



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

**APORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS
FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CAFÉ**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

RUBÉN GARZA LAU

Bajo la supervisión de: **DR. RANFERI MALDONADO TORRES**



Chapingo, Estado de México, febrero de 2020.



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISIÓN DE EXÁMENES PROFESIONALES

**APORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE
NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ**

Tesis realizada por **Rubén Garza Lau** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR: _____


Dr. Ranferi Maldonado Torres

ASESORA: _____


Dra. María Edna Álvarez Sánchez

ASESOR: _____


M.C. José Antonio Torres Rivera

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	IV
DEDICATORIAS	IX
AGRADECIMIENTOS	X
DATOS BIOGRÁFICOS	XI
RESUMEN GENERAL	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO	3
2.1 Interacción de especies arbóreas fijadoras de nitrógeno con el cultivo de café	3
2.1.1 Interacciones físicas entre árboles y el cultivo de café	3
2.1.2 Interacciones químicas entre árboles y el cultivo de café	6
2.2 Diagnóstico nutrimental	14
2.2.1 Requerimientos nutrimentales de café (macronutrientes y micronutrientes)	15
2.2.2 Niveles de suficiencia y toxicidad	17
2.3 Diseño de sistema agroforestal óptimo para el cultivo de café	20
2.3.1 Manejo nutrimental óptimo	21
2.3.2 Rendimiento y calidad de cosecha en SAF con leguminosas arbóreas	23
2.4 LITERATURA CITADA	23
3 Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café	33
4 APORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ	44
4.1 INTRODUCCIÓN	46

4.2	OBJETIVOS.....	47
4.3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
4.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.4.1	Nodulación	49
4.4.2	Estado nutrimental del cultivo de café.....	52
4.4.3	Análisis estadístico.....	60
4.4.4	Rendimiento de cosecha.....	68
4.5	CONCLUSIONES	69
4.6	LITERATURA CITADA	70
5	APÉNDICES	73

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados del análisis foliar realizado por (Audate et al., 2016) en las tres parcelas experimentales ubicadas en Huatusco, Veracruz.....	16
Cuadro 2. Concentraciones nutrimentales requeridas por plantas de café en la región de Zona de Mata, Brasil reportados por Partelli et al., (2007).....	16
Cuadro 3. Valores nutrimentales normales en materia seca de hojas para la región cafetalera de Venezuela, reportados por (Arizaleta et al., 2002).	17
Cuadro 4. Concentración de elementos en condiciones óptimas para el cultivo de café. Fuente: Osorio (2012b).	18
Cuadro 5. Síntomas de deficiencia y toxicidad de algunos elementos en plantas de café. Fuente: Naranjo Polania (2018).	19

ARTÍCULO: CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES ARBÓREAS ASOCIADAS AL CULTIVO DE CAFÉ

Cuadro 1. Descripción de los sistemas agroforestales sometidos a estudio.....	36
Cuadro 2. Concentración e interpretación de los análisis de suelo.	37
Cuadro 3. Diagnóstico nutrimental inicial utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para los cuatro sistemas bajo estudio.....	38
Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental inicial con el índice DOP para los cuatro sistemas bajo estudio.	40

ARTÍCULO: APORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

Cuadro 1. Concentraciones de nitrógeno, hierro, cobalto y molibdeno en las imágenes capturadas por el microscopio electrónico de barrido.	51
Cuadro 2. Concentración nutrimental en nódulos de cada sistema agroforestal.	51

Cuadro 3. Desviación del Óptimo Porcentual para el análisis foliar previo a la fertilización.....	52
Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para el análisis foliar previo a la fertilización.....	53
Cuadro 5. Desviación del Óptimo Porcentual para el análisis foliar posterior a la fertilización.....	58
Cuadro 6. Diagnóstico nutrimental utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para el análisis foliar posterior a la fertilización.....	59
Cuadro 7. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema EP por elemento ($p \leq 0.05$).....	61
Cuadro 8. Comparación de medias para concentraciones de calcio en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).	61
Cuadro 9. Comparación de medias para concentraciones de manganeso en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).....	62
Cuadro 10. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema IV por elemento ($p \leq 0.05$).....	63
Cuadro 11. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema JP por elemento ($p \leq 0.05$).....	65
Cuadro 12. Comparación de medias para concentraciones de Calcio en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).....	65
Cuadro 13. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema EG por elemento ($p \leq 0.05$).....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de nodulación en las raíces. Fuente: Pearson Education Inc. (2015)..... 11

ARTÍCULO: CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES ARBÓREAS ASOCIADAS AL CULTIVO DE CAFÉ

ARTÍCULO: APOORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

Figura 1. Aplicación e incorporación del fertilizante al cultivo de café. 48

Figura 2. Nodulación en las especies arbóreas bajo estudio. A) Nódulo vacío en EG; B) Nodulación en EP; C) Nodulación en IV; D) Raíz de *Erythrina poeppigiana* en EG sin nodulación aparente..... 49

Figura 3. Imagen de Microscopio Electrónico de Barrido en un nódulo de EP. A la izquierda, la imagen completa; a la derecha, un acercamiento a la zona donde se identificó el bacteroide..... 50

Figura 4. Imágenes de Microscopio Electrónico de Barrido en Nódulos de IV (izquierda) y EG (derecha)..... 50

Figura 5. Concentraciones promedio de macronutrientes en el sistema EP antes y después de fertilizar. 54

Figura 6. Concentraciones promedio de micronutrientes en el sistema EP antes y después de fertilizar. 55

Figura 7. Concentraciones de macronutrientes en el sistema IV antes y después de fertilizar. 55

Figura 8. Concentraciones de micronutrientes en el sistema IV antes y después de fertilizar. 56

Figura 9. Concentraciones de macronutrientes en el sistema JP antes y después de fertilizar. 56

Figura 10. Concentraciones de micronutrientes en el sistema JP antes y después de fertilizar.	57
Figura 11. Concentraciones de macronutrientes en el sistema EG antes y después de fertilizar.	57
Figura 12. Concentraciones de micronutrientes en el sistema EG antes y después de fertilizar.	58
Figura 13. Comparación de plantas de café, a la izquierda el tratamiento 3 en el sistema JP, a la derecha una planta bajo el manejo del productor.	60
Figura 14. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema EP.	62
Figura 15. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema EP.	63
Figura 16. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema IV.	64
Figura 17. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema IV.	64
Figura 18. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema JP.	66
Figura 19. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema JP.	66
Figura 20. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema EG.	67
Figura 21. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema EG.	68
Figura 22. Gráfico comparativo del rendimiento obtenido en los tratamientos durante los meses de noviembre y diciembre de 2019.	69

ANEXOS

Figura 1. Localización geográfica de las parcelas bajo estudio.	80
--	----

Figura 2. Uso de densiómetro para medición indirecta de sombra bajo el dosel forestal.....	82
Figura 3. Colecta de hojas y guardado en bolsas con cierre hermético.....	83
Figura 4. Colecta de datos y formación de la muestra compuesta para cada tratamiento.....	83
Figura 5. Presencia de manchas en hojas posiblemente por efecto de hongos.	84

DEDICATORIAS

A mis padres, por haber forjado en mí el carácter que me ha llevado hasta este punto. Por su amor, paciencia y apoyo incondicional. No habría logrado tantas cosas sin ellos.

A mi esposa, Victoria, por haberme acompañado a lo largo de este camino. Por haber estado siempre a mi lado y haberme animado cuando más lo necesitaba.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por haberme brindado la posibilidad de realizar mis estudios de posgrado mediante la asignación de una beca.

A todas las personas que colaboraron durante la realización de este estudio, en especial al equipo de laboratoristas del departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

Al Dr. Ranferi Maldonado Torres por haber guiado el presente estudio; por su conocimiento y enseñanza.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Rubén Garza Lau
Fecha de nacimiento	9 de enero de 1990
Lugar de nacimiento	Fortín de las Flores, Veracruz
No. Cartilla militar	9985430
CURP	GALR900109HVZRXB03
Profesión	Ingeniero Forestal
Cédula Profesional	11012147

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Diurna Cuautla
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

APORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

En la ciudad de Huatusco, Veracruz se llevó a cabo un estudio para determinar la influencia que tiene el sombreado con árboles fijadores de nitrógeno en el cultivo de café. Para ello, se describieron cuatro sistemas (tres con leguminosas arbóreas y uno sin ellas) a través de su espaciamiento, edad, altura y porcentaje de sombra para conocer las interacciones físicas. Se realizó un análisis de suelo y foliar para corroborar las interacciones químicas, y se analizaron nódulos en microscopio electrónico de barrido para comprobar su actividad. Posteriormente se propuso una dosis de fertilización con el objetivo de mejorar la calidad del cultivo y, a su vez, del suelo, para promover un balance nutrimental que mejore la fijación biológica de nitrógeno. Los cambios en el cultivo fueron evaluados a partir de tres análisis foliares y rendimiento al mes de diciembre. El manejo nutrimental propuesto permitió un mejor aprovechamiento de los nutrientes por parte de los cafetos, elevando concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Mn, y reduciendo a concentraciones normales los elementos Fe, Cu y Zn.*

Palabras clave: leguminosas arbóreas, porcentaje de sombra, balance nutrimental, análisis foliar, fijación biológica de nitrógeno.

* Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Rubén Garza Lau.
Director: Dr. Ranferi Maldonado Torres.

GENERAL ABSTRACT

This study was carried out in Huatusco, State of Veracruz, to determine the influence of shading with nitrogen fixing trees on coffee cultivation. To do this, four systems (three with legume trees and one without them) were described through their spacing, age, and height and shade percentage to know the physical interactions. Soil and foliar analyses were performed to corroborate the chemical interactions, and nodules were analyzed by scanning electron microscope to check their activity. Subsequently, a dose of fertilization was proposed in order to improve crop and soil nutrition, to increase biological nitrogen fixation. Changes in the crop were evaluated through three foliar analyzes and yield until December. The proposed nutritional management allowed better use of nutrients by coffee plants, rising N, P, K, Ca, Mg and Mn concentrations and reducing Fe, Cu and Zn concentrations to normal ranks.*

Key words: legume trees, shade percentage, nutrition, foliar analysis, biological nitrogen fixation.

* Thesis for Master in Sciences in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Rubén Garza Lau
Director: Dr. Ranferi Maldonado Torres

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de café genera una importante derrama económica para nuestro país, encontrando las mejores condiciones fisiográficas para su producción en el estado de Veracruz. De acuerdo con el reporte presentado por INEGI, el café tuvo una superficie cosechada de 159,174 hectáreas en este estado, con una producción de 307,909 toneladas, durante el ciclo 2013-2014. Se calcula que un 98.8% de la superficie cultivada es bajo sombra de diversas especies arbóreas, lo cual brinda importantes servicios ambientales, conformando hábitats que contribuyen a conservar la biodiversidad y el paisaje (Moguel, P., Toledo, 2004).

El sistema productivo de café bajo sombra en su mayoría implica un policultivo con cierto nivel de manipulación forestal de bosque o selva. En México, este cultivo se encuentra asociado con plantas como cacao (*Theobroma cacao* L.), naranja (*Citrus* spp.), plátano (*Musa paradisiaca*), mamey (*Pouteria zapota*), chicozapote (*Manilkara zapota*), aguacate (*Persea americana*), zapote negro (*Diospyros digyna*) y guayaba (*Psidium* spp.).

En el estado de Veracruz no existe la cultura del análisis de suelo, razón por la cual, la fertilización que se realiza no supe las necesidades nutrimentales del cultivo, aplicando dosis recomendadas por otros productores o por los vendedores de agroquímicos, que en muchos casos pueden no ser necesarias. Aunado a esto, el precio de los fertilizantes ha incrementado en los últimos años, lo que provoca la baja rentabilidad de la agricultura convencional y la consecuente búsqueda de alternativas económicamente viables (Romero Lopez, 2006).

Es por ello que la agroforestería tiene una función importante en la producción de café, dado que puede incrementar el balance nutrimental del cultivo, aprovechando la fijación biológica de nitrógeno (FBN) como beneficio secundario del sombreado. En un estudio realizado por da (da Silva et al., 2017), se demuestra que la leguminosa arbórea *Mimosa tenuiflora* puede fijar hasta 18 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N en condiciones naturales, mientras que otras especies arbóreas como *Leucaena leucocephala* o *Clitoria fairchildiana* tienen la capacidad de fijar

252 y 237 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Leite, De Lima Ferraz Junior, De Moura, & Das Chagas Ferreira Aguiar, 2008). Por otra parte, en suelos ácidos de Tabasco se ha determinado que *Mucuna deeringiana* fija 522.11 kg ha⁻¹ año⁻¹, contrastando con otras especies leguminosas como *Cajanus cajan* y *Phaseolus lunatus*, las cuales fijan 98.94 y 35.22 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente (Córdova-Sánchez et al., 2013). En Cuba, se cuantificó la fijación biológica de nitrógeno de la leguminosa *Canavalia ensiformis*, enredadera de clima tropical apreciada por su valor forrajero, obteniendo como resultado la fijación de 81.77 kg ha⁻¹ año⁻¹ de nitrógeno (Martín, Rivera, & Mujica, 2007).

De esta manera, se han elegido cuatro sistemas agroforestales de café cercanos entre sí, para evitar variaciones por cambios en temperatura y suelo, los cuales se dividen de la siguiente manera: café con *Juglans pyriformis*; café con *Inga vera*; café con *Grevillea robusta* y *Erythrina poeppigiana*; café con *Erythrina sp.*

El presente estudio pretende evaluar si el café asociado con especies leguminosas como sombreado puede ser una alternativa rentable para las zonas cafetaleras de México, mejorando la calidad nutrimental del cultivo. Al finalizar, se propondrá un diseño de sistema agroforestal que optimice el espacio y aporte de nitrógeno con la intención de obtener mayores beneficios para las plantaciones de café.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Interacción de especies arbóreas fijadoras de nitrógeno con el cultivo de café

El café se ha cultivado tradicionalmente bajo sombra de árboles como es el caso del sistema rusticano, donde los cafetos son plantados bajo el dosel forestal en bosques tropicales.

En México el café se cultiva predominantemente bajo sombra de árboles, de los cuales se obtienen productos secundarios tales como madera, frutos, leña y servicios ambientales. Además, el sombreado brinda ciertas características físicas y químicas al cultivo, pues reduce la transpiración, incrementa el área foliar y en el caso de las especies fijadoras de nitrógeno, contribuye al reciclaje de nutrientes a través de la hojarasca.

2.1.1 Interacciones físicas entre árboles y el cultivo de café

Cultivar café bajo sombra tiene ventajas, ya que mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y el estado general del cultivo, lo que tiene consecuencias benéficas en el rendimiento.

Además, se reduce la pérdida de nutrientes con el uso de especies arbóreas como sombreado de café, al proveer servicios ambientales con fuertes beneficios, como la conservación de suelos, mejora en la capacidad de infiltración del agua, incremento en biodiversidad, etc. En el caso de las plantaciones con *Erythrina*, se ha encontrado mayor capacidad de infiltración de agua, incremento de la cubierta de materia orgánica, mejor aireación, entre otros efectos positivos; sin embargo, es difícil relacionar la influencia de la fijación biológica de nitrógeno sobre el rendimiento del café, ya que este presenta una variación anual que solo puede ser medida a largo plazo (Meylan et al., 2017).

Efecto del porcentaje de sombra

El café es un cultivo que requiere cierto porcentaje de sombra a lo largo de su ciclo de vida, aunque puede cultivarse a pleno sol si se propician las condiciones necesarias, especialmente de humedad, ya que el crecimiento foliar está estrechamente relacionado con las precipitaciones. Por ende, el resultado de

producirlo con este método es la reducción en el tamaño de hojas, lignificación de tallos y mayor frecuencia estomática, que provoca mayor tasa de transpiración (Larramendi et al., 2016).

De igual manera, la incidencia de luz influye en las propiedades organolépticas y características físicas del grano, obteniendo una mayor uniformidad de grano y acidez de la bebida en variedad Caturra, también es mejorada la dureza y cuerpo de la bebida en variedad Catimor. Sin embargo, se ha estudiado que en elevaciones mayores a los 1300 msnm, el gradiente de sombra no genera una diferencia significativa en la producción y calidad de grano (Salazar, Muschler, Sánchez, & Jiménez, 2000).

En cuanto al rendimiento de café oro, se ha demostrado en diversos estudios que la exposición a pleno sol combinado con una gran cantidad de insumos, eleva la producción de 10 a 20% (Fournier, 1988). Cabe mencionar que el café en sistemas agroforestales no reduce el rendimiento y bajo un sistema con uso intensivo de insumos orgánicos puede llegar a superar el rendimiento del cultivo a pleno sol con manejo convencional (Moraga et al., 2011).

Lo anterior es consecuencia de la influencia del arbolado sobre características físicas del suelo como la densidad aparente y el espacio poroso que, a su vez, están ligados con el crecimiento y desarrollo de las raíces. Además, la sombra de los árboles proporciona condiciones de microclima, donde la temperatura del suelo puede disminuir hasta 1 °C, a la vez que incrementa la humedad gravimétrica hasta en un 10% (Cardona C. & Sadeghian K., 2005).

El café bajo sombra también brinda al productor beneficios económicos esporádicos por la venta de madera. En el estado de Veracruz, donde el café se asocia con especies de alto valor económico como el cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*), se aprovecha la leña y madera para muebles rústicos (Hernández, Alfonso, Briseño, & García, 2017).

Espaciamiento y edad del arbolado

El manejo del porcentaje de sombra que se brinda al cultivo de café depende directamente del espaciamiento y la edad del arbolado, ya que, a mayor densidad

de plantación, se origina menor incidencia de radiación para el café. De igual manera, cuando los árboles han alcanzado la edad adulta, sus copas son más cerradas, impidiendo el paso de la luz hacia los estratos más bajos. En consecuencia, la plantación de árboles como sombreado brinda diversos beneficios como la supresión de herbáceas, diversificación de productos, mayor control de la humedad del suelo y mejoramiento en la fertilidad, por ello es importante elegir correctamente el espaciamiento del arbolado (Beer & Rica, 1987).

A finales de los años 90, se realizaron investigaciones para determinar la densidad arbórea de *Grevillea robusta*, económicamente viable para productores de café, determinando que al plantar entre 34 y 71 árboles por hectárea, los beneficios económicos son mayores que en un sistema de café a cielo abierto, dado que proporcionan el porcentaje de sombra suficiente para que el cultivo logre un máximo rendimiento, además de protegerlo contra heladas (Baggio, Caramori, Androcioli Filho, & Montoya, 1997).

En estudios más recientes, se ha demostrado que el gradiente de luz influye en el tamaño de hojas, ramas y masa radicular del café (Bote, Ayalew, Ocho, Anten, & Vos, 2018). De este modo, cuando los árboles son jóvenes y han sido plantados con mayor separación, las hojas de café son más pequeñas, el transporte de la raíz a las ramas es más veloz y el sistema radicular crece, pues necesita un volumen mayor de agua para compensar aquella pérdida por transpiración.

Es por ello que no se debe desestimar la planeación y espaciamiento del arbolado en la producción agroforestal de café, pues se ha demostrado que con un 55% de sombra, se obtiene una tasa fotosintética óptima en las plantas de café, dado que los estomas sufren menor estrés que en condiciones de cielo abierto, además de maximizar la eficiencia en el uso del quantum de luz (Franck & Vaast, 2009).

El control del espaciamiento, la edad y la cantidad de radiación solar en un sistema agroforestal con café, no solamente influye en el crecimiento de las hojas y cantidad de fotosíntesis, sino que se ha demostrado su actividad en los atributos

sensoriales dulzura, cuerpo y acidez de la bebida, teniendo valores de alta calidad combinando un bajo porcentaje de sombra con la elevación del terreno (Suárez, Rodríguez, & Duran, 2015)

2.1.2 Interacciones químicas entre árboles y el cultivo de café

Existe una amplia gama de estudios que pretenden cuantificar el nitrógeno fijado al suelo por la asociación entre leguminosas y bacterias nitrificantes. Desde hace algunas décadas se ha buscado registrar la cantidad de nitrógeno fijado al suelo por parte de las bacterias asociadas a leguminosas. Un ejemplo es el estudio realizado por Phillips (1980), que calcula de 270 a 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹ con alfalfa (*Medicago sativa*), 75 a 311 kg con soya (*Glycine max*), 25 a 64 kg con frijol (*Phaseolus vulgaris*), 326 a 648 kg con haba (*Vicia faba*), 53 a 69 kg con chícharo (*Pisum sativum*), 58 a 138 kg con trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*) y 163 kg con trébol rojo (*Trifolium pratense*).

Estudios recientes demuestran que en suelos ácidos de Tabasco, la especie herbácea *Mucuna deerengiana* llegó a fijar 522 kg ha⁻¹ de nitrógeno, contrastando con *Cajanus cajan* y *Phaseolus lunatus*, que fijaron 98 y 35 kg ha⁻¹ respectivamente (Córdova-Sánchez et al., 2013).

Sucede lo mismo con otros cultivos como la soya, que tiene potencial para fijar hasta 125 kg ha⁻¹, la alfalfa con una fijación de 190 kg ha⁻¹, o el haba con un potencial de 189 kg ha⁻¹ (Yang et al., 2010).

En otros estudios, se ha demostrado que *Cajanus cajan* puede fijar 154 kg ha⁻¹ bajo condiciones favorables y en suelos donde la bacteria está presente. De igual manera sucede con *Canavalia ensiformis*, que en México puede fijar 318 kg ha⁻¹ (Nuclear & In, 2004), mientras que en Cuba solamente fijó 81.77 kg ha⁻¹ (Martín et al., 2007).

En cuanto a las leguminosas arbóreas, da Silva et al. (2017) cuantifican una fijación biológica de nitrógeno de 18.17 kg ha⁻¹ en 10 años por *Mimosa tenuiflora* en condiciones naturales, cantidad muy escasa comparada con los cultivos anuales previamente mencionados.

Por otra parte, Dinesh, Srinivasan, Hamza, Parthasarathy, & Aipe (2010) reportan 28 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en especies del género *Albizia*, 32 kg para *Gliricidia* y 29 kg para *Garuga* y *Erythrina*, lo que permitió observar que la fijación biológica de nitrógeno en especies arbóreas no es tan efectiva como en los cultivos anuales. Sin embargo, la disponibilidad de carbono incrementa notablemente en cultivos bajo la sombra de dichos árboles, mejorando la calidad del suelo.

Tully, Lawrence, & Scanlon (2012) demostraron diferencias no significativas en las pérdidas de nitrógeno y fósforo al comparar un sistema de producción orgánica (fertilización orgánica) con un sistema tradicional (fertilización química). Sin embargo, a profundidades mayores, las pérdidas de nitrógeno se redujeron por la biomasa de los árboles en el suelo, indicando que los sistemas agroforestales contribuyen al reciclaje de nutrientes a largo plazo (20 años), lo cual puede llegar a reducir el uso de fertilizantes en pequeñas cantidades.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la interacción de las especies arbóreas con el cultivo de café a través del porcentaje de sombra, espaciamiento y edad del arbolado para cuantificar los beneficios físicos que brindan al cultivo.

Aporte nutrimental al cultivo de café mediante la fijación biológica de nitrógeno

La fijación biológica de nitrógeno es un fenómeno que ocurre en las raíces, y consiste en reducir el nitrógeno ambiental (N₂) a NH₃, el cual es un compuesto asimilable por las plantas (Saha et al., 2017). Esto ha sido estudiado durante varias décadas para comprender su estrategia de nodulación y mecanismos moleculares. La investigación debe enfocarse en optimizar dicha asociación y crear nuevas cepas que permitan una mayor cantidad de nitrógeno fijado para contribuir al desarrollo de los cultivos (Dinesh et al., 2010).

El uso de especies leguminosas arbóreas en Sistemas Agroforestales (SAF) de café tiene una influencia positiva al elevar la cantidad de Nitrógeno disponible para la planta, pues la mayoría de las especies de dicha familia forman asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de nitrógeno. En este sentido, Munroe, Soto, Filho, Fulthorpe, & Isaac, (2015) demostraron que la cantidad de

nitrógeno y carbono disponible en un sistema de producción orgánica es mayor en comparación con un sistema tradicional y puntualizan la importancia de realizar estudios más detallados en cuanto a la Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) en SAF con café.

La fijación comienza con la transferencia de electrones a una proteína que contiene hierro (Fe), para que esto suceda, debe haber una proteína con hierro y molibdeno (MoFe) que detona la reacción. La energía necesaria para transferir electrones entre proteínas se obtiene del MgATP. De esta manera, la nitrogenasa requiere 12 MgATP por N_2 reducido a NH_3 , o sea, cuatro moléculas de ATP por cada par de electrones transferidos. Sin embargo, este número no es constante, ya que la cantidad de ATP depende de la concentración de proteína-Fe y proteína-MoFe (Burris, 1999).

Regulación de la nodulación en la fijación biológica de nitrógeno

La nodulación depende de varios factores, como la presencia de bacterias en el suelo o la disponibilidad de ciertos nutrientes útiles para el proceso de infección y síntesis de compuestos indispensables. A continuación, se describen algunas características necesarias para el proceso de nodulación.

Especificidad de la cepa de *Rhizobium*

Las bacterias nitrificantes se encuentran en casi todos los ecosistemas, ya sea de manera libre, como *Azotobacter* o en asociación con especies leguminosas (*Rhizobium*); además de existir en la superficie marítima, por ejemplo, el género *Trichodesmium*. Las especies asociadas a leguminosas tienen una ventaja competitiva sobre aquellas de vida libre, ya que el hospedero les brinda carbohidratos esenciales para su existencia. Estas mismas se dividen filogenéticamente en dos grandes ramas: los géneros más representativos de la primera son *Rhizobium* y *Sinorhizobium*; en la segunda rama se encuentra el género *Bradyrhizobium*, que forma nódulos con una gran cantidad de leguminosas tropicales (Saha et al., 2017).

Estas bacterias pueden formar nódulos con diferentes especies de leguminosas, como se explica en el estudio realizado por Frioni, Rodríguez, & Meerhoff, (2001),

donde se aislaron cepas que presentaron características similares, procedentes de nódulos encontrados en raíces de *Acacia caven*, *Enterolobium contortisiliquum* y *Sesbania virgata*, permitiendo concluir que las bacterias pertenecían al mismo género.

Lo mismo sucede con *Erythrina velutina*, que ha mostrado nodulación con diferentes cepas pertenecientes al género *Rhizobium*, además de presentar elevados índices de fijación biológica de nitrógeno en condiciones *in vitro*, lo que manifiesta su potencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Rodrigues et al., 2018).

Otro género importante en la fijación biológica de nitrógeno con leguminosas es *Bradirhizobium*, el cual tiene más de 20 especies descritas y un alto potencial de formar relaciones simbióticas con especies que no son su hospedero original, como lo demuestra el estudio realizado por Azarias Guimarães et al., (2015), en el cual se probó el potencial que tienen 50 cepas aisladas a partir de nódulos en raíces de *Vigna unguiculata* y *Cajanus cajan*, para nodular soya (*Glycine max*), encontrando que 11 de ellas lograron formar nódulos sanos.

Además de los géneros descritos, se ha encontrado que las leguminosas arbóreas pueden formar nódulos con bacterias pertenecientes a los géneros *Flavobacterium* y *Pseudomonas* en condiciones naturales, razón por la cual es necesario investigar el potencial de ambos géneros para la fijación de nitrógeno (Cardoso et al., 2018).

Proceso de infección

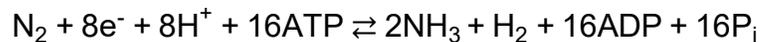
Los nódulos bacterianos pueden apreciarse de dos formas, cilíndrica, y la más común de ellas, la esférica; dichas formas se presentan tanto en nódulos ubicados en raíces como en tallos de algunas leguminosas tropicales (Hadri, Spaink, Bisseling, & Nicholas, 1998).

La nodulación comienza con la activación de señales químicas por parte de la planta a través de su sistema radicular. Cuando la bacteria es atraída hacia los pelos radicales, secreta sustancias reconocidas por la planta, lo cual detona una serie de reacciones que comienzan con la división celular, rizado del pelo radical

e hilos de preinfección, que son conductos contruidos por la bacteria a través de la pared celular y se forman al mismo tiempo que el nódulo en el tejido radical subcutáneo. Cuando esto sucede, la rhizobia penetra en las células del nódulo, donde comienza el proceso de fijación de nitrógeno (Murray, 2011).

Asimilación y metabolismo del nitrógeno fijado

La FBN ocurre en los organismos fijadores gracias a la actividad de dos proteínas, la reductasa, que provee electrones y la nitrogenasa, la cual transforma el nitrógeno atmosférico N_2 ($N\equiv N$) en una molécula asimilable por la planta (NH_3). En la asociación de *Rhizobium* con especies leguminosas (Figura 1), la síntesis de dicha enzima depende de ambos organismos, por lo que han desarrollado mecanismos como la protección respiratoria o la compartimentalización para evitar que el oxígeno entre en contacto con la nitrogenasa, dado que su actividad se inhibe en presencia de este elemento (Juliana, 2004). Dicho proceso requiere dos moléculas de ATP por cada una de N_2 , por lo que el proceso completo, en condiciones ideales, hidroliza 16 moléculas de ATP. Sin embargo, en condiciones naturales el requerimiento es mayor porque el proceso es menos eficiente. La energía requerida se obtiene del proceso fotosintético en organismos autótrofos o por descomposición de materia orgánica en heterótrofos. La estructura de la reductasa (proteína-Fe) se altera al unirse al ATP, lo que disminuye su potencial de reducción y permite la interacción con la dinitrogenasa, formando una asociación temporal con la proteína-MoFe. (Saha et al., 2017). La reacción sucede de la siguiente manera:



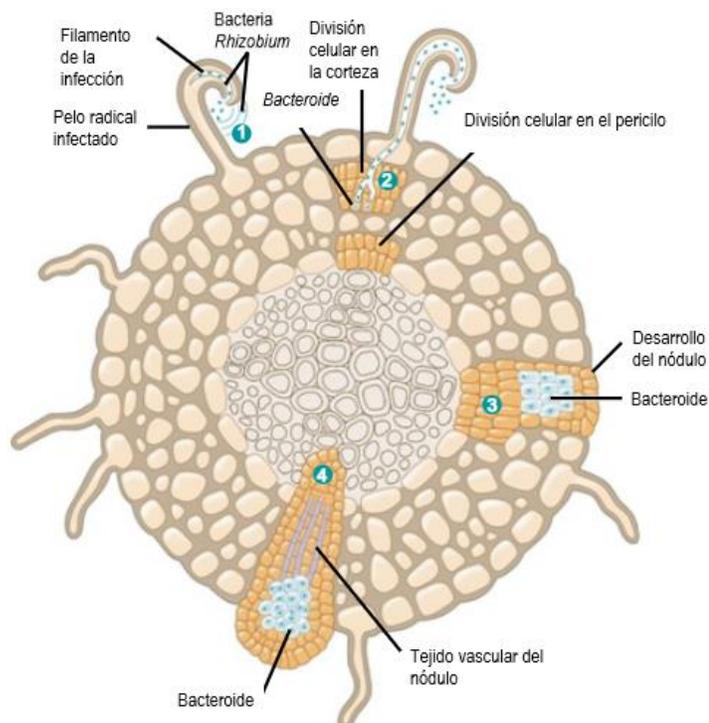


Figura 1. Esquema del proceso de nodulación en las raíces. Fuente: Pearson Education Inc. (2015).

La FBN requiere una gran cantidad de energía que podría ser satisfecha por la producción de carbohidratos en las ramas transportados vía floema, pero al ser un proceso anaeróbico, precisa la presencia de leghemoglobina, la cual mantiene niveles bajos de O_2 en la región infectada (Yadav, McNeil, Redden, & Patil, 2010). La planta transporta productos fotosintéticos de las hojas a los nódulos que sirven como sustrato para la bacteria nitrificante, sin embargo, la mayor fuente de energía en forma de ATP proviene de la fosforilación oxidativa (Saha et al., 2017). La leghemoglobina no es necesaria para el desarrollo de la planta, solamente es producida para regular los niveles de oxígeno e incrementar la energía en los nódulos con el objetivo de brindar las condiciones necesarias para la FBN (Ott et al., 2005).

Factores nutrimentales que regulan la fijación biológica de nitrógeno

Los nódulos bacterianos pueden tener una respuesta positiva a la fertilización química, no solo a la nitrogenada, sino al balance de todos los macro y microelementos. En plantaciones de Eucalipto y Acacia se ha demostrado que la

adición de fósforo (P) incrementa la FBN en la zona radical, por ello, debe procurarse suplir las necesidades nutrimentales del cultivo para promover un incremento en la fijación (Zheng, Li, et al., 2016).

En contraste, cuando la cantidad de nitrógeno en el suelo se eleva mediante fertilización nitrogenada (26.82 mg kg⁻¹ de NO₃⁻ y 12.09 mg kg⁻¹ de NH₄⁺ para este estudio), la FBN se reduce, tanto en plantaciones como en bosques naturales con leguminosas arbóreas. Por tanto, la fertilización nitrogenada no debe exceder los niveles requeridos por la planta, de lo contrario los nódulos quedarán inactivos (Zheng, Chen, et al., 2016).

La disponibilidad de los nutrientes asimilables por la planta puede variar dependiendo el pH, pues cada elemento aumenta o disminuye su disponibilidad en condiciones de acidez o alcalinidad. Así, se sabe que el rango aceptable de pH para la mayoría de los elementos es entre 5.5 y 6.0.

Moran-Centen & Benavides-González (2015) comparan parcelas donde se cultiva café y determinan que la disponibilidad de nutrientes tiene una alta variación producto del manejo. De igual manera, determinan que la cantidad de M.O. influye en características del suelo tales como el pH, humedad, contenido de macro y microelementos y textura. Indican una variación en la disponibilidad de N dependiente de la cantidad de biomasa y el grado de evolución de esta. El P tuvo una disponibilidad alta y el contenido de K fue muy bajo, en función de la altitud a la que se encontraban los cultivos.

En este sentido, la altitud tiene una función importante en la disponibilidad de elementos, encontrando suelos más fértiles en las zonas bajas. Pero esto no necesariamente significa que las partes altas tienen una ausencia total de algunos elementos. Bauw, Asten, Jassogne, & Merckx (2016) compararon parcelas de producción cafetalera para conocer las variaciones nutrimentales asociadas con la altitud y encontraron que el N y Ca tuvieron mayor presencia en elevaciones más altas, el P y Mg en elevaciones medias y el K y S en las partes bajas de la zona de estudio.

La disponibilidad de los elementos antes mencionados es muy importante cuando se pretende fijar nitrógeno ambiental mediante leguminosas, pues al existir una deficiencia de P, K y S, se reduce el número y tamaño de los nódulos bacterianos, pues están fuertemente relacionados con procesos metabólicos dentro de la planta (Divito & Sadras, 2014).

En la búsqueda de productos menos nocivos para el ambiente, las bacterias nitrificantes han tenido una importancia significativa, dado que pueden fijar la cantidad de N requerida por los cultivos sin necesidad, en algunos casos, de adicionar fertilizantes nitrogenados. La inoculación con dichas bacterias tiene gran importancia en la producción orgánica, como es el caso de la Soya (*Glycine max*), que ha presentado una alta nodulación en sus raíces y elevadas concentraciones de N fijado, con tratamientos que incluyen 600 mL ha⁻¹ de inoculante adicionado con Ca y B (Pedrozo, De Oliveira, & Alberton, 2018). El calcio (Ca) es necesario para la fijación biológica de nitrógeno, pero en condiciones de escasez puede ser reemplazado por el estroncio (Sr) (Saha et al., 2017).

Los microorganismos responsables de la fijación de N₂ requieren la presencia de nutrientes tales como molibdeno, hierro, calcio y cobalto, siendo el primero esencial para la fijación de nitrógeno, con la posibilidad de ser reemplazado, en algunos organismos carentes del mismo, por el vanadio (V). De igual manera, el Co es un elemento esencial para el crecimiento de los microorganismos fijadores de N₂ (Saha et al., 2017).

Condiciones físicas favorables para la nodulación

Como se ha indicado en párrafos anteriores, existen factores que favorecen o inhiben la nodulación. Por ello, existen variaciones en la disponibilidad de nutrientes, enzimas y actividad microbiana dependiendo la especie asociada al cultivo de café. Hay estudios que demuestran que la rizósfera en suelos con especies arbóreas es más activa y que los exudados de las raíces tienen una alta influencia en las propiedades del suelo (Dinesh et al., 2010). Las modificaciones a las condiciones físicas y biológicas del suelo suelen ser benéficas para el cultivo

del café, de ahí la importancia de cultivarlo bajo la sombra de especies leguminosas.

La salinidad es una característica que deteriora la nodulación, pues interfiere en la formación del pelo radical, la comunicación entre el *Rhizobium* y la planta, el rizado que sucede cuando la bacteria ha entrado al pelo radical. La mayoría de las leguminosas en condiciones de salinidad presentan bajo crecimiento, menor número de pelos radicales y deformaciones en los mismos. La comunicación entre la planta y la bacteria por medio de flavonoides se ve interrumpida en suelos salinos (Bruning & Rozema, 2013).

Sin embargo, la mayoría de las cepas de *Rhizobium* que han evolucionado en suelos salinos muestran una alta tolerancia a la salinidad y resistencia a pH poco favorable (Frioni et al., 2001).

En condiciones de escasa humedad como sucede en el bosque tropical seco, la nodulación de *Rhizobium* en especies leguminosas se ve fuertemente condicionada por la profundidad del suelo y el pH, de manera que la mayor cantidad de nódulos se encuentra a profundidades menores a 20 cm (mayormente 10 cm); y en un pH de 6.0, la misma especie nodula casi el doble que en pH de 5.0 (Rincón, González, & Betancourt, 1997).

2.2 Diagnóstico nutrimental

El estado nutrimental de todo cultivo es de suma importancia para alcanzar máximos rendimientos en la producción. Para ello, el suelo debe aportar la cantidad óptima de los elementos requeridos para los procesos metabólicos del cultivo, de manera que, al presentarse carencia de algún elemento, la parte aérea de la planta sufrirá modificaciones que disminuirán su salud. Afortunadamente, la nutrición es un factor que puede manipularse mediante la fertilización química, pero es de suma importancia realizar los análisis correspondientes para conocer la calidad del suelo donde se encuentra la plantación. Dichos análisis se presentan a continuación:

- a) **Análisis foliar:** Las concentraciones de elementos necesarios para cada etapa han sido establecidos para la mayoría de los cultivos. Es posible

analizar cualquier órgano de la planta, pero normalmente se analizan las hojas. Este dato, junto con el análisis de suelo, permite definir si existe una carencia de nutrientes. El análisis foliar permite diagnosticar deficiencias nutrimentales en la planta e indirectamente en el suelo, los principales criterios para interpretar los resultados son el nivel crítico de deficiencia y toxicidad. Es utilizado con mayor frecuencia en cultivos perennes, ya que su utilidad en anuales es limitada y puede emplearse para medir la eficiencia del uso de fertilizantes (Etchevers B., 2000).

- b) **Análisis de suelo:** El análisis de suelo, como se mencionó previamente, es utilizado para determinar la calidad nutritiva de un terreno y las diferencias que éste presenta para cierto cultivo. Comienza con la determinación del pH, normalmente usando un potenciómetro y su importancia radica en la influencia que tiene sobre la disponibilidad de cada nutriente.

El siguiente valor con importancia en el análisis de suelo es la cantidad de materia orgánica (M.O.), que se determina mediante la oxidación del carbono (método de combustión húmeda) en una solución sulfúrica. La M.O. indica el nivel de reciclaje de nutrientes en el suelo. Los macro y micronutrientes se determinan mediante métodos químicos diferentes en condiciones de laboratorio (Paneque P. et al., 2010).

2.2.1 Requerimientos nutrimentales de café (macronutrientes y micronutrientes)

Con el uso de los índices antes mencionados se pueden estimar los requerimientos nutricionales de cada cultivo, sin embargo, los resultados obtenidos serán válidos únicamente para la región específica donde se hayan colectado las muestras, de lo contrario, existirán variaciones producto de las condiciones climáticas y edáficas.

En México, la investigación al respecto es limitada o no existe, sin embargo, para el caso específico de la región de estudio, Audate, Maldonado Torres, Álvarez Sánchez, Torres Rivera, & Ramírez Maldonado (2016), realizaron un análisis en

el cual concluyeron que el N, K y Cu se encontraron en una proporción normal, el Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu en niveles bajo lo normal y P, S y B en niveles de concentración altos. El Cuadro 1 muestra los valores medios nutrimentales reportados por Audate et al. (2016) para los tres sistemas agroforestales de café estudiados en la región de Huatusco, Veracruz.

Cuadro 1. Resultados del análisis foliar realizado por (Audate et al., 2016) en las tres parcelas experimentales ubicadas en Huatusco, Veracruz.

Nutrientes	Sistema I	Sistema II	Sistema III
N %	0.79	0.69	0.73
P %	0.17	0.16	0.19
K %	3.72	5.07	3.45
Ca %	1.31	0.94	1.43
Mg %	0.3	0.22	0.41
Fe (mg kg ⁻¹)	205.58	163.28	155.71
Mn (mg kg ⁻¹)	164.08	179.93	243.75
S (mg kg ⁻¹)	0.37	0.33	0.4
Zn (mg kg ⁻¹)	11.7	12.58	12.58
Cu (mg kg ⁻¹)	8.23	7.9	6.1
B (mg kg ⁻¹)	113.9	88.43	127.43

En un estudio similar en Brasil, Partelli, Vieira, De Carvalho, & Filho, (2007) reportaron las siguientes concentraciones (Cuadro 2) como valores normales para las plantas de café en dicha región específica.

Cuadro 2. Concentraciones nutrimentales requeridas por plantas de café en la región de Zona de Mata, Brasil reportados por Partelli et al., (2007).

Nutrientes	Rango de suficiencia
N (g kg ⁻¹)	30.2 – 33.8
P (g kg ⁻¹)	1.18 – 1.88
K (g kg ⁻¹)	15.8 – 22.6
Ca (g kg ⁻¹)	10.3 – 14.7
Mg (g kg ⁻¹)	2.34 – 3.52
S (g kg ⁻¹)	1.24 – 2.06

Nutrientes	Rango de suficiencia
B (mg kg ⁻¹)	40.6 – 83
Cu (mg kg ⁻¹)	7.6 – 32
Fe (mg kg ⁻¹)	45 – 155
Mn (mg kg ⁻¹)	22.8 – 191
Zn (mg kg ⁻¹)	8.51 – 17.7

Otro estudio similar realizado en los estados de Lara, Yaracuy, Portuguesa y Trujillo, en Venezuela, reporta requerimientos nutricionales similares al estudio mencionado previamente, con diferencias mínimas en Zn y Ca. El Cuadro 3 muestra los valores en g kg⁻¹ de materia seca obtenida a partir del análisis foliar (Arizaleta, Rodríguez, & Rodríguez, 2002).

Cuadro 3. Valores nutrimentales normales en materia seca de hojas para la región cafetalera de Venezuela, reportados por (Arizaleta et al., 2002).

Nutrientes	Normales
N (g kg ⁻¹)	32.30
P (g kg ⁻¹)	1.50
K (g kg ⁻¹)	13.50
Ca (g kg ⁻¹)	19.40
Mg (g kg ⁻¹)	4.70
Zn (mg kg ⁻¹)	20.95
Fe (mg kg ⁻¹)	100.82
Cu (mg kg ⁻¹)	16.12
Mn (mg kg ⁻¹)	196.24

2.2.2 Niveles de suficiencia y toxicidad

Los términos suficiencia y toxicidad hacen referencia a niveles de escasez y exceso de nutrientes en el suelo respectivamente, se determinan comparando el análisis foliar y de suelo con estándares establecidos para tomar decisiones con respecto a la fertilización del cultivo. Existen categorías para definir la deficiencia del nutriente en el suelo de acuerdo con el rendimiento que se puede obtener en el cultivo, las cuales son: a) Muy baja, cuando existe una deficiencia severa en el

cultivo y es necesario fertilizar con grandes cantidades de dicho elemento; b) Baja, cuando presenta una deficiencia moderada y se requiere una alta cantidad de fertilizante; c) Moderada, cuando solo se aplica el fertilizante para obtener máximos rendimientos; d) Alta, cuando solo se aplican cantidades pequeñas para mantener el equilibrio en el suelo; e) Muy alta, cuando el elemento se encuentra en cantidades que podrían llegar a ser tóxicas para algunos cultivos (Osorio, 2012a). Estos valores pueden variar en pequeñas cantidades dependiendo del estudio citado, la época de muestreo foliar, la región donde se encuentra el cultivo, etc.; por ejemplo, Osorio (2012b) propone que los niveles de nutrientes en las hojas del cultivo de café deben encontrarse dentro de los rangos que muestra el Cuadro 4.

Cuadro 4. Concentración de elementos en condiciones óptimas para el cultivo de café. Fuente: Osorio (2012b).

Elemento	Concentración	
N	2.5-2.8	
P	0.2-0.4	
K	3.0-3.5	%
Ca	1.0-2.0	
Mg	0.4-0.12	
S	0.3-0.8	
B	20-50	
Cu	4-10	ppm
Fe	25-100	
Mn	20-150	
Mo	0.1-0.15	
Zn	15-40	

Bajo esta premisa, Sadeghian-Khalajabadí (2009) señala que los niveles críticos de P son 11 y 25 mg kg⁻¹ respectivamente para suelos de la región cafetalera colombiana, mientras que, en Kenia, los niveles son 15 y 30 mg kg⁻¹, en Brasil, entre 15 y 22 mg kg⁻¹ y en India, 7 mg kg⁻¹. De igual manera, determinó mediante un modelo rectilíneo-discontinuo que los niveles de suficiencia y toxicidad de K se encuentran entre 0.36 y 0.80 cmol₍₊₎ kg⁻¹, sin presentar una diferencia relevante entre sistemas a cielo abierto y bajo sombra. En el caso del Mg, las concentraciones críticas reportadas se encuentran entre 0.5 y 1 cmol₍₊₎ kg⁻¹.

En suelos ácidos es muy probable tener problemas de toxicidad por Al y Mn, lo que provoca una baja actividad microbiana, así como bajas concentraciones de Ca, Mg y K, condiciones que algunas plantas han evolucionado para tolerar hasta cierto punto. La toxicidad por Al está relacionada con la baja producción de pelos radicales, lo que tiene como consecuencia una disminución en la absorción de nutrientes; mientras que la toxicidad por Mn provoca defoliación y mutaciones genéticas en las células. Esta condición puede corregirse aplicando cal dolomítica ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), pues forma compuestos menos perjudiciales para la planta; sin embargo, el exceso de dicha enmienda, puede provocar deficiencias de P, K y Zn (Ortiz, Braeuner, & Vean, 1996).

De acuerdo con Naranjo Polania (2018), los síntomas de deficiencia y toxicidad de algunos nutrientes en el cultivo de café, se pueden observar en las hojas, como se muestra el Cuadro 5.

Cuadro 5. Síntomas de deficiencia y toxicidad de algunos elementos en plantas de café. Fuente: Naranjo Polania (2018).

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
B	Manchas color café en hojas nuevas. Muerte de yemas apicales y aparición de nuevos brotes. Tejido corchoso en nervaduras de hojas maduras.	Hojas viejas color amarillento y manchas secas en bordes y punta.
Zn	Hojas jóvenes muy pequeñas, lanceoladas y cloróticas. Entrenudos cortos. Menor pegado de flor y frutos pequeños. Baja producción de semilla.	Hojas maduras completamente amarillas.
Mn	Hojas jóvenes más grandes de lo normal, de color verde claro y nervaduras más oscuras. Lesiones necróticas en las hojas. Desorganización de la membrana del tilacoide.	Entrenudos cortos, hojas pequeñas, amarillentas y deformes. Clorosis y necrosis entre las nervaduras.
Fe	Hojas nuevas amarillas a verde pálido. Falta de clorofila. En casos extremos, las hojas se tornan blancas con lesiones necróticas. Modifica la estructura de los cloroplastos.	
Cu	Nervaduras secundarias salientes en hojas jóvenes. Inclinación hacia abajo desde la base de la hoja. Reducción de lignificación y acumulación de fenoles.	Hojas amarillentas a lo largo de la nervadura principal, muerte de raíces, defoliación.

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
Mo	Manchas amarillentas en hojas viejas, luego pardas entre las nervaduras. Se enrollan hacia abajo a lo largo de la nervadura principal y los bordes llegan a tocarse.	
Ni	Disminución de la actividad de la ureasa y posterior toxicidad de la urea (necrosis en la punta de la hoja). Incremento en la senescencia de la planta y reducción de concentración de Fe en el tejido.	Concentraciones superiores a 35 g g ⁻¹ MS son tóxicas para plántulas de café.

Los niveles de suficiencia y toxicidad también dependen del estado fenológico del cultivo, pues en plántulas de café, al suministrar 1 g de N por planta o más, se presentan condiciones de toxicidad, mientras que concentraciones menores, no tienen efectos sobre el cultivo. De igual manera, al fertilizar con más de 2 g de K por planta, éstas pueden sufrir daños por toxicidad (Mancilla Díaz, Miranda Salas, & Mendoza García, 2015).

2.3 Diseño de sistema agroforestal óptimo para el cultivo de café

La información previa nos permite vislumbrar un escenario óptimo para el cultivo del café, que puede variar en función de las condiciones climáticas y edáficas del sitio, pero que, de manera general, permite un acercamiento a las condiciones requeridas por las plantas para expresar su máximo potencial genético.

Como se abordó previamente, el sombreado óptimo para el desarrollo de los cafetos es de 55%, que puede ser cubierto por especies como *Grevillea robusta* y *Erythrina poeppigiana*. Sin embargo, al momento de plantar los árboles, el café no tendrá sombra, por lo que es necesario suplir las necesidades hídricas del cultivo. En condiciones naturales, la región cafetalera del estado de Veracruz puede suplir dicho déficit, pues la necesidad hídrica del cultivo es aproximadamente de 5,399 m³ ha⁻¹ al año (Cisneros Zayas, González Robaina, Martínez Varona, López Seijas, & Rey García, 2015). En la región de Huatusco llueven aproximadamente 1,970 mm anuales, lo cual significa 19,700 m³ ha⁻¹, restando la evaporación que es de 1,034 mm, quedan 9,360 m³ ha⁻¹, demostrando que en dicha región, la precipitación es mayor que la evapotranspiración.

2.3.1 Manejo nutrimental óptimo

El manejo nutrimental es quizá el factor más relevante que determina la producción y rendimiento. Por esto, se debe prestar especial atención a las necesidades del cultivo sin excederse en la aplicación de fertilizantes, ya que esto puede provocar efectos negativos como la salinización y lixiviación, que conllevan a un desbalance nutrimental en el suelo.

Fertilización adecuada para el cultivo de café

El crecimiento y producción óptimos para el café dependen en gran medida de la nutrición. A pesar de la diferencia climatológica y edáfica que existe en los países que cultivan dicho producto, el pH ácido en suelos es una constante. Esto puede acarrear ciertas deficiencias, ya que en pH entre 4.7 y 5.2, el aluminio precipita en forma de $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, provocando mayor acidificación en el suelo y la consecuente muerte de los pelos radicales, con lo cual la planta no puede absorber Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y NH_4^+ . De igual manera, puede inhibir la absorción de los iones H_2PO_4^- , SO_4^{2-} y MoO_4^{2-} , además de perjudicar la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición de materia orgánica y fijación de nitrógeno (Osorio, 2012c).

En consecuencia, la fertilización del café es necesaria si se pretende alcanzar su producción máxima, pero existen ciertas limitantes a tomar en cuenta cuando se propone un manejo nutrimental del cultivo. En suelos con pH por debajo de 5.5, la absorción de N, P, K, Ca, Mg, S y Mo se verán reducidas por efecto de antagonismos. Por esta razón, algunas dosis de fertilización aplicadas al suelo no generan diferencias significativas en el rendimiento de cosecha, pues aunque los nutrientes se encuentren en el sustrato, la planta no podrá absorberlos. Sin embargo, con un adecuado manejo del sombreado (45% de sombra), puede existir una diferencia en la fertilización, quizá debido al cambio en la temperatura y materia orgánica, entre otros factores (Farfán-Valencia & Mestre-Mestre, 2004).

En estudios realizados en la región central de Colombia, se ha determinado que cada planta de café necesita 560 kg ha^{-1} de N, 52 kg ha^{-1} de P, 520 kg ha^{-1} de K, 240 kg ha^{-1} de Ca y entre 60 y 120 kg ha^{-1} de Mg durante los 2,000 días después

de la siembra. Esto puede sufrir algunas variaciones dependiendo de las condiciones climáticas y de fertilidad en cada sitio, pero como se mencionó con anterioridad, la fertilización al suelo pierde efectividad en condiciones de pH menor a 5.5 (Sadeghian Khalajabadi, 2008). En contraste, en suelos cubanos del tipo Cambisol, la fertilización con 100 kg ha⁻¹ de N logró los más altos rendimientos (1.48 – 2.00 t ha⁻¹ de café oro) a partir de la tercera cosecha (Pérez, Bustamante, Rivera, & Viñals, 2010).

Debido a las dificultades presentadas en suelos ácidos con respecto a la disponibilidad de algunos elementos esenciales, la fertilización foliar es una necesidad para ayudar a los cafetos a expresar todo su potencial genético. Algunos productos que han mostrado resultados en condiciones de vivero contienen Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, Mo y extracto de algas marinas que aportan aminoácidos de fácil absorción. Otro elemento importante en la fertilización foliar es el P, el cual influye en la síntesis de ATP que constituye una de las principales fuentes de energía para todos los procesos metabólicos. Dicho elemento es muy poco móvil en el suelo (Andagoya Dávalos et al., 2014).

Funcionamiento de los nódulos bacterianos

A pesar de que las plantas de café se adaptan sin mayor dificultad a los suelos ácidos, la actividad nodular en las especies leguminosas arbóreas puede reducir la fijación de nitrógeno, ya que el pH tiene influencia en el crecimiento de *Rhizobium* y producción de flavonoides por parte de la planta para atraer a la bacteria, disminuyendo el éxito de infección. Sin embargo, en algunas cepas de *Rhizobium* el rango de pH es de 4 a 9, por lo que dicha variable no es determinante para la fijación en SAF con café (Rivera, Barbosa, & Bonilla, 2012; Sanjuán Pinilla, 2001).

Otro factor determinante para el proceso de nodulación es la especie hospedera, pues se ha demostrado que pueden modificar ciertos aspectos del simbiote, como la actividad nitrogenasa o la misma fijación biológica de nitrógeno, llegando a producirse mutaciones en *Rhizobium* o *Bradirhizobium* que fijan mayor cantidad de N, pero solo se asocian a una especie en particular (Palacios et al., 2015).

2.3.2 Rendimiento y calidad de cosecha en SAF con leguminosas arbóreas

El rendimiento del café es difícil de evaluar, pues presenta variaciones anuales que no dependen de la nutrición, sino de factores genéticos. En plantaciones con *Inga sp.* como sombra para el café, se ha cuantificado una producción de 0.725 t ha⁻¹ con una densidad aproximada de 3,000 plantas por hectárea (Peeters, Soto-Pinto, Perales, Montoya, & Ishiki, 2003), valor que resulta muy bajo en comparación con los rendimientos obtenidos en Cuba, que se encuentran entre 1.48 y 2.00 t ha⁻¹ con una densidad de 1,666 plantas por hectárea en monocultivo.

A pesar de lo anterior, en algunas ocasiones la producción de café con poca sombra puede ser mayor debido a la tasa fotosintética, tal es el caso de Farfán-Valencia & Mestre-Mestre (2004), donde la producción tuvo una media de 2.4 t ha⁻¹ con un distanciamiento entre árboles de 12 m por 12 m.

En México existen productores que pueden llegar a obtener rendimientos de 3.43 t ha⁻¹ en el municipio de Cuetzalan, Puebla, con un paquete tecnológico que incluye fertilización foliar y al suelo, mientras que el promedio a nivel nacional se encuentra en 1.92 t ha⁻¹ (Benítez-García, Jaramillo-Villanueva, Escobedo-Garrido, & Mora-Flores, 2015).

2.4 LITERATURA CITADA

Andagoya Dávalos, E. A., Suazo Lara, T. L., Sierra, A., Pineda, R., Huete, M., & Zelaya, R. H. (2014). *Análisis comparativo de tres sustratos y dos paquetes de fertilización para viveros de café*. Escuela Agrícola Panamericana.

Araujo, K. E. C., Vergara, C., Guimarães, A. P., Rouws, J. R. C., Jantalia, C. P., Urquiaga, S., ... Boddey, R. M. (2018). Changes in ¹⁵N natural abundance of biologically fixed N₂ in soybean due to shading, rhizobium strain and plant growth stage. *Plant and Soil*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3627-4>

Arizaleta, M., Rodríguez, V., & Rodríguez, O. (2002). DRIS foliar norms for coffee. *Acta Horticulturae*, 594, 405–409. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.594.52>

Audate, E., Maldonado Torres, R., Álvarez Sánchez, M. E., Torres Rivera, J. A.,

- & Ramírez Maldonado, H. (2016). *Diagnóstico nutrimental de tres sistemas agroforestales de Coffea arabica L. cultivado bajo sombra Veracruz, México*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Azarias Guimarães, A., Florentino, L. A., Alves Almeida, K., Lebbe, L., Barroso Silva, K., Willems, A., & de Souza Moreira, F. M. (2015). High diversity of Bradyrhizobium strains isolated from several legume species and land uses in Brazilian tropical ecosystems. *Systematic and Applied Microbiology*, 38(6), 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2015.06.006>
- Baggio, A. J., Caramori, P. H., Androcioli Filho, A., & Montoya, L. (1997). Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of Grevillea robusta. *Agroforestry Systems*, 37(2), 111–120. <https://doi.org/10.1023/A:1005814907546>
- Bauw, P. De, Asten, P. Van, Jassogne, L., & Merckx, R. (2016). Agriculture , Ecosystems and Environment Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt . Elgon. “*Agriculture, Ecosystems and Environment*,” 231(2016), 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.036>
- Beer, J., & Rica, C. (1987). Advantages , disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee , cacao and tea, 3–13.
- Benítez-García, E., Jaramillo-Villanueva, J. L., Escobedo-Garrido, S., & Mora-Flores, S. (2015). Caracterización de la producción y del comercio de café en el municipio de Cuetzalan, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(2), 181–198.
- Bote, A. D., Ayalew, B., Ocho, F. L., Anten, N. P. R., & Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 92(October 2017), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.007>

- Bruning, B., & Rozema, J. (2013). Symbiotic nitrogen fixation in legumes: Perspectives for saline agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.001>
- Burris, R. H. (1999). Advances in biological nitrogen fixation. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 22, 381–393.
- Cardona C., D. A., & Sadeghian K., S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*, 56(4), 348-364.
- Cardoso, P., Alves, A., Silveira, P., Sá, C., Fidalgo, C., Freitas, R., & Figueira, E. (2018). Bacteria from nodules of wild legume species: Phylogenetic diversity, plant growth promotion abilities and osmotolerance. *Science of the Total Environment*, 645, 1094–1102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.399>
- Cisneros Zayas, E., González Robaina, F., Martínez Varona, R., López Seijas, T., & Rey García, Á. R. (2015). Respuesta productiva del cafeto al manejo del riego. Función agua-rendimiento. *Soil and Water*, 24(4), 5–11.
- Córdova-Sánchez, S., Cárdenas-Navarro, R., Peña-Cabriales, J. J., Salgado-García, S., Castelán-Estrada, M., Lobbit-Phellipe, C., & Vera-Núñez, J. A. (2013). Fijación biológica de nitrógeno por cuatro fabáceas en suelos ácidos de Tabasco, México. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 45(1), 1–9.
- da Silva, A. F., de Freitas, A. D. S., Costa, T. L., Fernandes-Júnior, P. I., Martins, L. M. V., Santos, C. E. de R. e. S., ... Sampaio, E. V. de S. B. (2017). Biological nitrogen fixation in tropical dry forests with different legume diversity and abundance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 107(3), 321–334. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9834-1>
- Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S., Parthasarathy, V. A., & Aipe, K. C. (2010). Physico-chemical, biochemical and microbial properties of the rhizospheric soils of tree species used as supports for black pepper cultivation in the

humid tropics. *Geoderma*, 158(3–4), 252–258.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.034>

Divito, G. A., & Sadras, V. O. (2014). Field Crops Research How do phosphorus , potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes ? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 156, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.004>

Etchevers B., J. D. (2000). Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Revista Chapingo*, 209–219.

Farfán-Valencia, F., & Mestre-Mestre, A. (2004). Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes, 55(2), 161–174.

Fournier, L. A. (1988). El cultivo del cafeto (*Coffea arabica* L.) al sol o a la sombra: Un enfoque agronomico y ecofisiologico. *Agronomia Costarricense*, 12(1), 131–146.

Franck, N., & Vaast, P. (2009). Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Trees - Structure and Function*, 23(4), 761–769.
<https://doi.org/10.1007/s00468-009-0318-z>

Froni, L., Rodríguez, A., & Meerhoff, M. (2001). Differentiation of rhizobia isolated from native legume trees in Uruguay. *Applied Soil Ecology*, 16(3), 275–282.
[https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00124-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00124-4)

Hadri, A., Spaink, H. P., Bisseling, T., & Nicholas, J. (1998). Diversity of Root Nodulation and Rhizobial Infection Processes. In H. P. Spaink (Ed.), *The Rhizobiaceae* (pp. 347–360). Kluwe Academic Publishers.

Hernández, S. S., Alfonso, M., Briseño, M., & García, V. (2017). Diversificación de la sombra tradicional de cafetales en Veracruz mediante especies maderables Diversification of the traditional shadow of coffee trees in Veracruz through timber species. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 7–17.

- Juliana, M.-F. (2004). Fijación biológica de nitrógeno. *UDO Agrícola*, 4(1), 1–20.
- Larramendi, L. A. R., Hernández, F. G., Castro, H. G., Flores, M. F., Castañeda, J. C. G., & Ruiz, R. P. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronomica*, 65(3), 248–254. <https://doi.org/dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.46731>
- Leite, A. A. L., De Lima Ferraz Junior, A. S., De Moura, E. G., & Das Chagas Ferreira Aguiar, A. (2008). Comportamento de dois genótipos de milho cultivados em sistema de aléias preestabelecido com diferentes leguminosas arbóreas. *Bragantia*, 67(4), 875–882. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000400009>
- Mancilla Díaz, G. E., Miranda Salas, J. A., & Mendoza García, E. M. (2015). *Mejoramiento del plan de nutrición del cultivo de café y su impacto económico en la Granja San Fernando, Piedecuesta, Santander*. Universidad Santo Tomás de Aquino.
- Martín, G. M., Rivera, R. A., & Mujica, Y. (2007). Estimación de la fijación biológica del nitrógeno de la *Canavalia ensiformis* por el método de la diferencia de N total. *Cultivos Tropicales*, 28(4), 75–78.
- Meylan, L., Gary, C., Allinne, C., Ortiz, J., Jackson, L., & Rapidel, B. (2017). Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 245, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.005>
- Moguel, P., Toledo, V. . (2004). Conservar Produciendo. *Biodiversitas*, (55), 1–7.
- Moraga, P., Bolaños, R., Pilz, M., Munguía, R., Jurgén, A., Barrios, M., ... Gamboa, W. (2011). Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan al rendimiento de café (*Coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera*, 11(17), 41–47. <https://doi.org/1998-8850>
- Moran-Centen, J. C., & Benavides-González, Á. (2015). Diagnóstico de suelos en

- cultivos de café (*Coffea arabica* L.), maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), comunidad de Santa Julia, El Crucero, Managua. *La Calera*, 15(24), 26–30.
- Munroe, J. W., Soto, G., Filho, V., Fulthorpe, R., & Isaac, M. E. (2015). Soil microbial and nutrient properties in the rhizosphere of coffee under agroforestry management. *Applied Soil Ecology*, 93, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.04.003>
- Murray, J. D. (2011). Invasion by Invitation : Rhizobial Infection in Legumes. *The American Phytopathological Society*, 24(6), 631–639.
- Naranjo Polania, D. F. (2018). *Efectos de los elementos menores sobre la productividad del café (Coffea arabica L.) en la zona cafetera colombiana*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Nuclear, O. F., & In, T. (2004). *JOINT FAO / IAEA DIVISION Co-ordinated Research Project on “ Development of Management Practices for Sustainable Crop Production Systems on Tropical Acid Soils through the Use of Nuclear and Related Techniques .”*
- Ortiz, R., Braeuner, M., & Vean, M. (1996). Acidez del suelo como causa del " Mal de Viñas " del café (*Coffea arabica* L .) en Guatemala : un estudio de invernadero. *Ceiba*, 37(2), 291–298.
- Osorio, N. W. (2012a). Cómo interpretar los resultados del análisis de fertilidad del suelo. *Boletín Del Manejo Integral Del Suelo y La Nutrición Vegetal*, 1(6), 1–3.
- Osorio, N. W. (2012b). El análisis foliar: una poderosa herramienta para diagnosticar el estado nutricional de los cultivos, pasturas y plantaciones. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(3), 1–4.
- Osorio, N. W. (2012c). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 4–7. Retrieved from [http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH del suelo y nutrientes_0.pdf](http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH_del_suelo_y_nutrientes_0.pdf)

- Ott, T., Van Dongen, J. T., Günther, C., Krusell, L., Desbrosses, G., Vigeolas, H., ... Udvardi, M. K. (2005). Symbiotic leghemoglobins are crucial for nitrogen fixation in legume root nodules but not for general plant growth and development. *Current Biology*, 15(6), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.01.042>
- Palacios, J. M., Rey, L., Durán, D., García, R., Pacheco, A., Bautista, A., ... Ruiz-argüeso, L. R. T. (2015). Intercambio de nutrientes y señales en la simbiosis Rhizobium-leguminosa. *Microbiología de Plantas*, 60, 61–62.
- Paneque P., V. M., Calaña N., J. M., Calderón V., M., Borges B., Y., Hernández G., T., & Caruncho C., M. (2010). *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*. (INCA, Ed.) (1st ed.). La Habana: INCA.
- Partelli, F. L., Vieira, H. D., De Carvalho, V. B., & Filho, F. D. A. A. M. (2007). Diagnosis and recommendation integrated system norms, sufficiency range, and nutritional evaluation of Arabian coffee in two sampling periods. *Journal of Plant Nutrition*, 30(10), 1651–1667. <https://doi.org/10.1080/01904160701615525>
- Pedrozo, A., De Oliveira, N. J. G., & Alberton, O. (2018). Biological nitrogen fixation and agronomic features of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) crop under different doses of inoculant. *Acta Agronomica*, 67(2), 297–302. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.56375>
- Peeters, L. Y. K., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., & Ishiki, M. (2003). Coffee production , timber , and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in Southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95, 481–493.
- Pérez, A., Bustamante, C., Rivera, R., & Viñals, R. (2010). La fertilización nitrogenada de *Coffea canephora* Pierre var. Robusta en función del rendimiento y algunos indicadores químicos y microbiológicos de suelos cambisoles de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 31(3), 66–74.

- Phillips, D. A. (1980). Efficiency of symbiotic nitrogen fixation in legumes. *Plant Physiology*, 31, 29–49.
- Rincón, J. J., González, I., & Betancourt, M. (1997). Evaluación radicular y distribución de nódulos en *Stylosanthes hamata* bajo condiciones de bosque muy seco tropical. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 5(1), 57–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/102780>
- Rivera, M., Barbosa, H. de J., & Bonilla, R. (2012). *Formulación de un prototipo de biofertilizante con base en Rhizobium sp.* Universidad Nacional de Colombia.
- Rodrigues, D. R., Silva, A. F. da, Cavalcanti, M. I. P., Escobar, I. E. C., Fraiz, A. C. R., Ribeiro, P. R. de A., ... Fernandes-Júnior, P. I. (2018). Phenotypic, genetic and symbiotic characterization of *Erythrina velutina* rhizobia from Caatinga dry forest. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(3), 503–512. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.09.007>
- Romero Lopez, S. A. (2006). *Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (Coffea arabica var. Caturra), con tres niveles de manejo.* Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Sadeghian-Khalajabadí, S. (2009). Calibración de análisis de suelo para N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Cenicafé*, 60(1), 7–24.
- Sadeghian Khalajabadi, S. (2008). *Fertilizad del suelo y nutricion del cafe en Colombia.* (S. M. Marín, Ed.), *Cenicafé* (Primera ed, Vol. 32). Caldas, Colombia: Cenicafé.
- Saha, B., Saha, S., Das, A., Bhattacharyya, P. K., Basak, N., Sinha, A. K., & Poddar, P. (2017). *Agriculturally important microbes for sustainable agriculture.* (V. S. Meena, P. K. Mishra, J. K. Bisht, & A. Pattanayak, Eds.), *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture* (1st ed., Vol. 2). Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5343-6_4
- Salazar, E., Muschler, R., Sánchez, V., & Jiménez, F. (2000). Calidad de *Coffea*

arabica bajo sombra de *Erythrina poeppigiana* a diferentes elevaciones en Costa Rica. *Agroforestería En Las Américas*, 7(26), 40–42.

Sanjuán Pinilla, J. M. (2001). *Importancia de la biosíntesis bacteriana de Leucaena para el establecimiento de la simbiosis Rhizobium-Leguminosa. Editorial de la Universidad de Granada*. Universidad de Granada. Retrieved from [http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH del suelo y nutrientes_0.pdf](http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH_del_suelo_y_nutrientes_0.pdf)

Suárez, J., Rodríguez, E., & Duran, E. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Revista Universidad Nacional De Colombia.*, 64(4), 342–348. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n3.43488>

Tully, K. L., Lawrence, D., & Scanlon, T. M. (2012). More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 161, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.002>

Yadav, S. S., McNeil, D. L., Redden, R., & Patil, S. A. (2010). *Climate Change and Management of Cool Season*. (S. S. Yadav, D. L. McNeil, R. Redden, & S. A. Patil, Eds.) (1st ed.). New York: Springer Science. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3709-1>

Yang, J. Y., Drury, C. F., Yang, X. M., De Jong, R., Huffman, E. C., Campbell, C. A., & Kirkwood, V. (2010). Estimating biological N₂fixation in Canadian agricultural land using legume yields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137(1–2), 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.004>

Zheng, M., Chen, H., Li, D., Zhu, X., Zhang, W., Fu, S., & Mo, J. (2016). Biological nitrogen fixation and its response to nitrogen input in two mature tropical plantations with and without legume trees. *Biology and Fertility of Soils*, 52(5), 665–674. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1109-5>

Zheng, M., Li, D., Lu, X., Zhu, X., Zhang, W., Huang, J., ... Mo, J. (2016). Effects of phosphorus addition with and without nitrogen addition on biological nitrogen fixation in tropical legume and non-legume tree plantations. *Biogeochemistry*, 131(1–2), 65–76. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0265-x>

3 Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café

Rubén Garza-Lau, Ranferi Maldonado-Torres¹*, María Edna Álvarez-Sánchez, José Antonio Torres-Rivera.

¹Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en Agroforestería, Departamento de Suelos. km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. MÉXICO. C.P. 56230

*Autor para correspondencia: Correo-e: ranferimt@yahoo.com.mx

Resumen

El cultivo de café en México se produce bajo sombra con diversos árboles, incluyendo algunas especies fijadoras de nitrógeno, en sistemas denominados agroforestales. El presente estudio se llevó a cabo en el año 2018 en el municipio de Huatusco, Veracruz y el objetivo fue caracterizar los sistemas agroforestales de *Inga vera* y *Erythrina poeppigiana* (una plantación joven y otra adulta) en asociación con café, a través de la medición de sus características físicas, como edad del arbolado, altura, grosor de plantas de café, porcentaje de sombra y las características químicas del suelo y foliar. Posteriormente, los resultados se compararon con un sistema de café-*Juglans pyriformis* para observar las diferencias nutricionales existentes entre plantaciones con leguminosas y no leguminosas. Con estos datos, se propuso el uso de *Erythrina poeppigiana* como sombreado de café, la cual contribuye a mejorar el microclima y la fertilidad del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno.

Palabras clave: fijación de nitrógeno, diagnóstico nutrimental, sombra en café

Abstract

Coffee in Mexico is produced under the shade of various trees, including some nitrogen-fixing species, in agroforestry systems. The present study was carried out in 2018 in the municipality of Huatusco, Veracruz, and the main objective was to characterize the agroforestry systems of *Inga vera* and *Erythrina poeppigiana* (a young and an adult plantation) in association with coffee, through the measurement of their physical

characteristics, such as age of trees, percentage of shade, height and diameter of coffee plants; as well as its chemical characteristics through soil and foliar analyses. Subsequently, the results were compared with a coffee-*Juglans pyriformis* system to observe the nutritional differences between plantations with legumes and non-legumes. With these data, the use of *Erythrina poeppigiana* was proposed as coffee shading, which contributes to improving the microclimate and soil fertility through biological nitrogen fixation.

Keywords: nitrogen fixation, nutritional diagnosis, shade in coffee

Introducción

En el estado de Veracruz, el cultivo de café se realiza bajo la sombra de algunas especies forestales leguminosas, que interactúan con el cultivo de café a nivel físico mediante el porcentaje de sombra y nutrientes a través de la fijación biológica de nitrógeno (FBN). Los sistemas agroforestales de café deben cumplir con un porcentaje de sombra del 55% para reducir el estrés hídrico, lo cual se puede lograr con un correcto espaciamiento de los árboles y mediante podas periódicas (Cisneros y Sánchez, 2015). El presente estudio tiene como objetivo describir las interacciones físicas y químicas de cuatro sistemas agroforestales mediante la medición del porcentaje de sombra, así como del análisis e interpretación de sus valores nutrimentales para proponer un arreglo y manejo nutrimental que permitan obtener máximos rendimientos.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

Este estudio se realizó en un luvisol de la localidad de “La Patrona”, en el municipio de Huatusco, Veracruz. Las parcelas de interés se encuentran entre los 19° 09' 21'' y 19° 09' 31'' latitud Norte, y entre los 96° 55' 50' y 96° 56' 03'' longitud Oeste, a una altitud promedio de 1,170 msnm, temperatura media anual de 17.2°C y precipitación media anual de 1,969.9 mm al año y presentan

un clima de tipo (A)C(w₁), (FAO, 2008). Los sistemas agroforestales de la región el cultivo principal es café, plantado a 2x1 m, fertilizado en el área de goteo en mayo y agosto con 200 g de una mezcla de fosfonitrato y cloruro de potasio y una fertilización foliar en febrero. A 15 árboles de sombra en cada sistema agroforestal se midió el diámetro, altura y sombra que proyectan, mientras que a 20 plantas de café elegidos al azar se muestreo el suelo y hojas para el análisis. Los análisis de suelo y tejido fueron realizados de acuerdo con la NOM-021 (NOM, 2000). El diagnóstico del análisis de tejido fue realizado con el Sistema de Diagnóstico y Recomendación (DRIS), Índices de balance Kenworthy y Desviación Óptima Porcentual (DOP) (Montañes, et al., 1991; Kenworthy, 1961; Bhaduri y Pal, 2013). Los sistemas agroforestales estudiados fueron:

Sistema café-*Inga vera*: Este sistema tiene 12 años, es una leguminosa arbórea muy utilizada como sombra en cafetos. Los árboles tenían una distancia de 7x6 m, densidad de 238 árboles ha⁻¹, altura de 8.3 m y 21.6 cm de diámetro y proyectan al café una sombra de 47%, mientras que las plantas de café miden 1.81 m de altura y 4.75 cm de diámetro.

Sistema café-*Juglans pyriformis*: La especie *Juglans pyriformis* no es leguminosa, tiene 12 años, plantados a 6x6, con una densidad de 277 ha, altura de 6.9 m y el diámetro de 18.8 cm, proyectan una sombra de 68.6%, siendo el testigo respecto de fijadores de nitrógeno. Las plantas de café miden en promedio 1.97 m de altura y 5.04 cm de diámetro.

Sistema café-*Erythrina poeppigiana*-*Grevillea robusta*: Este sistema tiene *Erythrina poeppigiana* y *G. robusta*, tienen 4 años. La densidad de árboles de sombra fue de 69 de *Erythrina poeppigiana* y 208 de *G. robusta*, lo que proporcionan un 53.6% de sombra al cultivo de café. El cultivo tuvo una altura promedio de 2 m y un diámetro de 4.7 cm.

Sistema café- *Erythrina poeppigiana*: Este arbolado tiene 24 años de edad, plantados a 7x6 m, con lo que se obtiene una densidad arbórea de 238 árboles ha⁻¹, que proporciona 61% de sombra al café, que en promedio mide 1.92 m de altura y 4.1 cm de diámetro en la base.

Resultados y discusión

Evaluación de las interacciones físicas

En el Cuadro 1 se presentan las características de los cuatro sistemas agroforestales, tales como el espaciamiento y edad del arbolado, porcentaje de sombra y altura de los cafetos.

Cuadro 1. Descripción de los sistemas agroforestales sometidos a estudio.

	Café- <i>Inga vera</i> (IV)	Café- <i>E. poeppigiana</i> y <i>G. robusta</i> (EG)	Café- <i>E. poeppigiana</i> (EP)	Café- <i>Juglans pyriformis</i> (JP)
Superficie (ha)	1.21	1	1.14	0.15
Edad (años)	12	4	24	12
Densidad arbórea (árboles ha ⁻¹)	238	69 <i>E. poeppigiana</i> 208 <i>G. robusta</i>	238	277
Sombra (%)	47	53.6	61	68.6
Altura de cafetos (m)	1.81	2	1.92	1.97
Diámetro de cafetos (cm)	4.75	4.7	4.1	5.04

El sistema IV presenta un porcentaje de sombra menor al propuesto por Franck y Vaast (2009), lo que podría influir en el tamaño de las plantas de café, que presentaron el porte más bajo de los sistemas analizados. Los sistemas JP y EP superan el 55% de sombra, muy cercano al ideal de 53.6%, importante para el crecimiento foliar y producción de fruto. En el sistema EP, la edad del arbolado promovió mayor porcentaje de sombra. En el sistema EG los cafetos tuvieron mayor altura y con mayor diámetro los del sistema EP. Según Francesconi y Montagnini, 2014 el

crecimiento está relacionado con la producción de hojas, capacidad fotosintética, producción de flores del ciclo siguiente con yemas fructíferas altamente sensible a la radiación.

Diagnóstico nutrimental del suelo por sistema agroforestal

En el Cuadro 2 se muestra el análisis de suelo con un pH de entre 4.61 y 5.16, lo cual concuerda con Audate et al., (2016) y disminuye la disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg, S y Mo, mismos que deben ser suministrados mediante fertilización para procurar un balance nutrimental adecuado.

Todos los sistemas mostraron una CE baja y adecuada para el desarrollo del cultivo, así como un 5.16% de materia orgánica derivado de la acumulación de residuos de la poda, lo que se promueve el reciclaje de nutrientes, incremento de microflora y microfauna en la capa superficial del suelo. Los sistemas JP y EP mostraron altas concentraciones de N superiores a 20 mg kg⁻¹, mientras que EG e IV presentaron concentraciones más bajas en un rango deficitario. El sistema IV tuvo bajo nivel de P y muy altos de K, mientras que EG tuvo la concentración más baja de Ca, Mg, Cu y Zn debido a la acumulación de Al³⁺ el cual genera antagonismos con cationes y fijación de P.

Cuadro 2. Concentración e interpretación de los análisis de suelo.

Atributos	EG	IV	JP	EP
pH	4.61	5.03	5.16	4.99
CE (μS cm)	94.90	79.10	99.20	101.20
MO (%)	5.16	6.37	5.90	5.43
CIC	17.65	17.65	18.37	14.25
N inorg. (mg kg ⁻¹)	3.50	7.00	21.00	24.50
P-Olsen (mg kg ⁻¹)	11.40	1.70	14.90	10.30
K (mg kg ⁻¹)	484.51	316.19	469.05	343.12
Ca (mg kg ⁻¹)	671.41	1064.12	1187.38	1072.36
S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)	101.14	54.09	62.95	81.36
Mg (mg kg ⁻¹)	110.07	137.10	214.92	182.52

Atributos	EG	IV	JP	EP
Fe (mg kg ⁻¹)	58.13	30.45	20.96	21.43
Mn (mg kg ⁻¹)	18.16	34.63	48.08	71.00
Cu (mg kg ⁻¹)	0.34	0.74	0.80	0.86
Zn (mg kg ⁻¹)	0.83	1.18	1.08	1.22
B (mg kg ⁻¹)	3.81	2.80	2.55	3.76

EG: Tratamiento de *Grevillea robusta* y *Erythrina poeppigiana*; IV: Tratamiento con *Inga vera*; JP: Tratamiento con *Juglans pyriformis*; EP: Tratamiento con *Erythrina poeppigiana*.

El Ca y Cu fue bajo en los 4 sistemas y muy alto el Mg, mientras que el Fe fue muy alto en los sistemas EG y IV y medio en JP y EP. El Mn fue bajo en EG, alta en IV y JP y excesiva en EP. En el sistema EG la concentración de Zn se encontró muy baja, mientras que en IV, JP y EP fueron bajas. El B es de suma importancia para la longevidad del polen fue muy alto (Ankerman,1977).

Diagnóstico nutrimental del café por sistema agroforestal

Índice de balance de Kenworthy

Para calcular el Índice de Balance de Kenworthy se tomaron como referencia los datos reportados por Fonseca, et al., (2018), con los que se obtuvieron los resultados presentados en el **Error!**

Reference source not found..

Cuadro 3. Diagnóstico nutrimental inicial utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para los cuatro sistemas bajo estudio.

	Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>Erythrina poeppigiana</i> (EP)									
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%					mg kg ⁻¹				
CN	1.95	0.4	1.21	0.29	0.29	0.26	21.23	61.43	53.05	4.75
IBK	69	138	61	29	87	17	216	57	82	48
C	B	A	B	MB	N	MB	MA	B	B	MB
ORN	B>Ca>Zn>Fe>K>N>Mn>Mg>P>Cu									

Diagnóstico nutrimental inicial café con <i>Inga vera</i> (IV)										
CN	1.85	0.38	1.32	0.26	0.31	0.26	17.48	95.18	72.05	4.6
IBK	65	130	66	27	92	17	172	81	96	47
C	B	A	B	MB	N	MB	MA	B	N	MB
ORN	B>Ca>Zn>N>K>Fe>Mg>Mn>P>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>Juglans pyriformis</i> (JP)										
CN	1.41	0.31	1.32	0.27	0.29	0.22	14.23	55.85	96.2	5.53
IBK	51	104	66	28	87	17	135	53	134	53
C	B	N	B	MB	N	MB	A	B	A	B
ORN	B>Ca>N>Fe>Zn>K>Mg>P>Mn>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>E. poeppigiana</i> y <i>Grevillea robusta</i> (EG)										
CN	1.81	0.4	1.38	0.28	0.26	0.38	10.33	23.58	62.55	5.25
IBK	64	138	69	29	79	17	94	31	89	51
C	B	A	B	MB	B	MB	N	MB	N	B
ORN	B>Ca>Fe>Zn>N>K>Mg>Mn>Cu>P									

CN: Composición nutrimental; IBK: Índice de Balance de Kenworthy; C: Condición; MB: Muy baja; B: Baja; N: Normal; A: Alta; MA: Muy alta; ORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

El diagnóstico nutrimental de los sistemas agroforestales indicó que B, Ca, Fe, Zn, N, K y Mg fueron los más deficitarios, mientras que Mn siempre se mantuvo en el intervalo normal, Cu y P se ubicaron en el nivel arriba de lo normal.

El balance de Kenworthy indicó que, a pesar del alto contenido de N en el suelo de JP, la concentración foliar fue menor en comparación con los otros sistemas. También se puede observar que, en todos los sistemas, los elementos más deficientes fueron B y Ca, lo cual coincide con Millán, et al., (2010), quienes, reportan altos niveles de Al³⁺ en suelos ácidos de Argentina.

Al corregirse la deficiencia mencionada, las plantas presentarán mayor altura, desarrollo del sistema radicular, número de hojas, ramificaciones y resistencia a plagas y enfermedades. Por otro

lado, los elementos más abundantes son Cu y P. El P reduce su disponibilidad en suelos con pH menor a 6.5 pero se observa una aplicación innecesaria de P.

Desviación del Óptimo Porcentual (DOP)

El diagnóstico determinado mediante el método DOP se presenta en el 4.

Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental inicial con el índice DOP para los cuatro sistemas bajo estudio.

Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>Erythrina poeppigiana</i> (EP)										
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----%-----					-----mg kg ⁻¹ -----				
-CN	1.95	0.4	1.21	0.29	0.29	0.26	21.23	61.43	53.05	4.75
DOP	-33	33	-42	-78	-15	-99	89	-50	-32	-64
ORN	B>Ca>Zn>Fe>K>N>Mn>Mg>Cu>P									
Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>Inga vera</i> (IV)										
CN	1.85	0.38	1.32	0.26	0.31	0.26	17.48	95.18	72.05	4.6
DOP	-36	27	-36	-80	-9	-99	56	-22	-7	-64
ORN	B>Ca>Zn>K>N>Fe>Mg>Mn>Cu>P									
Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>Juglans pyriformis</i> (JP)										
CN	1.41	0.31	1.32	0.27	0.29	0.22	14.23	55.85	96.2	5.53
DOP	-51	3	-36	-79	-15	-100	27	-54	24	-58
ORN	B>Ca>Zn>Fe>N>K>Mg>Mn>Cu>P									
Diagnóstico nutrimental inicial de café con <i>E. poeppigiana</i> y <i>Grevillea robusta</i> (EG)										
CN	1.81	0.4	1.38	0.28	0.26	0.38	10.33	23.58	62.55	5.25
DOP	-38	33	-33	-78	-24	-99	-8	-81	-20	-60
ORN	B>Fe>Ca>Zn>N>K>Mg>Mn>Cu>P									

CN: Composición nutrimental; DOP: Desviación del Óptimo Porcentual; ORN: Orden de nutrimental.

Con ambos sistemas de diagnóstico se pudo constatar que los elementos más limitativos fueron B, Ca, Fe, Zn, N, K y Mg, pero que especialmente, en ambos métodos, Balance de Kenworthy y DOP demuestra que los elementos con mayor escasez son el B y Ca, y aquellos que se encuentran en exceso son el Cu y P, corroborando las deficiencias en el manejo nutrimental de los sistemas.

Conclusiones

El mayor problema en los sistemas agroforestales fue la acidez del suelo que disminuyó la disponibilidad de Ca, Cu y Zn y la consecuente deficiencia de estos en las plantas. El nivel de Fe en el suelo fue muy alto en EG y IV, pero media en JP y EP. Mientras que el Mn fue baja en EG, alta en IV y JP y excesiva en EP. El B el cual es un elemento de suma importancia para la longevidad del polen las concentraciones se encontraron muy altas. En general e independientemente del sistema agroforestal los análisis indicaron que los elementos B, Ca, Fe, Zn, N, K y Mg fueron los más limitativos encontrándose entre los más deficitarios en el orden respectivo, mientras que Mn siempre se mantuvo en el intervalo normal, y Cu y P se ubicaron en el nivel arriba de lo normal.

Se recomienda el uso de *E. poeppigiana* como sombreado para el café, debido a que, mediante podas, se puede mantener un porcentaje de sombra ideal para el cultivo (55%); sin embargo, para elevar la eficiencia en la nodulación, es necesario el uso de inóculos, ya que *E. poeppigiana* es una especie introducida, así como los activadores de la nodulación (Co, Mo, Fe) para asegurar que la FBN se lleve a cabo de manera adecuada y se reduzca la necesidad de fertilización nitrogenada.

Literatura citada

Ankerman, D. and Large, R. 1977. Soil and plant analysis. 1st Ed. A and L Agricultural Laboratories. Memphis, TN, USA. 82 pp.

Audate, E.; Maldonado, T. R.; Álvarez, S. M. E.; Torres, R. J. A. y Ramírez, M. H. 2016. Diagnóstico nutrimental de tres sistemas agroforestales de *Coffea arabica* L. cultivado bajo

- sombra Veracruz, México. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 91 pp.
- Bhaduri, D. and Pal, S. 2013. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS): Concepts and applications on nutritional diagnosis of plants - a review. *J. Soil Water Conserv.* 12(1):70-79.
- Cisneros, C. y Sánchez, M. 2015. Solubilización de fosfatos por hongos asociados a un Andisol de tres agroecosistemas cafeteros de la región andina colombiana. *Ingenium.* 9(25):37-46.
- FAO. 2008. Food and Agriculture Organization. Base referencial mundial del recurso suelo. 1a Edición. Roma, Italia. 117 pp.
- Fonseca, A.; Lima, J. and Silva, S. 2018. Spacial variability of balanced indexes of kenworthy (BIK) for macro and micronutrients on the coffee *Canephora*. *J. Exp. Agric. Inter.* 23(1):1-10.
- Francesconi, W. and Montagnini, F. 2014. Biodiversidad y conservación de bosques: funciones potenciales de los sistemas agroforestales. Jornadas técnicas forestales y ambientales. In: Memoria. XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Weber, E.; Bath, S. y Redes, J. (Eds.). 1a Edición. Eldorado Misiones, Argentina. 452-459 pp.
- Franck, N. and Vaast, P. 2009. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Trees-Structure and Function.* 23(4):761-769.
- Millán, G.; Vázquez, M.; Terminiello, A. and Santos, S. D. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ciencia Del Suelo.* 28(2):131-140.
- Montañes, L.; Heras, L. and Sanz, M. 1991. Desviación del óptimo porcentual (DOP); nuevo índice para la interpretación del análisis vegetal. *An. Aula Dei.* Aragón, España. 20(3-45).

NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. SAGARPA Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México. 31 de diciembre de 2002. 73 pp.

4 APOORTE NUTRIMENTAL DE ESPECIES ARBÓREAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

Rubén Garza Lau, Ranferi Maldonado Torres, Ma. Edna Álvarez Sánchez, Julio César Buendía Espinoza.

RESUMEN

En la región de Huatusco, Veracruz se realizó un experimento para comprobar el efecto que tiene el uso adecuado de fertilizante en la producción de café bajo sombra de especies arbóreas fijadoras de nitrógeno. Para ello, se plantearon cuatro tratamientos en cuatro sistemas agroforestales (café-*Inga vera*, café-*Juglans pyriformis*, café-*Erythrina poeppigiana* y café-*E. poeppigiana*-*Grevillea robusta*), con tres bloques de 10 plantas cada uno, los cuales consistieron en: a) sin fertilización; b) fertilización al suelo; c) fertilización foliar; d) fertilización al suelo y foliar. El balance nutrimental se evaluó mediante dos análisis foliares realizados antes y después de la fertilización. El rendimiento se evaluó durante los meses de noviembre y diciembre. Con el manejo nutrimental propuesto se elevaron las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Mn, mientras que disminuyeron las de Fe, Cu y Zn, acercándose a los niveles óptimos para el cultivo. No se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las concentraciones de nutrientes entre los cuatro tratamientos en los sistemas IV y EG. En EP, hubo diferencia para Ca y Mn, en los tratamientos 2 y 3. En JP hubo diferencia para Mg en los tres tratamientos.*

Palabras clave: fijación de nitrógeno, balance nutrimental, análisis foliar, rendimiento.

* Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Rubén Garza Lau.
Director: Dr. Ranferi Maldonado Torres.

NUTRITIONAL INPUT FROM NITROGEN FIXING TREE SPECIES TO COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS

Rubén Garza Lau, Ranferi Maldonado Torres, Ma. Edna Álvarez Sánchez, Julio
César Buendía Espinoza.

ABSTRACT

This study was carried out in the municipality of Huatusco, Veracruz to evaluate the effect that proper use of fertilizer has on the production of coffee under shade of nitrogen fixing tree species. For this, four treatments were proposed in four agroforestry systems (coffee-*Inga vera*, coffee-*Juglans pyriformis*, coffee-*Erythrina poeppigiana* and coffee-*E. Poeppigiana-Grevillea robusta*), with three blocks of 10 plants each. The treatments consisted of a) without fertilization; b) soil fertilization; c) foliar fertilization; d) soil and foliar fertilization. The nutritional balance was evaluated with two foliar analyzes performed before and after fertilization. The yield was evaluated during November and December. Concentrations of N, P, K, Ca, Mg and Mn were rised with the proposed nutritional management, while those of Fe, Cu and Zn decreased, approaching the optimum levels for coffee crops. No significant difference ($p \leq 0.05$) was found in nutrient concentrations of the four treatments in systems IV and EG. In PE, there was a difference for Ca and Mn in treatments 2 and 3. In JP there was a difference for Mg in all three treatments.*

Key words: nitrogen fixation, nutritional balance, foliar analysis, yield.

* Thesis for Master in Sciences in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Rubén Garza Lau
Director: Dr. Ranferi Maldonado Torres

4.1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de café en México se realiza predominantemente bajo sombra con algunas especies leguminosas que forman asociaciones con bacterias fijadoras de nitrógeno. Dichas bacterias se encuentran en casi todos los ecosistemas de manera libre o en asociación con leguminosas y otras especies, teniendo las segundas una ventaja competitiva al obtener carbohidratos de su hospedero (Saha et al., 2017).

El proceso de nodulación comienza cuando la planta envía señales químicas a través del sistema radicular, las cuales atraen a la bacteria, que se introduce por el pelo radical, provocando la división celular y el rizado de la raíz que se convertirá en nódulo para fijar N_2 (Murray, 2011). Para ello, la proteína reductasa provee electrones a la nitrogenasa, la cual reduce el N_2 a NH_3 , cuya síntesis depende tanto del hospedero como de la bacteria, mismos que desarrollan mecanismos como la compartimentalización o la síntesis de leghemoglobina para evitar que el oxígeno entre en contacto con la nitrogenasa, pues provoca su inhibición (Juliana, 2004). Dicho proceso implica un gasto considerable de energía para la planta, pues en condiciones ideales, se hidrolizan 16 moléculas de ATP, mientras que en condiciones naturales es menos eficiente.

Los nódulos bacterianos presentan una respuesta positiva a la fertilización química siempre y cuando se tenga un balance nutrimental, ya que la aplicación excesiva de nitrógeno reduce su efectividad hasta inactivarlos (Zheng, Chen, et al., 2016). En algunos casos, las bacterias nitrificantes pueden suministrar el N que el cultivo necesita, sin embargo, la inoculación de dichos organismos es indispensable para el proceso de fijación al igual que los elementos Mo, Fe, Ca y Co (Pedrozo, De Oliveira & Alberton, 2018; Saha et al., 2017).

Se ha demostrado que en plantaciones de café bajo sombra con especies leguminosas, el rendimiento puede llegar a 3.43 t ha^{-1} , mientras que con un espaciado entre árboles de $12 \times 12 \text{ m}$, el rendimiento disminuye a 2.4 t ha^{-1} , pues tanto el cultivo como los nódulos bacterianos pueden llegar a presentar deficiencias hídricas, como se demuestra en plantaciones de café sin árboles,

donde el rendimiento se reduce a 1.48 t ha⁻¹ con un máximo de 2.00 t ha⁻¹ (Benítez, Jaramilo, Escobedo & Mora, 2015; Farfán-Valencia & Mestre-Mestre, 2004; Peeters, Soto, Perales, Montoya & Ishiki, 2003).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta a la fertilización foliar y al suelo de cuatro plantaciones de café con y sin especies leguminosas, mediante el uso de análisis foliar para proponer un plan de manejo que promueva la fijación biológica de nitrógeno, el ciclaje de nutrientes, mejore el estado nutrimental del cultivo y se obtengan máximos rendimientos.

4.2 OBJETIVOS

- Cuantificar los aportes nutrimentales a la fertilidad de suelo y al cultivo de café por la actividad nodular de especies arbóreas fijadoras de N, mediante el diagnóstico nutrimental del suelo, plantas y análisis de microscopía electrónica de barrido, para mejorar la fijación biológica de nitrógeno y disponibilidad de nutrientes.
- Evaluar el efecto de la fertilización foliar y al suelo en el balance nutrimental de las plantas de café mediante análisis foliares y producción de café cereza, para proponer un manejo nutrimental que permita incrementar el rendimiento y calidad de cosecha.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el municipio de Huatusco, Veracruz, donde se realizó un experimento en bloques completos al azar (BCA), con cuatro tratamientos de fertilización en cada uno de los sistemas agroforestales mencionados. En cada sistema se eligieron tres bloques de diez plantas por tratamiento, los cuales fueron: 1) testigo; 2) fertilización al suelo; 3) fertilización foliar; 4) fertilización al suelo y foliar, teniendo un total de 16 tratamientos o 48 bloques para analizar un total de 480 plantas.



Figura 1. Aplicación e incorporación del fertilizante al cultivo de café.

Después de aplicar el fertilizante al cultivo de café, se evaluó el rendimiento de cosecha en el mes de diciembre, debido a que durante el mismo se presenta el pico máximo de producción. Se pesó la producción de café cereza por bloque y se secó para conocer el contenido de humedad.

Se realizó el primer análisis foliar antes de aplicar los fertilizantes y el segundo cuatro meses después con el objetivo de comparar los niveles de nutrientes en las plantas. Se colectó un par de hojas ubicadas en la cuarta posición del ápice hacia la base de la rama, en cada uno de los puntos cardinales, por cada una de las diez plantas que constituyen cada bloque. Las muestras fueron secadas en estufa a 75°C por 72 horas y se molieron en un molino de acero inoxidable. Luego se digirieron con 4 ml de mezcla diácida y 2 ml de peróxido de hidrógeno. Después se analizaron los elementos N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B (Álvarez-Sánchez & Marín Campos, 2015).

Los nódulos fueron analizados con microscopio electrónico de barrido en busca del bacteroide y se cuantificó el porcentaje de nutrientes dentro del cuadro de la imagen mediante el análisis EDAX (Energy Dispersive X-ray Analysis). Posteriormente, se colectaron nódulos de los tres sistemas con leguminosas para determinar sus concentraciones de nutrientes.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1 Nodulación

En los sistemas EP, IV, se observó nodulación, pero al realizar cortes a los nódulos, se pudo apreciar que estos carecían de leghemoglobina (color rosa a rojo) o se encontraba en concentraciones muy bajas. En el sistema EG se observó nodulación muy escasa, posiblemente debido a la edad del arbolado, pH y carencia de activadores para la nodulación (Co, Mo, Fe).



Figura 2. Nodulación en las especies arbóreas bajo estudio. A) Nódulo vacío en EG; B) Nodulación en EP; C) Nodulación en IV; D) Raíz de *Erythrina poeppigiana* en EG sin nodulación aparente.

En los nódulos de EP, la bacteria pudo reconocerse fácilmente en imágenes de microscopio electrónico de barrido (Figura 2), mientras que en IV y EG fue más complicado, quizá debido a la baja presencia de leghemoglobina. Sin embargo, la cuantificación del porcentaje de cada nutriente mediante la respuesta espectral demuestra altos niveles de Mo en los tres nódulos analizados (Cuadro), ya que dicho elemento promueve la inserción de electrones en el N_2 y el movimiento de

éste elemento dentro de la planta, elevando el rendimiento de cultivos como el frijol (Ocaña Reyes, 2016).

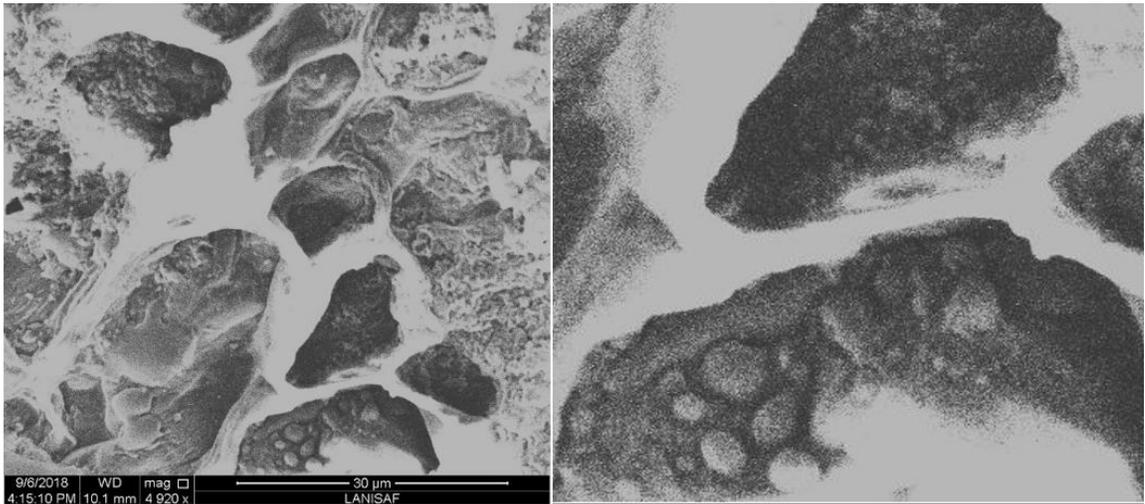


Figura 3. Imagen de Microscopio Electrónico de Barrido en un nódulo de EP. A la izquierda, la imagen completa; a la derecha, un acercamiento a la zona donde se identificó el bacteroide.

En los nódulos de IV se observaron estructuras parecidas a canales que se aprecian en EP, lo cual indica que los nódulos se formaron correctamente; sin embargo, no se observaron bacteroides dentro de dichas estructuras. Por el contrario, en EG no se observa desarrollo estructural ni bacteroide, debido a la inactividad del nódulo (Figura 4).

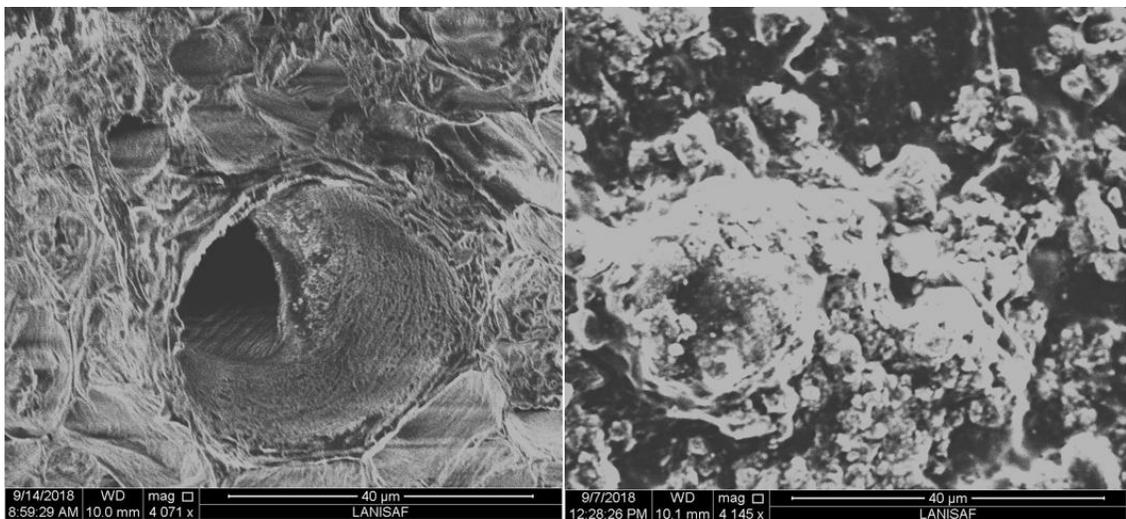


Figura 4. Imágenes de Microscopio Electrónico de Barrido en Nódulos de IV (izquierda) y EG (derecha).

En el análisis cuantitativo de las imágenes, se detectaron altas concentraciones de nitrógeno en los nódulos de ambas especies, demostrando que las raíces están absorbiendo dicho elemento a pesar de la escasa presencia de leghemoglobina. De igual manera, el Fe y Co, que son los elementos activadores de la FBN se encuentran en concentraciones superiores a las determinadas mediante el análisis de suelo, a pesar de la presencia de antagonismos con el Al^{3+} .

Cuadro 1. Concentraciones de nitrógeno, hierro, cobalto y molibdeno en las imágenes capturadas por el microscopio electrónico de barrido.

	EP	IV	EG
Elemento	Peso (%)		
N	3.52	22.52	6.86
Fe	3.23	0.55	2.89
Co	1.27	0.78	2.11
Mo	13.9	17.77	9.64

Para corroborar lo anterior, se colectaron muestras de nódulos que se lavaron, secaron en estufa y molieron para llevar a cabo análisis de tejido mediante la digestión de las muestras y determinación de nutrientes por absorción atómica (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración nutrimental en nódulos de cada sistema agroforestal.

Sistema		EP	IV	EG
K		1.25	0.81	1.31
Ca	%	0.78	0.54	0.68
Mg		0.22	0.21	0.46
Cu		95.97	52.93	332.93
Zn	mg kg ⁻¹	116.81	146.47	493.99
Mn		87.55	133.16	158.65
Fe		2192.42	623.17	4370.19

Se observa que las concentraciones de K son mucho menores a las obtenidas en hojas, debido a que los nódulos no realizan intercambio gaseoso, mientras que las bajas concentraciones de Ca y Mg pueden afectar a la formación de la pared celular en los nódulos y reducir su capacidad de fijación (Saha et al., 2017).

Por otro lado, las concentraciones de Cu, Zn, Mn se observan en concentraciones más elevadas que en las hojas, mientras que los altos valores de Fe podrían considerarse normales, dado que es un componente estructural de la leghemoglobina, sin embargo, no es el único factor determinante del éxito o fracaso en la fijación biológica de nitrógeno.

4.4.2 Estado nutrimental del cultivo de café

Análisis foliar previo a la fertilización

El primer análisis foliar (Apéndice 10) se llevó a cabo durante el mes de julio y mostró deficiencias en N, K, Ca, Mg y Zn, de acuerdo con los rangos propuestos por Osorio (2012), mientras que P, B, Mo y Mn se ubican en el rango de suficiencia, pero el Fe y Cu excedieron las concentraciones recomendadas, lo cual es normal en suelos con pH ácido, donde las concentraciones de Al, Fe, S y Mn en hojas suelen ser elevadas (Bernal, Forero & Almanza-Merchan, 2015).

Desviación del óptimo porcentual (DOP)

A continuación, se muestra el DOP del primer análisis foliar (Cuadro 3), donde se aprecia que, en la mayoría de los sistemas, los nutrientes deficientes son Ca, N, B, K, P, Mg y Mn, siendo el primero el de mayor deficiencia, mientras que el Fe fue el único elemento que no tuvo deficiencia en todos los sistemas.

Cuadro 3. Desviación del Óptimo Porcentual para el análisis foliar previo a la fertilización.

Diagnóstico nutrimental inicial (EP)										
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%					mg kg ⁻¹				
CN	1.50	0.27	1.17	0.14	0.24	31	11.92	154.15	74.28	9.12
DOP	-48	-10	-43	-89	-29	-39	6	26	-5	-30
ORN	Ca>N>K>B>Zn>Mg>P>Mn>Cu>Fe									
Diagnóstico nutrimental inicial (IV)										
CN	1.63	0.29	1.34	0.21	0.35	29	17.06	157.25	67.54	7.64
DOP	-44	-4	-35	-84	2	-43	52	29	-13	-42
ORN	Ca>N>B>Zn>K>Mn>P>Mg>Fe>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial (JP)										
CN	1.51	0.29	1.31	0.15	0.38	28	15.68	160.08	81.81	15.68
DOP	-48	-8	-37	-88	11	-45	40	31	5	-44
ORN	Ca>N>B>Zn>K>P>Mn>Mg>Fe>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial (EG)										
CN	1.60	0.26	1.39	0.16	0.27	39.25	10.18	147.43	47.98	9.22

DOP -45 -13 -33 -88 -22 -23 -9 21 -38 -30
 ORN Ca>N>Mn>K>Zn>B>Mg>P>Cu>Fe

EP: Sistema de café con *Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema de café con *Inga vera*; JP: Sistema de café con *Juglans pyriformis*; EG: Sistema de café con *E. poeppigiana* y *Grevillea robusta*; CN: Composición nutrimental; DOP: Desviación del Óptimo Porcentual; ORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

Índice de Balance de Kenworthy (IBK)

Para realizar el cálculo del Índice de Balance de Kenworthy se tomaron como referencia los valores reportados por Fonseca, Lima & Silva (2018), a partir de los cuales se obtuvieron los resultados presentados en el (Cuadro 4), donde se comparan los datos del análisis inicial.

Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para el análisis foliar previo a la fertilización.

Diagnóstico nutrimental inicial (EP)										
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%					mg kg ⁻¹				
CN	1.50	0.27	1.17	0.14	0.24	31	11.92	154.15	74.28	9.12
IBK	54	89	60	19	74	75	108	123	97	75
C	B	N	B	MB	B	B	N	A	N	B
ORN	Ca>N>K>B>Mg>Zn>P>Mn>Cu>Fe									
Diagnóstico nutrimental inicial (IV)										
CN	1.63	0.29	1.34	0.21	0.35	29	17.06	157.25	67.54	7.64
IBK	58	95	67	24	102	64	168	125	92	66
C	B	N	B	MB	N	B	MA	A	N	B
ORN	Ca>N>B>Zn>K>Mn>P>Mg>Fe>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial (JP)										
CN	1.51	0.29	1.31	0.15	0.38	28	15.68	160.08	81.81	15.68
IBK	54	90	66	20	110	62	152	127	107	64
C	B	N	B	MB	N	B	MA	A	N	B
ORN	Ca>N>B>Zn>K>P>Mn>Mg>Fe>Cu									
Diagnóstico nutrimental inicial (EG)										
CN	1.60	0.26	1.39	0.16	0.27	39.25	10.18	147.43	47.98	9.22
IBK	57	85	70	20	81	81	93	118	78	76
C	B	N	B	MB	B	B	N	A	B	B
ORN	Ca>N>K>Zn>Mn>Mg>B>P>Cu>Fe									

EP: Sistema de café con *Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema de café con *Inga vera*; JP: Sistema de café con *Juglans pyriformis*; EG: Sistema de café con *E. poeppigiana* y *Grevillea robusta*; CN: Composición nutrimental; IBK: Índice de Balance de Kenworthy; C: Condición: MB: Muy baja; B: Baja; N: Normal; A: Alta; MA: Muy alta; ORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

Ambas metodologías de interpretación de análisis foliar coinciden en que los elementos más deficientes en el cultivo son Ca, N, B, K y Mg, mientras que Fe y Cu llegan a niveles de exceso, lo que podría provocar problemas en el cultivo por toxicidad.

Análisis foliar posterior a la fertilización

El segundo análisis foliar se llevó a cabo durante el mes de noviembre, en él se refleja una diferencia en la concentración de N en los sistemas IV, EG y EP superior para los tratamientos 2 y 3, demostrando la efectividad de la fertilización foliar y al suelo (Apéndice 11).

El P y K no tuvieron una marcada respuesta a los tratamientos, no obstante, en los sistemas EP y JP se puede notar un pequeño incremento en la concentración de dichos nutrientes. Por otro lado, Ca y Mg tuvieron respuesta positiva a los tratamientos 2 y 3, con excepción del sistema EG, que tuvo un valor bajo.

En el caso de los microelementos, Fe, Zn, Mn y Cu mostraron una respuesta positiva a la fertilización foliar, pero en el tratamiento 3 los valores disminuyeron, sin embargo, de acuerdo con lo reportado por Fonseca et al. (2019), las concentraciones obtenidas alcanzan niveles que pueden provocar toxicidad en el cultivo, por lo que, al disminuir su concentración en las plantas, se obtiene un mejor balance nutrimental.

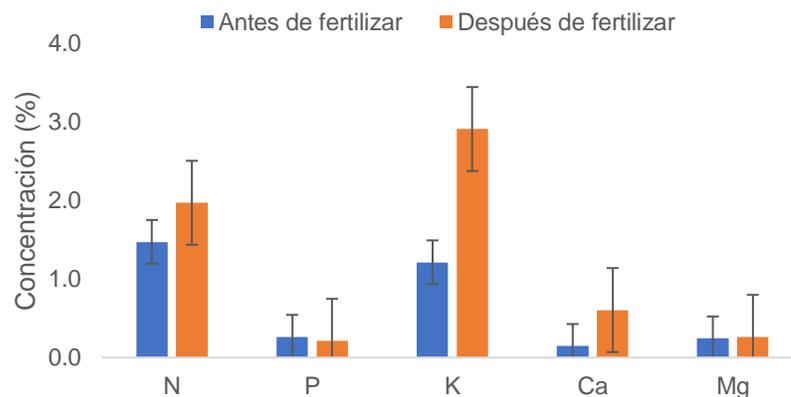


Figura 5. Concentraciones promedio de macronutrientes en el sistema EP antes y después de fertilizar.

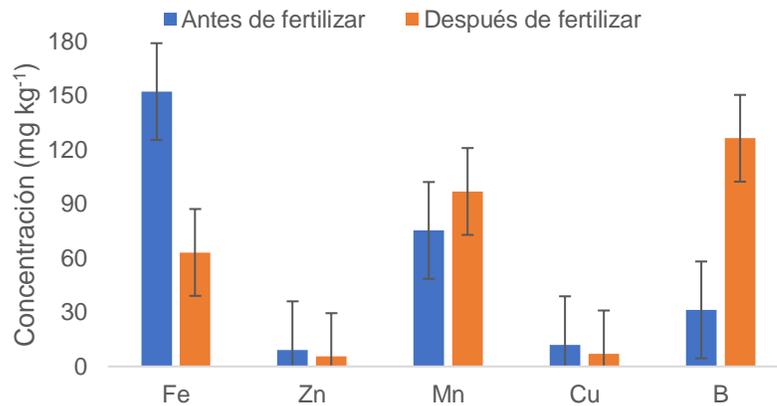


Figura 6. Concentraciones promedio de micronutrientes en el sistema EP antes y después de fertilizar.

En la Figura 5 y Figura 6 se observa que tanto K como B tuvieron un incremento considerable, mientras que las concentraciones de P, Fe, Zn y Cu disminuyeron ligeramente, lo cual representa un beneficio para el cultivo, pues Fe superaba las concentraciones recomendadas en la literatura (Osorio, 2012). De igual manera, se observa un incremento en las concentraciones de Ca y Mg, elementos cuya disponibilidad es limitada en suelos con pH ácido.

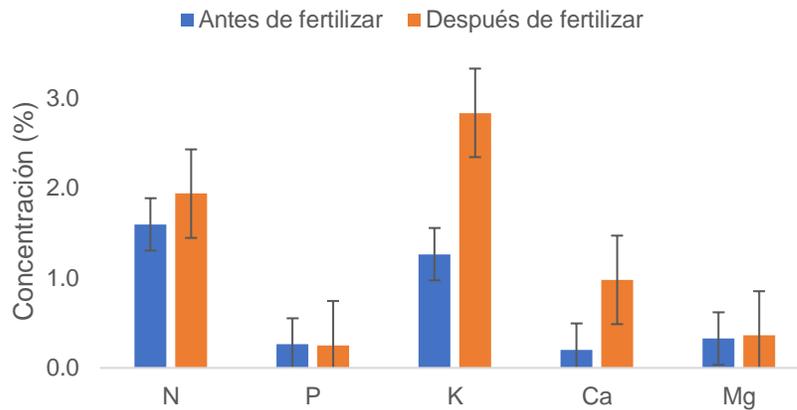


Figura 7. Concentraciones de macronutrientes en el sistema IV antes y después de fertilizar.

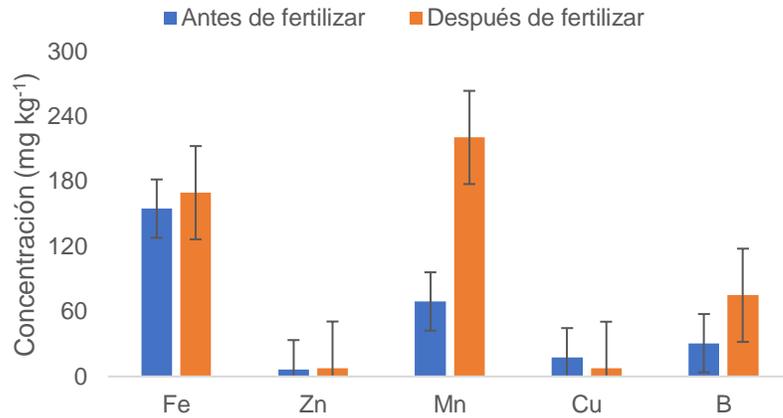


Figura 8. Concentraciones de micronutrientes en el sistema IV antes y después de fertilizar.

En la Figura 7 y Figura 8 se observa que las concentraciones de K, Ca y Mn presentaron una respuesta positiva a la fertilización, pues se incrementaron considerablemente, mientras que N, Fe, P, Mg, Zn y Cu no modificaron sus concentraciones de manera considerable.

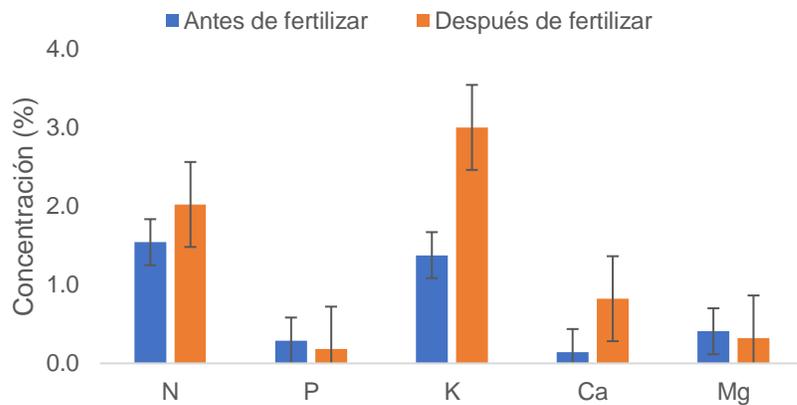


Figura 9. Concentraciones de macronutrientes en el sistema JP antes y después de fertilizar.

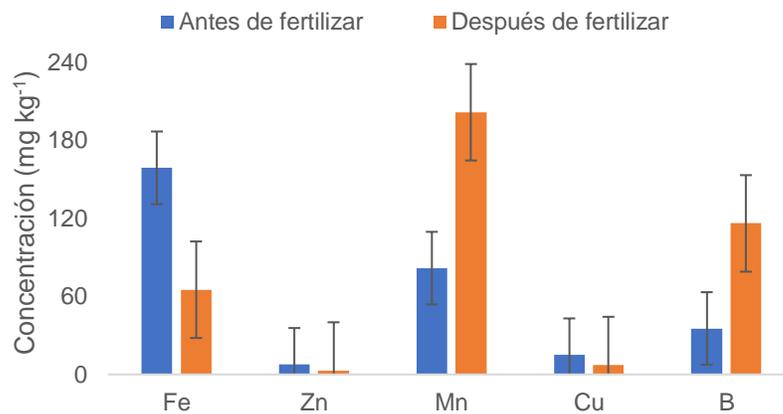


Figura 10. Concentraciones de micronutrientes en el sistema JP antes y después de fertilizar.

En el sistema JP (Figura 9 y Figura 10) los elementos K, Mn y B tuvieron un marcado incremento en respuesta a la fertilización, elevando su disponibilidad para la planta. Los demás elementos no tuvieron una respuesta tan marcada, con excepción del Fe, el cual se encontraba en condiciones de toxicidad antes de fertilizar, reduciendo sus concentraciones a niveles óptimos para la planta.

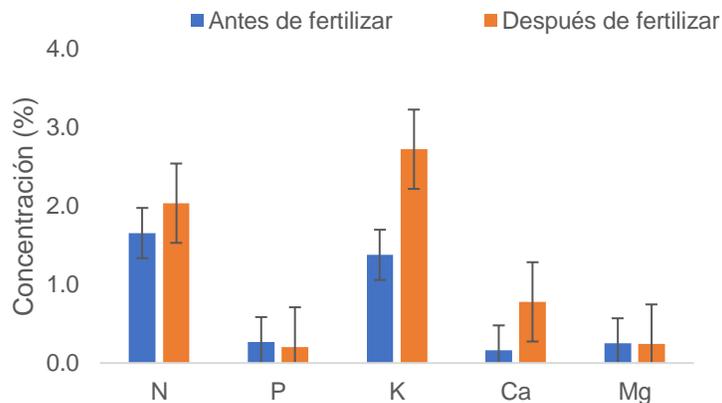


Figura 11. Concentraciones de macronutrientes en el sistema EG antes y después de fertilizar.

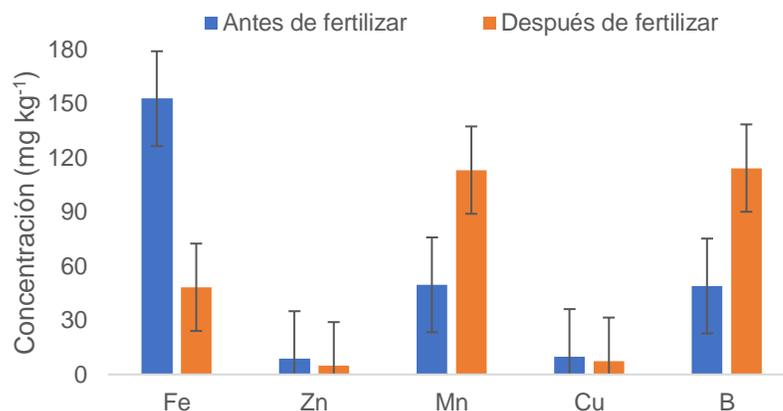


Figura 12. Concentraciones de micronutrientes en el sistema EG antes y después de fertilizar.

En el sistema EG (Figura 11 y Figura 12) se elevaron las concentraciones de nutrientes que, previo a la fertilización, se encontraban en condiciones de deficiencia (K, Ca, Mn y B), mientras que el Fe se redujo de manera considerable, promoviendo un mejor balance nutrimental en la planta al evitar condiciones de toxicidad. De igual manera, el P se redujo, debido a que el cultivo presentaba concentraciones muy elevadas del mismo.

Desviación del Óptimo Porcentual (DOP)

En el análisis foliar posterior a la aplicación de fertilizantes, el DOP muestra un importante incremento en los niveles de Ca, B y K, elevando los primeros dos a niveles aceptables para la planta, mientras que Zn, Fe, N y Cu permanecen en concentraciones por debajo del óptimo propuesto por Fonseca et al. (2019).

Cuadro 5. Desviación del Óptimo Porcentual para el análisis foliar posterior a la fertilización.

Diagnóstico nutrimental final (EP)										
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%					mg kg ⁻¹				
CN	1.89	0.21	2.89	0.54	0.27	129.53	7.33	61.9	84.74	5.17
DOP	-35	-19	-1	54	-22	154	-35	-49	9	-60
ORN	Zn>Fe>N>Cu>Mg>P>K>Mn>Ca>B									
Diagnóstico nutrimental final (IV)										
CN	1.90	0.24	2.85	0.95	0.36	80.48	7.69	146.43	212.56	7.70
DOP	-34	-19	38	-26	5	58	-31	20	173	-41
ORN	Zn>N>Cu>Ca>P>Mg>Fe>K>B>Mn									
Diagnóstico nutrimental final (JP)										
CN	2.05	0.18	3.06	0.82	0.33	117.14	8.41	69.47	201.39	3.73

DOP	-29	-42	48	-37	-4	130	-25	31	159	-72
ORN	Zn>Fe>P>Ca>N>Cu>Mg>K>B>Mn									
Diagnóstico nutrimental final (EG)										
CN	1.99	0.23	2.74	0.80	0.26	119.05	8.63	69.77	115.38	119.05
DOP	-31	-25	32	-38	-24	134	-23	-43	48	-59
ORN	Zn>Fe>Ca>N>P>Mg>Cu>K>Mn>B									

EP: Sistema de café con *Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema de café con *Inga vera*; JP: Sistema de café con *Juglans pyriformis*; EG: Sistema de café con *E. poeppigiana* y *Grevillea robusta*; CN: Composición nutrimental; DOP: Desviación del Óptimo Porcentual; ORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

Índice de Balance de Kenworthy (IBK)

El IBK muestra un incremento en las concentraciones de Ca en casi todos los sistemas con excepción de EP, mientras que N, K, B y Mn incrementaron en todos los sistemas, llegando los tres últimos a niveles excedentes. Por otra parte, Mg se mantuvo en concentraciones normales y Fe, Cu, P y Zn disminuyeron.

Cuadro 6. Diagnóstico nutrimental utilizando el Índice de Balance de Kenworthy para el análisis foliar posterior a la fertilización.

Diagnóstico nutrimental final (EP)										
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	%			mg kg ⁻¹						
CN	1.89	0.21	2.88	0.54	0.27	129.5	7.33	61.9	84.74	5.17
IBK	67	66	137	47	81	229	55	58	105	50
C	B	B	A	MB	B	MA	B	B	N	B
ORN	Ca>Zn>Cu>Fe>P>N>Mg>Mn>K>B									
Diagnóstico nutrimental final (IV)										
CN	1.9	0.24	2.85	0.95	0.36	80.48	7.69	146.4	212.6	7.70
IBK	67	78	135	76	105	148	59	117	199	66
C	B	B	A	B	N	A	B	N	MA	B
ORN	Cu>Zn>N>Ca>P>Mg>Fe>K>B>Mn									
Diagnóstico nutrimental final (JP)										
CN	2.05	0.18	3.06	0.82	0.33	117.14	8.41	69.47	201.39	3.73
IBK	72	52	144	67	96	209	67	63	326	41
C	B	B	A	B	N	MA	B	B	MA	MB
ORN	Zn>P>Fe>Cu>Ca>N>Mg>K>B>Mn									
Diagnóstico nutrimental final (EG)										
CN	1.99	0.23	2.74	0.80	0.26	119.05	8.63	69.77	115.38	5.41
IBK	70	71	130	65	79	212	84	63	128	52
C	B	B	A	B	B	A	N	B	A	B
ORN	Zn>Fe>Ca>N>P>Mg>Cu>Mn>K>B									

EP: Sistema de café con *Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema de café con *Inga vera*; JP: Sistema de café con *Juglans pyriformis*; EG: Sistema de café con *E.*

poeppigiana y *Grevillea robusta*; CN: Composición nutrimental; IBK: Índice de Balance de Kenworthy; C: Condición: MB: Muy baja; B: Baja; N: Normal; A: Alta; MA: Muy alta; ORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

Ambas metodologías de interpretación de análisis muestran que los niveles de N, P, K, Ca, Mg y Mn se elevaron, mientras que las concentraciones de Fe, Cu y Zn disminuyeron a niveles aceptables, demostrando que el manejo propuesto mejora el balance nutrimental del cultivo de café (Figura 13).



Figura 13. Comparación de plantas de café, a la izquierda el tratamiento 3 en el sistema JP, a la derecha una planta bajo el manejo del productor.

4.4.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos a partir de los análisis foliares se procesaron con ayuda del software R (ver. 3.6.1) para obtener el ANOVA (resumido mediante el P-value) y comparación de medias con Tukey y Duncan.

Diseño experimental:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + E_{ij}$$

$i = 1, 2, 3, \dots, t$

$j = 1, 2, 3, \dots, n$

Donde:

Y_{ij} = Variable respuesta en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento.

μ = Media general

τ_i = Efecto del tratamiento i.

E_{ij} = Error aleatorio.

Análisis de varianza para el modelo:

Ho: $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_t$

Ha: Al menos un tratamiento produce un resultado diferente

A continuación, se muestran los resultados del ANOVA por sistema agroforestal para cada elemento, representado por el P-value. En los casos donde se rechaza la Ho, se muestra también la comparación de medias con prueba de Tukey y de Duncan, para señalar el tratamiento que tuvo una diferencia significativa.

Cuadro 7. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema EP por elemento ($p \leq 0.05$).

Sistema	Elemento	P-value	Decisión
EP	N	0.1868	Ho
	P	0.7322	Ho
	K	0.2755	Ho
	Ca	0.0105	R Ho
	Mg	0.1954	Ho
	Fe	0.5635	Ho
	Cu	0.4011	Ho
	Zn	0.4175	Ho
	Mn	0.0021	R Ho
	B	0.3435	Ho

EP: Sistema de *Erythrina poeppigiana*; Ho: Se acepta la hipótesis nula; R Ho: Se rechaza la Hipótesis nula, se acepta la alternativa.

Cuadro 8. Comparación de medias para concentraciones de calcio en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).

Ca			
Par	Contraste	p (tukey)	p (Duncan)
EP2-EP3	0	1	1
EP2-EP1	0.1933	0.1910	0.0634
EP2-EP0	0.3433	0.0170	0.0057
EP3-EP1	0.1933	0.1910	0.0550
EP3-EP0	0.3433	0.0170	0.0050
EP1-EP0	0.1500	0.3645	0.1197

Cuadro 9. Comparación de medias para concentraciones de manganeso en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).

Par	Mn		
	Contraste	p (tukey)	p (duncan)
EP3-EP1	73.9667	0.0107	0.0025
EP3-EP2	75.9334	0.0092	0.0027
EP3-EP0	98.6000	0.0019	0.0006
EP1-EP2	1.9667	0.9994	0.9111
EP1-EP0	24.6333	0.5099	0.2037
EP2-EP0	22.6666	0.5723	0.2209

El sistema EP presentó diferencia significativa en las concentraciones de Ca, siendo los tratamientos 2 y 3 aquellos que se distinguieron del testigo por presentar contenidos más altos en el tejido foliar. De igual manera, el Mn mostró una diferencia significativa para el tratamiento 3, mismo que se distingue de los otros tres tratamientos por tener mayor concentración en las hojas.

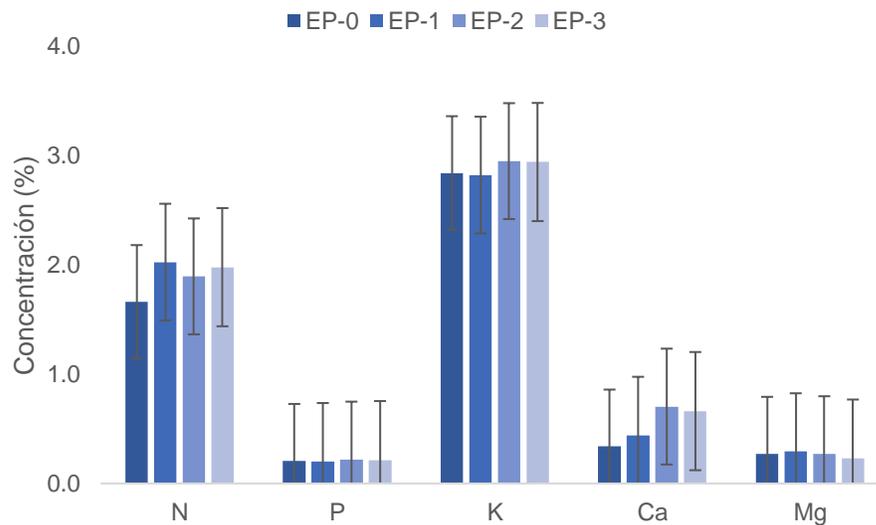


Figura 14. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema EP.

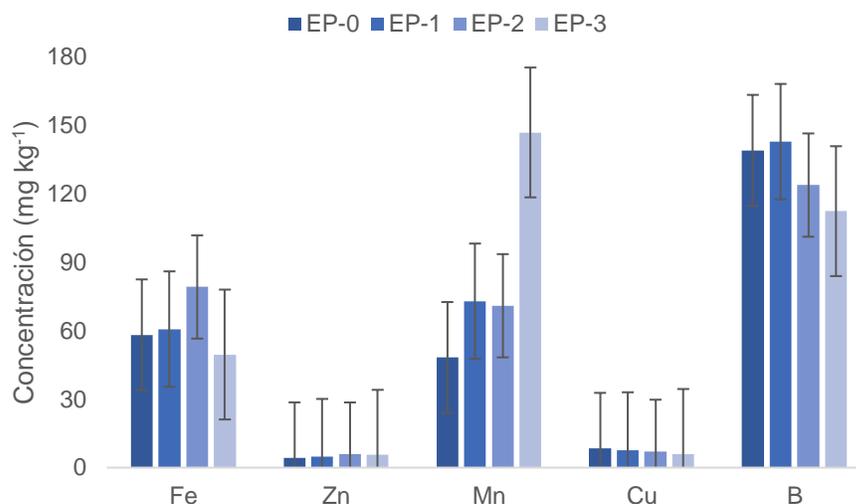


Figura 15. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema EP.

Cuadro 10. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema IV por elemento ($p \leq 0.05$).

Sistema	Elemento	P value	Decisión
IV	N	0.7230	Ho
	P	0.2624	Ho
	K	0.9485	Ho
	Ca	0.4441	Ho
	Mg	0.2180	Ho
	Fe	0.5955	Ho
	Cu	0.3354	Ho
	Zn	0.6151	Ho
	Mn	0.9514	Ho
	B	0.1112	Ho

IV: Sistema de *Inga vera*; Ho: Se acepta la hipótesis nula; R Ho: Se rechaza la Hipótesis nula, se acepta la alternativa.

El sistema IV no mostró diferencia significativa en ninguno de sus tratamientos, a pesar de haber demostrado una disminución en los requerimientos de Ca, N y K en la comparación del IBK.

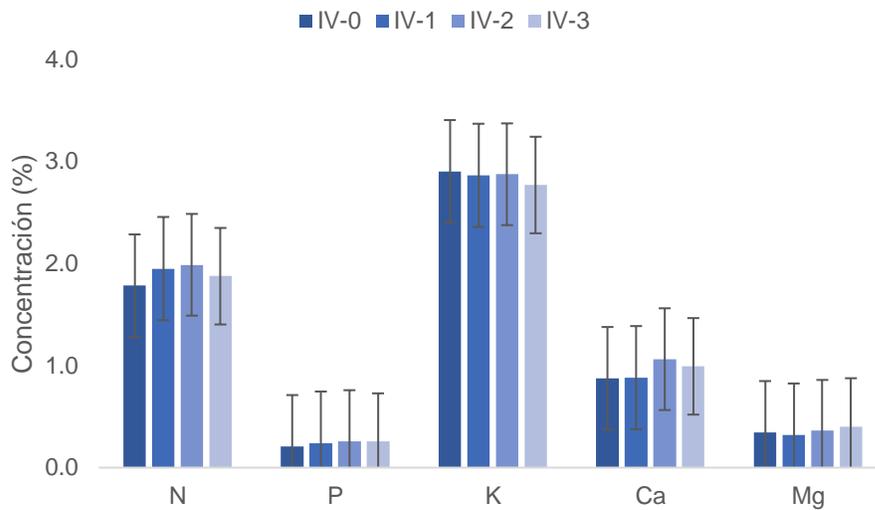


Figura 16. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema IV.

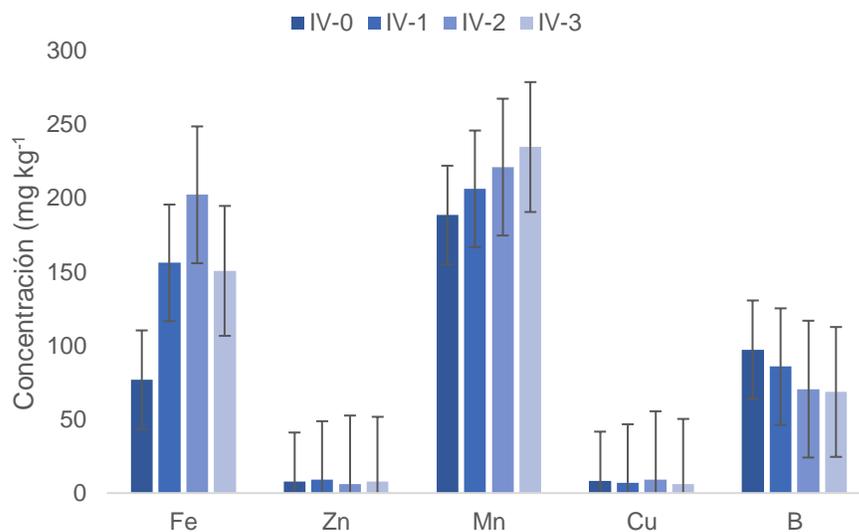


Figura 17. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema IV.

A pesar de no existir diferencia estadísticamente significativa, en la Figura 16 se aprecia un incremento en las concentraciones de N, Ca y Mg, con el tratamiento 3, mientras que, el tratamiento 4 tuvo los valores más altos en la concentración de Mn, en respuesta a la fertilización.

Cuadro 11. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema JP por elemento ($p \leq 0.05$).

Sistema	Elemento	P value	Decisión
JP	N	0.7036	Ho
	P	0.2468	Ho
	K	0.9479	Ho
	Ca	0.8091	Ho
	Mg	0.0251	R Ho
	Fe	0.2928	Ho
	Cu	0.3686	Ho
	Zn	0.1899	Ho
	Mn	0.5377	Ho
	B	0.3231	Ho

JP: Sistema de *Juglans pyriformis*; Ho: Se acepta la hipótesis nula; R Ho: Se rechaza la Hipótesis nula, se acepta la alternativa.

El sistema JP tuvo una diferencia significativa en la concentración de Mg, siendo el tratamiento 1 aquel que mostró una diferencia con respecto a los demás, dado que presentó niveles más bajos de dicho nutrimento con respecto a los demás tratamientos. A continuación, se muestra el Cuadro 12 con los cálculos de la prueba de Tukey y de Duncan para corroborar las diferencias estadísticamente significativas.

Cuadro 12. Comparación de medias para concentraciones de Calcio en el sistema EP mediante prueba de Tukey y de Duncan ($p \leq 0.05$).

Par	Contraste	Mg	
		p (tukey)	p (duncan)
JP2-JP0	0.0133	0.9295	0.5657
JP2-JP3	0.0300	0.5595	0.2310
JP2-JP1	0.0833	0.0233	0.0078
JP0-JP3	0.0167	0.8733	0.4735
JP0-JP1	0.0700	0.0536	0.0164
JP3-JP1	0.0533	0.1543	0.0431

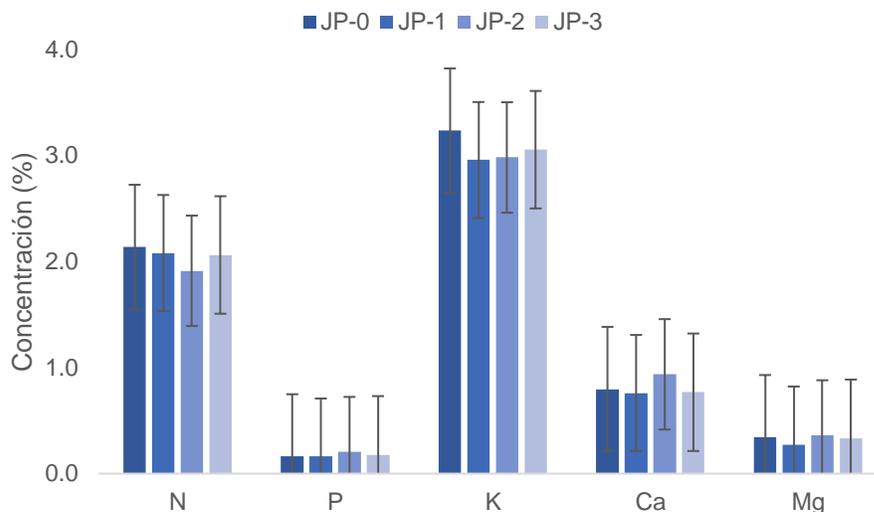


Figura 18. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema JP.

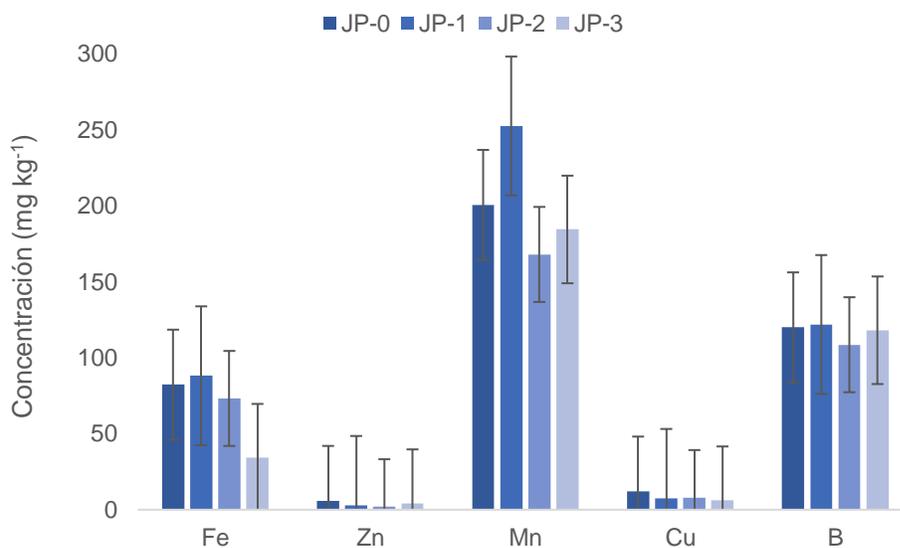


Figura 19. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema JP.

El sistema EG no mostró diferencia significativa en ninguno de los elementos. Sin embargo, el IBK mostró una disminución de los requerimientos de Fe, Ca, Mg, N y P, por lo que se recomienda corroborar con futuros análisis foliares. Los resultados del análisis estadístico se muestran a continuación en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Análisis estadístico de los tratamientos para el sistema EG por elemento ($p \leq 0.05$).

Sistema	Elemento	P value	Decisión
EG	N	0.6138	Ho
	P	0.2730	Ho
	K	0.5767	Ho
	Ca	0.6181	Ho
	Mg	0.9899	Ho
	Fe	0.2574	Ho
	Cu	0.4947	Ho
	Zn	0.1623	Ho
	Mn	0.7388	Ho
	B	0.2300	Ho

EG: Sistema de *E. poeppigiana* y *Grevillea robusta*; Ho: Se acepta la hipótesis nula.

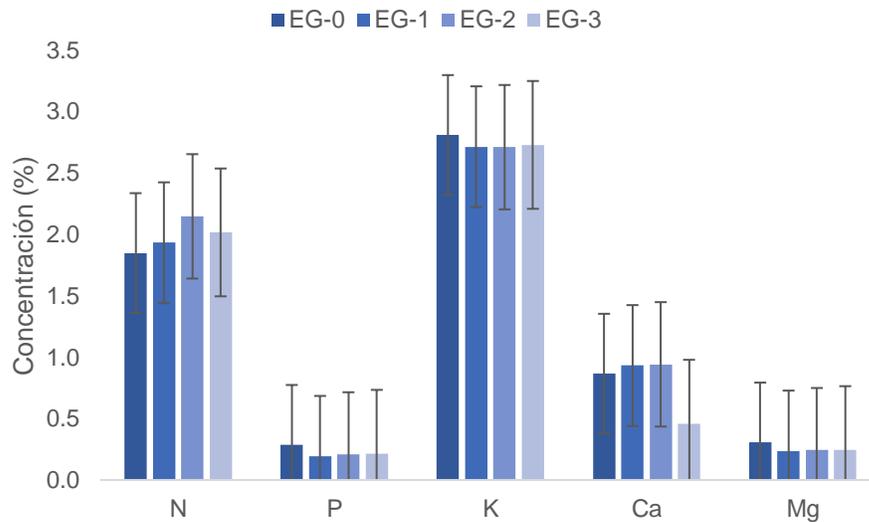


Figura 20. Comparación de concentraciones nutrimentales (macronutrientes) entre tratamientos en el sistema EG.

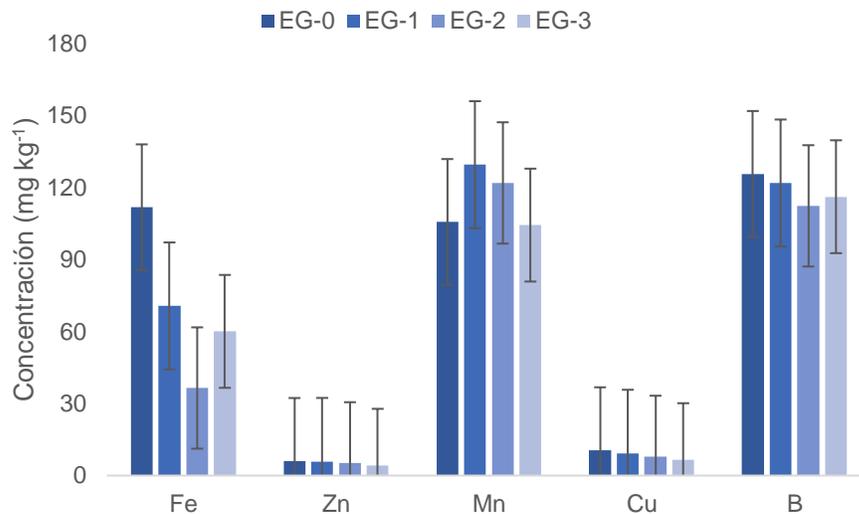


Figura 21. Comparación de concentraciones nutrimentales (micronutrientes) entre tratamientos en el sistema EG.

4.4.4 Rendimiento de cosecha

Los frutos de las diez plantas de cada bloque fueron colectados y promediados para obtener un solo peso por tratamiento, observando que en el sistema EP no se obtuvo ningún fruto durante el mes de noviembre, dado que la poda realizada por el productor y el porcentaje de sombra provocaron un crecimiento excesivo de hojas, aplazando la producción de flor y fruto. En la Figura 22 se observa que IV-2 es el tratamiento con mayor rendimiento de cosecha, mientras que los tratamientos EP-0, EP-1 y EP-2 no presentaron cosecha, como se mencionó previamente.

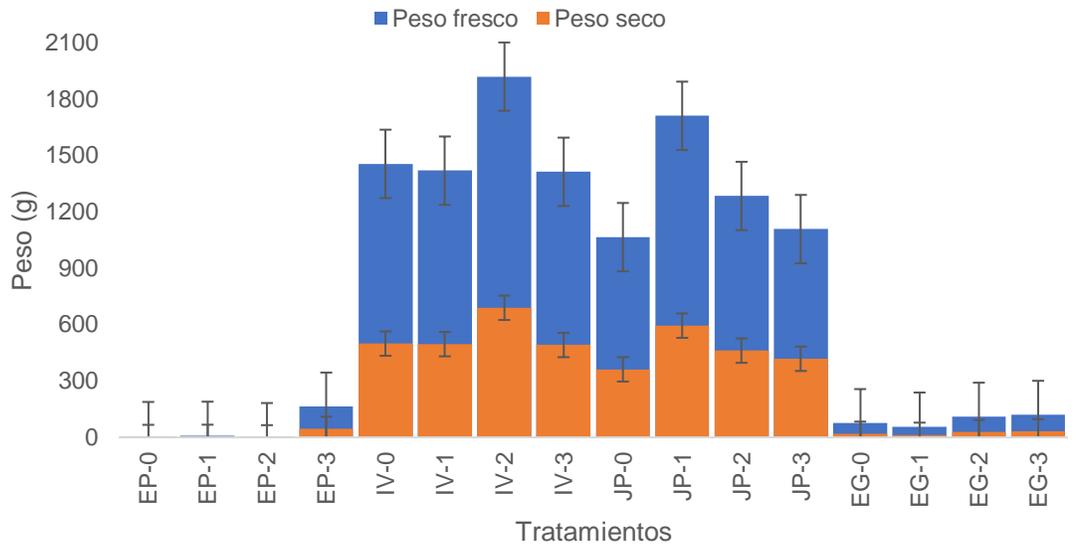


Figura 22. Gráfico comparativo del rendimiento obtenido en los tratamientos durante los meses de noviembre y diciembre de 2019.

En el sistema EP, a pesar de sufrir un retraso en la floración, provocado por el exceso de sombra, se puede apreciar que el tratamiento 3 presenta mayor producción en comparación con los demás. En IV el tratamiento que produjo una mayor cantidad de frutos fue el 2, mientras que los tratamientos 0, 1 y 3 tuvieron una producción muy similar. En el sistema JP el tratamiento 1 provocó la mayor producción, mientras que los tratamientos 0, 2 y 3 se mantuvieron similares. En el sistema EG, el tratamiento 3 obtuvo la mejor respuesta en producción de fruto, seguido por el tratamiento 2.

4.5 CONCLUSIONES

No se observó una nodulación abundante en las raíces de los árboles, pero sí en aquellas que están en contacto con el agua de escorrentía en la orilla de la parcela, junto al corte del camino ubicado a un costado del sistema EP. Esto puede deberse a que la disponibilidad de nutrientes en esta zona es mayor, ya que el agua arrastra cationes como Ca^{++} y Mg^{++} .

Para corregir la condición antes mencionada es necesario que el productor continúe fertilizando de la manera propuesta, pues con ello mejorará la

producción y calidad, al mismo tiempo que promueve el reciclaje de nutrientes esenciales para los nódulos.

Al comparar ambos análisis foliares, se concluye que las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Mn se elevaron hasta llegar a niveles dentro del rango normal, mientras que las concentraciones de Fe, Cu y Zn disminuyeron, acercándose al rango óptimo para el cultivo.

No se encontró diferencia estadísticamente significativa en los sistemas IV y EG, mientras que en EP hubo diferencia en las concentraciones de Ca y Mn, elementos cuya asimilación es limitada en suelos ácidos. En el caso del Ca, los tratamientos 2 y 3 tuvieron una respuesta positiva y estadísticamente diferente al tratamiento 1; en la concentración de Mn, el tratamiento 3 tuvo una marcada respuesta positiva con respecto a los otros tratamientos. En JP se encontró diferencia en las concentraciones de Mg, siendo el tratamiento 1 aquel que presentó concentraciones más bajas con respecto a los otros tratamientos.

La producción de fruto se vio beneficiada por diferentes tratamientos en cada sistema, mientras que en EP y EG se obtuvieron rendimientos elevados con el tratamiento 3, en IV fue el tratamiento 2 el que produjo el mismo efecto y JP se vio beneficiado por el tratamiento 1, lo cual confirma la necesidad de analizar cada sistema de manera independiente para ofrecer al productor esquemas de fertilización específicos para cada condición edáfica que permita obtener máximos rendimientos.

4.6 LITERATURA CITADA

Álvarez-Sánchez, M. E. & Marín-Campos, A. (2015). Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta del Laboratorio de Química, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Pp 3-78.

Benítez-García, E., Jaramillo-Villanueva, J. L., Escobedo-Garrido, S., & Mora-Flores, S. (2015). Caracterización de la producción y del comercio de café en el municipio de Cuetzalan, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(2), 181–198.

- Bernal F., A. A., Forero U., F. E., & Almanza-Merchán, P. J. (2016). Contenido de azufre, aluminio, hierro y manganeso foliar en especies vegetales cultivadas en suelo sulfatado ácido. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(2), 279. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4184>
- Farfán-Valencia, F., & Mestre-Mestre, A. (2004). Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. *Cenicafé*, 55(2), 161–174.
- Fonseca, A., Lima, J., & Silva, S. (2018). Spacial Variability of Balanced Indexes of Kenworthy (BIK) for Macro and Micronutrients on the Coffee *Canephora*. *Journal of Experimental Agriculture International*, 23(1), 1–10. <https://doi.org/10.9734/jeai/2018/41211>
- Juliana, M.-F. (2004). Fijación biológica de nitrógeno. *UDO Agrícola*, 4(1), 1–20.
- Murray, J. D. (2011). Invasion by Invitation : Rhizobial Infection in Legumes. *The American Phytopathological Society*, 24(6), 631–639.
- Ocaña Reyes, J. A. (2016). Aplicación de Molibdeno y Cobalto en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) con dos sistemas de fertilización bajo cero labranza (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Osorio, N. W. (2012). El análisis foliar: una poderosa herramienta para diagnosticar el estado nutricional de los cultivos, pasturas y plantaciones. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(3), 1–4.
- Peeters, L. Y. K., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., & Ishiki, M. (2003). Coffee production , timber , and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in Southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95, 481–493.
- Pedrozo, A., De Oliveira, N. J. G., & Alberton, O. (2018). Biological nitrogen fixation and agronomic features of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) crop under different doses of inoculant. *Acta Agronomica*, 67(2), 297–302. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.56375>

Saha B. et al. (2017) Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture. In: Meena V., Mishra P., Bisht J., Pattanayak A. (eds) Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5343-6_4

Zheng, M., Chen, H., Li, D., Zhu, X., Zhang, W., Fu, S., & Mo, J. (2016). Biological nitrogen fixation and its response to nitrogen input in two mature tropical plantations with and without legume trees. *Biology and Fertility of Soils*, 52(5), 665–674. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1109-5>

5 APÉNDICES

Apéndice 1. Medición de árboles de *Inga vera* en el sistema IV.

Número de árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	17	7
2	15	7
3	21	9
4	18	7
5	19	10
6	22	8
7	19	7
8	23	8
9	20	7
10	20	6
11	30	11
12	25	10
13	21	9
14	27	9
15	27	10

Apéndice 2. Medición de árboles de *Erythrina poeppigiana* en el sistema EP.

Número de árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	57	9
2	43	9
3	56	13
4	36	13
5	53	12
6	54	13
7	51	12
8	52	12
9	40	11
10	47	14
11	61	15
12	58	15
13	63	15
14	48	15
15	47	15

Apéndice 3. Medición de árboles de *Erythrina poeppigiana* en el sistema EG.

Número de árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	15	5
2	27	5
3	17	6
4	14	5
5	14	5
6	10	4
7	10	5
8	11	5
9	20	7
10	17	6
11	27	6
12	14	5
13	14	5
14	15	5
15	20	7

Apéndice 4. Medición de árboles de *Grevillea robusta* en el sistema EG.

Número de árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	18	7
2	19	7
3	23	8
4	12	6
5	22	8
6	17	8
7	19	8
8	18	7
9	21	8
10	20	7
11	23	7
12	17	6
13	14	8
14	8	4
15	14	5

Apéndice 5. Medición de árboles de *Juglans pyriformis* en el sistema JP.

Número de árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	15	5
2	25	5
3	21	7
4	17	7
5	17	7
6	21	8
7	20	8
8	14	6
9	13	5
10	12	6
11	20	8
12	22	8
13	23	8
14	22	8
15	20	8

Apéndice 6. Medición de cafetos en el sistema EP.

Número de cafeto	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	3.0	1.90
2	3.5	1.90
3	3.2	1.80
4	8.0	2.25
5	4.0	1.83
6	4.5	1.85
7	4.2	1.75
8	3.2	1.82
9	4.4	2.09
10	3.5	1.82
11	3.3	1.75
12	5.3	2.35
13	4.7	2.20
14	4.3	1.87
15	4.8	1.87
16	4.0	1.80
17	4.5	1.95
18	3.4	1.78
19	3.0	1.80
20	3.5	1.93

Apéndice 7. Medición de cafetos en el sistema EG.

Número de cafeto	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	4.0	2.20
2	5.0	2.09
3	4.0	2.20
4	4.5	2.12
5	3.5	2.00
6	4.0	1.90
7	5.4	2.15
8	4.0	1.64
9	5.0	2.15
10	4.5	1.94
11	4.5	1.85
12	4.3	2.00
13	5.0	1.93
14	4.5	1.85
15	5.3	2.20
16	3.5	1.73
17	4.0	1.95
18	4.0	1.93
19	7.0	2.10
20	8.0	2.12

Apéndice 8. Medición de cafetos en el sistema JP.

Número de cafeto	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	3.2	1.75
2	5.0	2.00
3	6.5	2.20
4	6.0	2.30
5	6.3	2.17
6	3.0	1.73
7	4.3	1.82
8	3.6	1.78
9	4.8	2.05
10	3.8	1.80
11	8.0	1.95
12	4.3	2.00
13	2.8	1.67
14	4.0	1.90
15	3.7	2.05
16	6.5	2.20
17	5.0	2.23

Número de cafeto	Diámetro (cm)	Altura (m)
18	8.0	2.15
19	4.5	1.97
20	7.5	1.80

Apéndice 9. Medición de cafetos en el sistema IV.

Número de cafeto	Diámetro (cm)	Altura (m)
1	4.5	1.60
2	7.7	1.90
3	5.3	2.00
4	4.5	1.80
5	5.2	1.94
6	6.8	1.94
7	4.0	1.95
8	5.0	1.87
9	6.3	2.05
10	4.8	2.05
11	3.0	1.90
12	4.0	1.87
13	4.0	1.80
14	4.0	1.93
15	3.0	1.67
16	4.0	1.94
17	5.5	2.05
18	4.5	2.00
19	2.8	1.93
20	6.0	1.95

Apéndice 10. Valores de concentración nutrimental foliar inicial de los sistemas agroforestales por cada tratamiento.

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Mo
EP-0	1.58	0.28	1.05	0.12	0.23	159.9	11.53	8.70	71.10	30.00	0.34
EP-1	1.50	0.25	0.99	0.11	0.31	158.7	11.18	9.08	73.95	41.00	0.43
EP-2	1.50	0.26	1.21	0.19	0.26	152.3	13.88	9.05	70.15	20.00	0.19
EP-3	1.41	0.29	1.43	0.15	0.16	145.7	11.10	9.65	81.90	33.00	0.29
IV-0	1.55	0.33	1.38	0.18	0.36	164.3	15.10	10.65	62.45	24.00	0.24
IV-1	1.72	0.29	1.43	0.21	0.37	147.4	12.18	7.88	79.75	39.00	0.34
IV-2	1.67	0.24	1.16	0.32	0.42	187.3	28.33	7.18	61.90	32.00	0.34
IV-3	1.58	0.29	1.38	0.12	0.24	130.0	12.63	4.83	66.05	21.00	0.19

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Mo
(%)						mg kg ⁻¹					
JP-0	1.41	0.23	1.10	0.17	0.28	163.5	21.38	6.23	81.90	21.00	0.19
JP-1	1.61	0.29	1.32	0.11	0.59	173.6	14.33	9.73	83.15	22.00	0.24
JP-2	1.43	0.29	1.43	0.20	0.37	148.2	16.75	7.80	86.20	48.00	0.43
JP-3	1.58	0.29	1.38	0.13	0.27	155.0	14.45	5.75	76.00	36.00	0.34
EG-0	1.43	0.25	1.43	0.16	0.31	153.3	11.48	10.50	42.95	23.00	0.34
EG-1	1.57	0.24	1.38	0.16	0.24	130.9	9.36	9.23	38.60	36.00	0.38
EG-2	1.60	0.29	1.49	0.19	0.29	157.4	9.85	8.60	47.55	37.00	0.38
EG-3	1.79	0.26	1.27	0.13	0.22	148.1	10.03	8.53	62.80	61.00	0.06

EP: Sistema café-*Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema café-*Inga vera*; JP: Sistema café-*Juglans pyriformis*; EG: Sistema café-*Erythrina poeppigiana* y *Grevillea robusta*; 0: Testigo; 1: Fertilización al suelo; 2: Fertilización foliar; 3: Fertilización al suelo y foliar.

Apéndice 11. Estado nutricional de los sistemas por tratamiento después de aplicar los productos.

Trat.	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	Cu	B
%						mg kg ⁻¹				
EP-0	1.66	0.21	2.84	0.34	0.27	58.18	4.30	48.27	8.47	139.05
EP-1	2.03	0.20	2.82	0.44	0.29	60.72	4.83	72.90	7.73	142.86
EP-2	1.89	0.22	2.95	0.70	0.27	79.15	5.93	70.93	7.13	123.81
EP-3	1.98	0.21	2.94	0.66	0.23	49.55	5.63	146.87	6.00	112.38
IV-0	1.78	0.21	2.90	0.88	0.35	76.85	7.63	188.47	8.23	97.14
IV-1	1.95	0.24	2.86	0.88	0.32	156.05	9.23	206.23	7.17	85.71
IV-2	1.99	0.26	2.88	1.06	0.36	202.18	6.22	220.97	9.10	70.48
IV-3	1.88	0.26	2.77	0.99	0.40	150.62	7.70	234.57	6.27	68.57
JP-0	2.14	0.16	3.23	0.80	0.34	82.28	5.80	200.60	11.93	120.00
JP-1	2.08	0.16	2.96	0.76	0.27	88.15	2.83	252.53	7.47	121.90
JP-2	1.91	0.20	2.98	0.94	0.36	73.22	1.97	168.00	8.00	108.57
JP-3	2.06	0.18	3.06	0.77	0.33	34.22	4.30	184.43	6.23	118.10
EG-0	1.85	0.29	2.81	0.87	0.31	111.82	6.13	105.70	10.60	125.71
EG-1	1.93	0.19	2.71	0.93	0.24	70.68	5.90	129.53	9.30	121.90
EG-2	2.15	0.21	2.71	0.94	0.24	36.48	5.30	121.93	8.00	112.38
EG-3	2.02	0.21	2.73	0.46	0.24	60.08	4.30	104.37	6.63	116.19

EP: Sistema café-*Erythrina poeppigiana*; IV: Sistema café-*Inga vera*; JP: Sistema café-*Juglans pyriformis*; EG: Sistema café-*Erythrina poeppigiana* y *Grevillea robusta*; 0: Testigo; 1: Fertilización al suelo; 2: Fertilización foliar; 3: Fertilización al suelo y foliar.

Apéndice 12. Producción de 30 plantas por tratamiento expresada en peso fresco y seco de frutos para los meses de noviembre, diciembre y total.

Trat.	Noviembre		Diciembre		Total	
	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
EP-0	0.0	0.0	6.69	1.98	6.69	1.98
EP-1	0.0	0.0	8.01	2.70	8.01	2.70
EP-2	0.0	0.0	0.80	0.23	0.80	0.23
EP-3	0.0	0.0	162.99	45.20	162.99	45.20
IV-0	57.0	14.5	1398.16	484.67	1455.18	499.19
IV-1	36.3	9.2	1382.90	486.93	1419.17	496.12
IV-2	12.7	7.9	1906.91	681.71	1919.57	689.62
IV-3	11.0	2.6	1402.05	489.03	1413.09	491.62
JP-0	38.7	10.6	1026.68	351.36	1065.37	361.98
JP-1	56.0	15.9	1654.78	578.58	1710.82	594.49
JP-2	41.2	10.9	1243.18	450.58	1284.41	461.47
JP-3	63.8	17.1	1044.38	401.14	1108.21	418.25
EG-0	6.2	1.2	68.84	17.86	75.07	19.05
EG-1	8.1	1.7	48.58	11.82	56.68	13.56
EG-2	18.8	4.1	90.43	23.79	109.21	27.88
EG-3	22.0	4.8	96.99	27.64	119.02	32.42

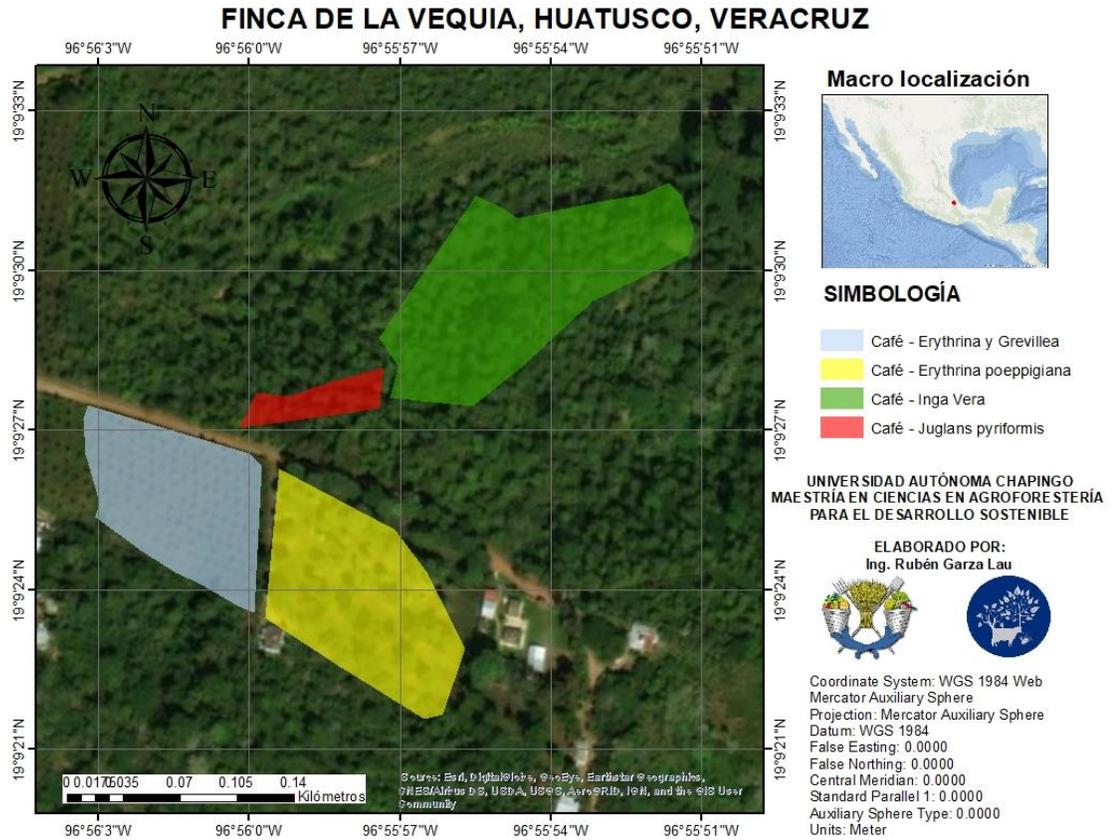


Figura 1. Localización geográfica de las parcelas bajo estudio.



Figura 2. Sistema de café con *Inga vera* (IV).

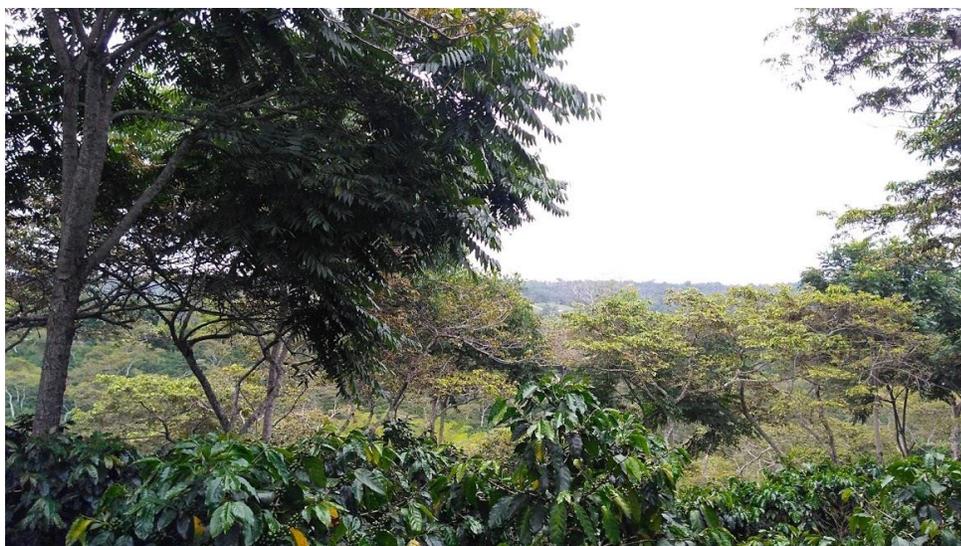


Figura 3. Sistema de café con *Juglans pyriformis* (JP).



Figura 4. Sistema de café con *Erythrina poeppigiana* y *Grevillea robusta* (EG)



Figura 5. Sistema de café con *Erythrina poeppigiana* (EP).



Figura 6. Uso de densiómetro para medición indirecta de sombra bajo el dosel forestal.



Figura 7. Colecta de hojas y guardado en bolsas con cierre hermético.



Figura 8. Colecta de datos y formación de la muestra compuesta para cada tratamiento.



Figura 9. Presencia de manchas en hojas posiblemente por efecto de hongos.



Figura 10. Nódulos bacterianos en raíces de *Erythrina poeppigiana* en el sistema EG.



Figura 11. Nódulos bacterianos en raíces de *Inga vera* en el sistema IV.



Figura 12. Nódulos bacterianos en raíces de *Erythrina poeppigiana* del sistema EP.



Figura 13. Comparación de cafetos con fertilización (izquierda) y sin fertilización (derecha).



Figura 14. Deficiencias nutrimentales de microelementos expresadas en hojas jóvenes.



Figura 15. Susceptibilidad al ataque de patógenos por deficiencias nutrimentales.



Figura 16. Titulación de muestras para determinación de nitrógeno por el método Kjendahl.