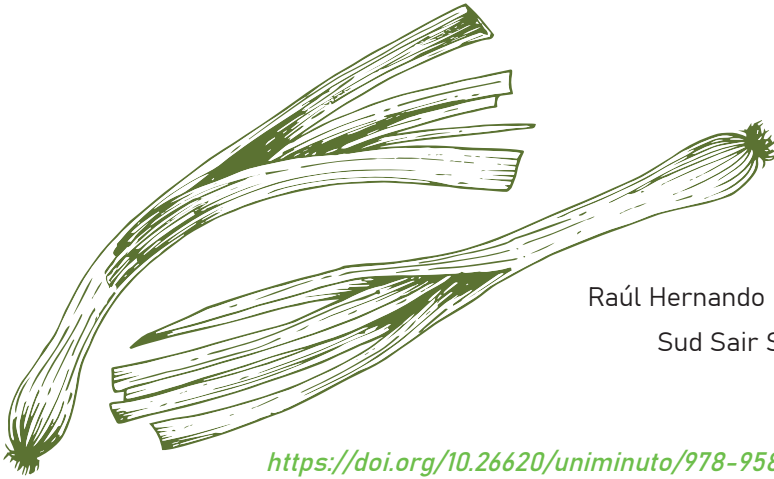


CAPÍTULO 2

Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla



Raúl Hernando Posada Almanza¹
Sud Sair Sierra Roncancio¹

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap2>

Resumen

La agricultura intensiva deteriora la calidad y salud del suelo, generando aumentos en el uso de productos industriales para mantener la productividad. Los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) se han perfilado como alternativa para mejorar la salud del suelo. Este trabajo evalúa la riqueza y composición de HMA en cultivos de cebolla en Boyacá - Colombia y su relación con la salud del suelo. De 15 fincas con diferente grado de deterioro edáfico, se extrajeron e identificaron los HMA, así también se evaluó la fisicoquímica del suelo. Mediante Analisis de Componentes Principales (ACP) se determinaron las variables más relacionadas con la variabilidad de las fincas; para evaluar aquellas características edáficas más influyentes en los HMA, se categorizó cada variable fisicoquímica dentro de los parámetros de salud del suelo y mediante tablas de contingencia se seleccionaron aquellas que mostraran efectos significativos sobre los HMA. Se encontraron 23 morfoespecies de HMA tan variables entre fincas como los parámetros edáficos,

1 Zenkinoko S.A.S

se evidenció exceso de algunos nutrientes y déficit de otros, con mediana a buena CIC y pH poco uniforme. Se concluye que la salud del suelo, evaluada mediante parámetros fisicoquímicos en cultivos de cebolla de bulbo afecta más la composición que la riqueza de especies de HMA.

Palabras clave: Boyacá, calidad del suelo, Colombia, diversidad, servicios ambientales.

Abstract

Intensive agriculture degrades both soil quality and health, leading to the increasing use of industrial products to maintain productivity. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have emerged as an alternative to improve soil health. This study assesses AMF richness and composition in onion crops in Boyacá, Colombia, and their relationship with soil health. AMFs from 15 farms with varying degrees of soil degradation were extracted and identified, along with soil physicochemical properties. Principal Component Analysis (PCA) identified the most associated variables with farm variability. To determine the edaphic factors influencing AMF occurrence each physicochemical variable was categorized within soil health parameters, and contingency tables were used to select those with significant effects on AMF. 23 AMF morphospecies were identified, showing high variability among farms, similar to edaphic parameters. Nutrient imbalances were observed, some in excess and others deficient, along with moderate to high cation exchange capacity (CEC) and heterogeneous pH. In conclusion, soil health, assessed through physicochemical parameters in onion bulb crops, affects AMF species composition more than species richness.

Keywords: Boyacá, Colombia, diversity, environmental services, soil quality

Cómo citar este capítulo

Posada Almanza, R. H., & Sierra Roncancio, S. S. (2025). Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 87–105). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap2>

Introducción

La cebolla es un cultivo de gran importancia económica a nivel mundial, y su producción a menudo se lleva a cabo en regiones con suelos de baja calidad (Baar, 2008). La región de los Andes colombianos es un área clave para la producción de cebolla de bulbo, donde a los cultivos para alcanzar grandes producciones, se les aplica en cada cosecha, nutrientes minerales en forma intensiva, debido a la extracción del suelo por las plantas.

En 2023, la producción de cebolla (*Allium cepa*) en Colombia alcanzó 635.583 toneladas, cultivadas en una superficie cosechada total de 26.820 hectáreas (MinAgricultura, 2024). El departamento de Boyacá contribuyó con el 41% de la producción nacional, con 8.250 hectáreas (31% del área cosechada total) y una producción de 260.970 toneladas, posicionándose como la región líder en la producción de cebolla del país. Otras regiones productoras importantes incluyen Cundinamarca, Norte de Santander y Nariño (MinAgricultura, 2024).

Por su parte, la salud del suelo es la capacidad continua de este para funcionar como ecosistema vital que sustente las plantas, los animales y los humanos (Departamento de agricultura de los estados Unidos [USDA] y Naturales, 2012); esto incluye las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular (Romig et al. 1995). Entre los indicadores químicos de la salud del suelo están la concentración de nutrientes, la materia orgánica y el pH (Moebius-Clune et al. 2016).

El deterioro del suelo es una gran preocupación en muchas regiones agrícolas, ya que puede llevar a una reducción de los rendimientos de los cultivos y a la degradación de los ecosistemas. La alteración de la salud y calidad del suelo son influenciadas de manera diferencial por las prácticas de manejo, tales como la agricultura convencional u orgánica, que incluyen actividades de fertilización, control de plagas y enfermedades mediante productos químicos o métodos biológicos o métodos físicos, y el grado de labranza del suelo que se utiliza (Baweja et al. 2020; Tahat et al. 2020; Villalba et al. 2024). El cultivo de cebolla en Colombia es una práctica altamente influenciada por el uso de enmiendas químicas durante todas las etapas fenológicas del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha, profundamente afectada por el ataque de plagas y la presión de enfermedades en la región (Galeano et al. 2018), lo que indica un alto grado de deterioro del suelo.

Por su parte, los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) son un componente vital de la comunidad microbiana del suelo, formando relaciones simbióticas con más del 80% de las especies vegetales terrestres (Lee et al. 2013). Los beneficios que estos hongos proporcionan a los sistemas agrícolas están bien documentados, ya que pueden mejorar significativamente la adquisición de nutrientes, especialmente de fósforo, y aumentar la resistencia de las plantas a patógenos (Garg & Chandel, 2010; Guo, 2019). Estudios previos han demostrado que los HMA pueden contribuir a una madurez más temprana de las plantas de cebolla con una mayor calidad del bulbo, mayor firmeza y uniformidad en el diámetro del bulbo, además de una menor pérdida de peso durante el almacenamiento (Charron et al. 2001). En los Países Bajos, Galván et al. (2009), ilustraron que los HMA pueden mejorar potencialmente el crecimiento de la cebolla en suelos con condiciones variables de nutrientes.

El mantenimiento de poblaciones de HMA es crucial para combatir los efectos perjudiciales del deterioro del suelo, ya que estos hongos tienen la capacidad de estabilizar la estructura del suelo, aumentar el ciclo de nutrientes y promover la diversidad vegetal dentro del agroecosistema (Guo, 2019; Jeffries et al. 2003); sin embargo, algunos estudios han demostrado una fuerte correlación entre el grado de deterioro del suelo y la diversidad de HMA presentes en los sistemas de cultivo de cebolla (Galván et al. 2009; Jaime et al. 2008). Los suelos con niveles más altos de alteración y degradación tienden a tener menor riqueza de especies y abundancia de estos hongos beneficiosos, limitando su capacidad para apoyar el crecimiento y rendimiento saludable de las plantas de cebolla (Knerr et al. 2018).

Dado el papel esencial que desempeñan los HMA en el mantenimiento de la salud del suelo y el apoyo al crecimiento vegetal, su diversidad y abundancia en los sistemas de cultivo de cebolla pueden tener un impacto profundo en la viabilidad a largo plazo y la productividad de este cultivo (El-Sherbeny et al. 2022; Khokhar, 2019). Comprender la relación entre el grado de deterioro del suelo y las comunidades de HMA es un tema que merece investigación (Knerr et al. 2018). Este estudio tiene como objetivo evaluar la riqueza y composición de HMA en las áreas de cultivo de cebolla en Boyacá - Colombia y su relación con la salud del suelo. Se hipotetiza que debido a que los suelos ya tienen un historial de manejo continuo en cultivo de cebolla de bulbo, las especies de HMA existentes estarán adaptadas a estas condiciones de excesos de nutrientes, por lo tanto, la degradación del suelo tendrá efectos mínimos en la riqueza de especies de HMA, pero habrá cambios en la composición

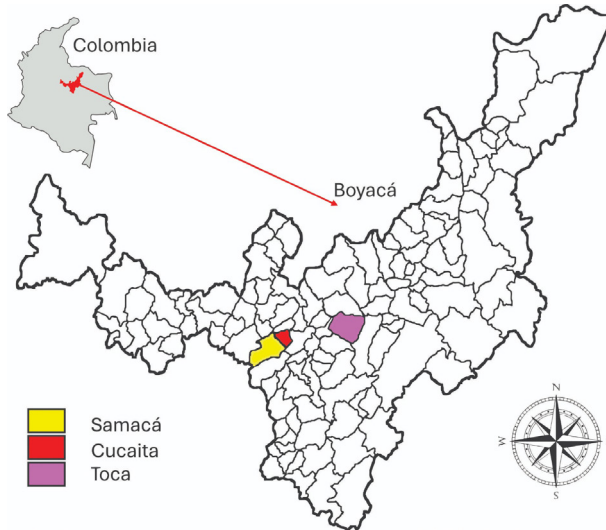
de especies. También se hipotetiza que habrá especies comunes en todos los cultivos, así como algunas especies sensibles a las propiedades edáficas que determinan la salud del suelo.

Métodos

El estudio se realizó en los municipios de Samacá, Toca y Cucaita del Departamento de Boyacá – Colombia en 2023, en cada municipio se seleccionaron fincas con una amplia tradición como productoras de cebolla de bulbo (Figura 2.1).

Figura 2.1

Mapa de los municipios de Cucaita, Toca y Samacá en el departamento de Boyacá



Fuente: Elaboración propia

De cada municipio se seleccionaron 5 fincas y en cada una de ellas se zonificaron como parte alta, media y baja para fincas con cierto grado de pendiente, pero si era plano, entonces como lotes 1, 2 o 3; de cada zona se seleccionaron muestras compuestas de la rizosfera (3-10 cm de profundidad) de 5 plantas seleccionadas aleatoriamente, hasta completar un kilo de cada una. De cada una de las muestras se tomó una submuestra para determinación de la diversidad de micorrizas arbusculares y el resto de material se envió debidamente etiquetado para análisis físico-químico al laboratorio de suelos

del Instituto Geográfico Agustín Codazzi siguiendo sus propias metodologías para determinación de:

Textura de suelo (Hidrómetro de Bouyoucos – Densimétrico. Método IGAC adaptado a los suelos Colombianos), pH (Potenciométrico en relación suelo/ agua 1:1), Carbono total (oxidación completa y cuantificación por infrarrojo), fósforo disponible (Bray II – Espectrofotométrico. Modificado por el IGAC y adaptado a los suelos colombianos) y, Capacidad de intercambio catiónica (Extracción con Acetato de Amonio 1M pH 7 – Volumétrico y cuantificación por volumetría), Bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio): Extracción con acetato de amonio 1M pH 7 y cuantificación por absorción-emisión atómica, Nitrógeno total: Kjeldahl y titulación potenciométrica o Combustión (oxidación completa) en Analizador Elemental, Carbono orgánico por Walkley-Black y cuantificación por volumetría, Retención fosfórica: Fijación de fósforo y cuantificación por espectrofotometría en el rango visible (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1998).

Para conocer la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares se procedió a realizar su extracción a partir de suelo e identificación morfológica microscópica. Las esporas fueron extraídas de cada zona de cada finca, para un total de 45 muestras, de acuerdo con la técnica de tamizaje húmedo, seguido de centrifugación en gradiente de sacarosa como está descrito en Sánchez de Prager et al. (2010). La extracción de las esporas se realizó en un estereoscopio Carl Zeiss modelo STEMI 305 y se montaron en láminas portaobjetos, tiñéndolas con una mezcla de polivinil glicerol (PVGL) y reactivo de Melzer en proporción 1:1 (v/v) (Brundrett et al. 1994) para su posterior identificación.

Solo las esporas que parecían viables (basados en la apariencia y presencia de contenido citoplasmático) fueron contadas e identificadas microscópicamente (generalmente 1000 aumentos) a morfoespecie o a su categoría superior a partir de parámetros morfológicos de las esporas como: color de la espora y de la hifa de soporte, presencia o ausencia de escudo, número de paredes y capas, forma y unión de la hifa de soporte, presencia, ausencia y posición de septo, presencia de cicatrices, presencia de sáculo, ornamentaciones, esporas agrupadas o solitarias, tipo de agrupación y la reacción en Melzer. La identificación a género fue hecha con base en literatura e identificada a nivel de especie, cuando fuera posible, comparándolos con la información disponible en el International Culture Collection of Arbuscular

y Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi - INVAM (<https://invam.wvu.edu/>), la colección del profesor Sidney Stürmer (<https://sites.google.com/site/cicgfm/home>) y con la colección de Glomeromycota del profesor Januzs Blaskowski (www.zor.zut.edu.pl), Blaszkowski, (2012) y nuevas descripciones de especies (hasta diciembre 2023). En el caso de los morfotipos que encajan a género, pero no a especie, el morfo fue numerado en secuencia dentro del género. Finalmente, los nombres científicos fueron actualizados de acuerdo a Micobank (<https://www.mycobank.org/>).

Análisis de datos.

A los datos se les organizó en dos grupos, físico-químicos y biológicos (abundancia relativa de morfoespecies de HMA), a cada grupo se le realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el objeto de discriminar las variables con menos aporte a la varianza y reducir las dimensiones, en todas ellas se evaluó la determinante como criterio de aceptación superior a 0.00.

Con el objeto de evaluar el efecto de cada una de las variables edáficas sobre cada una de las especies de HMA, se categorizaron todas las variables físico-químicas de acuerdo a sus valores siguiendo a Osorio, (2012) para la mayoría de los parámetros, discriminando entre valores ideales, bajos o altos y para las relaciones entre cationes en deficientes, bajos, óptimos, altos o excesos para una buena calidad del suelo con fines agrícolas (datos ordinales); mientras que las morfoespecies de HMA fueron contadas de 0 a 3 de acuerdo a su frecuencia de aparición (nominales).

Con los datos categorizados se procedió a realizar tablas de contingencia que permiten sacar predicciones del comportamiento de las diferentes especies en función de los parámetros edáficos del suelo; su nivel de independencia fue valorado por medio de la V de Kramer (mide el grado de intensidad en que dos variables están relacionadas, donde un valor 0.6-0.8 es fuerte y 0.8-1.0 es muy fuerte) y su valor P asociado.

Resultados y discusión

Comenzando con los análisis físicoquímicos de suelos (Tabla 2.1), una mayor disponibilidad o exceso de P, tal como ocurre en la mayoría de las fincas, debido en muchos casos por aplicación sin asesoría técnica, disminuye la disponibilidad de micronutrientes (Roshinus-Tsufac et al. 2021), la cantidad

de fósforo retenido no es excesiva, siendo acorde con el pH del suelo. Las cantidades de carbono y de nitrógeno están entre bajas y medias para clima frío (IGAC, 1998), cayendo en categorías de muy bajo a óptimas de acuerdo a la finca seleccionada (Moebius-Clune et al. 2016), a pesar de esto conservan una adecuada proporción C/N; cuatro tipos de textura, donde la más favorable para la CIC es la arcillosa, aunque no es un parámetro de salud del suelo, si es necesario tomarla en cuenta para la interpretación de muchos otros parámetros (Moebius-Clune et al. 2016).

Tabla 2.1

Resultados de análisis físico-químicos de suelos de fincas productoras de cebolla de bulbo seleccionadas

ID	Municipio	Textura	Are			pH	CO			Ni	SB	C/N				CIC				Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	S	
			Lim	Arc			M0					P.di	P.re											
			%			%			(Mg / Kg)				(Cmol/Kg)											
M01	Cu	FArA	46	27	27	6.1	0.84	1.44	0.07	95	11.9	180.9	48.6	12.6	9.5	2.4	0.6	0.1	12.6	3.9	3.90	15.4	19.3	13
M02	Cu	FAr	38	29	33	5.1	4.37	7.54	0.39	27	11.5	146.7	88.8	33.3	5.4	2.4	1.3	0.0	9.1	2.2	1.91	4.3	6.2	16
M03	Cu	F	40	38	23	5.1	4.51	7.77	0.39	27	11.6	23.5	89.1	36.9	5.2	3.5	1.2	0.0	10.0	1.5	2.84	4.2	7.0	12
M04	Cu	FAr	32	31	37	6.9	0.86	1.48	0.07	95	12.3	130.8	34.6	16.4	14.3	4.5	1.0	0.4	20.3	3.2	4.33	13.9	18.2	14
M05	Sa	Ar	35	23	42	7.5	0.82	1.41	0.07	95	11.7	84.8	36.4	13.9	33.9	4.4	0.8	0.2	39.2	7.7	5.39	41.4	46.7	17
M06	Sa	Ar	36	21	44	5.5	1.35	2.33	0.12	83	11.3	29.0	53.0	16.0	8.0	4.5	0.7	0.1	13.4	1.8	6.10	10.9	16.9	20
M07	To	Ar	31	19	50	5.5	1.10	1.90	0.09	83	12.2	130.4	47.8	10.6	8.1	4.1	1.5	0.2	13.8	2.0	2.71	5.4	8.1	16
M08	To	F	44	33	23	6.2	1.57	2.71	0.14	95	11.3	60.0	36.0	13.7	8.9	3.9	1.0	0.2	14.0	2.3	3.79	8.6	12.4	16
M09	To	FAr	35	31	36	6.3	2.30	3.97	0.20	87	11.5	19.9	47.5	20.5	12.5	4.2	1.1	0.1	17.9	3.0	3.81	11.5	15.3	14
M10	To	F	45	41	15	6.3	1.43	2.46	0.12	95	11.9	111.8	36.8	7.5	4.5	2.4	0.7	0.0	7.7	1.9	3.36	6.3	9.7	13
M11	To	FArA	54	23	23	5.8	1.40	2.42	0.12	57	11.7	72.5	45.6	10.7	3.6	1.8	0.7	0.0	6.1	2.0	2.50	5.0	7.5	19
M12	Cu	F	48	31	21	6.8	1.34	2.32	0.12	95	11.2	211.1	19.5	11.3	9.5	2.3	0.9	0.1	12.7	4.2	2.42	10.1	12.6	12
M13	Sa	Ar	28	29	44	7.8	0.64	1.11	0.06	95	10.7	323.7	35.9	14.6	19.5	3.6	1.2	0.1	24.3	5.5	2.89	15.8	18.7	14
M14	Sa	FAr	30	35	35	6.0	0.37	0.64	0.03	95	12.4	94.0	30.6	12.4	10.0	3.0	0.4	0.2	13.5	3.4	7.40	24.9	32.3	7
M15	Sa	FAr	38	23	39	7.2	1.05	1.81	0.09	95	11.7	172.3	56.9	15.3	21.0	3.5	1.1	0.1	25.7	6.0	3.18	19.0	22.2	11

Nomenclatura= Cu: Cucaita, Sa: Samaná, To: Toca, Are: Arena, Lim: Limo, Arc: Arcilla, CO: Carbono orgánico, Ni. Nitrógeno, SB: Saturación de bases, BT: Bases totales, CIC: Capacidad de Intercambio catiónico, P.di: Fósforo disponible, P.re: Fósforo retenido, S: Riqueza de HMA.

Fuente: Elaboración propia

Los valores de pH están en el rango de pH (5.1-7.8) entre los ácidos y ligeramente alcalinos (adecuados para cultivos de cebolla), lo cual hace que gran cantidad de nutrientes esté disponible (Departamento de agricultura de los estados Unidos [USDA], 1999; Hartemink & Barrow, 2023). En general, con una buena a excelente saturación de bases, que acompañada de una mediana a alta CIC indica buena disponibilidad de bases para la nutrición vegetal (IGAC, 1998). Afín a estos parámetros, los cationes intercambiables y sus proporciones presentan valores muy variables de acuerdo con el cultivo de proveniencia y pueden infringir diferencias en los resultados obtenidos en cualquier parámetro biológico influenciado. Finalmente, la riqueza de HMA (S) no parece ser influenciada por la salud del suelo, ya que solo la finca M14 presentó valores más bajos que las demás (Tabla 2.1).

Análisis multivariados

Se encontraron 23 morfoespecies de HMA, distribuidos en los géneros *Acaulospora* (6), *Cetraspora* (1), *Claroideoglossum* (1), *Funneliformis* (2), *Gigaspora* (1), *Glomus* (5), *Intraspora* (1), *Paraglossum* (2), *Rhizoglossum* (3) y *Scutellospora* (1). De estas especies *Acaulospora* sp02, *Acaulospora mellea*, *Funneliformis coronatum* y *Glomus trufemii* fueron encontradas en todas las fincas, lo que denota que estas especies son resistentes a las condiciones extremas presentes en el cultivo de cebolla en Boyacá.

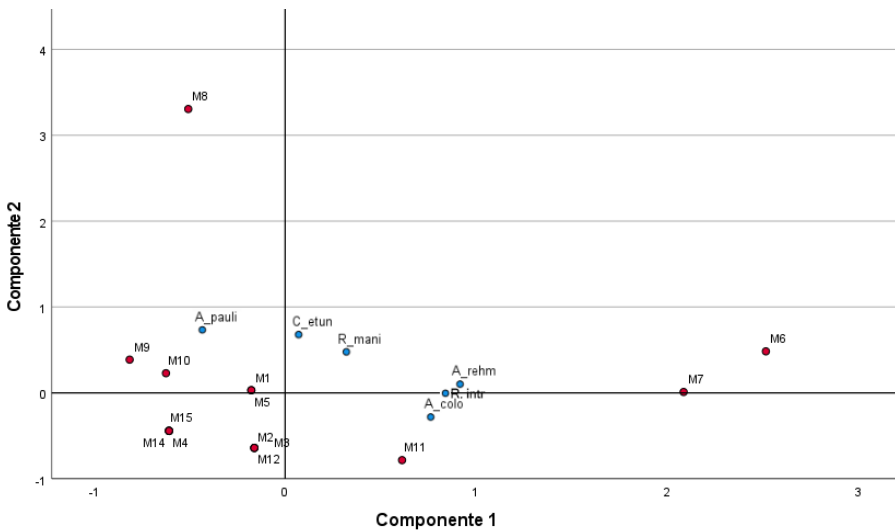
Para las morfoespecies se encontraron dos componentes principales, los cuales explican el 80.3% de la varianza, el primer componente representado por (*A. rehmsii*, *R. intraradices*, *A. colombiana* y *R. manihotis*) explica el 47.5% y el segundo componente (*A. paulinae* y *C. etunicatum*) explican el 32.8%. En todos los casos corresponden a especies de HMA poco frecuentes y con las mayores frecuencias relativas de aparición para el primer componente asociado a las fincas M06 y M07, mientras en el segundo caso a la finca M08. La mayoría de las fincas no tiene especies claramente distintivas. Posiblemente hay diferentes factores en estas fincas que diferencian y pueden promover la aparición de estas especies (Figura 2.2).

Para los parámetros físico-químicos tres componentes explican el 89.9% de la varianza, todos ellos relacionados con la salud del suelo, el primer componente, al que se le denominó relaciones iónicas y el pH (Ca^+/Mg^+ , Ca^+ , BT , Ca^+/K^+ , $(\text{Ca}^{++}\text{Mg}^+)/\text{K}^+$ y en menor medida pH) explican el 41.1%, donde se resalta la finca M05 por sus altos valores, y el segundo componente, al que

se le denominó nutricional (CIC, N, CO y P.re), explican el 32.6%, donde se resaltan las fincas M02 y M03 por sus altos contenidos; finalmente el Mg⁺ y la arena explican el 16.3%. Se encontró un alto contraste en los parámetros físico-químicos edáficos en las fincas, algunos de los cuales en exceso o déficit para una buena salud del suelo. Claramente al comparar el APC de los componentes bióticos y los físico-químicos, no hay una coincidencia de las fincas, por lo tanto es muy probable que no sean los parámetros edáficos en conjunto los que determinen la abundancia relativa de las especies (Figura 2.3).

Figura 2.2

APC para las especies de hongos de micorriza arbuscular, a partir de los datos de las variables mencionadas en la tabla 2.1 de 15 fincas productoras de cebolla en Boyacá



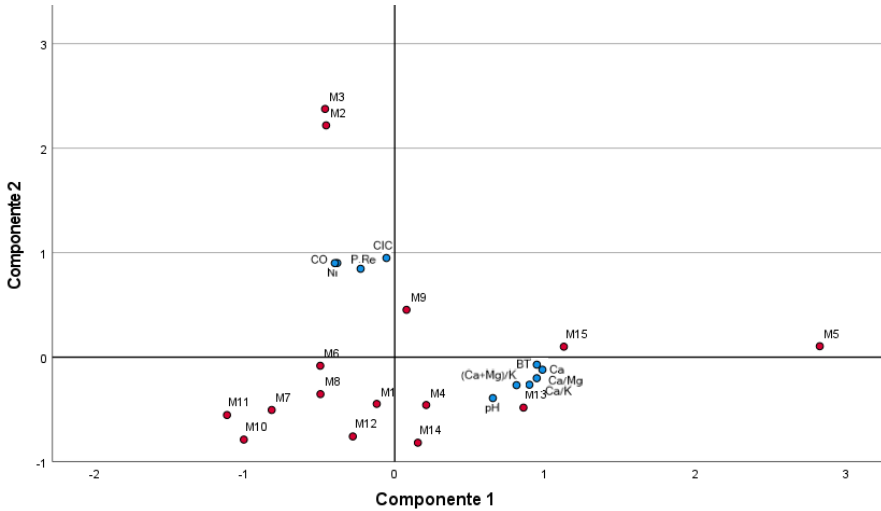
Fuente: Elaboración propia

Tablas de contingencias

Para las tablas de contingencia se consideraron solo los valores de V-Kramer superiores a 0.7 (fuertes a muy fuertes) con un valor de P < 0.05 y se muestran solo los valores que cumplen con ambos criterios (Tabla 2.2). Especies con valores V-Kramer que no cumplían con los criterios anteriores no fueron detalladas o aparecen con (-).

Figura 2.3

ACP para los parámetros físico-químicos edáficos, a partir de los datos de 15 fincas productoras de cebolla en Boyacá



Fuente: Elaboración propia

Es de destacar que, dentro de las variables físico-químicas evaluadas, la textura y el fósforo disponible no mostraron relación significativa con ninguna morfoespecie de HMA, mientras los contenidos de magnesio y sodio no mostraron variabilidad edáfica con respecto a la calidad del suelo, por lo tanto, no se muestran en las tablas de contingencia (Tabla 2.2).

Es notorio que *Scutellospora* sp.01 es una especie influenciada por 5 parámetros químicos del suelo, seguida de *Rhizogloium intraradices* y *Acaulospora* sp.01 (3 parámetros). El grupo de los Gigasporales se ha encontrado que es una especie altamente sensible, se ha reportado anteriormente que, de preferencia, en zonas poco intervenidas como bosques (Devia-Grimaldo et al. 2021) y cultivos con cero labranza como el café (Hernandez-Acosta et al. 2021; Posada et al. 2016), donde las condiciones del suelo son más estables y menos perturbadas (Chagnon et al. 2013; van der Heyde et al. 2017), aquí se encuentra preferencia por ambientes ligeramente ácidos, con contenidos adecuados de calcio, sin saturación de bases y con un bajo a ideal contenido de Ca^+ en la proporción Ca^+/Mg^+ , como son unos suelos saludables.

Estudios específicos de *Rhizogloium intraradices* con respecto a su respuesta a las propiedades físico-químicas del suelo no fueron encontrados, en el

presente estudio se encontró que tiene preferencia para esporulación en sitios con bajos contenidos de Ca^+ en la proporción Ca^+/Mg^+ y con alta saturación de bases, mientras *Acaulospora sp01* es más asociada con bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno poco saludables de acuerdo al IGAC (1998) y Osorio (2012).

Tabla 2.2

Valores de V-Kramer (P asociado) para las variables edáficas influyentes en la abundancia relativa de Hongos de micorriza arbuscular en 15 fincas productoras de cebolla de bulbo

Especie de HMA	pH	Ca^+	K^+	CO	Ni	CIC	SB	Ca^+/Mg^+	Ca^+/K^+	$(\text{Ca}^++\text{Mg}^+)/\text{K}^+$
<i>Acaulospora_sp01</i>	0.810 (0.033)	-	-	0.784 (0.026)	0.784 (0.026)	-	-	-	-	-
<i>Acaulospora_sp02</i>	-	-	-	-	-	0.707 (0.005)	-	-	-	-
<i>Acaulospora_colombiana</i>	0.794 (0.041)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Acaulospora_rehmii</i>	-	0.784 (0.010)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Funneliformis_coronatus</i>	-	-	-	0.784 (0.026)	0.784 (0.026)	-	-	-	-	-
<i>Gigaspora_sp01</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.715 (0.018)	-
<i>Glomus_trufemii</i>	-	-	1 (0.002)	-	-	-	-	-	-	-
<i>Glomus_ambisporum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.722 (0.016)
<i>Glomus_macrocarpum</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.707 (0.024)	-	-
<i>Glomus_microcarpum</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.707 (0.024)	-	-
<i>Intraspora_schenckii</i>	-	-	-	0.784 (0.01)	0.784 (0.01)	-	-	-	-	-
<i>Rhizogloium_irregulare</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.733 (0.013)
<i>Rhizogloium_intraradices</i>	0.850 (0.055)	-	-	-	-	-	0.829 (0.006)	0.707 (0.024)	-	-
<i>Rhizogloium_manihotis</i>	-	1 (0.001)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Scutellospora_sp01</i>	0.850 (0.055)	0.829 (0.006)	-	-	-	-	0.829 (0.006)	-	1 (0.002)	0.829 (0.016)

Nomenclatura: pH = potencial de Hidrógeno, Ca^+ = Calcio iónico, K^+ = Potasio iónico, Mg^+ = Magnesio iónico, CO= Carbono orgánico, CIC= Capacidad de Intercambio catiónica, SB= Saturación de bases. Las siguientes corresponden a relaciones iónicas. (-) no se muestra el resultado por no cumplir los criterios de V-Kramer.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, al evaluar los factores físico-químicos más influyentes sobre los HMA se encontró poca o nula relación y diferentes patrones con las especies encontradas, lo cual se puede deber en parte a la heterogeneidad edáfica, característica muy común en los suelos agrícolas (Santiago-Mejía et al. 2018; Tiruneh et al. 2021) y muestra variabilidad en preferencias de esporulación de estos hongos ante diferentes condiciones edáficas (Melo et al. 2019), contribuyendo a explicar porqué se encuentra una amplia diversidad de HMA en ambientes cultivados tan diversos en todo el mundo.

Oehl et al. (2017), trabajando con 154 sitios encontró una gran diversidad de especies con esporulación en todos los sitios, otras muy raras y otras con patrones específicos de especies como la intensidad de manejo, el pH, materia orgánica, respiración, textura, altitud o combinaciones de estas. Posteriormente, algunos estudios como el de Melo et al. (2019) mostraron preferencia de algunos géneros por condiciones edáficas particulares, como la familia Acaulosporaceae, en la cual se relacionó negativamente la esporulación con el pH y el fósforo disponible, para la familia Gigasporaceae la relacionó positivamente con incremento con el K disponible y negativamente con el Mg, mientras para la familia Glomeraceae encontró correlación positiva con el Mg⁺ y negativa con el K⁺ y el pH edáficos. Mas recientemente, Devia-Grimaldo et al. (2021) encontraron una relación de la saturación de K⁺ y Na⁺ con la esporulación de las morfoespecies de las familias Glomeraceae y Acaulosporaceae; más ninguno de los autores relacionó las familias, géneros o especies de HMA con los valores ideales para una buena salud del suelo.

En el presente trabajo no se encontraron patrones por familias o géneros, solo especie-específicos, sin embargo se encontraron patrones para algunos de los componentes químicos del suelo que se asocian a diferentes especies de HMA en el cultivo de cebolla: el pH del suelo (con especificidades de acuerdo a la spp), suelos con altos contenidos de Ca⁺ o de K⁺ (poco saludable), suelos con bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno (poco saludable), CIC media a alta (saludable), con alta concentración de bases pero no saturados de éstas (saludable), y suelos con relaciones iónicas como Ca⁺/Mg⁺, Ca⁺/K⁺ o (Ca⁺+Mg⁺)/K⁺, con bajos a ideales contenidos de calcio (saludables). Estos datos indican que diferentes factores edáficos, tanto de suelos saludables o no, se asocian con la esporulación de diferentes especies de HMA, quizás esto contribuye a que este grupo de hongos demuestre proficiencia en servicios ecosistémicos como la toma de K⁺, Mg⁺, Ca⁺ o S⁺, durante condiciones de estrés, tales como suelos salinos (Miransari, 2017). Este hecho contribuye

a que se seleccionen especies de HMA tolerantes a condiciones estresantes (Hijri et al. 2006), manteniendo la riqueza de HMA, pero con comunidades diferentes de acuerdo con las propiedades edáficas.

Conclusiones

En los cultivos de cebolla de bulbo en el departamento de Boyacá se tienen condiciones de agricultura tradicional intensiva, llevando a deterioro de la calidad y salud del suelo, bajo estas condiciones se encuentra presencia de una riqueza de HMA relativamente constante, indicando adaptación de algunas especies a las condiciones de estrés predominantes en estos sistemas.

Como producto de la variabilidad en salud del suelo donde se produce la cebolla de bulbo, las comunidades de HMA esporulan de manera diferencial, algunas especies son constantes en su aparición, mientras otras responden y esporulan como respuesta ante uno o varios parámetros edáficos como el pH, contenidos y proporciones iónicas (Ca^+ , K^+ , Mg^+), y/o bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno.

La salud del suelo, evaluada mediante diferentes parámetros fisico-químicos en cultivos de cebolla de bulbo afecta más la composición que la riqueza de especies de HMA. Aun así, se requieren estudios más amplios que ayuden a dilucidar la relación de la salud del suelo donde se producen los diferentes cultivos con las comunidades de HMA, y estudios guiados que brinden información acerca de los servicios ambientales que brindan este grupo de hongos.

Tomando en cuenta la erosión edáfica asociada a los cultivos de cebolla de bulbo, producto de la intensa actividad agrícola, con sobreexplotación de nutrientes y generando desbalances iónicos, algunas de las especies de hongos de micorriza arbuscular muestran una alta resiliencia, convirtiéndolos en un elemento de biodiversidad microbiana que se resiste a ser eliminado del suelo, mientras otras especies se vuelven sensibles. Son una alternativa para programas de cambio agrícola hacia una agricultura más amigable con el medio ambiente y que puede contribuir en el proceso de restablecimiento de especies aún más sensibles que ellos.

A nivel agrícola, se recomienda la transición a prácticas agroecológicas, con el uso de microorganismos adaptados a las condiciones del suelo, ya que podría favorecer la permanencia y supervivencia de estas especies en el entorno químico saturado predominante.

Recomendaciones

Se requieren estudios más amplios que ayuden a dilucidar la relación de la salud del suelo donde se producen los diferentes cultivos con las comunidades de HMA, y estudios guiados que brinden información acerca de los servicios ambientales que brindan este grupo de hongos.

Referencias

- Baar, J. (2008). From production to application of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural systems: Requirements and needs. *Mycorrhiza*, 361–373. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78826-3_18
- Baweja, Pooja, Savindra Kumar, and Gaurav Kumar. 2020. "Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment." Pp. 265–85 in *Soil Health. Soil Biology*, edited by B. Giri and A. Varma. Springer.
- Blaszkowski, J. (2012). Glomeromycota. En Z. Mirek, J. J. Wójcicki, & M. Zarzyka-Ryszka (eds.), *W. Szafer institute of Botany, Polish Academy of Sciences*.
- Brundrett, M., Peterson, L., Melville, L., Addy, H., McGonigle, T., Schaffer, G., Bougher, N., & Massicotte, H. (1994). Practical methods in mycorrhiza research. En M. Brundrett, L. Melville, & L. Peterson (eds.), *Mycologue Publications*.
- Chagnon, P.-L., Bradley, R. L., Maherali, H., & Klironomos, J. N. (2013). A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in Plant Science*, 18(9), 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.001>
- Charron, G., Furlan, V., Bernier-Cardou, M., & Doyon, G. (2001). Response of onion plants to arbuscular mycorrhizae. *Mycorrhiza*, 11(4), 187–197. <https://doi.org/10.1007/s005720100121>
- Departamento de agricultura de los estados Unidos. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*.
- Departamento de agricultura de los estados Unidos, y Naturales. (2012). *Libere los secretos del suelo. Principios para suelos de alto rendimiento* (p. 2). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/NRCS-Principles-for-High-Functioning-Soils-Factsheet-2021-Spanish.pdf>

- Devia-Grimaldo, L. D., Pérez-Moncada, U. A., López-D, E. O., & Varón-López, M. (2021). Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(177), 1137–1153. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1482>
- El-Sherbeny, T. M. S., Mousa, A. M., & El-Sayed, E.-S. R. (2022). Use of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization to improve the yield of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.094>
- Galeano Mendoza, C. H., Baquero Cubillos, E. F., Molina Varón, J. A., & Cerón Lasso, M. del S. (2018). Agronomic evaluation of bunching onion in the colombian Cundiboyacense high plateau. *International Journal of Agronomy*, 1(8). <https://doi.org/10.1155/2018/4940589>
- Galván, G. A., Parádi, I., Burger, K., Baar, J., Kuyper, T. W., Scholten, O. E., & Kik, C. (2009). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in onion roots from organic and conventional farming systems in the Netherlands. *Mycorrhiza*, 19(5), 317–328. <https://doi.org/10.1007/s00572-009-0237-2>
- Garg, N., & Chandel, S. (2010). Arbuscular mycorrhizal networks: Process and functions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 581–599. <https://doi.org/10.1051/agro/2009054>
- Guo, X. (2019). The role of arbuscular mycorrhiza in sustainable environment and agriculture. In B. Giri, R. Prasad, Q. Wu, & A. Varma (Eds.), *Soil Biology* (55th ed., pp. 501–520). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_23
- Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486(1–2), 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Hernandez-Acosta, E., Banuelos, J., & Trejo-Aguilar, D. (2021). Revisión: Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 1–17.
- Hijri, I., Sykorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi

in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, 15(8), 2277–2289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.02921.x>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1998). Consideraciones generales para interpretar análisis de suelos. *Methods* (3).

Jaime, M. D. L. A., Hsiang, T., & McDonald, M. R. (2008). Effects of *Glomus* intraradices and onion cultivar on *Allium* white rot development in organic soils in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 30(4), 543–553. <https://doi.org/10.1080/07060660809507554>

Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K., & Barea, J.-M. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0546-5>

Khokhar, K. M. (2019). Mineral nutrient management for onion bulb crops – a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(6), 703–717. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1613935>

Knerr, A. J., Wheeler, D., Schlatter, D., Sharma-Poudyal, D., du Toit, L. J., & Paulitz, T. C. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in organic and conventional onion crops in the Columbia Basin of the Pacific northwest United States. *Phytobiomes Journal*, 2(4), 194–207. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-18-0022-R>

Lee, E.-H., Eo, J.-K., Ka, K.-H., & Eom, A.-H. (2013). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. *Mycobiology*, 41(3), 121–125. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2013.41.3.121>

Melo, C. D., Walker, C., Krüger, C., Borges, P. A. V., Luna, S., Mendonça, D., Fonseca, H. M. A. C., & Machado, A. C. (2019). Environmental factors driving arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with endemic woody plant *Picconia azorica* on native forest of Azores. *Annals of Microbiology*, 69(13), 1309–1327. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01535-x>

MinAgricultura. (2024). *Cien familias productoras de cebolla de Ábrego, en Norte de Santander, recibieron apoyos de MinAgricultura*. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/CienFamiliasProductorasCebollaAbrego.aspx>

- Miransari, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In W. Qiang-Sheng (Ed.), *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (1st ed., pp. 147–161). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_7
- Moebius-Clune, B., Moebius-Clune, D., Gugino, B., Idowu, O., Schindelbeck, R., AJ, R., van Es, H., Thies, J., Shayler, H., McBride, M., Kurtz, K., Wolfe, D., & Abawi, G. (2016). *Comprehensive assessment of soil health – The Cornell framework training manual (3rd ed.)*. bit.ly/3qFoBk2
- Oehl, F., Laczko, E., Oberholzer, H.-R., Jansa, J., & Egli, S. (2017). Diversity and biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 53(7), 777–797. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1217-x>
- Osorio, N. W. (2012). Como interpretar los resultados del análisis de fertilidad del suelo. *Boletín del Manejo Integral del Suelo y la Nutrición Vegetal*, 1(6), 3.
- Posada, R. H., Sánchez de Prager, M., Heredia-Abarca, G., & Sieverding, E. (2016). Effects of soil physical and chemical parameters, and farm management practices on arbuscular mycorrhizal fungi communities and diversities in coffee plantations in Colombia and Mexico. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0030-0>
- Romig, D. E., Garlynd, M. J., Harris, R. F., & McSweeney, K. (1995). How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil Water Conservation*, 50, 229–236.
- Roshinus Tsufac, A., Princely Awazi, N., & Kfuban Yerima, B. P. (2021). Characterization of agroforestry systems and their effectiveness in soil fertility enhancement in the south-west region of Cameroon. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.100024>
- Sánchez de Prager, M., Posada, R. H., Velásquez Pomar, D., & Narvaez Castillo, M. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular (1st ed.)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Santiago-Mejia, B. E., Martínez-Mez, M. R., Rubio-Granados, E., Vaquera-Huerta, H., & Sánchez-Escudero, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en

la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(2), 275–288. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v15n2/1870-5472-asd-15-02-275.pdf>

- Tahat, Monther, Kholoud Alananbeh, Yahia Othman, and Daniel Leskovar. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(12):4859. doi: 10.3390/su12124859.
- Tiruneh, G. A., Alemayehu, T. Y., Meshesha, D. T., Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., & Haregeweyn, N. (2021). Spatial variability of soil chemical properties under different land-uses in Northwest Ethiopia. *PLOS ONE*, 16(6), e0253156. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253156>
- van der Heyde, M., Ohsowski, B., Abbott, L. K., & Hart, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungus responses to disturbance are context-dependent. *Mycorrhiza*, 27(5), 431–440. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0759-3>
- Villalba, A., Alcides, C., González, A., Szostak, J., and Sanabria, M. (2024). Explorando El Estado Del Arte de La Labranza y Su Impacto En La Calidad Del Suelo y La Productividad Agrícola: Una Revisión Crítica de Los Últimos 20 Años. *Investigación Agraria* 26(2):111–24. doi: 10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806.