

Carbono de Biomasa Microbiana en Agrosistemas Cafetaleros de San Miguel Tzinacapan en Puebla, México Microbial Biomass Carbon in Coffee Agrosystems of San Miguel Tzinacapan, Puebla, Mexico

Anna Karina Alcántara-Azuara¹, Gerardo Cruz-Flores², Judith Castellanos-Moguel¹, Miguel Ángel Ramos-López³, José Roberto Ángeles-Vázquez¹ y Gilberto Vela-Correa^{1*}

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Departamento de El Hombre y su Ambiente. Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud. 04960 alcaldía de Coyoacán, Ciudad de México, México; (A.K.A.A.), (J.C.M.), (J.R.A.V.), (G.V.C.).

* Autor para correspondencia: gvla@correo.xoc.uam.mx

² Universidad Nacional Autónoma de México, Laboratorio de Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Batalla 5 de mayo esquina Fuerte de Loreto s/n, Colonia Ejército de Oriente. 09230, alcaldía de Iztapalapa, Ciudad de México, México; (G.C.F.).

³ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química. Cerro de las Campanas s/n. Colonia Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, Querétaro, México; (M.A.R.L.).

RESUMEN

El carbono de biomasa microbiana (CBM) es un indicador biológico utilizado para evaluar el efecto de las prácticas de manejo en suelos agrícolas, debido a la importancia que tienen los microorganismos para intercambiar nutrientes y energía. En la comunidad de San Miguel Tzinacapan, perteneciente al municipio de Cuetzalan del Progreso en el estado de Puebla, una de las actividades económicas más importantes que se realiza es la producción de café. Sin embargo, los agricultores afirman que en los últimos años la producción ha disminuido, al igual que la fertilidad de los suelos, lo que ha traído problemas económicos y de seguridad alimentaria, ya que su producción también es para autoconsumo. Se evalúa la relación que tiene el CBM en tres agrosistemas cafetaleros: el agrosistema (A-1) es un policultivo abonado con pollinaza; el segundo (A-2) a un policultivo abonado con composta; y el tercero (A-3) es un monocultivo convencional de café. Se realizaron dos muestreos de suelos uno durante la temporada de lluvias y otro en la temporada de sequía, para describir los componentes biofísicos y de labranza. Los parámetros físicos y químicos de los suelos se obtuvieron con técnicas estandarizadas y el CBM por el método de fumigación-incubación. El agrosistema A-1 presentó la mayor concentración de materia orgánica (10.6% en secas y 6.49% en lluvias), en carbono orgánico (6.15%), y cationes de intercambiables principalmente de Ca^{2+} (42.43 presentó en la época de secas, para el agrosistema A-1, la mayor concentración (0.93 g kg^{-1}), seguido del agrosistema A-2 con 0.18 g kg^{-1}). En cuanto a la salud del suelo el agrosistema A-1 obtuvo los valores más altos (8.6) de los parámetros evaluados en cada agrosistema.

Palabras clave: Cuetzalan, cultivo de café, indicadores de suelo, microbiota del suelo.

SUMMARY

Microbial biomass carbon (MBC) is a biological indicator used to evaluate the effect of management practices in agricultural soils, due to the importance of microorganisms in exchanging nutrients and energy. In the community of San Miguel Tzinacapan that belongs to the municipality of Cuetzalan del Progreso in the state of Puebla, one of the most important economic activities is coffee production. However, farmers claim that in recent years production has decreased, as well as soil fertility, which has brought economic and food security problems, since their production is also for self-consumption. Considering the above, the present study evaluates the relationship that MBC has in three typical coffee agrosystems of San Miguel Tzinacapan. Agrosystem (A-1) is a polyculture fertilized with chicken manure;



Cita recomendada:

Alcántara-Azuara, A. K., Cruz-Flores, G., Castellanos-Moguel, J., Ramos-López, M. A., Ángeles-Vázquez, J. R., & Vela-Correa, G. (2024). Carbono de Biomasa Microbiana en Agrosistemas Cafetaleros de San Miguel Tzinacapan en Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-13. e1751. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i.1751>

Recibido: 16 de mayo de 2023.

Aceptado: 23 de septiembre de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Noviembre de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Pablo Preciado Rangel

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

the second one (A-2) is a polyculture fertilized with compost; and the third one (A-3) is a conventional coffee monoculture. Two soil samplings were carried out, one during the rainy season and the other during the dry season to describe the biophysical and tillage components. Soil physical and chemical parameters were obtained with standardized techniques and the MBC by the fumigation-incubation method. Among the results, agrosystem A-1 showed the highest concentration of organic matter (10.6% in dry seasons and 6.49% in rainy seasons), organic carbon (6.15 and 3.15%), and exchangeable cations especially Ca^{2+} (42.43 and 17.87 meq 100^{-1}) and MBC (2.51 g kg^{-1}). The lowest values were observed in agrosystem A-3 with an organic matter concentration of 3.86 and 4.60% during the dry and rainy seasons, respectively. The highest MBC concentration occurred during the dry season for agrosystem A-1, which had the highest concentration (0.93 g kg^{-1}), followed by agrosystem A-2 with 0.18 g kg^{-1} . Regarding soil health, agrosystem A-1 obtained the highest values (8.6) of the parameters evaluated in each agrosystem.

Index words: *Cuetzalan, coffee cultivation, soil indicators, soil microbiota.*

INTRODUCCIÓN

El carbono de la biomasa microbiana (CBM) constituye la parte viva de la fracción lábil de la materia orgánica en el suelo, y es muy importante en la retención, liberación e intercambio de nutrientes y energía, al mineralizar los polímeros complejos de la materia orgánica (Spohn y Widdig, 2017). Además, tiene un papel importante en la agregación del suelo y reciclaje de nutrientes, por lo que la productividad de los agrosistemas depende de la cantidad de CBM y su interacción con el suelo y vegetación. La microbiota del suelo se compone principalmente de bacterias, actinomicetos y hongos, siendo los más abundantes las bacterias, aunque los hongos, por su mayor tamaño, representan alrededor de 70% de la biomasa del suelo (Osorio-Vega, 2009; Wall *et al.*, 2012). En general, en un gramo de suelo seco es posible encontrar 10^6 - 10^8 bacterias, 10^6 - 10^7 actinomicetos, 10^4 - 10^5 hongos, mientras que algas y protozoos, varían entre 10^3 - 10^6 , y 10^3 - 10^5 respectivamente (Torsvik *et al.*, 1990). Las bacterias y los hongos son los descomponedores primarios de la materia orgánica; al solubilizar los nutrientes y al excretar ácidos orgánicos, que descomponen polímeros vegetales y animales (Zhao, Sun, Xu y Qin, 2017).

El CBM puede ser utilizado como indicador de los cambios en la estabilización del carbono y de la salud del suelo, debido a que responde rápidamente a las variaciones ambientales (Li, Chang, Tian y Zhang, 2018; Singh y Gupta, 2018). El manejo manual y en ocasiones con tracción animal, que realizan los agricultores a sus cultivos vegetales en la zona, está en función de sus recursos económicos y de las condiciones de relieve en que se encuentran sus parcelas, situación que también puede modificar los procesos bioquímicos en el suelo, y que están en función de la estructura y de las comunidades microbianas, al agregar abonos y fertilizantes. También se debe tomar en cuenta que algunas prácticas de manejo pueden influir en la captura de carbono en el suelo, siendo las mejores las que lo mantienen y lo sustentan.

Li *et al.* (2018), reportaron que la agricultura de conservación y la retención de residuos sobre el suelo, puede aumentar el CBM al corto plazo independientemente de las condiciones edáficas y climáticas. Mientras que Bargali, Manral, Padalia, Bargali y Upadhyay (2018), afirmaron que la cobertura vegetal influye en la fertilidad del suelo como en la concentración de CBM, así como en la eficiencia de los microorganismos para utilizar el carbono debido a la cantidad y calidad de la hojarasca, de los exudados radiculares, del microclima y de la forma en que se encuentra estructurado el suelo.

En el municipio de Cuetzalan del Progreso, el principal producto comercial es el café, que es la base de los ingresos económicos de los productores (Rivadeneira-Pasquel y Ramírez, 2006; OJP, 2010). Es importante mencionar que en 88% de la superficie de cultivo, los productores aplican fertilizantes sintéticos, y solo 12% incorporan diversos abonos. Sin embargo, los productores argumentan que en los últimos años las actividades agrícolas no se han desarrollado adecuadamente por problemas relacionados con la fertilidad del suelo, alto costo de los insumos y servicios, adicionalmente a las derivadas por cuestiones climáticas. También se debe considerar en la producción de café, la falta de sombra para los cafetales, que en algunos casos ocasiona problemas fitosanitarios como la incidencia de plagas y enfermedades, siendo la principal la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) (INEGI, 2007).

Setenta y cinco por ciento de los productores de café son pequeños propietarios y más de 60% de los cultivadores son miembros de pueblos originarios por lo que se encuentran en zonas con alta marginalidad (Rivadeneira-Pasquel y Ramírez, 2006). En el municipio no existen registros sobre el efecto que tienen las prácticas de manejo en el suelo, por lo que el objetivo de este trabajo es determinar las concentraciones de carbono de biomasa microbiana en agrosistemas cafetaleros bajo diferentes condiciones de manejo en San Miguel Tzinacapan, en Puebla, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características Fisiográficas del Área de Estudio

Este trabajo se llevó a cabo en la localidad de San Miguel Tzinacapan, en el municipio de Cuetzalan del Progreso, al noroeste del estado de Puebla (Figura 1), fisiográficamente corresponde a la Sierra Madre Oriental, donde los materiales geológicos de la región están compuestos por calizas, lutitas, limonitas y areniscas. El clima con base en García (2004), es del tipo Af que es cálido húmedo con lluvias durante todo el año; la temperatura media anual es de 20.15 °C y su precipitación media anual es de 4200 mm por lo que se considera que es uno de los municipios más lluviosos del país. Los suelos dominantes son Leptosoles, Acrisoles, Andosoles y Regosoles y la vegetación corresponde a un bosque mesófilo de montaña, selva mediana subperennifolia y pastizales inducidos (INEGI, 2009; OJP, 2010).

Trabajo en Campo

En San Miguel Tzinacapan, se trabajó en tres agrosistemas cafetaleros que se encontraban en parcelas con una superficie menor a 1 ha, con diferente manejo y en cada una de ellas se describieron sus características biofísicas y morfológicas del suelo. Se consultó a los dueños de las parcelas, para obtener información sobre el manejo que realizan a sus cultivos. Se hicieron dos muestreos de suelos, el primero durante la época de secas y el segundo en la de lluvias. En cada agrosistema se describieron las características morfológicas y se tomó una muestra de 1 kg por horizonte del suelo (Vela-Correa, Rodríguez y López, 2011). Posteriormente, cada muestra se empaquetó en bolsas de polietileno, y se almacenaron a temperatura ambiente, para su análisis en laboratorio. También se recolectaron muestras de aproximadamente 200 g por horizonte que se trataron como material biológico, las cuales se guardaron en bolsas estériles bajo condiciones de refrigeración (4 °C) para la cuantificación del CBM en laboratorio.

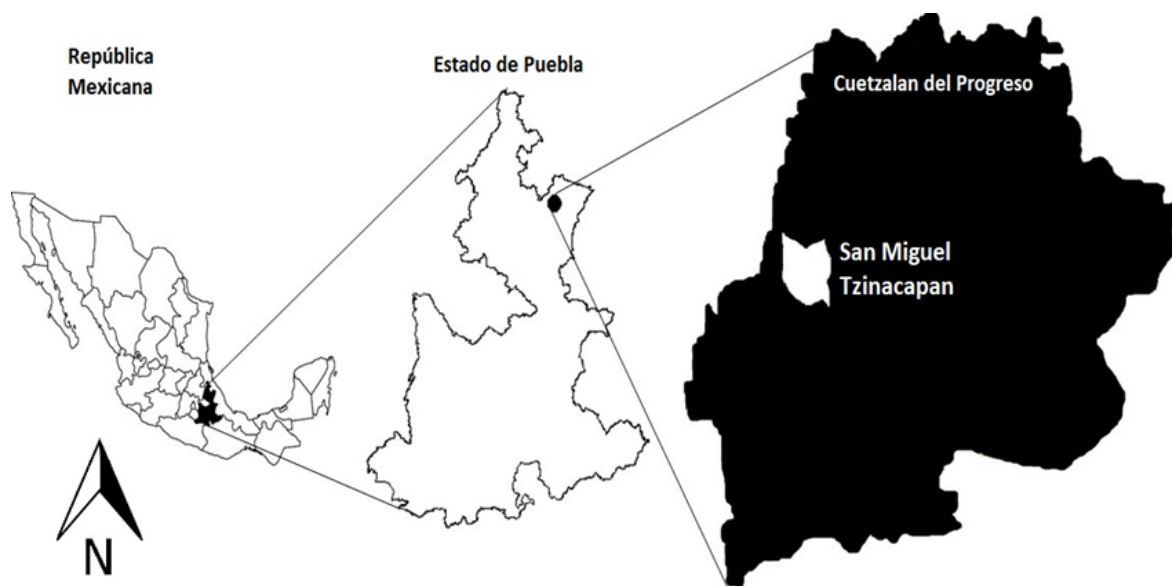


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Figure 1. Location of the study area.

Trabajo en Laboratorio

La determinación de las propiedades físicas y química de los suelos se realizó siguiendo los métodos descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) donde se establecen las especificaciones sobre el estudio, muestreo y análisis de suelos, así como los propuestos por Jackson (1982) y Vogt, Tilley, Edmonds y Harrison (2015). Las determinaciones que se realizaron fueron: humedad, misma que se cuantificó por el método gravimétrico, que se basa en la diferencia del peso que existe entre la muestra húmeda y seca; la densidad aparente (D_a) por medio muestras inalteradas de suelo, utilizando un núcleo de acero; y la densidad real (D_r) se cuantificó por el método del picnómetro, y la porosidad se obtuvo con la ecuación *Espacio poroso (%) = $1 - (D_a/D_r) \times 100$* ; mientras que la textura se estimó por el método del hidrómetro de Bouyoucos (1962). En cuanto a los parámetros químicos, el pH se determinó en una mezcla con relación suelo: agua (1:2.5) con un potenciómetro Thermo Scientific™ modelo Orión 3-Star; la materia orgánica (MO) y el carbono orgánico (Corg) se cuantificaron con el método de combustión en húmedo usando una mezcla de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) con ácido sulfúrico (H_2SO_4) propuesto por Walkley y Black (1934); la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método descrito en Jackson (1982); los cationes intercambiables de Ca^{2+} y Mg^{2+} se calcularon con el método del versenato; y los iones intercambiables de Na^+ y K^+ con un fotoflamómetro Corning 400. Para cuantificar el CBM se utilizó el método de "fumigación-incubación" propuesto por Jenkinson y Powlson (1976), que consiste en tres etapas: la fumigación, que se refiere a la lisis de los microorganismos al someter las muestras de suelo a una atmósfera de cloroformo; la incubación, consiste en inocular las muestras con suelo no fumigado; y la determinación analítica del carbono mineralizado.

Relación del CBM y Salud del Suelo

Para determinar la relación del CBM con las prácticas de manejo, se utilizó el método propuesto por Altieri y Nicholls (2002), que determina la sostenibilidad de los cafetales a partir de la salud de los suelos. Se consideraron indicadores que se basan en el manejo que realizan los productores en sus parcelas, así como en algunos parámetros físico, químicos y biológicos que son fáciles de medir. A cada indicador seleccionado se le asigna un valor de 1 a 10 (1 = valor menos deseable; 5 = valor medio; y 10 = más deseable) de acuerdo con las características observadas en campo del atributo a evaluar. Una vez asignados los valores, se obtiene el promedio, de los indicadores y se elabora un gráfico radial (tipo ameba) a fin de visualizar el estado general de la salud del suelo. Cuanto más se aproxime la ameba al diámetro del círculo (valor = 10) el agrosistema tiene mejor salud del suelo, y con los valores que más se alejen se pueden considerar estrategias de manejo que las mejoren.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización Fisiográfica de los Agrosistemas

Los tres agrosistemas se encuentran en relieve accidentado, particularmente formado por laderas medias y cada parcela la superficie es menor a 1 ha y los suelos se encuentran sobre calizas (Ruelas-Monjardín, Nava y Barradas, 2014), son someros con profundidad máxima de 30 cm. Se describió un perfil de suelos por cada parcela y se tomaron muestra de cada horizonte de suelo para su análisis en laboratorio.

El agrosistema A-1 se localiza en los 20° 01' 22" N y los 97° 32' 20" O, a 959 m de altitud, se caracteriza por tener policultivo con manejo orgánico donde las plantas de café (*Coffea arabica* L.) se encuentran asociadas con canela (*Cinnamomum verum* J. Presl.), plátano (*Musa paradisiaca* L.) y pimienta (*Piper nigrum* L.) (Cuadro 1). En el terreno, las plantas se distribuyen a tres metros equidistantes entre ellas. La parcela se abona con pollinaza la cual está conformada por los desechos de la producción de pollo de engorda, formado por una mezcla de heces, cama, orina, restos de alimento, mucosa intestinal descamada, secreciones glandulares, microorganismos de la biota intestinal, sales minerales, plumas, insectos, pigmentos, trazas de medicamentos, etc.; la cual se coloca a 20 cm de profundidad en tres sitios distribuidos en la parcela (Ochoa y Urrutia, 2007). La periodicidad con la que se abona es a criterio del productor, al igual que los deshierbes y chaponeos que se realizan con machete, a lo largo del año. En este agrosistema se describieron los siguientes horizontes del perfil de suelo: El horizonte Ap (0 - 7 cm), que tiene influencia antrópica por prácticas agrícolas, además presenta acumulación de materia orgánica humificada, mientras que en el horizonte AB (7 - 10 cm) hay mayor acumulación de arcillas y de materiales orgánicos humificados. El Bw (10 - 20 cm) tiene un mejor desarrollo estructural por la mayor presencia de arcillas de neoformación. A partir de 20 cm de profundidad hay contacto lítico (R) con rocas calizas. El suelo en general presenta erosión severa leve de forma laminar, y los pedos que predominan son de tamaño fino (5 a 10 mm de diámetro), su drenaje superficial es lento, por las características del policultivo, donde este aporta materiales que cubren al suelo durante la mayor parte del año.

Cuadro 1. Características de los agrosistemas.
Table 1. Characteristics of agrosystems.

Agrosistema	Sistema de manejo	Abonado	Vegetación	Altitud	Relieve	Drenaje superficial
				m		
A-1	Policultivo orgánico	Pollinaza	Café, canela, plátano y pimienta	959.0	Fuertemente ondulado (10 a 15°)	Lento
A-2	Policultivo orgánico	Composta	Café, plátano, pimienta, mamey, lima y naranja.	618.7	Muy ondulado (15 a 20°)	Lento
A-3	Monocultivo convencional	Fertilizante 18-06-12 (N-P-K)	Café	770.1	Fuertemente ondulado (10 a 15°)	Medio

El agrosistema A-2, se encuentra en los 20° 03' 21" N y los 97° 32' 38" O a 618.7 m de altitud y corresponde a policultivo orgánico, pero en este caso, las plantas de cafeto (*Coffea arabica* L.) se encuentran asociadas con árboles de mamey (*Pouteria sapota* J.), lima (*Citrus aurantiifolia* L.), naranja (*Citrus sinensis* L.), plátano (*Musa paradisiaca* L.) y pimienta (*Piper nigrum* L.), las cuales se encuentran en promedio a equidistancia de 4 m entre ellas. El productor aplica composta, que el mismo prepara con los insumos que tiene a la mano como restos de comida y/o cultivos, y no tiene una forma estandarizada de prepararla, por lo que su calidad es variable y está la esparce entre las plantas, donde la cantidad y periodicidad es a su criterio por lo que es posible impacte en las propiedades del suelo (Cuadro 1).

Se describieron los horizontes: Ap (0 - 8 cm), B(w) (8 - 17 cm), y R (>17 cm). El primero presenta buena estructura y forma terrones de tamaño medio, la infiltración es moderada, aunque las lluvias fuertes crean algunos encharcamientos. En esta parcela el productor no practica deshierbes, por lo que el suelo se encuentra cubierto de herbáceas y arbustivas durante la mayor parte del año. Los árboles asociados al café son de porte alto y no presentan evidencias de plagas o enfermedades; pero en cuanto a los cafetos, el productor considera ya una plantación vieja (>20 años), y en su mayoría se encuentran infectados por roya (*H. vastatrix*). El productor comentó que, por tratarse de una plantación antigua, sus rendimientos son bajos (<1 Mg ha⁻¹), por lo que considera reemplazar las plantas de café por otras más jóvenes.

El agrosistema A-3 se ubica en los 20° 02' 13" N y los 97° 32' 17" O a una altitud de 770.1 m de altitud, el perfil del suelo presenta un horizonte Ap (0 - 25 cm) que se encuentra sobre calizas R (> 25 cm). Se cultiva como monocultivo convencional que se fertiliza con la fórmula de N- P- K (18 - 06 - 12). El productor deposita el fertilizante después de la cosecha y al inicio de la floración a un costado del tallo de las plantas de café (de 10 a 15 cm de distancia del tallo), los cafetos se ubican a 2.5 m de equidistancia entre ellos (Cuadro 1). El horizonte Ap (0 - 25 cm), es suelto, forma terrones pequeños que se deshacen con facilidad, presenta buena retención de humedad, pero durante la temporada de secas las plantas se ven afectadas debido a que el terreno es deshierbado, por lo que el suelo está descubierto parte del año, estando expuesto a los procesos de degradación por erosión que se presentan en la región. El productor, manifestó que desconoce el rendimiento de la parcela, por ser una plantación nueva, pero argumentó que con los cafetos anteriores este era muy bajo (< 400 kg ha⁻¹), (Cuadro 1).

Propiedades Físicas de los Suelos

En los tres agrosistemas, las propiedades físicas de los suelos se presentan en el Cuadro 2. Los suelos tuvieron mayor humedad durante la temporada de secas, pero se debe considerar que llueve casi todo el año, y que la temporada de lluvias es de abril a octubre con una precipitación de 1200 a 2800 mm (Jaramillo-Villanueva, Guerrero, Vargas y Bustamante, 2022). El agrosistema con mayor humedad fue el A-1, seguido por A-3 y por último el A-2, esto se atribuye a la diversidad vegetal de los agrosistemas, donde los aportes de hojarasca que cubre al suelo disminuyen las pérdidas por evaporación y escurrimiento. Además de que, al integrarse la materia orgánica al suelo, influye directamente en la densidad aparente, donde esta presenta valores menores a la unidad, lo que a su vez repercute en que la porosidad sea mayor al 50% en todos sus horizontes, aunado a la textura arcillosa, que permite que este mantenga un régimen de humedad adecuada para que las raíces de las plantas, y la fauna edáfica se desarrollen adecuadamente (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008; Wu y Wang, 2019).

Cuadro 2. Características físicas de los suelos.
Table 2. Physical characteristics of soils.

Parcela	Hz	Prof	Humedad	Densidad		Porosidad	Partículas			Textura
				aparente	real		arenas	limos	arcillas	
		cm	%	g cm ⁻³		%				
Agrosistemas en temporada de secas										
A-1	Ap	0-7	42.05	0.94	2.15	56.36	30.20	32.92	36.88	Cr
	AB	7-10	31.55	1.02	2.34	56.55	35.12	35.64	29.24	Cr
	B(w)	10-20	23.39	1.28	2.45	47.75	25.12	32.00	42.88	R
	R	>20	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2	Ap	0-8	26.42	0.94	2.28	58.60	27.12	30.00	42.88	R
	B(w)	8-17	13.21	1.10	2.54	56.86	21.48	25.64	52.88	R
	R	>17	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3	Ap	0-25	33.25	1.01	2.39	57.71	26.76	30.00	43.24	R
	R	>25	-	-	-	-	-	-	-	-
Agrosistemas en temporada de lluvias										
A-1	Ap	0-7	21.29	0.98	2.23	55.94	32.92	32.00	35.08	Cr
	AB	7-10	17.74	0.98	2.31	57.56	33.64	29.28	37.08	Cr
	B(w)	10-20	19.58	1.01	2.25	55.37	28.92	34.00	37.08	R
	R	>20	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2	Ap	0-8	15.41	0.94	2.21	57.57	26.92	32.00	41.08	R
	B(w)	8-17	13.68	0.94	2.35	60.14	25.64	25.28	49.08	R
	R	>17	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3	Ap	0-25	18.98	0.96	2.16	55.82	28.92	32.00	39.08	R
	R	>25	-	-	-	-	-	-	-	-

Hz = horizonte; Prof. = Profundidad; Textura: Cr = Franco-arcillosa, R = Arcillosa.
 Hz = horizon; Prof. = Depth; Texture: Cr = Clay loam, R = Clay.

Los agrosistemas A-1 y A-2 tienen un desarrollo edáfico mayor en comparación con el A-3 y presentan de forma incipiente un horizonte B(w) que se caracteriza por ser ligeramente más arcilloso que los horizontes supra y subyacentes en ambos suelos. Además, en la fracción arcillosa se encuentran gran cantidad de nutrientes, lo que resulta esencial en procesos como la mineralización de la materia orgánica como la pólina y composta que los productores agregan a estos agrosistemas (Finn, Kopitke, Dennis y Dalal 2017; Madigan, Martinko, Bender, Buckley y Stahl, 2015); mientras que en el agrosistema A-3 el manejo depende exclusivamente de la aplicación de fertilizantes químicos. Durante la temporada de lluvias el agrosistema A-2 presentó menor humedad, y mayor cantidad de partículas arcillosas (< 0.002 mm de diámetro), posiblemente por la presencia de poros muy finos que conlleva a un proceso de saturación y retención de humedad más lento (Cuadro 2).

Propiedades Químicas de los Suelos

Durante la temporada de secas, en los tres agrosistemas el suelo del horizonte Ap es ligeramente ácido (6.1 - 6.5), incrementando su acidez hasta llegar a considerarse fuertemente ácido (< 5.5) en el horizonte B(w), atribuible a la migración de ácidos orgánicos provenientes de la vegetación de la parcela, donde los grupos carboxílicos y fenólicos contenidos en la materia orgánica se comportan como ácidos débiles por lo que tienden a disminuir el pH de los suelos (Vázquez-Alarcón, 1997; Martínez *et al.*, 2008).

El suelo más ácido correspondió al agrosistema A-3 donde el empleo de fertilizantes como la urea, que dejan residuo ácido, aunado a los aportes de materia orgánica, y que, por tratarse de monocultivo sin sombra, está más expuesto a mayor lavado de bases. El A-1 presentó las mayores concentraciones de materia orgánica, carbono orgánico, CIC y cationes intercambiables de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , mientras que, durante la temporada de lluvias, el A-2 presentó valores más elevados en CIC, Ca^{2+} y Mg^{2+} posiblemente porque es la parcela que menos se deshierba, y en consecuencia tiene mayor cobertura vegetal y menor lavado de bases. Los valores de iones intercambiables y CIC disminuyeran en el A-1 durante la temporada de lluvias puede ser explicado por su posición en la ladera, están expuestas a lavado constante de nutrimentos por las lluvias (Lince y Sadeghian, 2016; Geissert, Mólgora, Negrete y Hunter, 2017).

En cuanto a los cationes intercambiables existe la tendencia $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, por lo que se estima que las elevadas concentraciones de Ca^{2+} son atribuibles al material parental que está conformado por calizas y dolomitas. Donde mayormente se encuentran CaCO_3 y en menor proporción MgCO_3 , lo que explica que el Mg^{2+} sea el segundo catión más abundante. Las concentraciones de estos cationes influyen en la biodisponibilidad del carbono que se encuentra en la materia orgánica (Finn *et al.*, 2017).

Los valores de Na^+ y de K^+ fueron bajos (Vázquez-Alarcón, 1997), y se debe tener en cuenta que en los tres agrosistemas las mayores concentraciones correspondieron al ion Ca^{2+} en comparación con los demás cationes intercambiables; debido a que la oxidación de la materia orgánica por microorganismos quimiorganotrofos libera CO_2 es disuelto en el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3) el cual solubiliza los carbonatos de los que se componen las calizas (CaCO_3) (Madigan *et al.*, 2015). Las concentraciones más bajas correspondieron al ion K^+ (Cuadro 3) y que, debido a su solubilidad, se desplaza fácilmente con las lluvias. Lo anterior repercute en que las hojas de los cultivos presenten clorosis por lo que las plantas no obtienen la cantidad suficiente de este elemento para activar enzimas responsables de la fotosíntesis (Römheld y Kirkby, 2010).

Concentraciones de Carbono de Biomasa Microbiana

Las concentraciones de CBM es muy heterogénea en los horizontes del suelo (Figura 2), esto debido a que no existe una distribución espacial específica de los microorganismos, además de tomar en cuenta que los suelos son poco profundos y de moderadamente a fuertemente ácidos, y se considera que la mayor cantidad de microorganismos está asociada a la rizosfera, lo que coincide con la mayor densidad de raíces que se presenta de 0 - 20 cm de profundidad en los cafetales (Gómez-González, Palma, Obrador y Ruiz, 2018).

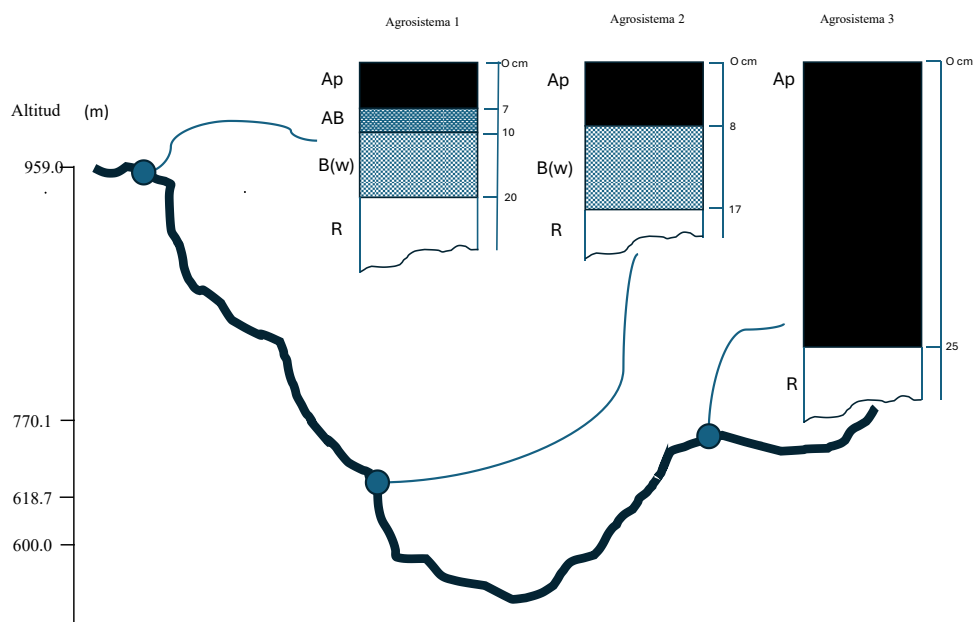


Figura 2. Perfiles de suelos en los agrosistemas.
Figure 2. Soil profiles in agrosystems.

Cuadro 3. Características químicas de los suelos de los agrosistemas.
Table 3. Chemical characteristics of agrosystem soils.

Parcela	Hz	Prof	pH	MO	Corg	CIC	Iones intercambiables			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		cm	H ₂ O (1:2)	%		cmol+ kg ⁻¹	----- meq 100 g ⁻¹ -----			
Agrosistemas en temporada de secas										
A-1	Ap	0-7	5.7	10.6	6.15	29.54	42.43	10.08	2.93	1.00
	AB	7-10	5.7	5.42	3.14	22.06	23.57	3.63	2.49	0.55
	B(w)	10-20	5.5	3.70	2.14	21.35	12.66	3.57	2.37	0.35
	R	>20	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2	Ap	0-8	4.9	5.34	3.10	24.20	19.35	0.96	3.16	0.87
	B(w)	8-17	5.0	1.64	0.95	12.10	12.16	3.80	0.16	0.22
	R	>17	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3	Ap	0-25	4.7	3.86	2.24	12.10	7.44	0.09	1.15	0.22
	R	>25	-	-	-	-	-	-	-	-
Agrosistemas en temporada de lluvias										
A-1	Ap	0-7	5.04	6.49	3.76	17.79	17.87	6.51	1.82	1.00
	AB	7-10	4.84	4.19	2.43	17.79	13.15	5.69	0.70	0.61
	Bw	10-20	4.91	4.35	2.53	14.23	7.94	6.91	0.48	0.48
	R	>20	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2	Ap	0-8	5.20	4.93	2.86	22.42	19.85	7.41	0.48	0.48
	B(w)	8-17	5.37	1.48	0.86	17.44	15.88	5.17	0.59	0.48
	R	>17	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3	Ap	0-25	4.95	4.60	2.67	16.01	12.16	1.36	0.14	0.29
	R	>25	-	-	-	-	-	-	-	-

Hz = Horizonte; Prof.= Profundidad; MO = Materia orgánica; Corg= Carbono orgánico; CIC = Capacidad de intercambio catiónico.
 Hz = Horizon; Prof.= Depth; OM = Organic matter; Corg = Organic carbon; CIC = Cation exchange capacity.

Las mayores concentraciones de CBM se presentaron durante la temporada de secas en los tres agrosistemas siendo el agrosistema A-1 el que tuvo la mayor concentración 0.93 g kg⁻¹ en el horizonte Ap (Figura 3), mientras que el mismo horizonte en el A-2 fue de 0.18 y en el A-3 de 0.61 g kg⁻¹ (Figura 4). El hecho de que se obtuvieran ligeramente valores más bajos de CBM en la temporada de secas, se debe a que la densidad de microorganismos se reduce, son más sensibles a la frecuencia de las lluvias, que a la duración de éstas (Ren *et al.*, 2018). Cuando los suelos son ácidos dan un panorama sobre la composición de la comunidad microbiana, que tal vez esté integrada primordialmente por hongos, seguidos por actinomicetos y al último bacterias. Por ejemplo, el grupo de las taumarqueas en suelos agrícolas crecen óptimamente en valores de pH 4 - 5 (Madigan *et al.*, 2015), mientras que Hermans *et al.* (2017), encontraron que mientras más neutro sea el pH, mayor es la abundancia de la comunidad microbiana hasta en 9.6% particularmente de las clases *Betaproteobacteria* y *Deltaproteobacteria*.

La mayor concentración de CBM en el agrosistema A-1, se debe a que el terreno lo deshieran con mayor frecuencia, además, la pollinaza que se aplica, contiene elevados contenidos de proteínas fibrosas, como la queratina que forma parte de las plumas de los pollos, y una gran cantidad de aminoácidos por lo que la microbiota del suelo puede solubilizar sus compuestos lentamente, para que se incorporen al suelo durante más tiempo, favoreciendo la presencia de bacilos esporulados (Arthanari y Dhanapalan, 2019).

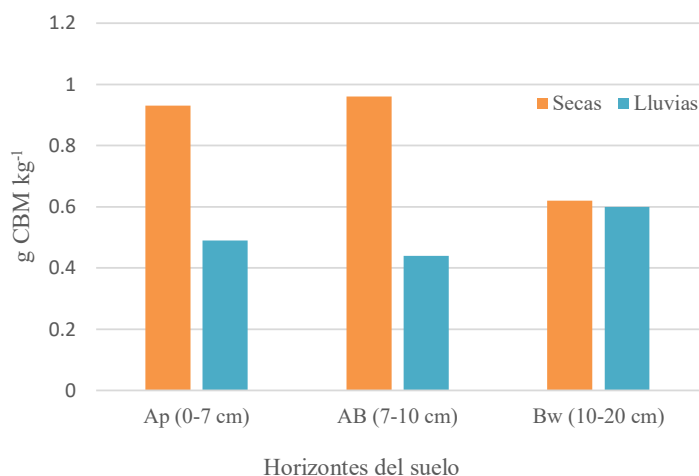


Figura 3. Carbono de biomasa microbiana en el sistema A-1.
Figure 3. Microbial biomass carbon in system A-1.

El manejo que realiza el productor es generalmente con machete y azadón, lo que queda de manifiesto, debido a que la mayor actividad microbiana se presenta a una profundidad de 0 - 10 cm en la época de secas en los horizontes Ap y AB (Figura 3), disminuyendo el CBM alrededor del 30% en el horizonte Bw (>10 cm) ya que está conformado por materiales arcillosos disminuyendo a su vez el contenido de humedad y de porosidad (Figura 3); por lo mismo, el rompimiento de su capilaridad y movimiento del suelo es mínimo por el tipo de herramientas que emplean durante las labores de cultivo. Interesante es que durante la temporada de lluvias la CBM disminuye en más de 45% su concentración en los primeros 10 cm de espesor, debido al tipo textural que provoca que sus poros se saturen por las intensas lluvias, y su drenaje sea muy lento, provocando condiciones de anoxia a nivel microbiano (Figura 3).

En el agrosistema A-2 su suelo está cubierto de herbáceas y arbustivas, por lo que los nutrientes de la composta se consideran no son absorbidos por los cultivos, sino que existe una competencia con las demás especies vegetales y con microorganismos quimioautótrofos. La CBM en este agrosistema durante la temporada de secas fue la más baja (0.18g kg⁻¹), al igual que su contenido de humedad y presentar una textura arcillosa (Figura 4).

En comparación con el A-3, donde se aplica fertilizante con base en la fórmula 18-6-12 el N es absorbido directamente por las plantas, aunque no en su totalidad, debido a la precipitación, condiciones de relieve y de lixiviado en los suelos de la parcela (Figura 5). Lo anterior coincide con lo reportado por Abumere, Dada, Adebayo, Kutu y Togun (2019), quienes encontraron en el cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.) abonado con pollinaza mejoraba la calidad del suelo, en comparación con otra parcela donde se aplicó fertilizante inorgánico.

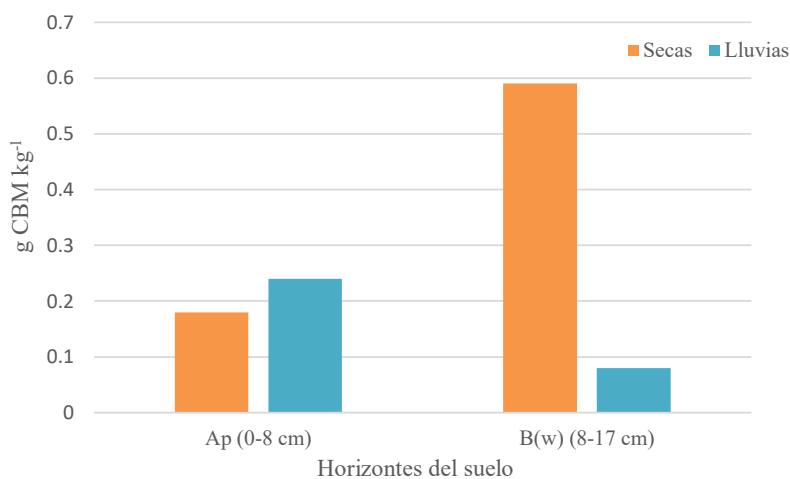


Figura 4. Carbono de biomasa microbiana en el sistema A-2.
Figure 4. Microbial biomass carbon in system A-2.

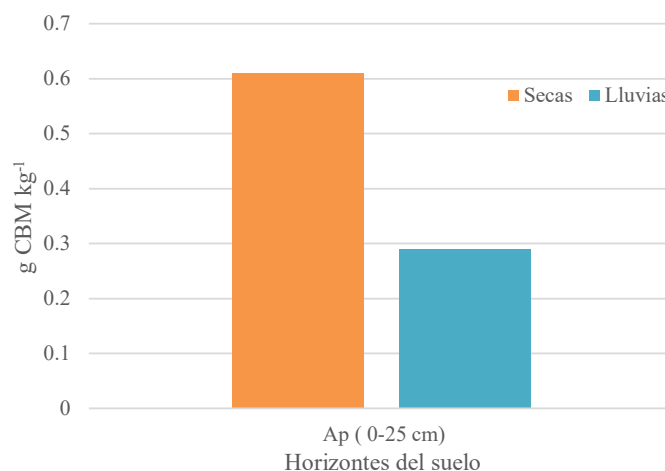


Figura 5. Carbono de biomasa microbiana en el sistema A-3.
Figure 5. Microbial biomass carbon in system A-3.

El CBM como Indicador de Salud en los Agrosistemas

El agrosistema A-1 obtuvo los valores más altos (8.6) de CBM de los parámetros evaluados (Cuadro 4), seguido por el agrosistema A-2 (7.3) y por último el A-3 (5.8). En los tres agrosistemas se obtuvieron valores deseables en cuanto a estructura, compactación e infiltración y profundidad del suelo, lo cual se explica por su porosidad y presencia de arcillas que promueven la actividad microbiana, el intercambio de nutrientes, así como por el paso de aire y agua. Además, se considera que los microorganismos segregan sustancias poliméricas derivadas de la descomposición de materiales orgánicos que son necesarios para la formación de biopelículas y la formación de agregados (Madigan *et al.* 2015; Finn *et al.*, 2017); mientras que los agrosistemas A-2 y A-3 presentaron valores muy bajos referente al estado de los residuos que se encuentran en la superficie del suelo y considerando su color, olor y concentraciones de materia orgánica, esta fue mejor en el A-2 que el A-3, lo que coincide con los valores obtenidos de CBM, pH, MO, Corg y cationes intercambiables.

Cuadro 4. Valores de salud del suelo.
Table 4. Soil health values.

Indicadores	Valor		
	A-1	A-2	A-3
Agrosistema	A-1	A-2	A-3
Estructura	9	8	7
Compactación e infiltración	8	8	7
Profundidad del suelo	10	10	10
Estado de residuos	9	2	0
Color, olor y materia orgánica	9	5	4
Retención de humedad	9	9	7
Desarrollo de raíces	9	7	7
Cobertura del suelo	7	9	1
Erosión	10	10	9
Actividad biológica	6	5	6
Promedio	8.6	7.3	5.8

Por otra parte, las tres parcelas tuvieron valores deseables en cuanto a retención de humedad siendo mejores las correspondientes al A-1 y A-2 por la aplicación de materiales orgánicos, que a su vez repercute en el desarrollo de raíces en el agrosistemas A-1, su textura franca permite un mejor desarrollo radicular y por lo tanto, existe mayor concentración de microorganismos asociados a las raíces de las plantas, lo que explica que en este sistema se hayan obtenido las mayores concentraciones CBM; no obstante, en el caso del A-1 y A-2 podría existir competencia de los cafetales con los demás cultivos por efectos alelopáticos de los exudados radiculares (Figura 6), (Berroa, Cotilla y Mulén, 2013).

Referente a la cobertura del suelo, el agrosistema A-2 presentó el valor más deseable, y las concentraciones más bajas de CBM, lo que puede explicarse porque esta cobertura se compone de vegetación viva que no puede ser mineralizada por la comunidad microbiana. En cuanto a la erosión del suelo, los agrosistemas A-1 y A-2 presentaron los valores más altos, y en el caso del A-3 por pendiente, posición en la ladera, fuertes lluvias y suelo descubierto, existen problemas de erosión. La actividad biológica se refiere a la presencia de mesofauna, y en los tres agrosistemas se obtuvieron valores deseables que benefician la descomposición primaria de la materia orgánica (Wu y Wang, 2019). Por último, el agrosistema A-2 tuvo el promedio más bajo, el cual coincide con el hecho de que haya tenido menor CBM por lo que los residuos orgánicos se descomponen con mayor lentitud.

La calidad de los suelos en los agrosistemas es de media para el A-3, con limitaciones en el contenido de humedad, desarrollo de las raíces y principalmente sobre cobertura del suelo, donde ésta es mínima debido a que no hay aportes de materia orgánica por parte de la vegetación del lugar, para el A-2, y para el agrosistema A-1 se considera buena; sin embargo, para que alcance este estatus se podrían mejorar las propiedades del suelo (Figura 6), así como incrementar la actividad biológica y su cobertura. Por lo que es necesario que la pollinaza pase por un proceso de compostaje antes de aplicarse en las parcelas, para que los nutrientes contenidos en las plumas y excretas queden en formas químicamente disponibles por un mayor tiempo (Arthanari y Dhanapalan, 2019).

Mientras que en el A-2, se debe considerar incrementar la actividad biológica y mejorar el estado de los residuos, además de remover los restos de herbáceas y arbustivas, para que los nutrientes de la composta puedan ser utilizados mayormente por los cultivos. En el A-3, que fue el que tuvo el promedio más bajo, es necesario aumentar la cobertura del suelo, la materia orgánica y mejorar el estado y calidad de los residuos. Se puede mejorar al incrementar la materia orgánica mediante el uso de abonos e implementar prácticas de labranza cero, y diversificar los cultivos a fin de que no se pierdan los nutrientes, y el carbono orgánico almacenado, principalmente por escorrentía (Finn *et al.*, 2017). En los tres casos, es importante implementar estrategias de conservación como la retención de residuos orgánicos sobre el suelo, que lo protejan de los factores atmosféricos y que mantengan las condiciones microambientales adecuadas para fortalecer la actividad microbiana.

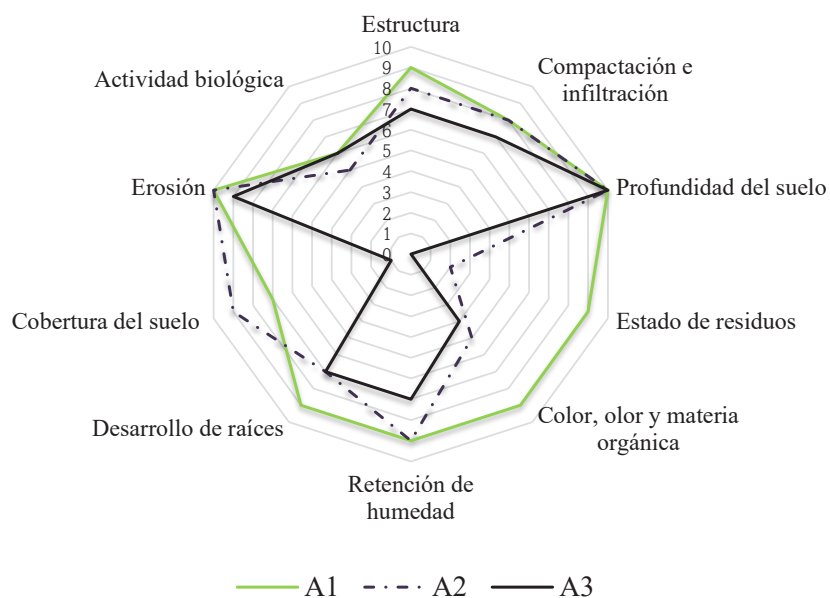


Figura 6. Gráfico radial de la salud de los suelos en cada agrosistema.
Figure 6. Radial chart of soil health in each agrosystem.

CONCLUSIONES

El agrosistema A-1, presentó las mayores concentraciones de carbono en la biomasa microbiana y correspondió al policultivo más diverso en cuanto a especies y al único abonado con pollinaza.

Las características físicas no variaron entre temporadas, los valores de las propiedades químicas disminuyeron de secas a lluvias por la posición en la ladera donde se encuentran los agrosistemas. La actividad biológica depende de la temporalidad de lluvias y particularmente del periodo de secas, por las condiciones de porosidad y textura ya que, al parecer, estas juegan un papel fundamental en las concentraciones de CBM y en cuanto a la salud del suelo el agrosistema A-1 obtuvo los valores más altos de los parámetros evaluados.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco, recursos propios de los autores.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e idea principal: A.K.A.A., G.C.F., G.V.C. Trabajo en campo: A.K.A.A., J.C.M., J.R.A.V., G.V.C. Trabajo en laboratorio: A.K.A.A., G.C.F., J.C.M. Escritura y revisión: A.K.A.A., M.A.L.R., G.V.C. Administración del proyecto: G.V.C.

AGRADECIMIENTOS

A los productores Moisés Castro, Blas Soto y a la familia Arrieta de San Miguel Tzinacapan que amablemente facilitaron sus terrenos para poder llevar a cabo este trabajo. Así como al Laboratorio de Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal de la Facultad de Estudios Superiores - Zaragoza (UNAM) y al Programa Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la beca otorgada a la primera autora, para desarrollar el proyecto durante sus estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco.

LITERATURA CITADA

- Abumere, V. I., Dada, O. A., Adebayo, A. G., Kutu, F. R., & Togun, A. O. (2019). Different rates of chicken manure and NPK 15-15-15 enhanced performance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) on ferruginous soil. *International Journal of Agronomy*, 2019(1), 3580562. <https://doi.org/10.1155/2019/3580562>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad en cafetales. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 64, 7-24.
- Arthanari, M., & Dhanapalan, S. (2019). Quantification of β -carotene, lycopene, and chlorophyll content in tomato fruits of enrichment of chicken feathers composting. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 473-477. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0258-6>

- Bargali, K., Manral, V., Padalia, K., Bargali, S. S., & Upadhyay, V. P. (2018). Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan Forest soils, India. *Catena*, 171, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.001>
- Berroa, N. G., Cotilla, P. L., & Mulén, F. M. (2013). Efectos alelopáticos de dos coberturas vivas *Commelina difusa* Burm. F. y *Tradescantia zebrina* Shunltz sobre *Coffea arabica* L. *Centro Agrícola*, 40(2), 75-78.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Finn, D., Kopittke, P. M., Dennis, P. G., & Dalal, R. C. (2017). Microbial energy and matter transformation in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 176-192. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.010>
- García, A. E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Geissert, D., Mólgora-Tapia, A., Negrete-Yankelevich, S., & Hunter-Manson, R. (2017). Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra. *Agrociencia*, 51(2), 119-133.
- Gómez-González, R., Palma-López, D. J., Obrador-Olan, J. J., & Ruiz-Rosado, O. (2018). Densidad radical y tipos de suelos en los que se produce café (*Coffea arabica* L.) en Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 203-215. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1278>
- Hermans, S. M., Buckley, H. L., Case, B. S., Curran-Cournane, F., Taylor, M., & Lear, G. (2017). Bacteria as emerging indicators of soil condition. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1), 1-13. <https://doi.org/10.1128/AEM.02826-16>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Consultada el 30 de abril, 2020, desde <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=17177&s=est>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Cuetzalan del Progreso, Puebla: Consultada el 30 de mayo, 2020, desde <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/21/21043.pdf>
- Jaramillo-Villanueva, J. L., Guerrero-Carrera, J., Vargas-López, S., & Bustamante-González, Á. (2022). Percepción y adaptación de productores de café al cambio climático en Puebla y Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1), e3170. <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3170>
- Jackson, M. L. (1982). *Análisis químico de suelos*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Jenkinson, D. S., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 167-177. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90001-8)
- Li, Y., Chang, S. X., Tian, L., & Zhang, Q. (2018). Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 121, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.024>
- Lince-Salazar, L. A., Sadeghian, K. S. (2016). Producción de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta al manejo específico por sitio de la fertilidad del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 19-29. <https://doi.org/10.22490/21456453.1401>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2015). Brock. *Biología de los microorganismos*. Madrid, España: Editorial Pearson Educación. S. A. ISBN 8490352798
- Martínez, H. E., Fuentes, E. J. P., & Acevedo, H. E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Ochoa-Cordero, M. A., & Urrutia-Morales, J. (2007). *Uso de pollinaza y gallinaza en la alimentación de rumiantes*. San Luis Potosí, México: INIFAP-SAGARPA-CIRNE.
- Osorio-Vega, N. W. (2009). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.). *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 43-71). Medellín, Colombia: Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0003_3
- OJP (Orden Jurídico de Poblano). (2010). *Programa de ordenamiento ecológico local del territorio del municipio de cuetzalan del progreso. Puebla, México: Gobierno del Estado de Puebla*. Consultado el 13 de febrero, 2024, desde https://smadsot.puebla.gob.mx/images/ProgramaOrdenamientoEcologicoCuetzalan2010_1.pdf
- Ren, C., Chen, J., Lu, X., Doughty, R., Zhao, F., Zhong, Z., ... & Ren, G. (2018). Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 4-10.
- Rivadeneira-Pasquel, J. I., & Ramírez-Valverde, B. (2006). El comercio local del café a raíz de su crisis en la Sierra Norte de Puebla. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 10(18), 1-14.
- Römheld, V., & Kirkby, E. A. (2010). Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*, 335, 155-180. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>
- Ruelas-Monjardín, L. C., Nava-Tablada, M. E., Cervantes, J., & Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20(3), 27-40.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Singh, J. S., & Gupta, V. K. (2018). Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of the Total Environment*, 634, 497-500. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373>
- Spohn, M., & Widdig, M. (2017). Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 113, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.05.017>
- Torsvik, V., Salte, K., Sørheim, R., & Goksøyr, J. (1990). Comparison of phenotypic diversity and DNA heterogeneity in a population of soil bacteria. *Applied And Environmental Microbiology*, 56(3), 776-781.
- Vázquez-Alarcón, A. (1997). *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Vela-Correa, G., Rodríguez-Gamiño, L., & López-Blanco, J. (2011). *Descripción Morfológica de Perfiles de Suelos (Manual para Trabajo en Campo)*. Ed: Universidad Autónoma Metropolitana. ISBN 978-607-477-4283
- Vogt, D. J., Tilley, J. P., Edmonds, R. L., & Harrison, R. B. (2015). *Soil and plant analysis for forest ecosystem characterization. Serie*. Walter de Gruyter, Berlin, Germany: Higher Education Press <https://doi.org/10.1515/9783110290479>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J. E., Jones, T. H., Six, J., ... & Ritz, K. (2012). *Soil Ecology and Ecosystem Services*. New York, NY, USA: Oxford University Press.
- Wu, P., & Wang, C. (2019). Differences in spatiotemporal dynamics between soil macrofauna and mesofauna communities in forest ecosystems: the significance for soil fauna diversity monitoring. *Geoderma*, 337, 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.031>
- Zhao, H., Sun, J., Xu, X., & Qin, X. (2017). Stoichiometry of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in China's temperate and alpine grasslands. *European Journal of Soil Biology*, 83, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.09.007>