

Dinámica biogeoquímica por microorganismos edáficos en sistemas agroforestales de cacao: revisión de literatura científica.

Biogeochemical dynamics by edaphic microorganisms in cocoa agroforestry systems: a scientific literature review.

doi:<http://doi.org/10.23850/23899573.2496>

Recibido: 8.11.2019 Aceptado: 16.12.2020

Sergio Andres Orduz-Tovar
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
saorduz6@misena.edu.co
Colombia

Leidy Machado-Cuellar
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
leidymachadocuellar@gmail.com
Colombia

Laura Constanza Rojas-Basto
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
larojasb@sena.edu.co
Colombia

Elian David Amaya-Ucue
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
eliandabidl@gmail.com
Colombia

Cómo Citar:

Orduz-Tovar, S. A., Machado-Cuellar, L., Rojas-Basto, L. C., & Amaya-Ucue, E. D. (2020) Dinámica biogeoquímica por microorganismos edáficos en sistemas agroforestales de cacao: revisión de literatura científica. *Revista SENNOVA: Revista del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 5 (1), 53-72. doi: <http://doi.org/10.23850/23899573.2496>

RESUMEN

Los sistemas agroforestales son estrategias donde se realizan cultivos mixtos de especies vegetales para favorecer una producción agrícola, para optimizar la producción de cacao. La acción de microorganismos edáficos en estos sistemas no se tiene del todo descrita, por tanto, en el presente documento se consolida información acerca de la acción de los microorganismos en ciclos biogeoquímicos sobre cultivos agroforestales para favorecer la producción de cacao. Para esto, se realizó una revisión bibliográfica de los temas relacionados usando bases de datos académicas e identificando que desde 2001 se ha abordado la producción de cacao con sistemas agroforestales, así como también se ha determinado que la diversidad de bacterias edáficas es importante en tanto que participa en la transformación y biodisponibilidad de elementos como nitrógeno, fósforo y carbono; además, en el biocontrol de metales pesados que pueden afectar el grano. En la revisión bibliográfica se identificaron más de diez géneros de microorganismos con alguna acción potencial sobre la biogeoquímica de los suelos. La implementación de consorcios microbianos se convierte en una de las estrategias para fortalecer la producción de cacao sin el uso de agroquímicos.

Palabras clave: *nutrición vegetal, Theobroma cacao, microorganismos edáficos*

ABSTRACT

The agroforestry arrangements represent strategies for mixed species cultivation and favoring a particular agricultural crop, this activity is to optimize cocoa production. The action of edaphic microorganisms in these systems has not been fully described, therefore, this document consolidates information about the role of microorganisms in biogeochemical cycles on agroforestry systems to promote cocoa crop. For this, a bibliographic review of the related topics was carried out using academic databases and identifying that since 2001 cocoa production has been approached with agroforestry systems, as well as determining that the diversity of edaphic bacteria is important insofar as it participates in the transformation and bioavailability of elements like nitrogen, phosphorus and carbon. Besides, in the biocontrol of heavy metals that can affect the grain. In the bibliographic review, more than ten genera of microorganisms with some potential action on the biogeochemistry of soils were identified. The implementation of microbial consortia comes to be one of the strategies to strengthen cocoa production without the use of agrochemicals.

Keywords: *plant nutrition, Theobroma cacao, edaphic microorganisms*

INTRODUCCIÓN

La economía de muchos países se basa en la actividad agrícola que allí se desarrolla, Colombia es precisamente uno de estos y dicha actividad representó en 2017 el 6.3% del Producto Interno Bruto (BANRED, 2017). Dentro de los cultivos con mayor potencial en el país está el cacao con un incremento anual cercano al 10% en la última década, con un registro de producción cercana a 101 toneladas durante el 2018, 10% mayor que en 2017 (Agronet, 2018); sin embargo, a pasar de ser un cultivo prometedor con características únicas como atributos sensoriales (sabor, aroma, componentes nutricionales) y rendimiento por hectárea sembraba, no ha tenido un incremento sustancial en su productividad, pasando de 0.51 ton/ha a 0.53 ton/ha entre 2017 y 2018 respectivamente (Agronet, 2018).

Colombia se caracteriza por poseer cultivos transitorios de ciclo corto y otros cuya producción del fruto puede darse luego de largos periodos del cultivo vegetal como el caso del cacao, por lo cual ante periodos prolongados de cultivo, sus propiedades finales deben ser especiales desde puntos de vista fisiológico, bromatológico y sensorial. El caso del cacao presenta atributos sensoriales de sabores básicos como (astringencia, amargor, acidez y dulce) y sabores específicos como (cacao frutal, floral y nuez), además de componentes nutricionales como antioxidantes, fibra, proteína, y otros compuestos como teobromina, cafeína y compuestos volátiles, los cuales pueden

generar aromas únicos al grano de cacao, las concentraciones de estos elementos dependen principalmente de la variedad, manejo de cultivo y poscosecha (Oracz *et al.*, 2015; Barrientos *et al.*, 2019)

Varias de las estrategias implementadas para fortalecer la producción agrícola son los sistemas agroforestales, donde la principal especie productiva es quien domina el cultivo y se acompaña con especies transitorias. Estos sistemas agroforestales se caracterizan por poseer al menos dos especies que interactúan biológicamente, de las cuales una especie vegetal es leñosa perenne y la otra especie manejada se caracteriza para fines agrícolas, incluyendo pastos (Detlefsen y Somarriba, 2012).

Uno de los principales factores que influyen en la dinámica bioquímica de suelos y que por tanto repercute en la producción de los cultivos son los microorganismos que habitan e interactúan en dicha matriz (Jones *et al.*, 2014). Si bien la interacción ambiental de las bacterias y hongos es diversa especialmente por su ubicuidad y participación en componentes ecosistémicos, la caracterización específica relacionada a cultivos es poco estudiada (DeLong & Pace, 2001).

Se han establecido variables de estudio para análisis de cambios estructurales de los servicios ecosistémicos con base en indicadores funcionales (Wood *et al.*, 2015) e incluso se ha evidenciado que solo el 1% microorganismos puede tener funciones activas en suelos (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013). Sin embargo, la relación y participación de microorganismos edáficos

en suelos de cultivos como cacao no ha sido consolidada, pero si se ha registrado la participación de estos microorganismos en cultivos especialmente de índole fitosanitaria como estrategias de biocontrol (Sanchez, Ousset, & Sosa, 2019), Sumado a lo anterior, los microorganismos tienen un papel fundamental en el ciclo de nutrientes al causar la mineralización, otras transformaciones de la materia orgánica y ciclaje de otros materiales (Oergensen & Emmerling, 2006).

En el caso de los sistemas agroforestales no son la excepción, si bien se conoce la dinámica entre plantas usadas en los sistemas que pueden favorecer el control de virus fitopatógenos, estabilidad de suelos y homogenización biótica para estabilidad de cultivo y almacenamiento de carbono (Marconi & Armengot, 2020; Nijmeijer *et al.*, 2019; Somarriba *et al.*, 2013); no se tiene consolidada la actividad y acción que los microorganismos puedan ejercer sobre la calidad final de la producción de estos sistemas diversificados; Alfaro-Flores y col, (2015) mencionan que dado a los pocos estudios sobre el tema, es importante investigar acerca de la interacción suelo-planta, con el fin de validar el efecto de la agroforestería en el desarrollo de la biomasa microbiana (Marconi & Armengot, 2020; Nijmeijer *et al.*, 2019; Somarriba *et al.*, 2013).

Esta revisión se enfoca en identificar los microorganismos edáficos potenciales y su efecto directo o indirecto que puede fortalecer la producción de cacao cultivado con estrategias agroforestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

• Revisión bibliométrica

La información recolectada para esta revisión se basó en búsqueda bibliográfica académica especializadas, tipo artículos científicos, usando las bases de datos Science Direct (<https://www.sciencedirect.com>), Web Of Science (<http://www.webofknowledge.com/>) y SCOPUS (<https://www.scopus.com>) con periodo temporal desde 2008 a 2020; sin embargo, según citaciones bibliográficas de los autores consultados se consideraron documentos de referencia con fechas anteriores a estas fechas de acuerdo a la importancia del artículo.

Como estructura de búsqueda se utilizaron los términos AGROFORESTRY, BACTERIA, COCOA TREE, adicionando operadores booleanos AND y OR para completar ecuaciones bibliométricas relacionadas con el conjunto de temas principales que se relacionan y se reportan los elementos de exclusión (Tabla 1).

Tabla 1.*Bases de datos y ecuaciones bibliométricas relacionadas con la búsqueda de información*

Ecuación de búsqueda	Base de datos	Resultados de búsqueda	Espacio temporal
(TITLE-ABS-KEY (agricultural AND systems) AND TITLE-ABS-KEY (cocoa) AND TITLE-ABS-KEY (colombia)) AND DOCTYPE (ar) AND ACCESTYPE (OA) AND PUBYEAR > 2013	SCOPUS	3	2015-2019
(TITLE-ABS-KEY (agroforestry) AND TITLE-ABS-KEY (microbiology))	SCOPUS	43	2005-2019
(TITLE-ABS-KEY (agroforestry) AND TITLE-ABS-KEY (microbiology))	SCOPUS	43	2005-2019
TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND "soil microbiology")	SCOPUS	17	2005-2018
(TITLE-ABS-KEY (biodiversity) AND TITLE-ABS-KEY (agroforestry)) AND DOCTYPE (ar OR re) AND PUBYEAR > 2007 AND PUBYEAR < 2020	SCOPUS	843	2008-2020
(TITLE-ABS-KEY (cacao) AND TITLE-ABS-KEY (agroforestry)) AND DOCTYPE (ar) AND ACCESTYPE (OA) AND PUBYEAR > 2011	SCOPUS	63	2012-2019
(TITLE-ABS-KEY (cacao) AND TITLE-ABS-KEY (agroforestry)) AND DOCTYPE (ar) AND ACCESTYPE (OA) AND PUBYEAR > 2011	SCOPUS	63	
(TITLE-ABS-KEY (interaction) AND TITLE-ABS-KEY (microorganisms AND soil) AND TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND systems))	SCOPUS	6	2010-2018
(TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND bacteria))	SCOPUS	139	
(TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND bacteria) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI")))	SCOPUS	108	
agroforestry AND ("cocoa tree")	Sciencedirect	54	2007-2010
bacteria AND (Phosphorus AND soil) AND cocoa	Sciencedirect	546	
TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND bacteria)	SCOPUS	139	
TITLE-ABS-KEY (agroforestry AND bacteria) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI"))	SCOPUS	108	
agroforestry AND ("cocoa tree")	Sciencedirect	54	2007-2010

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificados los listados, se procedió a realizar filtros orientados a documentación sobre las posibles interacciones dadas entre bacterias edáficas y producción de cacao bajo sistemas agroforestales; así como eliminar duplicidad de elementos que por análisis de información se presentara. Por último, se estableció la red de temática relacionada con agroforestería, microorganismos edáficos y producción de cacao. Posteriormente se estableció relaciones entre palabras claves usando el método de normalización por asociaciones, para lo cual se utilizó el software VOSWierver Vr 1.6.13 s (Van Eck y Waltman, 2019). Por otra parte, la evolución cronológica de publicación con los respectivos autores se estableció usando el software gratuito CitiNet Explorer Vr. 1.0 incluyendo un análisis de clúster para establecer principales estrategias de colaboración internacional modificando la resolución de búsqueda (Van Eck y Waltman, 2019).

Identificación de rasgos funcionales de microorganismos edáficos en producción de cacao con sistemas agroforestales.

Para la identificación de las características funcionales de este grupo biológico edáficos, se realizó el análisis de la información identificando microorganismos que presenten o desarrollen alguna participación en los servicios ecosistémicos de la producción de cacao con sistemas agroforestales, documentando los posibles características funcionales de organismos microbianos asociados a la productividad

de cacao, especialmente en zonas de vida de bosque seco tropical, y relacionándolos con las palabras claves de mayor relevancia en los análisis bibliométricos. Los microorganismos vinculados con enfermedades de la planta y aquellos considerados biocontroladores fueron excluidos del estudio, para así realizar los esfuerzos de búsqueda en las bacterias y hongos que generen beneficios físicos, químicos o biogeoquímicos a la planta de interés primario en el sistema agroforestal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

• Análisis bibliométricos

La búsqueda generada usando como ecuación primaria (agroforestry AND theobroma) mostró que en Science Direct, Scopus y Web of Science arrojaron respectivamente 264, 416 y 229 hallazgos, la producción bibliográfica detalló los resultados en áreas como agroforestería, macroorganismos edáficos y producción de cacao con inicio de búsqueda desde 2001. El Centro de la Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD) de Francia con producción académica activa específica entre 2001 y 2019 fue una de las instituciones con mayor producción bibliográfica siendo 2018 el periodo de mayor frecuencia en generación de conocimiento en el área relacionada (Figura 1). Así mismo, la Universidad de Göttingen en Alemania también registra el mayor volumen de publicaciones según la plataforma SCOPUS aunque su mayor actividad en la temática se registró en el año 2012.

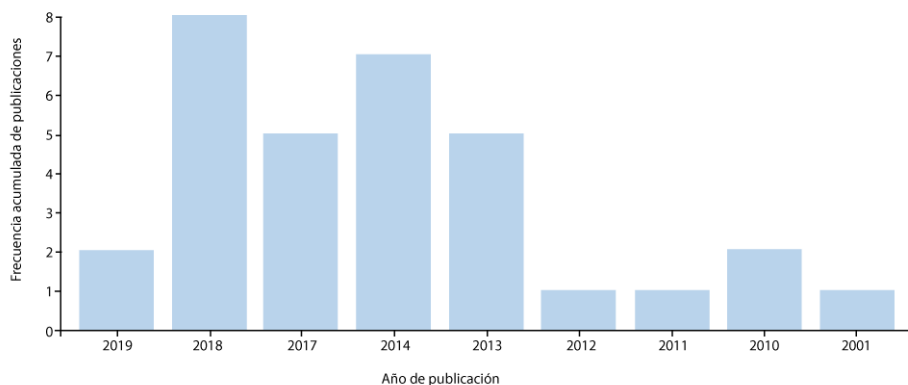


Figura 1. Frecuencia y cantidad de publicaciones sobre agroforestería y cacao realizadas por el Centro de la Investigación Agronómica para el desarrollo (CIRAD). Datos obtenidos de Web Of Science 08/11/2019

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que la participación de microorganismos en la dinámica ecosistémica de suelos es crucial (Wartenberg *et al.*, 2017), por tanto, Colombia demanda mayor cantidad de estudios para las temáticas descritas con el fin de establecer mejores estrategias de cultivo auto sostenibles y ecoeficientes.

Función de los microorganismos en el suelo

Una de las principales actividades de los microorganismos en el suelo es su participación en ciclos biogeoquímicos (Figura 2), destacando la movilidad y transformación de nutrientes esenciales para las plantas. Se estima que cerca del 90% del CO₂ que es producido en la biosfera está asociado con la actividad metabólica de los microorganismos, los cuales participan en la descomposición de materia orgánica y otros nutrientes. Así mismo, la respiración de los microorganismos proporciona cerca

del 80% del CO₂ requerido por las plantas terrestres para realizar la fotosíntesis y de esta cantidad los hongos proporcionan cerca del 13% (Peña-Vanegas y Vanegas, 2010).

Por otra parte, los hongos están relacionados con suelos de bajas tasas en descomposición y disponibilidad de nutrientes, mientras que las bacterias están asociadas a suelos con altas tasas de descomposición y disponibilidad de nutrientes. Por lo tanto, un aumento en esta proporción debería reflejar una disponibilidad reducida de nutrientes y tasas de crecimiento más lentas (Orwin *et al.*, 2018) la necesidad de diversidad microbiana depende del sistema productivo que entre otras cosas se asocia a la distribución de raíz, que en este caso es cacao con los respectivos sistemas agroforestales.

Por otra parte, los hongos están relacionados con suelos de bajas tasas en descomposición y disponibilidad de nutrientes, mientras que las bacterias

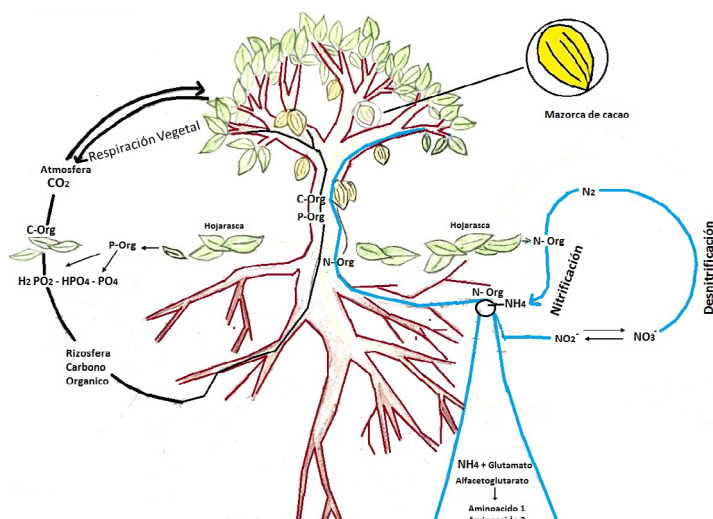


Figura 2. Diagrama de interacción de ciclos biogeoquímicos de nitrógeno y carbono y la participación de microorganismos

Fuente: Elaboración propia

están asociadas a suelos con altas tasas de descomposición y disponibilidad de nutrientes. Por lo tanto, un aumento en esta proporción debería reflejar una disponibilidad reducida de nutrientes y tasas de crecimiento más lentas (Orwin *et al.*, 2018) la necesidad de diversidad microbiana depende del sistema productivo que entre otras cosas se asocia a la distribución de raíz, que en este caso es cacao con los respectivos sistemas agroforestales.

Sistema radicular del árbol de cacao

El sistema radicular del árbol de cacao tiene una raíz principal de 0.8–1.5 m aproximadamente, aunque la extensión real dependerá de las características físicas edáficas, en este sentido en suelos francos puede ser más profunda y en suelos arcillosos pesados el desarrollo radicular principal es

restringido o nulo. Adicionalmente el árbol cuenta con un sistema radicular lateral en la capa superior del suelo, esta es usada para retención de la humedad y absorción de la mayoría de los nutrientes, por lo cual la aplicación de los fertilizantes cerca de las raíces del árbol favorece la absorción de estos, en el caso del fósforo, el incrementar después del primer año de aplicación y por ello la actividad microbiológica para este sistema productivo debe ser en los primeros horizontes del suelo (Nygren *et al.*, 2013)

pH

El rango óptimo de pH para el cultivo de cacao es de 6.0-7.5; esto puede variar, según las condiciones de manejo que se realice al cultivo, lo cual dependerá del tipo de fertilización que se proporcione y de las condiciones óptimas para que la planta pueda

tener un desarrollo óptimo y una absorción de nutrientes y se presente la debida acción microbiana. Según Shamshuddin y cols (2004), el cacao es muy sensible a la acidez de los suelos, sin embargo, se ha demostrado que, en suelos ácidos, es posible obtener buen rendimiento del grano de cacao cuando la acidificación está asociada a producción de compuesto ácidos orgánicos. Por tanto realizar un manejo adecuado que incluye proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo de las etapas fenológicas del cultivo, permitiría que el árbol de cacao sea tolerante a condiciones ácidas presentadas en distintos suelos (Van vliet y Giller, 2017).

Interacción de microorganismos en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales de cacao están conformados por especies de árboles los cuales además de brindar sombra al cultivo y proporcionan otros servicios, como la producción de hojarasca, reducción de la erosión del suelo, uso de nutrientes del suelo profundo y la mejora de los procesos biológicos. Por otra parte, se han establecido sistemas de cacao con especies vegetales como *Gliricidia sepium*, *Erythrina fusca*, *Cordia alliodora*, *Guazuma ulmifolia*, *Mangifera indica*, *Musa paradisiaca*, *Persea americana*, *Citrus limon*, *Annona muricata*, *Carica papaya*, *Citrus nobilis*, *Citrus sinensis*, *Psidium guajava* y *Eucalyptus globulus*; en los cuales se registraron mejoras de las condiciones de suelos para la producción bi-dirigida (ej. Cacao – cítricos) (Minorta y Ordoñez, 2015; Oliveira *et al.*, 2018).

Es importante tener en cuenta que la estructura de la dinámica poblacional de bacterias puede ser afectada negativamente por la estrategia de siembra de especies específicas como el *Eucalyptus globulus* por tanto debe ser cuidadosa la selección de la especie agroforestal para no afectar la biodiversidad microbiológica que se desea promover en el cultivo (Chen *et al.*, 2013).

Chen y colaboradores (2006) asocian la solubilización de elementos como el fósforo tricalcico a las actividades realizadas por las bacterias edáficas en la rizósfera. Precisamente se indica que el establecimiento de estos sistemas agroforestales evita los efectos adversos del monocultivo sobre la biodiversidad bacteriana. Esto sugiere que las comunidades microbianas pueden ser restauradas mediante la implementación de la agroforestería, particularmente porque tienen el potencial de mejorar el biociclaje de fósforo (Wang *et al.*, 2017).

Los grupos bacterianos que han sido reportados como más dominantes en suelos con alto contenido orgánico son Proteobacterias, Actinobacterias y los encontrados en la capa superficial mineral son Acidobacterias y Chloroflexi. De igual manera, se ha reportado en suelos orgánicos Ascomycota y Basidiomycota en las primeras capas edáficas del suelo mineral (Chen *et al.*, 2019); teniendo en cuenta que el sistema productivo de cacao se realiza la acumulación de hojarasca, favorece el incremento de materia orgánica en suelo y por tanto esos grupos de microorganismos deben ser considerados para estudios de biodiversidad edáfica en cultivos cacao (Zavala, Merino y Peláez, 2018). Sumado

a lo anterior, y considerando que las especies arbóreas tienen diversos rasgos que devuelven al suelo materia orgánica; se puede atribuir que esta interacción de especies vegetales influye significativamente en la riqueza y composición microbiana edáfica. Por lo cual se favorece la diversidad de bacterias y hongos para contribuir a la productividad de las plantas, dado que la ausencia de especies arbóreas en el cultivo afecta la diversidad bacteriana que dependen de los productos de la fotosíntesis de las plantas (Chen *et al.*, 2019).

Por otra parte, Liu y cols (2019) encontraron que los sistemas agroforestales una mayor abundancia de Acidobacterias, Proteobacterias y Actinobacterias. Además, en los sistemas agroforestales las características del suelo como pH, fósforo disponible y nitrógeno orgánico disueltos fueron los mayores generadores de la comunidad bacteriana *Kitasatospora*, *Streptomyces*, *Nitrospira*, *Bacillus* y *Pseudomonas*.

Los microorganismos por tanto presentan una importante acción en la actividad bioquímica para el ciclaje de minerales en suelos, lo cual puede favorecer la asimilación del mineral e incrementar la productividad de los cultivos de interés, en este caso cacao.

Nitrógeno (N)

Como macronutriente el N es indispensable en cualquier sistema productivo se requiere para la síntesis de aminoácidos y participa en la producción de biomasa. La asimilación del N por la planta se da

mediante su absorción en forma de amonio (NH_3^+) principalmente, usando glutamato como aminoácido principal de flujo para ser integrado posteriormente y asimilado como proteínas o mediante translocación entre aminoácidos por alfa cetoglutarato. Precisamente Azimi (2012) evidenció que suplementar con % 45 N (urea), favorece la producción de biomasa e influye en el diámetro de hoja final. Así mismo, los sistemas agroforestales favorecen la producción de sombra, incrementando la concentración de N foliar y posiblemente la producción (Triadiati, et al, 2007) lo que constata la importancia de disponibilidad de amonio en el sistema productivo.

La dinámica del N en suelo se basa en la oxidación o reducción por la acción de microorganismos, los cuales poseen genes específicos (*napA*, *narG*, *nirK*, *nirS*, *nosZ*) que permiten la producción de enzimas para la transformación del nitrógeno, la cual puede ser asimilatoria (desde la atmósfera), nitrificación (oxidación) y desnitrificación (reducción) (Levy-Booth, Prescott, & Grayston, 2014).

Los procesos bioquímicos relacionados con el N pueden ser regulados por la concentración de N y la producción de proteínas específicas de membrana para tales fines (Leigh & Dodsworth, 2007), precisamente se ha registrado que en suelos con N-NH_4 mayor a 500 ppm, afecta de manera negativa comunidades de microorganismos edáficos (Li *et al.*, 2013) a causa de inhibición por sustrato. Esto cobra importancia porque la regulación en el flujo de N está supeditada principalmente a la acción de bacterias (Leigh & Dodsworth, 2007), aunque la dinámica de hongos puede

favorecer la captación de N e incluso su acumulación en suelos (Fontaine *et al.*, 2011).

En cultivos de cacao tradicionalmente la forma de adición de N al cultivo se basa en la fertilización, sin embargo, microorganismos endófitos pueden ser una estrategia con impacto orgánico y que además facilitan la asimilación de N continua por la planta. Esto se presenta porque estos organismos colonizan el tejido de la planta, favoreciendo la incorporación de N y produciendo sustancias promotoras de crecimiento para elongación (Santoyo, *et al.*, 2016). Aunque la fertilización es tradicional para árbol de cacao, en sistemas agroforestales se recomienda que estas actividades no sean realizadas de manera periódica, dado que puede afectar la diversidad de microorganismos influyentes en el proceso de oxidación de NO₂- independiente de la cantidad de agregados que en el suelo de cultivo se desarrollen (Han *et al.*, 2018).

En este sentido, se manifiesta que la implementación de sistemas agroforestales es una adecuada estrategia para favorecer la diversidad bacteriana, la transformación y disponibilidad de nitrógeno en suelos; incrementando la producción vegetal del cacao. En el suelo, la mezcla de especies arbóreas promueve la abundancia de grupos taxonómicos como Acidobacteria, Proteobacteria y Actinobacteria y géneros como Kitasatospora, Streptomyces, Nitrospira, Bacillus y Pseudomonas que está relacionada con el ciclaje del Nitrógeno (Han *et al.*, 2018; Koch, van Kessel, & Lückner, 2019; Liu *et al.*, 2019), aunque no se puede dejar de lado el potencial de las archeas, las cuales también participan activamente en cicla-

je de Nitrógeno, especialmente en condiciones favorables como las proporcionadas por los sistemas agroforestales (Offre, Spang, & Schleper, 2013).

Fósforo (P)

El fósforo participa de manera activa en el cultivo de cacao, es usado para la producción de biomasa y generación de energía para metabolismo primario en la planta, estimula la floración en el cacao (Van vliet y Giller, 2017). La adición de este elemento al cultivo suele realizarse también mediante fertilización química, incorporándolo al suelo en forma de fosfato (PO₄-) aunque la disponibilidad final depende del pH; a valores bajos (<5) el fósforo suele ser inmovilizado con otros minerales como Mg o Mn, mientras que a pH altos (>8) se inmoviliza con hierro o aluminio.

Esta disponibilidad está directamente relacionada con la actividad de microorganismos en los suelos, cuya disponibilidad y actividad es afectada por actividades agrícolas y por ello se recomiendan estrategias de manejo productivo (Mander *et al.*, 2012). El uso de este micronutriente inorgánico (usado en fertilización) por parte de microorganismos está destinado a la formación de membranas celulares e incorporación metabólica para la generación de energía, por medio de enzimas específicas como : 2-oxoglutarato dihidrogenasa o Dehidrogenasa homologas; aunque uno de los principales inconvenientes de la fertilización inorgánica está relacionado con la inhibición que el fósforo añadido genera en la descomposición de

fuentes de Nitrógeno o Carbono en el suelo (White & Metcalf, 2007).

Por otra parte, la acción de bacterias u hongos para favorecer la asimilación de P por la planta se da por relaciones simbióticas, es el caso de plantas arbustivas que generan una relación estrecha entre la planta y los microorganismos en la raíz, sin embargo, la eficiencia del proceso depende de las condiciones del entorno (White & Metcalf, 2007); esto es importante puesto estas asociaciones pueden ser contraproducente cuando se evidencia crecimiento de maleza en cultivos de cacao, a razón que podría ser inmovilizado el P que el árbol productivo demanda, de allí la relevancia de control de malezas; sin embargo, la mayoría de las actividades microbianas con P se da de manera libre en el suelo.

La actividad de microorganismos libres relacionado con la transformación de fosforo se lleva a cabo principalmente con dos modalidades, producción de ácidos y presencia de sideróforos. En la primera se fundamenta la solubilización de fosforo inorgánico cercano a la célula, con producción de metabolitos primarios o secundarios generan una acidificación parcial del entorno con la consecuente liberación del fosforo. El segundo caso se da por medio de organelos creados por los microorganismos que sirve para la solubilización del fosforo orgánico e inorgánica que facilita la liberación del elemento.

Los sistemas agroforestales son indispensables para cultivos de cacao, especialmente porque la sombra puede generar condiciones ambientales adecuadas para la formación de agregados de suelos

y por ende actividades metabólicas de microorganismos (Wartenberg *et al.*, 2017).

Los géneros *Geobacter*, *Massilia* son representativos puesto se caracteriza por tener alta producción enzimática para la solubilización de suelos, así como *Phylia* como *Verrucomicrobia*, *Bacteroidetes*, *Acidobacteria*, *Chloroflexi*, y *Cyanobacteria* (Samaddar *et al.*, 2019). En otro estudio, Alori, Glick, y Babalola (2017) consolidaron documentación donde demuestran que microorganismos como *Burkholderia gladioli*, *Bacillus* sp. and *Pseudomonas* sp, *Burkholderia cepacia*, *Azotobacter chroococcum* o *Bacillus subtilis*, estos microorganismos se caracterizan por participar en la solubilización de fosforo mientras que favorecen el crecimiento vegetal, bien sea en tallo y hoja.

Es necesario considerar que microorganismos patógenos pueden ser muy eficientes en la solubilización de fosforo, es el caso de *E. coli*, se caracteriza por su rápido crecimiento y capacidad de interactuar con materia orgánica para solubilización de fosforo (White & Metcalf, 2007); sin embargo, al ser patógenos no deben ser usados como estrategias dentro del desarrollo de consorcios microbianos.

Potasio (K)

El potasio es importante para la translocación de carbohidratos y se cree que aumenta tolerancia al estrés hídrico debido a su influencia en la regulación del agua en las células y en los tejidos (transpiración, concentración de sales), este elemento también interviene en el

proceso de división celular y regulación de disponibilidad de azúcares por inhibición enzimática, así como en los procesos que determinan la absorción de calcio, nitrógeno y sodio, juega un papel importante en el transporte de azúcares desde la hoja hasta el fruto (Fernandez *et al.*, 2016). También está encargado del engrosamiento de frutos y promueve mecanismos de resistencia a plagas y patógenos (Alarcón *et al.*, 2012).

Carbono (C)

Las prácticas de manejo y la diversidad del sistema agroforestal aumentan el almacenamiento de Carbono, debido a la hojarasca que almacenan en ellos y a la función que cumplen los microorganismos en el suelo, mejorando la productividad del cultivo, asimismo estos suelos almacenan más carbono (C) bajo tierra que las plantas y la atmósfera, proporcionando un servicio del ecosistema (Shao *et al.*, 2019).

Además, el pH es una variable importante en la presencia o ausencia de las comunidades bacterianas y fúngicas de los suelos, estas comunidades fueron influenciadas por la relación carbono/nitrógeno (C/N), y nutrientes del suelo, lo cual afecta directamente la diversidad de especies microbianas (Chen *et al.*, 2019).

Por otra parte, en estudios realizados por Ren y colaboradores (2018) encontraron bacterias de los grupos Proteobacterias, Actinobacterias, Acidobacterias, Chloroflexi, Planctomycetes, Gemmatimonadetes, Bacteroidetes, Cyanobacterias y Nitrospirae. De las cuales Proteobacterias, Bacteroidetes, Actinobacterias y Chloroflexi; ayudan a

mantener el equilibrio del ciclo del carbono. Además, las Proteobacterias favorecen la disponibilidad de carbono y Bacteroidetes conducen a aumentar el carbono orgánico del suelo. También se identificó que las Actinobacterias son más abundantes en suelos de sistemas agroforestales.

También se ha registrado que hongos Ascomycota y Basidiomycota metabolizan la materia orgánica en rizodepositos, además la dinámica de la materia orgánica del suelo como resultado de descomposición de los residuos vegetales, influye en la abundancia de estos filos fúngicos, lo cual demuestra la relación de las comunidades fúngicas con los cambios en las fracciones de carbono (Bastida *et al.*, 2013).

Metales pesados

La disponibilidad de metales pesados en suelos es uno de los principales factores que pueden afectar el valor final del producto cacaotero, la unión europea plantea la regulación en el reglamento de la comisión N° 488/2014 de la Unión Europea, donde establecen los niveles máximos por mg/Kg de peso corporal de contaminantes en productos alimenticios.

La concentración de Cd es el principal metal encontrado en el grano de cacao, según la comisión del Codex Alimentarius, programa en conjunto FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y OMS (Organización Mundial de la Salud), esta concentración debe ser menor a 0.5 mg/kg (FAO/OMS, 2019). Por otra parte, la asimilación de Cd por cacao usando sistemas agroforestales es

un 60% menor con un monocultivo de cacao, esto se da por la competencia de asimilación de Cd por otras especies (Gramlich *et al.*, 2017). Además, hongos como las Micorrizas arbusculares ayudan a reducir la absorción de este metal que causa toxicidad en los suelos de este cultivo, los cuales pueden almacenarse en el grano de cacao y generar problemas de salud (Jacome, 2018)

Microorganismos que participan en la dinámica nutricional de los suelos de sistemas agroforestales

Se logró identificar más de diez microorganismos, llámese grupo, género o especie, que participan en la dinámica nutricional de los suelos, enfocado en la productividad de las plantas de cacao, los cuales pueden tener participación con la calidad y producción de los árboles (Tabla 2).

Tabla 2.

Características de microorganismos edáficos que pueden tener participación en la dinámica nutricional

Característica	Familia, grupo de microorganismo, género o especie involucrada	Descripción	Referencia bibliográfica
Carbono	<i>Bacteroidetes</i>	Conducen a aumentar el carbono orgánico del suelo	(Ren <i>et al.</i> , 2018)
Carbono	<i>Proteobacterias, Bacteroidetes, Actinobacterias y Cloroflexi</i>	Ayudan a mantener el equilibrio del ciclo del carbono	(Ren <i>et al.</i> , 2018)
Carbono	<i>Ascomycota, Basidiomycota</i>	Metabolizan la materia orgánica	(Bastida <i>et al.</i> , 2013)
Nitrógeno	<i>Acidobacteria, Proteobacteria y Actinobacteria y géneros como Kitasatospora, Streptomyces, Nitrospira, Bacillus y Pseudomonas</i>	Se relacionan con el ciclaje del Nitrógeno	(Han <i>et al.</i> , 2018; Koch, van Kessel, y Lückner, 2019; Liu <i>et al.</i> , 2019)
Nitrógeno	<i>Bradyrhizobium</i>	Fijadora de Nitrógeno	(Liu <i>et al.</i> , 2019)
Nitrógeno	<i>Rizobiales</i>	Son promotoras de plantas rizosféricas	(Bastida <i>et al.</i> , 2013)
Fósforo	<i>Bacillus subtilis y Pseudomonas putida</i>	Solubilizadoras de fosfato	(Bagyalakshmi <i>et al.</i> , 2017; Liu <i>et al.</i> , 2019)
Fósforo	<i>Burkholderia gladioli, Bacillus sp. Pseudomonas sp, Burkholderia cepacia Azotobacter chroococcum, Bacillus subtilis,</i>	Solubilización de fosforo, favorecen el crecimiento vegetal, bien sea en tallo y hoja	(Alori, Glick, y Babalola, 2017)
Fósforo	<i>Geobacter, Massilia, Phylia Verrucomicrobia, Bacteroidetes, Acidobacteria, Chloroflexi, y Cyanobacteria</i>	Producción enzimática para la solubilización de suelos	(Samaddar <i>et al.</i> , 2019)
Cadmio	<i>Micorriza arbuscular</i>	Contribuyen a reducir la absorción de cadmio	(Jacome, 2018)

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La producción tradicional para cultivar cacao son una estrategia típica en la producción de este cultivo, sin embargo, los sistemas agroforestales deben ser considerados puesto que permiten una mayor dinámica en la transformación de nutrientes, todo asociado por la promoción de bacterias que participan en el ciclaje de nutrientes como N y hongos que cumplen un rol especial en la mineralización de materia orgánica por degradación de compuestos orgánicos de carbono.

Los sistemas agroforestales se convierten en una estrategia para la optimización de producción orgánica de cacao, por qué favorece la biodiversidad bacteriana y fúngica para regular de manera positiva el ciclaje y aprovechamiento de los nutrientes, promoviendo así mejores condiciones de calidad vegetal en especial en unidades productivas agrícolas de cultivos perennes. Esta actividad microbiana participa activamente en la biodisponibilidad de N, P y C para que las condiciones de suelos sean idóneas y permitan la adecuada nutrición vegetal, lo que influye a la larga en las características finales del grano de cacao.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Formación Agroindustrial - Regional Huila y SENNOVA del Servicio Nacional de Aprendizaje

REFERENCIAS

- Agronet. (2018). *Base Agrícola EVA 2007-2018 (P)*. Recuperado Septiembre 18, 2019, de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>
- Alarcón, J.J., Arevalo, P.E., Díaz, J.L., Galindo, A.J.R., Rosero, A.A., (2012). *Manejo fitosanitario del cultivo de cacao: Medidas para la temporada invernal*. Fedecacao. 43p.
- Alfaro-Flores, A., Morales-Belpaire, I., & Schneider, M. (2015). Microbial biomass and cellulase activity in soils under five different cocoa production systems in Alto Beni, Bolivia. *Agroforestry Systems*, 89(5), 789–798. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9812-z>
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8(JUN), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Azimi, A. (2012). Experimental Study on Eggplant Drying by an Indirect Solar Dryer and Open Sun Drying. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 3(4), 385–389.
- Bagyalakshmi, B., Ponmurugan, P., & Balamurugan, A. (2017). Potassium solubilization, plant growth promoting substances by potassium solubilizing bacteria (KSB) from Southern Indian tea plantation soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 12, 116-124.
- BANRED. (2017). *Coyuntura del sector agropecuario colombiano. Documento*

- to conyuntura Ganadera Colombiana. Bogotá D.C. Recuperado de <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/informe-congreso-marzo-2018-recuadro-2.pdf>
- Barrientos, L. D. P., Oquendo, J. D. T., Garzón, M. A. G., & Álvarez, O. L. M. (2019). Effect of the solar drying process on the sensory and chemical quality of cocoa (*Theobroma cacao* L.) cultivated in Antioquia, Colombia. *Food research international*, 115, 259-267.
- Bastida, F., Hernández, T., Albaladejo, J., & García, C. (2013). Phylogenetic and functional changes in the microbial community of long-term restored soils under semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 12-21.
- Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2013). Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 192-211. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>
- Chen, F., Zheng, H., Zhang, K., Ouyang, Z., Li, H., Wu, B., & Shi, Q. (2013). Soil microbial community structure and function responses to successive planting of Eucalyptus. *Journal of Environmental Sciences*, 25(10), 2102-2111. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60319-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60319-2)
- Chen, L., Xiang, W., Wu, H., Ouyang, S., Zhou, B., Zeng, Y., ... & Kuzyakov, Y. (2019). Tree species identity surpasses richness in affecting soil microbial richness and community composition in subtropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 130, 113-121.
- Chen, Y. P., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W.-A., & Young, C. C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>
- DeLong, E. F., & Pace, N. R. (2001). Environmental diversity of bacteria and archaea. *Systematic Biology*, 50(4), 470-478. <https://doi.org/10.1080/10635150118513>
- Detlefsen, G y Somarriba, E. (2012). Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica. *Ministry for foreign affairs of finland & Catie*. P. 21-26.
- FAO Y OMS, 2019. Programa conjunto sobre normas alimentarias, comité del codex sobre contaminantes de los alimentos. 32 pag. Disponible en: <https://bit.ly/3nkb9d>
- Fontaine, S., Henault, C., Aamor, A., Bdioui, N., Bloor, J. M. G., Maire, V., ... Maron, P. A. (2011). Soil Biology & Biochemistry Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(1), 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.017>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M., & Schulín, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of the Total Environment*, 580, 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>

- Han, S., Li, X., Luo, X., Wen, S., Chen, W., & Huang, Q. (2018). Nitrite-oxidizing bacteria community composition and diversity are influenced by fertilizer regimes, but are independent of the soil aggregate in acidic subtropical red soil. *Frontiers in Microbiology*, 9(MAY), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00885>
- Jacome Molina, D. M. (2018) Efecto de la inoculación de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero. *Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá* (Disertación doctoral).
- Jones, L., Provins, a., Holland, M., Mills, G., Hayes, F., Emmett, B., ... Harper-Simmonds, L. (2014). A review and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services. *Ecosystem Services*, 7, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.09.001>
- Koch, H., van Kessel, M. A. H. J., & Lüscher, S. (2019). Complete nitrification: insights into the ecophysiology of comammox Nitrospira. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(1), 177–189. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9486-3>
- Leigh, J. A., & Dodsworth, J. A. (2007). Nitrogen regulation in bacteria and archaea. *Annual Review of Microbiology*, 61, 349–377. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093409>
- Levy-Booth, D. J., Prescott, C. E., & Grayston, S. J. (2014). Microbial functional genes involved in nitrogen fixation, nitrification and denitrification in forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.021>
- Li, F., Liu, M., Li, Z., Jiang, C., Han, F., & Che, Y. (2013). Changes in soil microbial biomass and functional diversity with a nitrogen gradient in soil columns. *Applied Soil Ecology*, 64(2), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.006>
- Liu, C., Jin, Y., Hu, Y., Tang, J., Xiong, Q., Xu, M., ... Beng, K. C. (2019). Drivers of soil bacterial community structure and diversity in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 278(March), 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.03.015>
- Fernandez, J. C., Santana, W. B., & Villate, A. R. (2016). Dinámica nutricional de cacao bajo diferentes tratamientos de fertilización con N, P y K en vivero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 367–380.
- Mander, C., Wakelin, S., Young, S., Condron, L., & O’Callaghan, M. (2012). Incidence and diversity of phosphate-solubilising bacteria are linked to phosphorus status in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 44(1), 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.009>
- Marconi, L., & Armengot, L. (2020). Complex agroforestry systems against biotic homogenization : The case of plants in the herbaceous stratum of cocoa production systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 287(December 2018), 106664. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106664>

- Minorta-Cely, V., Ordoñez, CM. (2015). Diversidad florística en arreglos agroforestales asociados a cacao (*Theobroma cacao*), de cuatro municipios del sur colombiano. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 2(2), 80-87.
- Nijmeijer, A., Lauri, P. E., Harmand, J. M., Freschet, G. T., Essobo Nieboukaho, J. D., Fogang, P. K., ... Saj, S. (2019). Long-term dynamics of cocoa agroforestry systems established on lands previously occupied by savannah or forests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 275(October 2018), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.004>
- Nygren, P., Leblanc, H. A., Lu, M., & Luciano, C. A. G. (2013). Distribution of coarse and fine roots of *Theobroma cacao* and shade tree *Inga edulis* in a cocoa plantation. *Annals of forest science*, 70(3), 229-239.
- Oergensen, R. G., & Emmerling, C. (2006). Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3), 295–309.
- Offre, P., Spang, A., & Schleper, C. (2013). Archaea in biogeochemical cycles. *Annual Review of Microbiology*, 67, 437–457. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155614>
- Oliveira, P. H., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. (2018). Litter and soil-related variation in functional group abundances in cacao agroforests using structural equation modeling. *Ecological indicators*, 84, 254-262.
- Oracz, J., Zyzelewicz, D., & Nebesny, E. (2015). The content of polyphenolic compounds in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.), depending on variety, growing region, and processing operations: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(9), 1176-1192.
- Orwin, K. H., Dickie, I. A., Holdaway, R., Wood, J. R. (2018). A comparison of the ability of PLFA and 16S rRNA gene metabarcoding to resolve soil community change and predict ecosystem functions. *Soil Biology and Biochemistry*, 117, 27-35.
- Peña-Vanegas, C.P., Vanegas, G.I., (2010). *Dinámica de los suelos amazónicos: procesos de degradación y alternativas para su recuperación*, Instituto SINCHI, Bogotá, ISBN 978-958-8317-62-5.
- Ren, C., Wang, T., Xu, Y., Deng, J., Zhao, F., Yang, G., Ren, G. (2018). Differential soil microbial community responses to the linkage of soil organic carbon fractions with respiration across land-use changes. *Forest Ecology and Management*, 409, 170-178.
- Samaddar, S., Chatterjee, P., Truu, J., Anandham, R., Kim, S., & Sa, T. (2019). Long-term phosphorus limitation changes the bacterial community structure and functioning in paddy soils. *Applied Soil Ecology*, 134(July 2018), 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.016>
- Sanchez, A. D., Ousset, M. J., & Sosa, M. C. (2019). Biological control of

- Phytophthora collar rot of pear using regional *Trichoderma* strains with multiple mechanisms. *Biological Control*, 135(April), 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.05.012>
- Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., & Glick, B. R. (2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, 183, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
- Shamshuddin, J., Muhrizal, S., Fauziah, I., Husni, M. H. A. (2004). Effects of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Science of the total environment*, 323(1-3), 33-45.
- Shao, P., Liang, C., Lynch, L., Xie, H., & Bao, X. (2019). Reforestation accelerates soil organic carbon accumulation: Evidence from microbial biomarkers. *Soil Biology and Biochemistry*, 131, 182-190.
- Smil, V. (2000). PHOSPHORUS IN THE ENVIRONMENT : Natural Flows and Human Interferences. *Annual Review Energy Environmental*, 25, 53–88.
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., ... Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Triadiati, S., Guhardja, E. D. I., Sudarsono Qayim, I., & Leuschner, C. (2007). Nitrogen Resorption and Nitrogen Use Efficiency in Cacao Agroforestry Systems Managed Differently in Central Sulawesi. *Journal of Biosciences*, 14(4), 127–132. <https://doi.org/10.4308/hjb.14.4.127>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2019). CitNetExplorer. The Netherlands: Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. Retrieved from <https://www.citnetexplorer.nl>
- Van Eck, N., & Waltman, L. (2019). VosViewer. The Netherlands: Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. Retrieved from <https://www.vosviewer.com/>
- Wang, J., Ren, C., Cheng, H., Zou, Y., Bughio, M. A., & Li, Q. (2017). Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: consequences for soil phosphorus forms and microbial community. *Science of the Total Environment*, 595, 769-778.
- Wartenberg, A. C., Blaser, W. J., Gatteringer, A., Roshetko, J. M., Van Noordwijk, M., & Six, J. (2017). Does shade tree diversity increase soil fertility in cocoa plantations?. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 248(March), 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.033>
- White, A. K., & Metcalf, W. W. (2007). Microbial metabolism of reduced phosphorus compounds. *Annual Review of Microbiology*, 61, 379–400. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093357>
- Wood, S. A., Karp, D. S., DeClerck, F., Kremen, C., Naeem, S., & Palm, C.

- A. (2015). Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.013>
- Zavala, W., Merino, E., & Peláez, P. (2018). Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493-501.