Hartmann & Kester, 1983; Leakey, 2014; Leakey *et al.*, 1990; Mesén, 1998; Mesén *et al.*, 1997), incluidas estaquillas de café (Mesén & Jiménez, 2016). En el presente trabajo, es razonable pensar que el AIB aplicado a las estaquillas tuvo un papel importante en el éxito del enraizamiento.

Por su parte, el estatus nutricional inicial de las estaquillas es de primordial importancia en el proceso, y los buenos resultados obtenidos pueden ser atribuidos también, de manera parcial, a este factor. Se sabe que la movilización de nutrientes dentro de la estaquilla se ve limitada durante la fase de iniciación de raíces, no así durante el crecimiento y desarrollo de estas (Blazich, 1988b). De esta manera, desde el punto de vista nutricional, la iniciación de raíces depende grandemente de los niveles iniciales de nutrientes que se encuentran en la porción de la estaquilla, donde se formarán las futuras raíces (Blazich, 1988b). Justamente por el papel fundamental que tiene la nutrición de las “plantas madre” sobre el enraizamiento subsecuente de estaquillas (Leakey, 2014; Mesén *et al.*, 2001), varias investigaciones previas en el CATIE se han enfocado en determinar el mejor paquete nutricional en los jardines clonales de híbridos de café (Mesén & Jiménez, 2016), y el buen manejo nutricional de estos mismos se vio reflejado en este trabajo.





#### 4.2 Fase de vivero

Una vez que las raíces se formaron en las estaquillas, su crecimiento y desarrollo posterior sí se vieron afectados por los distintos tratamientos. Esto indica que, si bien la aplicación de los productos no tuvo mayor influencia sobre los porcentajes de enraizamiento, por las razones comentadas anteriormente, sí tuvo un efecto posterior en el desarrollo de las raíces y el crecimiento de las plantas. Los mejores resultados se obtuvieron con las combinaciones del enraizante + multiminerales y del enraizante + ZnP. Este último fue también el que mostró los mayores promedios de longitud de raíces al final de la fase de enraizamiento, lo que sugiere que el desarrollo de plantas a partir de estaquillas enraizadas se vio favorecido cuando las aplicaciones ofrecieron no solo una gama de nutrientes, sino también estimuladores hormonales. Los beneficios de estos últimos en los procesos de iniciación y desarrollo de raíces adventicias se han conocido y estudiado desde los años 30, cuando se determinó la naturaleza química del ácido indolacético (AIA) y su papel como promotor del enraizamiento (Blazich, 1988a; Hartmann & Kester, 1983). El papel de las auxinas es complejo, pero su efecto se atribuye, principalmente, a su estímulo sobre la síntesis de ADN en regiones tratadas, la diferenciación y división celular, y la atracción de azúcares y nutrientes a la base de la estaquilla (Leakey, 2014; Ruiz-Solsol & Mesén, 2010). Sin embargo, como lo indica Leakey (2014), las auxinas no son la “solución mágica”, si no se pone atención también a otros factores, en particular al estatus hídrico y nutricional de las estaquillas. Existe evidencia directa de que el N, P, K, Ca, Mn, B y Zn son importantes en el proceso de enraizamiento por sus efectos sobre la multitud de procesos metabólicos que se desarrollan durante la formación de nuevas raíces (Blazich, 1988b). Además, se sabe que el Zn tiene influencia sobre los niveles endógenos de auxina, al ser necesario para la producción de triptófano, precursor del AIA (Blazich, 1988b; Gaspar & Hofinger, 1988). Los buenos resultados obtenidos con la fórmula de multiminerales y el fertilizante ZnP, ambos con Zn dentro de sus fórmulas, pueden ser atribuidos, entonces, no solo a los efectos obvios de la nutrición, sino quizá también a este segundo efecto sobre la producción endógena de AIA. El estudio también mostró que la mezcla de demasiados productos (p. ej. Bioestimulante + NP + ZnP) afectó negativamente el desarrollo de las raíces, posiblemente por algún efecto de toxicidad.

Con respecto a los híbridos, en ambas fases destacó la superioridad del híbrido L12A28. Este híbrido mostró mayor precocidad en el enraizamiento, lo cual evidentemente le dio una ventaja sobre los otros dos en cuanto a crecimiento, tanto de raíces como de su parte aérea. También, este híbrido ha destacado a nivel de campo en múltiples ensayos y plantaciones (Bertrand *et al.*, 2011, Quijano, 2007), demostrando que su reconocida superioridad genética también se manifestó tanto en su capacidad de enraizamiento como en su desarrollo temprano en vivero. Por su parte, es interesante que el híbrido L13A44, que ocupó el último lugar en cuanto a longitud de raíces, peso fresco y seco de parte aérea, y peso fresco y seco de raíces, también ha sido de los más difíciles de propagar mediante la técnica de embriogénesis somática (N. Vásquez, comunicación personal, 28 agosto, 2018). Esto hace suponer que los mismos factores que limitan su propagación *in vitro* tienen también un efecto a nivel de enraizamiento de estaquillas.



Sin embargo, con los tres híbridos en general se alcanzaron porcentajes de enraizamiento superiores al 70 %, considerado el nivel mínimo de enraizamiento para justificar una operación comercial (Murillo, Rojas & Badilla, 2001), lo cual, unido a su buen desarrollo en vivero, confirma la factibilidad de la técnica de enraizamiento de estaquillas de café como un complemento eficiente a la técnica de embriogénesis somática. Asimismo, permitió identificar las mejores combinaciones de productos hormonales y nutricionales para alcanzar altos porcentajes de enraizamiento, y maximizar el desempeño posterior de las plantas en vivero. Este trabajo abre más opciones para la reproducción comercial de estos materiales de alta calidad genética de manera rápida y económica, y su uso por parte del sector cafetalero regional, tan necesitado de materiales de alta producción y calidad.

## 5. Conclusiones

Este trabajo demostró que el enraizamiento de estaquillas es una técnica eficiente y relativamente simple para la reproducción comercial de híbridos de café, como una opción complementaria a la técnica de embriogénesis somática, pues logró porcentajes de enraizamiento superiores al 83 % y un buen desarrollo de las plantas en vivero.

Se debe prestar especial atención al manejo nutricional de las plantas madre, al tratamiento a las estaquillas y al ambiente de propagación, que fueron determinantes en el éxito de la propagación.

El proceso de iniciación de raíces, mediado básicamente por niveles hormonales, no se vio afectado por los distintos tratamientos nutricionales aplicados, pero estos sí tuvieron un efecto posterior en la fase de desarrollo en vivero.

Para mejores resultados en vivero es necesaria la aplicación de las mezclas óptimas de productos durante la fase de enraizamiento, que incluyan no solo estimuladores hormonales, sino también una oferta balanceada de suplementos nutricionales.

## 6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

## 7. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al personal del Banco de Semillas Forestales del CATIE por su apoyo en las diversas etapas de esta investigación. Además, a las personas revisoras anónimas y la Revista por sus valiosos aportes para mejorar el presente artículo.



## 8. Referencias

- Adama. (2018). *Ficha técnica nutrición vegetal NutriZinc Plus*. Recuperado de [https://www.adama.com/documents/369693/370573/FT+Nutri+Zinc\\_tcm58-31257.pdf](https://www.adama.com/documents/369693/370573/FT+Nutri+Zinc_tcm58-31257.pdf)
- Agrotico. (2019). *Bayfolan forte, ficha técnica*. Recuperado de [http://agrotico.net/Nutricion\\_Info/Bayfolan%20Forte/Etiqueta/Bayfolan%20Forte.pdf](http://agrotico.net/Nutricion_Info/Bayfolan%20Forte/Etiqueta/Bayfolan%20Forte.pdf)
- Atlántica Agrícola. (2018). *Razormin, ficha técnica*. Recuperado de <https://www.atlanticaagricola.com/tienda/razormin/>
- Bertrand, B., Alpízar, E., Lara, L., SantaCrea, R., Hidalgo, M., Quijano, J. M., Montagnon, C., Georget, F. & Etienne, H. (setiembre, 2011). Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars [Comportamiento de híbridos F1 de *Coffea arabica* en sistemas agroforestales y de cultivo a pleno sol en comparación con los cultivares americanos de línea pura]. *Euphytica*, 181, 147–158 <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0372-7>
- Blazich, F. A. (1988a). Chemicals and formulations used to promote adventitious rooting [Productos químicos y formulaciones utilizadas para promover formación de raíces adventicias] En T. D. Davis, B. E. Haissig and N. Sankhla (Eds.), *Adventitious Root Formation in Cuttings* (pp. 132-149). Portland, USA: Dioscorides Press.
- Blazich, F. A. (1988b). Mineral nutrition and adventitious rooting [Nutrición mineral y formación de raíces adventicias] En T. D. Davis, B. E. Haissig and N. Sankhla (Eds.), *Adventitious Root Formation in Cuttings* (pp. 61-69). Portland, USA: Dioscorides Press.
- Bolaños, R., Watson, V., & Tosi, J. (2005). Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge, Escala 1:750 000. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE]. (2017). *Datos meteorológicos*. Turrialba, Costa Rica. Recuperado de <https://www.catie.ac.cr/productos-y-servicios/estacion-meteorologica/estacion-meteorologica-catie.html>
- Davis, T. D. (1988). Photosynthesis during adventitious rooting [Fotosíntesis durante la formación de raíces adventicias] En T. D. Davis, B. E. Haissig and N. Sankhla (Eds.), *Adventitious Root Formation in Cuttings* (pp. 79-87). Portland, USA: Dioscorides Press.
- De Melo V. F. E., & Astorga, D. C. (2015). *Prevención y control de la roya del café. Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores*. CATIE, Serie técnica, Manual técnico n.º 131.
- Etienne-Barry, D., Bertrand, B., Vásquez, N. & Etienne, H. (diciembre, 1999). Direct sowing of *Coffea arabica* somatic embryos mass-produced in a bioreactor and regeneration of plants [Siembra directa de embriones somáticos de *Coffea arabica* producidos en masa en un



biorreactor y regeneración de plantas] *Plant Cell Reports* 19, 111–117. <https://doi.org/10.1007/s002990050720>

- Gaspar, T. & Hofinger, M. (1988). Auxin metabolism during adventitious rooting [Metabolismo de las auxinas durante la formación de raíces adventicias] En T. D. Davis, B. E. Haissig and N. Sankhla (Eds.), *Adventitious Root Formation in Cuttings* (pp. 117-131). Portland, USA: Dioscorides Press.
- Georget, F., Courtel, P., Malo, E., García, E., Hidalgo, M., Alpízar, E., Breitler, J. C., Bertrand, B., & Etienne, H. (febrero, 2017). Somatic embryogenesis-derived coffee plantlets can be efficiently propagated by horticultural rooted mini-cuttings: A boost for somatic embryogenesis [Plántulas de café derivadas de embriogénesis somática pueden ser propagadas eficientemente mediante mini-estaquillas hortícolas enraizadas: Un impulso para la embriogénesis somática] *Scientia Horticulturae*, 216, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.017>
- Grange, R. I., & Loach, K. (1983). The water economy of unrooted leafy cuttings [La economía hídrica de estaquillas con hoja no enraizadas]. *Journal of Horticultural Science*, 58(1), 9-17. <https://doi.org/10.1080/00221589.1983.11515084>
- Hartmann, H. T. & Kester, D. E. (1983). *Plant propagation –Principles and practices [Propagación de plantas – principios y prácticas]* (2<sup>nd</sup>. ed.). Englewood Cliffs, N. J.
- ICAFE (Instituto del Café de Costa Rica). (2011). Guía técnica para el cultivo del café (1<sup>era</sup> ed.). Heredia, Costa Rica: ICAFE-CICAFE.
- ICAFE. (2019). Entrevista especial. Directora de ICAFE: “Los productores de café están en crisis”. Recuperado de <https://www.larepublica.net/noticia/directora-de-icafe-los-productores-de-cafe-estan-en-crisis>
- INAGROSA (Industrias Agrobiológicas, S. A.). (2018). *Fosnutren*. Recuperado de <http://www.inagrosa.es/productos/fosnutren-20/>
- Leakey, R. R. B. (2014). Plant cloning: Macropropagation [Clonación de plantas: Macropropagación] *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 4, 349-359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00223-0>
- Leakey, R. R. B., Mesén, F., Tchoundjeu, Z., Longman, K. A., Dick, J. Mc.P., Newton, A. C., Matin, C., Grace, J., Munro, R. C., & Muthoka, P. N. (1990). Low-technology techniques for the vegetative propagation of tropical trees [Métodos de baja tecnología para la propagación vegetativa de árboles tropicales] *Commonwealth Forestry Review*, 69, 247-257.
- Loach, K. (1988). Water relations and adventitious rooting [Relaciones hídricas y formación de raíces adventicias] En T. D. Davis, B. E. Haissig and N. Sankhla (Eds.), *Adventitious Root Formation in Cuttings* (pp. 102-116). Portland, USA: Dioscorides Press.



- Mesén, F. (1998). Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: Uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE, Serie Técnica, Manual Técnico n.º 30.
- Mesén, F. & Jiménez, L. D. (2016). Producción de clones de café por miniestaquillas. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie Técnica, Manual Técnico n.o 130.
- Mesén, F., Newton, A. C., & Leakey, R. R. B. (1997). Vegetative propagation of *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken: The effect of IBA concentration, propagation medium and cutting origin [Propagación vegetativa de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken: Efecto de la concentración de AIB, sustrato de propagación y origen de la estaquilla]. *Forest Ecology and Management*, 92, 45-54. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03960-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03960-6)
- Mesén, F., Newton, A. C., & Leakey, R. R. B. (2001). The influence of stockplant environment on morphology, physiology and rooting of leafy stem cuttings of *Albizia guachapele* [Influencia del ambiente de las plantas donantes sobre la morfología, fisiología y enraizamiento de estaquillas con hoja de *Albizia guachapele*]. *New Forest* 22, 213-227. <https://doi.org/10.1023/A:1015668011884>
- Murillo, O., Rojas, J. L., & Badilla, Y. (2001). Reforestación clonal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Newton, A. C., Dick, J. Mc.P., Mc Beath, C. & Leakey, R. R. B. (2008). The influence of R:FR ratio on the growth, photosynthesis and rooting ability of *Terminalia spinosa* Engl. and *Triplochiton scleroxylon* K. Schum [Influencia de la relación R:FR en el crecimiento, fotosíntesis y la capacidad de enraizamiento de *Terminalia spinosa* Engl. y *Triplochiton scleroxylon* K. Schum]. *Annals of Applied Biology*, 128(3), 541-556. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1996.tb07113.x>
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2019). *Costa Rica proyecta producir 2.5 millones de fanegas de café en un plazo de 3 años*. Recuperado de <https://presidencia.go.cr/comunicados/2019/05/costa-rica-proyecta-producir-2-5-millones-de-fanegas-de-cafe-en-un-plazo-de-3-anos/>
- Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura [PROMECAFE]. (2005). *Mejoramiento genético del café en América Central: Selección de clones de híbridos F<sub>1</sub> de Coffea arabica* (Informe final ATN-SF-7382-RG IICA-BID). Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura [PROMECAFE]. (2011). *Mejoramiento genético del café en América Central, selección de clones de Híbridos F<sub>1</sub> de Coffea arabica y desarrollo tecnológico*. Recuperado de <http://www.promecafe.org>
- Quijano, J. M. (2007). *Validación de nuevos híbridos F<sub>1</sub> de Coffea arabica introducidos de PROMECAFE/CATIE a PROCAFE* (Informe PROCAFE). El Salvador.







QUIMIA (Química Internacional Aplicada, México). (2018). *Ficha técnica Hormovit enraizador*. Recuperado de <http://dunemexicali.com.mx/archivos/AGROQUIMICOS/ESTIMULANTES/CONVENCIONALES/QUIMIA/HORMOVIT%20ENRAIZADOR/HORMOVIT%20ENRAIZADOR%20HT.pdf>

Ruiz-Solsol, H., & Mesén, F. (abril, 2010). Efecto del ácido indolbutírico y tipo de estaquilla en el enraizamiento de sachu inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Agromomía. Costarricense*, 34(2), 259-267.

