



Microorganismos de suelo y su relación con la calidad de la bebida de café: Una revisión*

Soil microorganisms, and its relationship with coffee beverage quality: A review

José Andrés Rojas-Chacón¹, Fabián Echeverría-Beirute², José Pablo Jiménez Madrigal³, Andrés Gatica-Arias⁴

* Recepción: 9 de noviembre, 2023. Aceptación: 8 de febrero, 2024. Este trabajo formó parte de la tesis de Maestría del primer autor de la Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica, San Carlos, Costa Rica.

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad, Campus Tecnológico local San Carlos. 159-7050, Alajuela, Costa Rica. joseandresrojaschacon@hotmail.com (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-8049-532X>)

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigación y Desarrollo en Agricultura Sostenible del Trópico Húmedo. Apartado 159-7050, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. fecheverria@itcr.ac.cr (<http://orcid.org/0000-0002-7238-220X>).

³ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ciencias Naturales y Exactas, Laboratorio de Biología Molecular. Apartado 159-7050, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. jjjimenez@itcr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-0345-8899>).

⁴ Universidad de Costa Rica, Escuela de Biología, Laboratorio Biotecnología de Plantas. Apartado 11501-2060, San José, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. andres.gatica@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-3841-0238>).

Resumen

Introducción. El café (*Coffea* spp.) es el segundo producto más comercializado a nivel mundial y cultivado en más de ochenta países. Este cultivo es complejo por pertenecer a un ecosistema donde factores abióticos y bióticos, tienen dinámicas bajo diferentes condiciones de manejo agronómico. Para comprender el desarrollo de la planta y su influencia en la calidad sensorial del producto hay que conocer la intrincada interacción entre la planta del café y los microorganismos autóctonos del café. **Objetivo.** Describir el rol de la microbiota edáfica del café, bacterias y hongos, y cómo puede contribuir en la calidad final de la bebida. **Desarrollo.** El suelo es uno de los ecosistemas más diversos y menos estudiados, en el cual se desarrollan diversas funciones ecológicas importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La identificación de los componentes microbianos del suelo y sus interacciones con otros organismos, son importantes desde el punto de vista agronómico. La microbiota edáfica puede favorecer la fisiología de la planta y de esta manera, se realiza la presente recopilación de información que busca asociar cómo los atributos sensoriales de la bebida de café pueden ser beneficiados por la microbiota del suelo. Se revisaron artículos de ScienceDirect, Scopus, Web of Science y Google Scholar, entre el 2011 y 2023. Los datos muestran la diversidad de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) y hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) asociados con el cultivo de café. También existen compuestos microbianos que juegan un papel importante en la formación de atributos sensoriales y están relacionados con la calidad en taza del café. **Conclusión.** La diversidad microbiana del suelo y fruto puede sintetizar o degradar compuestos que influyen en el perfil sensorial de la bebida, lo cual podría tener implicaciones para la sostenibilidad y calidad.

Palabras clave: agricultura sostenible, características organolépticas; ecología de suelo, microbioma funcional.



Abstract

Introduction. Coffee (*Coffea* spp.) is the second most traded product globally and is cultivated in over eighty countries. This crop is complex due to its belonging to an ecosystem where abiotic and biotic factors have dynamics under different agronomic management conditions. To understand the plant's development and its influence on the sensory quality of the product, it is necessary to understand the intricate interaction between the coffee plant and its indigenous microorganisms. **Objective.** To describe the role of soil microbiota in coffee, including bacteria and fungi, and how it can contribute to the final quality of the beverage. **Development.** Soil is one of the most diverse and least studied ecosystems, in which various ecological functions important for plant growth and development occur. The identification of soil microbial components and their interactions with other organisms are important from an agronomic perspective. Soil microbiota can favor plant physiology, and thus, this compilation of information seeks to associate how the sensory attributes of coffee beverage can be benefited by soil microbiota. Articles from ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and Google Scholar were reviewed between 2011 and 2023. The data show the diversity of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), nitrogen-fixing bacteria (NFB), and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) associated with coffee cultivation. There are also microbial compounds that play an important role in shaping sensory attributes and are related to coffee cup quality. **Conclusion.** The microbial diversity of soil and fruit can synthesize or degrade compounds that influence the sensory profile of the beverage, which could have implications for sustainability and quality.

Keywords: sustainable agriculture, organoleptic characteristics, soil ecology, functional microbiome.

Introducción

El café (*Coffea* spp.) es un cultivo de gran relevancia a nivel mundial por su alto valor como bebida, con un consumo diario de tres mil millones de tazas (International Coffee Organization, 2022). Este se cultiva en alrededor de ochenta países, donde abarcan más de 10,2 millones de hectáreas en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Alemayehu, 2017). Además, es la principal fuente de trabajo para 25 millones de familias en África, Asia y América Latina (Silva et al., 2022). Estadísticas recientes indican que un 80 % de la producción mundial de café arábica se encuentra en América Central y del Sur, donde hay interés por encontrar alternativas viables al manejo convencional que permitan obtener un mejor precio por el producto y depender menos de insumos externos (Jezeer et al., 2018; Sternhagen et al., 2020).

El café arábica (*Coffea arabica* L.) es una planta originaria de las tierras altas de Etiopía, donde crece en el sotobosque de bosques tropicales (Krishnan et al., 2021). En estas zonas, el café se cultiva a una altura entre 700 y 2000 m s. n. m., con diferentes estrategias que van desde el manejo con poca intervención, bajo sombra y con el uso de bioinsumos orgánicos, hasta el manejo intensivo a plena luz y la aplicación excesiva de insumos de origen químico (Toniutti et al., 2017). En consecuencia, los efectos adversos del cultivo y procesamiento del café en el medio ambiente resaltan la importancia de desarrollar soluciones sostenibles para mantener el sustento de los productores y minimizar el impacto ambiental.

El suelo es un ecosistema dinámico y complejo, esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Prates et al., 2021). La evaluación de la salud del suelo se basa en variables de calidad química, física y biológica, las cuales garantizan la sostenibilidad de la producción de cultivos en tierras agrícolas. Se ha demostrado que los componentes de la biota del suelo, como la comunidad, abundancia, diversidad y actividad microbiana, son indicadores importantes de la calidad del suelo (Sahu et al., 2019). La microbiota del suelo juega un papel clave en la mineralización de los residuos vegetales para formar nutrientes de fácil absorción por las plantas, para optimizar

su crecimiento y desarrollo (Custódio et al., 2022; Meena et al., 2017), así como, mantener la fertilidad del suelo y sanidad de las plantas (Tahat et al., 2020).

Como cultivo perenne, el café puede albergar una amplia y diversa cantidad de microorganismos benéficos en su rizosfera, incluidas bacterias y hongos, vitales para satisfacer las necesidades de la planta (Prates et al., 2021; Tahat et al., 2020). Sin embargo, es necesario comprender las especies de microorganismos que brindan estos beneficios. Algunos estudios han tratado de describir la dinámica de la microbiota del cultivo, así como, durante el proceso de fermentación del café (Cruz-O'Byrne et al., 2021; Martínez et al., 2022; Silva et al., 2022). Pese a esto, ninguna revisión publicada ha profundizado en la influencia de la microbiota del suelo y frutos de café, con la calidad final. Es necesaria más investigación para revelar su biodiversidad, identificar las cepas que pueden modular las estructuras microbianas de la rizosfera hacia los frutos, de manera que contribuyan a la calidad de la bebida.

El objetivo de la presente revisión es describir el rol de la microbiota edáfica del café, bacterias y hongos, y cómo puede influir en la calidad de la bebida. Se utilizaron combinaciones de las siguientes palabras clave en español e inglés: café, *Coffea*, microbioma, microbiota, metagenómica, microorganismos, suelo, bacterias, hongos, endófitos, micorrizas, rizosfera, manejo agronómico, sostenibilidad, convencional, altitud y calidad de taza. Además, se utilizó la combinación de operadores booleanos básicos: AND, OR, NOT para incluir palabras clave o términos en la búsqueda. Las bases de datos analizadas fueron: PubMed, Google Scholar, Springer Link, SciELO y Scopus, entre los años 2011 y 2023.

Herramientas utilizadas para explorar la microbiota rizosférica del café

La primera mención de los microorganismos asociados a las plantas de café data del siglo XIX y trató sobre hongos micorrízicos arbusculares que colonizaban las raíces de *C. arabica* y *C. liberica* L. (Janse, 1897). Desde ese momento, se ha estudiado la microbiología del suelo con el fin de poder describir la diversidad en el café. El estudio de organismos se inició por medio de técnicas convencionales de cultivo en laboratorio que implica el aislamiento y la purificación. Sin embargo, aún es desconocido cuánta diversidad microbiana existe, pues nunca ha sido aislada ni estudiada en su totalidad (Posada et al., 2018). En este caso, la diversidad se limita a las obtenidas mediante técnicas de tinción o microscopía, identificadas por morfología, bacterias, micorrizas y hongos filamentosos (Cabrera-Rodríguez et al., 2020).

A finales del siglo XX, surgieron avances en biología molecular que han llevado al desarrollo de técnicas ómicas, con un protagonismo en el estudio de la diversidad y abundancia microbiana. Estos métodos han contribuido significativamente a la microbiología edáfica y aumentar el número de especies microbianas conocidas (Duong et al., 2020). En búsqueda para comprender en detalle la comunidad microbiana total del suelo, se utilizan cada vez más las tecnologías ómicas como la metagenómica, las tecnologías de secuenciación de ADN de alto rendimiento y el análisis del ADN extraído de muestras ambientales (Nwachukwu & Babalola, 2022).

El surgimiento de la metagenómica ha resuelto el desafío de capturar toda la comunidad microbiana en una muestra ambiental al permitir el análisis de genomas completos sin necesidad de cultivo. Hasta el momento, la mayoría de los estudios metagenómicos relacionados con la diversidad de los microorganismos del café se realizaron con plataformas de secuenciación de segunda generación que permiten secuenciar solo una parte (regiones hipervariables) de marcadores de ADN como el gen ribosomal 16S para bacterias y las subunidades 18S o 26S/28S e ITS para hongos (Nwachukwu & Babalola, 2022). Varios autores han realizado análisis de metagenomas (Cabrera-Rodríguez et al., 2020; Caldwell et al., 2015), en los que describen los habitantes bacterianos presentes en la rizosfera del café con manejo de cultivo orgánico o convencional.

Funciones y diversidad de la microbiota rizosférica del café

La estrecha capa de los primeros 20 cm de suelo bajo la influencia directa de las raíces de las plantas, es decir, la rizosfera, se considera un punto de alta actividad microbiana y representa uno de los ecosistemas más complejos. Una gran diversidad de organismos se especializan en vivir en la rizosfera, incluidas bacterias, hongos, nematodos, algas, protozoos, virus y arqueas (Compant et al., 2019). Las raíces liberan gran diversidad de compuestos químicos orgánicos en su rizosfera como resultado de sus procesos metabólicos. A este proceso se le denomina rizodeposición y a los metabolitos liberados se les denominan rizodepósitos o exudados de raíces. Estos exudados son una mezcla de una amplia variedad de compuestos orgánicos, incluidos metabolitos primarios y secundarios. Los metabolitos primarios, incluidos los carbohidratos, aminoácidos, y los ácidos orgánicos, se secretan en cantidades mayores en comparación con los metabolitos secundarios, como los flavonoides, glucosinolatos y reguladores de crecimiento (Vives-Peris et al., 2019).

El proceso de rizodeposición conduce a una selección activa de microbios del suelo, lo que da como resultado diferentes comunidades bacterianas y fúngicas que colonizan la rizosfera, las raíces y, en cierta medida, las partes aéreas de las plantas (Dastogeer et al., 2020). Una vez estos microbios se establecen en la rizosfera, producen sustancias como metabolitos secundarios, antibióticos, fitohormonas y otros compuestos que ayudan a la planta huésped en su crecimiento, desarrollo y mecanismos de defensa (Meena et al., 2017; Vejan et al., 2016) (Figura 1).

Se ha descubierto la existencia de microorganismos asociados con una determinada especie o genotipo de planta, conocidos como el microbioma central de la planta (Lemanceau et al., 2017). Se identificó un microbioma central del café comprendido por los seis taxones bacterianos *Sphingobium*, *Rhizobium*, *Acidobacter*, *Sphingomonas*, *Burkholderia* y *Amycolatopsis* (Bez et al., 2023). Se cree que el microbioma central de la planta de café comprende taxones microbianos clave para la salud de la planta. En estudios realizados por de Sousa et al. (2022), se estudió la estructura y función del microbioma de la rizosfera por medio de metagenómica, en cinco especies diferentes, *C. arabica*, *C. canephora*, *C. stenophylla*, *C. racemosa*, y *C. liberica*. Sus hallazgos indicaron que *C. arabica* y *C. stenophylla* tienen diferentes microbiomas, mientras que no se detectaron diferencias entre las otras especies de *Coffea* evaluados. El microbioma central de la rizosfera determinado comprendió géneros como *Streptomyces*, *Mycobacterium*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Sphingomonas*, *Penicillium*, *Trichoderma* y *Rhizophagus*.

Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV)

El término “rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas” se refiere a las bacterias que colonizan las raíces (rizosfera) y mejoran el crecimiento de las plantas. Las RPCV constituyen un grupo de microorganismos que representan entre 2 % y 5 % de las bacterias presentes en el suelo (Urgiles-Gómez et al., 2021; Sagar et al., 2021). En función a las interacciones con las células vegetales, las RPCV se pueden clasificar en bacterias simbióticas, que habitan dentro de las plantas, y rizobacterias de vida libre (Rai et al., 2020; Vejan et al., 2016). La inducción de la promoción del crecimiento de las plantas de café por RPCV ejercen múltiples efectos benéficos, a través de mecanismos directos e indirectos (Moreno Reséndez et al., 2018; Prates et al., 2021; González-Osorio et al., 2020).

Los mecanismos directos se expresan cuando las bacterias sintetizan metabolitos que facilitan la disponibilidad de elementos nutritivos para las plantas, entre estos se mencionan la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fósforo (Meena et al., 2017; Sagar et al., 2021). Además, se han reportado bacterias que participan en la regulación del crecimiento vegetal, por medio de la síntesis de fitohormonas, principalmente auxinas, giberelinas, ácido jasmónico y etileno, que favorecen una mayor altura de la planta, área foliar y biomasa del sistema radical (Gouda et al., 2018). Los mecanismos indirectos cumplen una función de biocontrol mediante efectos antagonísticos a enfermedades, y la producción de sustancias antimicrobianas, enzimas líticas, compuestos volátiles inhibidores de patógenos y sideróforos (Gouda et al., 2018; Moreno Reséndez et al., 2018; Vejan et al., 2016).

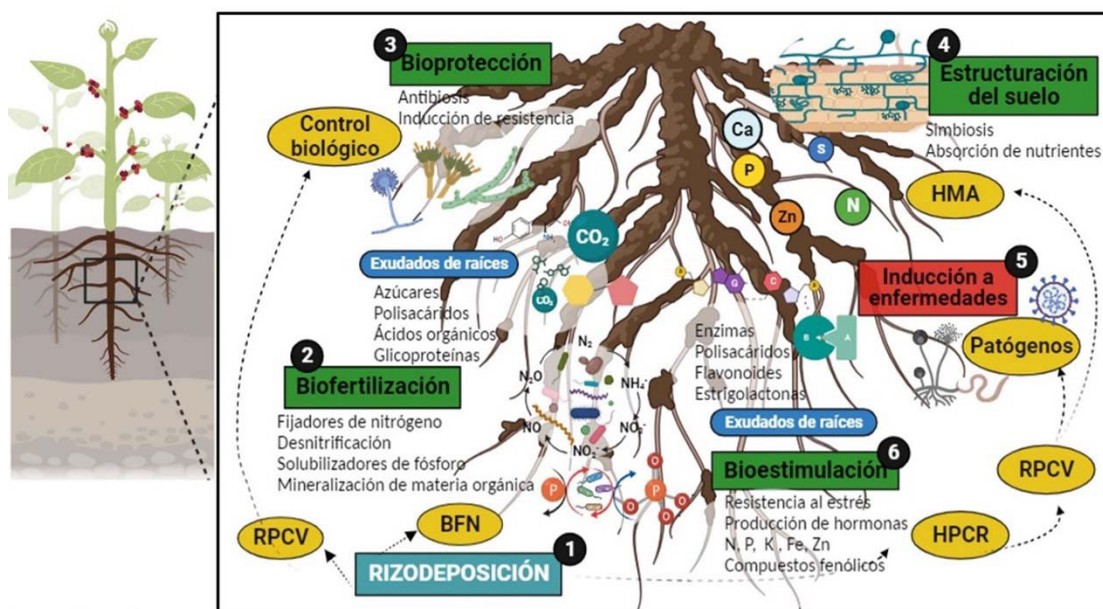


Figura 1. Interacciones entre planta de café (*Coffea* spp.)-microorganismos del suelo. **1- Rizodeposición** es la forma por el cual las plantas secretan sustancias que modifican su entorno. **2- Biofertilización**, microorganismos con capacidad de transformar los nutrientes minerales en formas biodisponibles para las plantas. **3- Bioprotección o biocontrol**, inhibición o supresión de patógenos por recursos por medio de antibiosis, e inducción de resistencia. **4- Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)** forman asociaciones simbióticas y suministran al huésped nutrientes que son inaccesibles para las raíces. **5- Patógenos**. Algunos agentes patógenos pueden inducir enfermedades severas y reducir significativamente la productividad y calidad del fruto. **6- Bioestimulación**, rizobacterias promotoras del crecimiento (RPCV) y hongos promotores del crecimiento vegetal (HPCR) con capacidad de sintetizar compuestos para optimizar el crecimiento de las plantas. Creación propia con base en el empleo de BioRender.com.

Figure 1. Interactions between coffee plant (*Coffea* spp.) and soil microorganisms. **1- Rhizodeposition** is the process by which plants secrete substances that modify their environment. **2- Biofertilization**, microorganisms capable of transforming mineral nutrients into forms available for plants. **3- Bioprotection or Biocontrol**, inhibition or suppression of pathogens through resources via antibiosis and induction of resistance. **4- Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)** form symbiotic associations and supply nutrients to the host that are inaccessible to roots. **5- Pathogens**. Some pathogens can induce severe diseases and significantly reduce fruit productivity and quality. **6- Biostimulation**, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and plant growth-promoting fungi (PGPF) with the ability to synthesize compounds to optimize plant growth. Created based on the use of BioRender.com.

La endosfera es el compartimento mejor descrito de la microbiota autóctona del café (Prates et al., 2021). Entre los géneros de RPCV más reportados en *Coffea* spp se encuentran: *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Streptomyces*, *Herbaspirillum*, *Acetobacter* (Caldwell et al., 2015; Lamelas et al., 2020). Otros estudios también reportan a *Erwinia*, *Bacillus*, *Micrococcus* y *Burkholderia* (Urgiles-Gómez et al., 2021), *Serratia* y *Flavobacterium*, *Streptomyces*, *Mycobacterium*, *Bradyrhizobium*, *Sphingomonas* (de Sousa et al., 2022).

Bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN)

Las bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) o diazotarias son de gran importancia agrícola como intermediarios en el proceso de fijación biológica del nitrógeno (N) (Rai et al., 2020; Urgiles-Gómez et al., 2021). En el cultivo de café, estas bacterias pueden influir en la nutrición, al aumentar la capacidad de asimilación de N de dos maneras: indirecta, con el incremento del sistema radical o directa al estimular el sistema de transporte de N en la planta

(Prates et al., 2021). La fijación biológica de nitrógeno convierte el dinitrógeno (N_2) en una forma utilizable por las plantas (NH_4^+) (Soumare et al., 2020).

Se ha reportado a *Acetobacter diazotrophicus* como las primeras bacterias fijadoras de nitrógeno asociadas con las plantas de café, la cual se encuentra tanto en los tejidos de la planta, como en la rizosfera (Jimenez-Salgado et al., 1997). También, los géneros de bacterias *Erwinia*, *Bacillus*, *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium* y *Azotobacter*, han sido identificados en el cultivo de café y que participan en la fijación de nitrógeno en el suelo (Caldwell et al., 2015; Duong et al., 2021).

La rizosfera del café varía de acuerdo con la especie (de Sousa et al., 2022) y localidad reportada (Bez et al., 2023), por ejemplo: en *C. arabica* dominan los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Serratia* y *Flavobacterium*, mientras que en el *C. canephora* se encontraron en mayoría los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Flavobacterium* (Cortes et al., 2022). A continuación, se detallan diversas RPCV y BFN, así como su rol en el cultivo de café (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rol de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) y bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) en el cultivo de café (*Coffea* spp.), reportados en diferentes países.

Table 1. Role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and nitrogen-fixing bacteria (NFB) in coffee cultivation (*Coffea* spp.), reported in different countries.

Organismo	Rol en suelo/planta	Especie	País	Referencia
<i>Azospirillum amazonense</i>	Fijación de N y producción de ácido indol-3-acético (AIA)	<i>Coffea</i> spp	Perú, Nigeria	(Curi et al., 2019; Mukharib et al., 2018)
<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Solubilización de fósforo, agente efectivo de control biológico de los nematodos	<i>Coffea</i> spp	India, Vietnam	(Nguyen et al., 2021; Srigantha et al., 2017)
<i>Azotobacter</i> sp, <i>Burkholderia gladioli</i>	Solubilización de fósforo	<i>C. arabica</i>	Ecuador, Perú	(Curi et al., 2019; Mora et al., 2021)
<i>Staphylococcus succinus</i> , <i>Leclercia adecarboxylata</i> , <i>Kocuria</i> sp.	Solubilización de P, mejora el crecimiento y desarrollo en plántulas de café	<i>C. arabica</i>	Colombia	(Cisneros-Rojas et al., 2017; Ramos-Cabrera et al., 2021)
<i>Bacillus cereus</i>	Biocontrol de <i>Radopholus duriophilus</i> y promotores del crecimiento de las plantas	<i>C. canephora</i> y <i>C. liberica</i>	Vietnam	(Duong et al., 2021)
<i>Bacillus subtilis</i> y <i>Bacillus licheniformis</i>	Bioestimulante en crecimiento y parámetros fisiológicos de plántulas	<i>C. arabica</i>	Brasil	(Ferraro et al., 2023)
<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Biocontrol y antagonismo a <i>Myrothecium roridum</i>	<i>C. canephora</i> y <i>C. arabica</i>	India	(Ranjini & Naika, 2019)
<i>Trichoderma</i> sp.	Promotor de crecimiento y antagonista antagonizar contra <i>Mycena citricolor</i>	<i>C. arabica</i>	Costa Rica	(Escudero-Leyva et al., 2023)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Bioestimulante de crecimiento, biocontrol y antagonismo a <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	<i>C. arabica</i>	Ethiopia	(Kejela et al., 2016)
<i>Arthrobacter koreensis</i>	Precursor de la calidad de la semilla y productor de ácido málico y láctico	<i>C. arabica</i>	Brasil	(Suzzi et al., 2019)
<i>Bacillus</i> sp, <i>B. antrachis</i> , <i>Pseudomonas dimunita</i> , <i>B. subtilis</i>	Agentes de control biológico de <i>Pratylenchus coffeae</i> y promotor de crecimiento	<i>C. anephora</i>	Indonesia	(Alemayehu, 2017)
<i>Ktedonobacter</i> sp. y <i>Exidiopsis</i> sp.	Endófitos	<i>C. arabica</i>	Costa Rica y Nicaragua	(Fulthorpe et al., 2019)

Hongos promotores del crecimiento vegetal

Los hongos promotores del crecimiento vegetal (HPCV) pueden colonizar la rizosfera de las plantas, de manera que, favorecen su crecimiento y protegen contra algunos patógenos (Shaw et al., 2016; Urgiles-Gómez et al., 2021). Es por ello que los HPCV son un componente crítico dentro de las comunidades microbianas del suelo y cuyo papel es de gran importancia para la sanidad de las plantas (Duong et al., 2020). Algunos de estos organismos están relacionados con el ciclo de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica y efectos de biocontrol (Frac et al., 2018).

Entre las especies de mayor impacto, el género *Trichoderma* ha sido estudiado para el biocontrol de patógenos, al secretar sustancias antifúngicas, como antibióticos y enzimas que degradan la pared celular de hongos patogénicos y como efecto secundario, estimula el crecimiento de las plantas (Shaw et al., 2016). Un estudio reciente demuestra que diferentes aislados de *Trichoderma* tienen potencial para la promoción del crecimiento de las plantas y el antagonismo contra *Mycena citricolor* en café (Escudero-Leyva et al., 2023).

Una revisión de la microbiota del café reveló que *Ascomycota* fue el filo más reportado, siendo *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Trichoderma* los géneros identificados con mayor frecuencia (Duong et al., 2020). Aunque se reporta que las prácticas de manejo agronómicas en el cultivo de café pueden modificar las comunidades fúngicas del suelo. Así, en plantaciones con un manejo orgánico se encontraron una mayor abundancia de organismos del filo *Ascomycota*, mientras que las parcelas manejadas de forma convencional prevalecían el filo *Chytridiomycota* (Jurburg et al., 2020). En cuanto a la composición de la comunidad fúngica en suelo y frutos de café, se identificaron un total de cinco filos comunes, entre ellos *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, *Mortierellomycota* y *Mucoromycota*, siendo el primero el más abundante (Velooso et al., 2020).

Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA)

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pertenecientes al filo *Mucoromycotina* y al subfilo *Glomeromycotina*, son considerados hongos ancestrales (Spatafora et al., 2016; Prates et al., 2021). Las plantas de café son plantas micotróficas, ya que dependen de hongos micorrízicos para su crecimiento y desarrollo (Bano & Uzair, 2021). Estos HMA tienen la capacidad de generar relaciones mutualistas con las plantas, donde los hongos favorecen en las plantas la absorción de nutrientes (fósforo, nitrógeno y otros nutrientes esenciales) y agua, mientras las plantas a su vez entregan carbono reducido en forma de azúcares y lípidos (de Beenhouwer et al., 2015; Genre et al., 2020).

Las micorrizas benefician a las plantas al aumentar el área de superficie efectiva para la absorción de nutrientes y agua del suelo (Hernández-Acosta et al., 2021). Además, las plantas de café con asociación de micorrizas son más competitivas y pueden tolerar el estrés biótico y abiótico (Genre et al., 2020). Los HMA tienen la capacidad de mejorar la absorción por parte de la planta huésped de nutrientes inmóviles, en particular P, y varios micronutrientes como el Zn y Cu (Siqueira et al., 1998).

En condiciones de campo, las plantas de café adultas están asociadas con una comunidad diversa de HMA (Lovera et al., 2022). En estudios previos, se han identificado un total de 70 especies de HMA asociadas con el cultivo de café (Cogo et al., 2017). Sin embargo, en esta revisión se ha encontrado un total de 92 especies de micorrizas reportadas para el cultivo de café, *Glomeromycetes* (82), *Archaeosporomycetes* (5) y *Paraglomeromycetes* (4). De estas clases, las familias *Glomeraceae* (27), *Gigasporaceae* (25) y *Acaulosporaceae* (22) son las que concentran más especies representadas.

Investigaciones realizadas en Costa Rica (Aldrich-Wolfe et al., 2020; Prates et al., 2019) estudiaron comunidades HMA de raíces de café con manejo orgánico respecto a suelos manejados de forma convencional. Estos autores encontraron que las familias *Gigasporaceae* y *Acaulosporaceae* dominaron las comunidades de

HMA del café en términos de abundancia. La riqueza de *Gigasporaceae* fue mayor en los campos manejados de forma convencional, mientras que la riqueza de *Acaulosporaceae* se encontró con mayor frecuencia en suelos orgánicos. En Brasil, se ha reportado la presencia de HMA en suelos cultivados con café con manejo agroecológico y convencional. El análisis molecular indicó un mayor índice de diversidad de hongos formadores de micorrizas en los sistemas agroecológicos que en las parcelas bajo manejo convencional. En este estudio, se reportó la presencia de los géneros *Glomus*, *Acaulospora*, *Scutellospora*, *Archaeospora*, *Ambispora*, *Gigaspora*, *Rhizophagus*, *Dentiscutata* y *Paraglomus* (Prates et al., 2019).

Microbioma y compuestos asociados a la calidad del café

El aspecto nutricional del café se refleja en la calidad de sus frutos y, en consecuencia, en la calidad de su bebida (Prates et al., 2021). Esto ocurre porque una planta con un estado nutricional óptimo es más eficiente en la producción de fotoasimilados que pueden ser asignados como fuente de energía para el metabolismo y la defensa contra patógenos (Sahu et al., 2017). En cuanto, a la absorción de nutrimentos, se dice que después del nitrógeno, el fósforo es el segundo macronutriente limitante en la producción de café, ambos relacionados con la producción de cafeína y proteínas. Para obtener estos nutrientes, las plantas dependen de mecanismos como la síntesis de fosfatasas, ácidos orgánicos y glomalina, en gran medida asociados con HMA, lo que involucra una ruta regulada para absorción para la planta y como respuesta las plantas secretan compuestos carbonados que son asignados para estos microorganismos (Andrade et al., 2019).

También se ha reportado que algunas especies de hongos formadores de micorrizas en *C. arabica* pueden influir en la concentración y la composición de metabolitos secundarios, como aceites esenciales, apocarotenoides, y compuestos fenólicos acumulados en su mayoría en los granos (Prates et al., 2021). En estudios realizados por Morales-Ramos et al. (2020), mencionan que algunos HMA están involucrados en la síntesis de productos relacionados con la calidad sensorial del café; entre ellos: alcaloides, compuestos volátiles y fenólicos como los ácidos clorogénicos, incluido el ácido cafeoilquinico. La síntesis de aminoácidos por HMA y bacterias promotoras de crecimiento vegetal influyen en la producción de cafeína, un alcaloide derivado de la glicina, el ácido L-aspartico y la L-glutamina (Suzzi et al., 2019).

La microbiota asociada a las plantas de café representa un papel crítico en la fisiología, la producción y la calidad final del grano (Pimenta et al., 2018; Veloso et al., 2020). Algunos autores indican que la rizosfera del cultivo de café tiene influencia con los microorganismos y les permite colonizar los tejidos vegetales externos e internos y logran llegar hasta los frutos (Prates et al., 2021). El conocimiento de la diversidad microbiana asociada con el fruto de café es crucial para entender las interacciones, rutas metabólicas, productos y los posibles metabolitos microbianos como los precursores sensoriales asociados con bebidas de café de mayor calidad (Cheng et al., 2016).

La calidad en la bebida de café es el resultado de factores y condiciones del suelo (Veloso et al., 2020), altitud (Tolessa et al., 2017), genética (Machado et al., 2022), sombra (Torrez et al., 2023), manejo agronómico (Cabrera-Rodríguez et al., 2020; Jurburg et al., 2020), plagas y/o enfermedades (Echeverría-Beirute et al., 2018). Por ejemplo, en el cultivo de café arábica, altitudes elevadas influye directamente en la composición química de los granos, así como el perfil microbiano y sensorial, en particular el aroma y fragancia (Martins et al., 2020).

También se sabe que el método de procesamiento del café influye en los factores metabólicos endógenos del fruto y en factores exógenos como la ecología microbiana y las condiciones de procesamiento (Elhalis et al., 2020; Florac et al., 2016; Zhang et al., 2019). Aunque la función principal de la fermentación en el café es la eliminación de la capa de mucílago adherida al pergamino, este proceso también desencadena varios cambios químicos dentro de los granos que son precursores de compuestos beneficiosos para la calidad sensorial de los granos (Evangelista et al., 2015; Simmer et al., 2022). Un estudio de bacterias autóctonas en frutos de café (Mahatmanto et al., 2023)

reportan el género *Bacillus* como el encargado de producir las enzimas para la degradación de la pulpa del café, como son la poligalacturonasa y pectina liasa.

En consecuencia, al afectar a la comunidad microbiana, se sugiere que también se afecta la composición bioquímica de la bebida de café (Peñuela-Martínez et al., 2023). La microbiota nativa impacta el concepto de *terroir* microbiano, que sugiere que los productos sensoriales del café pueden explicarse de forma parcial por la diversidad microbiana en ese ambiente (Cruz-O'Byrne et al., 2021.) Hay una amplia variedad de bacterias y levaduras en el proceso de la fruta y en la fermentación, que variaron en abundancia y diversidad de especies, así como, en los productos sensoriales. Los principales géneros microbianos encontrados fueron *Pichia*, *Klebsiella*, *Candida*, *Hanseniaspora*, *Meyerozyma*, *Wickerhamomyces*, *Ochrobactrum*, *Chryseobacterium*, *Escherichia*, *Erwinia*, *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Paenibacillus* y *Bacillus* (Evangelista et al. (2015) y Martínez et al. (2022).

También se sabe que algunas especies de *Proteobacteria*, contribuyen a la producción de diacetilo, compuestos volátiles y enzimas. Estas últimas convierten el dióxido de carbono en ácido acético, lo que influye en el sabor y la acidez de la bebida (de Melo Pereira et al., 2020). en un estudio sobre el impacto de la fermentación en la calidad de la bebida, se identificaron una gama de compuestos volátiles además de los ácidos málico, láctico, cítrico, isobutírico, succínico y oxálico, muchos de los cuales tienen una correlación positiva con la construcción de atributos sensoriales (Bressani et al., 2020) (Figura 2). La calidad sensorial es causada por un cambio en la composición química del grano, influenciado por microorganismos, reacciones enzimáticas, así como, parámetros ambientales (Braga et al., 2023).

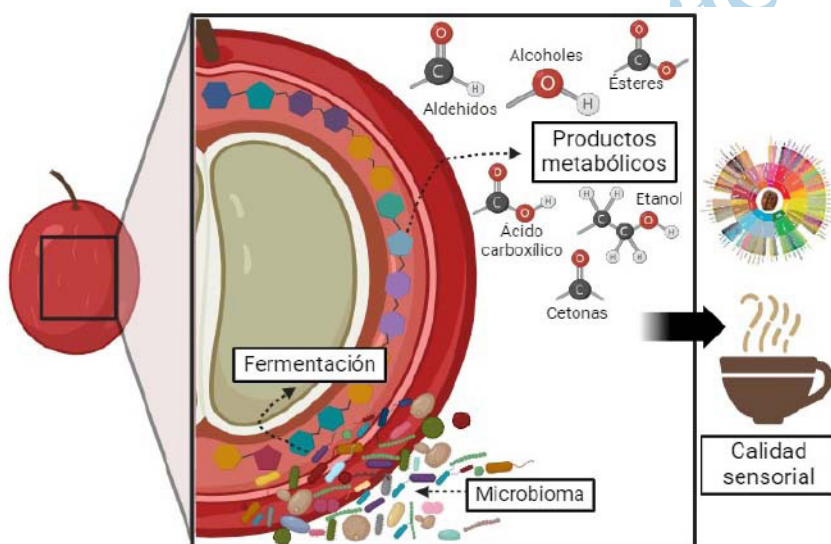


Figura 2. Relación del microbioma del fruto de café (*Coffea* spp.) implicados en el proceso fermentativo y la producción de productos metabólicos en la calidad sensorial de la bebida. Creación propia con el empleo de BioRender.com.

Figure 2. Relationship of the coffee fruit microbiome (*Coffea* spp.) involved in the fermentation process and the production of metabolites in the sensory quality of the beverage. Created using BioRender.com.

Microbioma común entre suelo y fruto de café

El conocimiento de los microorganismos autóctonos que crecen en el suelo de los cafetales es esencial para comprender la complejidad de estas comunidades bióticas. Algunos estudios han evaluado la composición microbiana del suelo en respuesta al manejo del agroecosistema cafetalero con la secuenciación del ADN del suelo (Jurburg et al., 2020). De igual manera, mediante un estudio metagenómico se ha informado que el microbioma del suelo en cafetales bajo producción orgánica y convencional, prevalecían los filos *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, y *Planctomycetes* en ambos ambientes (Cabrera-Rodríguez et al., 2020). Sin embargo, ningún estudio ha informado si existe esta misma relación microbiológica entre el suelo, fruto y el proceso de fermentación.

Existen taxones compartidos entre la rizósfera, la endosfera y la episfera de la planta de café. Un estudio mostró diez géneros bacterianos (*Bacillus*, *Burkholderia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Gluconacetobacter*, *Kocuria*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Stenotrophomonas* y *Streptomyces*), así como, seis géneros de hongos (*Aspergillus*, *Cladosporium*, *Cylindrocarpon*, *Fusarium*, *Penicillium* y *Trichoderma*) (Duong et al., 2020). Estos microorganismos pueden considerarse los más competitivos en la colonización de los cafetos y pueden llegar al interior del fruto.

El análisis por medio de metodologías modernas de biología molecular, como lo es la metagenómica, ha permitido comprender el comportamiento, la abundancia y la riqueza de las comunidades microbianas presentes en el suelo (Duong et al., 2020). Varios estudios han realizado estudios metagenómicos, de secuenciación y análisis del ADN para lograr dar a conocer y entender la microbiota en la producción de café. Por ejemplo, Veloso et al. (2020) sugieren que los factores ambientales en la microbiota bacteriana y fúngica que habita en los frutos y el suelo de los cafetos afectan la calidad de la bebida.

De los estudios existentes Cruz-O'Byrne et al. (2021) realizaron una caracterización de la diversidad microbiana en la fermentación del café y su influencia en la calidad de la bebida. Su análisis de secuenciación reveló que las bacterias y los hongos filamentosos eran los organismos más comunes. Concluyeron que la calidad de la taza fue influenciada de forma positiva por la riqueza fúngica y bacteriana, en especial *Lactobacillales*, *Pichia* y *Pseudomonas*. Se reportan a *Proteobacteria* seguido de *Firmicutes* como los filos bacterianos más abundantes en fruto y suelo (Silva et al., 2020; Veloso et al., 2020).

Investigadores han relacionado el microbioma bacteriano de la rizosfera y del proceso de fermentación de café (Pino et al., 2023). Estos autores encontraron que los filos *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes* y *Acidobacteria* fueron los taxones bacterianos dominantes y comunes tanto en suelo como en frutos. Además, demostraron una fuerte relación entre los microorganismos rizosféricos y las propiedades organolépticas del café, entre ellas, el sabor, la acidez, el equilibrio y el sabor residual.

De igual manera, se ha logrado confirmar que ciertas cepas involucradas en la fermentación del café pueden producir compuestos activos de sabor (de Melo Pereira et al., 2020). Se ha investigado la diversidad de bacterias autóctonas en frutos frescos de café arábica y robusta (Mahatmanto et al., 2023). Estos autores informaron que los frutos de arábica contenían un número menor de especies en comparación con el robusta, pero una mayor abundancia de bacterias. La alta abundancia de bacterias en las cerezas de café arábica es aportada por el género *Leuconostoc*, mientras que en robusta es aportada por *Enterobacteria*.

Conclusiones

La calidad de taza en café no es un tema fácil de representar porque existen una serie de factores complejos entre la planta-microorganismos del suelo y su interacción, sumado con las percepciones del consumidor. Sin embargo, la presencia de microorganismos del suelo, como los hongos micorrízicos, las bacterias fijadoras de nitrógeno y bacterias endófitas de los frutos, contribuyen de forma directa e indirecta en la calidad final de la

bebida de café. El procesamiento de fermentación de los frutos, así como, las condiciones edáficas y climáticas influyen en la composición química y microbiana de los cafés y en la calidad sensorial de la bebida. Se evidenció que las herramientas de biología molecular y ciencias ómicas han marcado un punto de inflexión en la historia de la biología, en especial en la descripción de la composición taxonómica y función de comunidades microbianas específicas, lo que permite tomar mejores decisiones sobre un manejo más sostenible del café, y de este modo mejorar y diversificar los atributos sensoriales del café.

La exploración de microorganismos asociados con la planta del café y su fruto presenta oportunidades para la bioprospección a través de cultivos iniciadores y, en consecuencia, generar nuevos perfiles de taza. Este estudio sintetiza los datos existentes sobre el microbioma relacionado con el café, su función en el ecosistema, los metabolitos producidos por los microorganismos y sus efectos sobre el proceso de fermentación y la calidad de los granos y bebidas de café. Se destaca la importancia de las interacciones planta-microbio en la cadena productiva del café.

A medida que la importancia de la sostenibilidad para los mercados emergentes de cafés especiales continúa creciendo, se necesitan más estudios que se centren en comprender la influencia de la microbiota del suelo y sus efectos en las interacciones de la calidad del café. Además, se debe explorar a mayor profundidad el impacto potencial en las características organolépticas del café según las condiciones de manejo y ambiente.

Referencias

- Aldrich-Wolfe, L., Black, K. L., Hartmann, E. D. L., Shivega, W. G., Schmaltz, L. C., McGlynn, R. D., Johnson, P. G., Asheim Keller, R. J., & Vink, S. N. (2020). Taxonomic shifts in arbuscular mycorrhizal fungal communities with shade and soil nitrogen across conventionally managed and organic coffee agroecosystems. *Mycorrhiza*, 30(4), 513–527. <https://doi.org/10.1007/S00572-020-00967-7>
- Alemayehu, D. (2017). Review on genetic diversity of coffee (*Coffea arabica*. L) in Ethiopia. *International Journal of Forestry and Horticulture*, 3(2), 18–27. <https://doi.org/10.20431/2454-9487.0302003>
- Andrade, S. A. L., Mazzafera, P., Schiavinato, M. A., & Silveira, A. P. D. (2019). Arbuscular mycorrhizal association in coffee. *Journal of Agricultural Science*, 147(2), 105–115. <https://doi.org/10.1017/S0021859608008344>
- Bano, S. A., & Uzair, B. (2021). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) for improved plant health and production. In M. Kaushal, & R. Prasad (Eds.), *Microbial biotechnology in crop protection* (pp. 147–169). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0049-4_6
- Bez, C., Esposito, A., Musonerimana, S., Nguyen, T. H., Navarro-Escalante, L., Tesfaye, K., Turello, L., Navarini, L., Piazza, S., & Venturi, V. (2023). Comparative study of the rhizosphere microbiome of *Coffea arabica* grown in different countries reveals a small set of prevalent and keystone taxa. *Rhizosphere*, 25, Article 100652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100652>
- Braga, A. U., Miranda, M. A., Aoyama, H., & Schmidt, F. L. (2023). Study on coffee quality improvement by self-induced anaerobic fermentation: Microbial diversity and enzymatic activity. *Food Research International*, 165, Article 112528. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112528>
- Cabrera-Rodríguez, A., Trejo-Calzada, R., García-De la Peña, G., Arreola-Ávila, J. G., Nava-Reyna, E., Vaca-Paniagua, F., Díaz-Velásquez, C., & Meza-Herrera, C. A. (2020). A metagenomic approach in the evaluation of the soil microbiome in coffee plantations under organic and conventional production in tropical agroecosystems. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32(4), 263–270. <https://doi.org/10.9755/EJFA.2020.V32.I4.2092>

- Caldwell, A. C., Silva, L. C. F., da Silva, C. C., & Ouverney, C. C. (2015). Prokaryotic diversity in the rhizosphere of organic, intensive, and transitional coffee farms in Brazil. *PLoS One*, *10*(6), Article e0106355. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0106355>
- Cheng, B., Furtado, A., Smyth, H. E., & Henry, R. J. (2016). Influence of genotype and environment on coffee quality. *Trends in Food Science & Technology*, *57*, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.003>
- Cisneros-Rojas, C. A., Sánchez-de Prager, M., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Efecto de bacterias solubilizadoras de fosfatos sobre el desarrollo de plántulas de café. *Agronomía Mesoamericana*, *28*(1), 149–158. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.22021>
- Cogo, F. D., Guimarães, P. T. G., Rojas, E. P., Júnior, O. J. S., Siqueira, J. O., & Carneiro, M. A. C. (2017). Arbuscular mycorrhiza in *Coffea arabica* L.: Review and meta-analysis. *Coffee Science*, *12*(3), 419–443. <https://doi.org/10.25186/CS.V12I3.1227>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of advanced research*, *19*(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Cortes, A. D., & Nahar-Cortes, S. (2022). Biological Nitrogen Fixation in the Rhizosphere of Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Coffee (*Coffea* spp.) and its Role in Sustainable Agriculture. In D. K. Maheshwari, R. Dobhal, & S. Dheeman (Eds.), *Nitrogen Fixing Bacteria: Sustainable Growth of Non-legumes* (pp. 215–231). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4906-7_10
- Cruz-O'Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N., & Aguirre-Forero, S. (2021). Microbial diversity associated with spontaneous coffee bean fermentation process and specialty coffee production in northern Colombia. *International Journal of Food Microbiology*, *354*, Article 109282. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2021.109282>
- Curi, M. A., Jiménez, V. H., & Ibarra, J. P. J. (2019). Cepas bacterianas nativas con actividades promotoras del crecimiento vegetal aisladas de la rizosfera de *Coffea* spp. en Pichanaqui, Perú. *Biotecnología Vegetal*, *19*(4), 285–295. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2074-86472019000400285&script=sci_arttext
- Custódio, V., Gonin, M., Stabl, G., Bakhoun, N., Oliveira, M. M., Gutjahr, C., & Castrillo, G. (2022). Sculpting the soil microbiota. *The Plant Journal*, *109*(3), 508–522. <https://doi.org/10.1111/TPJ.15568>
- Dastogeer, K. M. G., Tumpa, F. H., Sultana, A., Akter, M. A., & Chakraborty, A. (2020). Plant microbiome—an account of the factors that shape community composition and diversity. *Current Plant Biology*, *23*, Article 100161. <https://doi.org/10.1016/J.CPB.2020.100161>
- de Beenhouwer, M., Van Geel, M., Ceulemans, T., Muleta, D., Lievens, B., & Honnay, O. (2015). Changing soil characteristics alter the arbuscular mycorrhizal fungi communities of Arabica coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia across a management intensity gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, *91*(1), 133–139. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2015.08.037>
- de Melo Pereira, G. V., da Silva Vale, A., de Carvalho Neto, D. P., Muynarsk, E. S., Socol, V. T., & Socol, C. R. (2020). Lactic acid bacteria: what coffee industry should know? *Current Opinion in Food Science*, *31*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.004>
- de Sousa, L. P., Guerreiro-Filho, O., & Mondego, J. M. C. (2022). The Rhizosphere microbiomes of five species of coffee trees. *Microbiology Spectrum*, *10*(2), Article e00444-22. <https://doi.org/10.1128/SPECTRUM.00444-22>
- Duong, B., Marraccini, P., Maeght, J. L., Vaast, P., Lebrun, M., & Duponnois, R. (2020). Coffee microbiota and its potential

- use in sustainable crop management. A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, Article 607935. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.607935>
- Duong, B., Nguyen, H. X., Phan, H. V., Colella, S., Trinh, P. Q., Hoang, G. T., Nguyen, T. T., Marraccini, P., Lebrun, M., & Duponnois, R. (2021). Identification and characterization of Vietnamese coffee bacterial endophytes displaying in vitro antifungal and nematicidal activities. *Microbiological Research*, 242, Article 126613. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2020.126613>
- Echeverria-Beirute, F., Murray, S. C., Klein, P., Kerth, C., Miller, R., & Bertrand, B. (2018). Rust and thinning management effect on cup quality and plant performance for two cultivars of *Coffea arabica* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5281–5292. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.7B03180>
- Elhalis, H., Cox, J., Frank, D., & Zhao, J. (2020). The crucial role of yeasts in the wet fermentation of coffee beans and quality. *International Journal of Food Microbiology*, 333, Article 108796. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2020.108796>
- Escudero-Leyva, E., Granados-Montero, M. D. M., Orozco-Ortiz, C., Araya-Valverde, E., Alvarado-Picado, E., Chaves-Fallas, J. M., Aldrich-Wolfe, L., & Chaverri, P. (2023). The endophytobiome of wild Rubiaceae as a source of antagonistic fungi against the American Leaf Spot of coffee (*Mycena citricolor*). *Journal of Applied Microbiology*, 134(5), Article lxad090. <https://doi.org/10.1093/JAMBIO/LXAD090>
- Evangelista, S. R., Miguel, M. G. D. C. P., Silva, C. F., Pinheiro, A. C. M., & Schwan, R. F. (2015). Microbiological diversity associated with the spontaneous wet method of coffee fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 210, 102–112. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2015.06.008>
- Ferraro, A. C., França, A. C., Machado, C. M. M., Aguiar, F. R., Oliveira, L. L., Braga Neto, A. M., & Oliveira, R. G. (2023). Commercial characteristics of coffee seedlings produced with different sources of phosphorus and plant growth-promoting bacteria. *Brazilian Journal of Biology*, 83, Article e270262. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.270262>
- Florac, D. B., Jiyuan, Z. S., Vasileios, P., Julio, T., Charles, L., V. M. A., Michael, C., Wilbert, S., Stefan, W., & Luc, D. V. (2016). Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1), Article e02398-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>
- Frac, M., Hannula, S. E., Belka, M., & Jędryczka, M. (2018). Fungal biodiversity and their role in soil health. *Frontiers in Microbiology*, 9, 707. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00707>
- Fulthorpe, R., Martin, A. R., & Isaac, M. E. (2019). Root Endophytes of Coffee (*Coffea arabica*): Variation Across Climatic Gradients and Relationships with Functional Traits. *Phytobiomes Journal*, 4(1), 27–39. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-04-19-0021-R>
- Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S., & Bonfante, P. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 649–660. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>
- González-Osorio, H., Góngora Botero, E. C., Medina Rivera, R. D., & Osorio Vega, N. W. (2020). Screening for phosphate-solubilizing fungi from Colombian andisols cultivated with coffee (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, 15, Article e151666. <https://doi.org/10.25186/v15i.1666>
- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H. S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research*, 206(1), 131–140. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2017.09.005>

org/10.1016/J.MICRES.2017.08.016

- Hernández-Acosta, E., Banuelos, J., & Trejo-Aguilar, D. (2021). Distribution and effect of mycorrhizal fungi in the coffee agroecosystem: A review. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 445-461. <https://doi.org/10.15517/RBT.V69I2.42256>
- International Coffee Organization. (2022). *International Coffee Organization - Trade Statistics Tables. Total Production by All Exporting Countries*. https://www.ico.org/trade_statistics.asp?section=Statistics
- Janse, J. M. (1897). Les endophytes radicaux de quelques plantes javanaises. *Annales du Jardin botanique de Buitenzorg*, 14, 53-201.
- Jezeer, R. E., Santos, M. J., Boot, R. G. A., Junginger, M., & Verweij, P. A. (2018). Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agricultural Systems*, 162, 179–190. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2018.01.014>
- Jimenez-Salgado, T., Fuentes-Ramirez, L. E., Tapia-Hernandez, A., Mascarua-Esparza, M. A., Martinez-Romero, E., & Caballero-Mellado, J. (1997). *Coffea arabica* L., a new host plant for *Acetobacter diazotrophicus*, and isolation of other nitrogen-fixing Acetobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(9), 3676–3683. <https://doi.org/10.1128/aem.63.9.3676-3683.1997>
- Jurburg, S. D., Shek, K. L., & McGuire, K. (2020). Soil microbial composition varies in response to coffee agroecosystem management. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(9), Article fiaa164. <https://doi.org/10.1093/FEMSEC/FIAA164>
- Kejela, T., Thakkar, V. R., & Thakor, P. (2016). *Bacillus species* (BT42) isolated from *Coffea arabica* L. rhizosphere antagonizes *Colletotrichum gloeosporioides* and *Fusarium oxysporum* and also exhibits multiple plant growth promoting activity. *BMC Microbiology*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0897-y>
- Krishnan, S., Pruvot-Woehl, S., Davis, A. P., Schilling, T., Moat, J., Solano, W., Al Hakimi, A., & Montagnon, C. (2021). Validating South Sudan as a Center of Origin for *Coffea arabica*: Implications for Conservation and Coffee Crop Improvement. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Article 445. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.761611>
- Lamelas, A., Desgarenes, D., López-Lima, D., Villain, L., Alonso-Sánchez, A., Artacho, A., Latorre, A., Moya, A., & Carrión, G. (2020). The bacterial microbiome of *Meloidogyne*-based disease complex in coffee and tomato. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 136. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00136>
- Lemanceau, P., Blouin, M., Muller, D., & Moëne-Loccoz, Y. (2017). Let the core microbiota be functional. *Trends in Plant Science*, 22(7), 583-595. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.04.008>
- Lovera, M., Cuenca, G., Fajardo, L., Cáceres, A., & Guerra-Sierra, B. E. (2022). AMF Diversity in Coffee and Cacao Agroforestry Systems: Importance for Crop Productivity and Forest Conservation. In M. A. Lugo & M. C. Pagano (Eds.), *Mycorrhizal Fungi in South America: Biodiversity, Conservation, and Sustainable Food Production* (pp. 107–127). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12994-0_5
- Machado, J. L., Tomaz, M. A., da Luz, J. M. R., Osório, V. M., Costa, A. V., Colodetti, T. V., Debona, D. G., & Pereira, L. L. (2022). Evaluation of genetic divergence of coffee genotypes using the volatile compounds and sensory attributes profile. *Journal of Food Science*, 87(1), 383–395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1750-3841.15986>
- Mahatmanto, T., Sunarharum, W. B., Putri, F. A., Susanto, C. A., Davian, A. O., & Murdiyatmo, U. (2023). The microbiology of arabica and robusta coffee cherries: a comparative study of indigenous bacteria with presumptive impact on coffee quality. *FEMS Microbiology Letters*, 370, Article fnad024. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnad024>

- Martinez, S. J., Bressani, A. P. P., Simão, J. B. P., Pylro, V. S., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Dominant microbial communities and biochemical profile of pulped natural fermented coffees growing in different altitudes. *Food Research International*, 159, Article 111605. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111605>
- Martins, P. M. M., Batista, N. N., Miguel, M. G. da C. P., Simão, J. B. P., Soares, J. R., & Schwan, R. F. (2020). Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees. *Food Research International*, 129, Article 108872. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.108872>
- Meena, V. S., Meena, S. K., Verma, J. P., Kumar, A., Aeron, A., Mishra, P. K., Bisht, J. K., Pattanayak, A., Naveed, M., & Dotaniya, M. L. (2017). Plant beneficial rhizospheric microorganism (PBRM) strategies to improve nutrients use efficiency: A review. *Ecological Engineering*, 107, 8–32. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.06.058>
- Mertens, J. E. J., Emsens, W.-J., Jocqué, M., Geeraert, L., & De Beenhouwer, M. (2020).** From natural forest to coffee agroforest: implications for communities of large mammals in the Ethiopian highlands. *Oryx*, 54(5), 715–722. <https://doi.org/10.1017/S0030605318000844>
- Morales-Ramos, V., Escamilla-Prado, E., Ruiz-Carbajal, R. A., Pérez-Sato, J. A., Velázquez-Morales, J. A., & Servín-Juárez, R. (2020). On the soil–bean–cup relationships in *Coffea arabica* L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5434–5441. <https://doi.org/10.1002/JSFA.10594>
- Moreno Reséndez, A., Carda Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68–83. <https://doi.org/10.15446/REV.COLOMB.BIOTE.V20N1.73707>
- Mukharib, D., Babou, C., Govindappa, M., Gokavi, N., Mote, K., Manjunath, A., & Raghuramulu, Y. (2018). Establishment of Coffee Seedlings as Influenced by Planting Pit Size and Rock Phosphate along with Plant Growth Promoting Rhizobacteria Inoculations. *International Journal of Plant & Soil Science*, 21(3), 1-5. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2018/38955>
- Nguyen, D. N., Wang, S. L., Nguyen, A. D., Doan, M. D., Tran, D. M., Nguyen, T. H., Ngo, V. A., Doan, C. T., Tran, T. N., Do, V. C., & Nguyen, V. B. (2021). Potential application of rhizobacteria isolated from the central highland of Vietnam as an effective biocontrol agent of robusta coffee nematodes and as a bio-fertilizer. *Agronomy*, 11(9), Article 1887. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091887>
- Nwachukwu, B. C., & Babalola, O. O. (2022). Metagenomics: A tool for exploring key microbiome with the potentials for improving sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, Article 886987. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.886987>
- Peñuela-Martínez, A. E., Velasquez-Emiliani, A. V., & Angel, C. A. (2023). Microbial diversity using a metataxonomic approach, associated with coffee fermentation processes in the department of Quindío, Colombia. *Fermentation*, 9(4), Article 343. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040343>
- Pimenta, C. J., Angélico, C. L., & Chalfoun, S. M. (2018). Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. *Ciência e Agrotecnologia*, 42(4), 337–349. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018424000118>
- Pino, A. F. S., Espinosa, Z. Y. D., & Cabrera, E. V. R. (2023). Characterization of the rhizosphere bacterial microbiome and coffee bean fermentation in the Castillo-Tambo and bourbon varieties in the Popayán-Colombia Plateau. *BMC Plant Biology*, 23(1), Article 217. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04182-2>

- Posada, R. H., Sánchez de Prager, M., Heredia-Abarca, G., & Sieverding, E. (2018). Effects of soil physical and chemical parameters, and farm management practices on arbuscular mycorrhizal fungi communities and diversities in coffee plantations in Colombia and Mexico. *Agroforestry Systems*, 92(2), 555–574. <https://doi.org/10.1007/S10457-016-0030-0>
- Prates, J.P., Moreira, B. C., da Silva, M. D. C. S., Veloso, T. G. R., Stürmer, S. L., Fernandes, R. B. A., de Sá Mendonça, E., & Kasuya, M. C. M. (2019). Agroecological coffee management increases arbuscular mycorrhizal fungi diversity. *PLoS One*, 14(1), Article e0209093. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0209093>
- Prates, J. P., Veloso, T. G. R., de Cássia Soares da Silva, M. da L., J. M. R., Oliveira, S. F., & Kasuya, M. C. M. (2021). Soil microorganisms and quality of the coffee beverage. In L. Louzada Pereira, & T. Rizzo Moreira (Eds.), *Quality determinants in coffee production. food engineering series* (pp. 101–147). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_3
- Rai, P. K., Singh, M., Anand, K., Saurabh, S., Kaur, T., Kour, D., Yadav, A. N., & Kumar, M. (2020). Chapter 4 - Role and potential applications of plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture. In A. A. Rastegari, A. N. Yadav, & N. Yadav (Eds.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 49–60). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00004-X>
- Ramos-Cabrera, E. V., Delgado-Espinosa, Z. Y., Murillo-Muñoz, R. A., Muñoz-Días, V. E., & Hoyos-García, J. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 94-107. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1554>
- Ranjini, A. P., & Naika, R. (2019). Efficacy of biocontrol agents on *Myrothecium roridum*, the stem necrosis and leaf spot pathogen of coffee seedlings. *Journal of Biopesticides*, 12(1), 109-113.
- Sagar, A., Rathore, P., Ramteke, P. W., Ramakrishna, W., Reddy, M. S., & Pecoraro, L. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria, arbuscular mycorrhizal fungi and their synergistic interactions to counteract the negative effects of saline soil on agriculture: key macromolecules and mechanisms. *Microorganisms*, 9(7), Article 1491. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS9071491>
- Sahu, N., Vasu, D., Sahu, A., Lal, N., & Singh, S. K. (2017). Strength of Microbes in Nutrient Cycling: A Key to Soil Health. In V. S. Meena, P. K. Mishra, J. K. Bisht, & A. Pattanayak (Eds.), *Agriculturally important microbes for sustainable agriculture: Volume I: Plant-soil-microbe nexus* (pp. 69–86). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5589-8_4
- Sahu, P. K., Singh, D. P., Prabha, R., Meena, K. K., & Abhilash, P. C. (2019). Connecting microbial capabilities with the soil and plant health: Options for agricultural sustainability. *Ecological Indicators*, 105, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.084>
- Shaw, S., Le Cocq, K., Paszkiewicz, K., Moore, K., Winsbury, R., de Torres Zabala, M., Studholme, D. J., Salmon, D., Thornton, C. R., & Grant, M. R. (2016). Transcriptional reprogramming underpins enhanced plant growth promotion by the biocontrol fungus *Trichoderma hamatum* GD12 during antagonistic interactions with *Sclerotinia sclerotiorum* in soil. *Molecular Plant Pathology*, 17(9), 1425–1441. <https://doi.org/10.1111/MPP.12429>
- Silva, M. de C. S., Veloso, T. G. R., Entringer, T. L., Bullergahn, V. B. B., Pereira, L. L., Anastácio, L. M., & Kasuya, M. C. M. (2020). Diversity of nitrogen-fixing bacteria in coffee crops (*Coffea arabica* L.). *Revista Ifes Ciência*, 6(3), 12–21. <https://doi.org/10.36524/RIC.V6I3.852>

- Silva, M. C., Guerra-Guimarães, L., Diniz, I., Loureiro, A., Azinheira, H., Pereira, A. P., Tavares, S., Batista, D., & Várzea, V. (2022). An overview of the mechanisms involved in coffee-*Hemileia vastatrix* interactions: plant and pathogen perspectives. *Agronomy*, *12*(2), Article 326. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020326>
- Simmer, M. B., Soares da Silva, M. C., Pereira, L. L., Moreira, T. R., Guarçoni, R. C., Veloso, T. G. R., da Silva, I. M. R., Entringer, T. L., Kasuya, M. C. M., da Luz, J. M. R., Moreli, A. P., & da Silva Oliveira, E. C. (2022). Edaphoclimatic conditions and the soil and fruit microbiota influence on the chemical and sensory quality of the coffee beverage. *European Food Research and Technology*, *248*(12), 2941–2953. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04102-y>
- Siqueira, J. O., Saggin-Júnior, O. J., Flores-Aylas, W. W., & Guimarães, P. T. G. (1998). Arbuscular mycorrhizal inoculation and superphosphate application influence plant development and yield of coffee in Brazil. *Mycorrhiza*, *7*, 293–300. <https://doi.org/10.1007/s005720050195>
- Soumare, A., Diedhiou, A. G., Thuita, M., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Gopalakrishnan, S., & Kouisni, L. (2020). Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture. *Plants*, *9*(8), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/plants9081011>
- Spatafora, J. W., Chang, Y., Benny, G. L., Lazarus, K., Smith, M. E., Berbee, M. L., Bonito, G., Corradi, N., Grigoriev, I., Gryganskyi, A., James, T. Y., O'Donnell, K., Roberson, R. W., Taylor, T. N., Uehling, J., Vilgalys, R., White, M. M., & Stajich, J. E. (2016). A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, *108*(5), 1028–1046. <https://doi.org/10.3852/16-042>
- Srigandha, D. D., Venkatesha, J., Shetty, G. R., Biradar, I. B., Manjunath, G., & Kulkarni, S. (2017). Study of suitability of containers and rooting media for growth and rooting of coffee seedlings (*Coffea arabica* cv. chandragiri). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(10), 527–530. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.064>
- Sternhagen, E. C., Black, K. L., Hartmann, E. D. L., Shivega, W. G., Johnson, P. G., McGlynn, R. D., Schmaltz, L. C., Asheim Keller, R. J., Vink, S. N., & Aldrich-Wolfe, L. (2020). Contrasting patterns of functional diversity in coffee root fungal communities associated with organic and conventionally managed fields. *Applied and Environmental Microbiology*, *86*(11), Article e00052-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00052-20>
- Suzzi, G., Poltronieri, P., Vittori, S., Schwan, R. F., Sj, M., App, B., Dr, D., Jbp, S., Rf, S., Martinez, S. J., Pereira Bressani, A. P., Dias, R., Batista, J., & Simão, P. (2019). Effect of bacterial and yeast Starters on the formation of volatile and organic acid compounds in coffee beans and selection of flavors markers precursors during wet fermentation. *Frontiers in Microbiology*, *10*, Article 1287. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01287>
- Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, *12*(12), Article 4859. <https://doi.org/10.3390/SU12124859>
- Tolessa, K., D'heer, J., Duchateau, L., & Boeckx, P. (2017). Influence of growing altitude, shade and harvest period on quality and biochemical composition of Ethiopian specialty coffee. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *97*(9), 2849–2857. <https://doi.org/10.1002/JSFA.8114>
- Toniutti, L., Breitler, J. C., Etienne, H., Campa, C., Doubeau, S., Urban, L., Lambot, C., Pinilla, J. C. H., & Bertrand, B. (2017). Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*C. arabica* L) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Frontiers in Plant Science*, *8*, Article 2025. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.02025>
- Torres, G. V., Pisco, A. S., & Lopez, L. A. A. (2021).** Efecto bioprotector de micorrizas arbusculares en la reducción de roya (*Hemileia vastatrix*) en la Región San Martín. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, *1*(1), 34–44. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.02025>

org/10.51252/RAA.V1I1.122

- Torrez, V., Benavides-Frias, C., Jacobi, J., & Speranza, C. I. (2023). Ecological quality as a coffee quality enhancer. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1), Article 19. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00874-z>
- Urgiles-Gómez, N., Avila-Salem, M. E., Loján, P., Encalada, M., Hurtado, L., Araujo, S., Collahuazo, Y., Guachanamá, J., Poma, N., Granda, K., Robles, A., Senés, C., & Cornejo, P. (2021). Plant growth-promoting microorganisms in coffee production: from isolation to field application. *Agronomy*, 11(8), Article 1531. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081531>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability-a review. *Molecules*, 21(5), Article 573. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES21050573>
- Veloso, T. G. R., da Silva, M. C. S., Cardoso, W. S., Guarçoni, R. C., Kasuya, M. C. M., & Pereira, L. L. (2020). Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. *Scientific Reports*, 10(1), Article 14692. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71309-y>
- Vives-Peris, V., de Ollas, C., Gómez-Cadenas, A., & Pérez-Clemente, R. M. (2019). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports*, 39(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/S00299-019-02447-5>
- Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Contreras, G. F., Cai, Z., Moccand, C., Weckx, S., & De Vuyst, L. (2019). Influence of various processing parameters on the microbial community dynamics, metabolomic profiles, and cup quality during wet coffee processing. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 2621. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.02621>

Manuscrito aceptado