

A close-up photograph of soil with a yellow seedling and a wooden stick. The soil is dark brown and appears moist. The seedling is bright yellow and has a small white root system. The wooden stick is light brown and is lying horizontally across the soil. The background is a blurred view of the same soil and wood.

Los cultivos cubierta de
invierno mejoran la fertilidad y
la calidad del suelo gracias a
su efecto en la micorrización

Hontoria C.¹
García-González I.¹
Gabriel J.L.^{2,3}
Alonso-Ayuso M.^{1,2}
Quemada M.^{1,2}

Introducción

En la actualidad, importantes problemas ambientales como la erosión o la contaminación de acuíferos se atribuyen a un uso excesivo de laboreo, fertilización y fitosanitarios en los sistemas agrícolas. Uno de los principales efectos de la sobreintensificación de la agricultura es la degradación del suelo, en especial la degradación biológica, que pone en peligro el suministro de importantes servicios ecosistémicos proporcionados por el suelo (Lehman *et al.*, 2015). Este problema es más relevante en España puesto que las condiciones mediterráneas resultan desfavorables para la acumulación de materia orgánica y estos bajos contenidos aumentan la vulnerabilidad del suelo a amenazas como la erosión y la contaminación.

La agricultura de conservación constituye un manejo esencial en el mantenimiento y recuperación de la salud y funcionalidad de los suelos degradados, siendo las cubiertas vegetales o cultivos cubierta (CC) una práctica de gran interés dentro de ella. Además de su uso en las calles de cultivos leñosos, como el olivar o la vid, los CC también se pueden emplear en sustitución del barbecho en las rotaciones de cultivos anuales, especialmente cuando se trata de CC de invierno que se combinan con cultivos de verano en regadío.

Los CC protegen al suelo frente a la erosión, refuerzan la calidad del suelo mediante el aumento del carbono orgánico y el nitrógeno, la agregación y el reciclado de nutrientes, facilitan el control de malas hierbas y enfermedades, o reducen el lavado de nitratos con la consiguiente protección de las aguas freáticas (Snapp *et al.*, 2005; Clark, 2008; Schipanski *et al.*, 2014). Además, han sido señalados como una interesante estrategia para la adaptación y mitigación al cambio climático (Kaye y Quemada, 2017).

Otro aspecto a destacar es el efecto positivo de los CC en la salud del suelo con la estimulación de la actividad biológica. En concreto los CC favorecen el desarrollo de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA), uno de los grupos más importantes de microorganismos en el suelo debido a los importantes servicios ecológicos que proporcionan. Los HMA son hongos que viven en simbiosis con la mayoría de las plantas y, a cambio de carbono, proporcionan numerosas ventajas a sus hospedadoras. Así, mejoran la absorción de nutrientes, especialmente aquellos menos móviles como el fósforo, aumentan la tolerancia de las plantas a situaciones de estrés, protegen frente a patógenos, mejoran las condiciones físicas del suelo, etc.,

¹Dpto. Producción Agraria. ETSI Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid; c.hontoria@upm.es

²Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales, CEIGRAM-UPM, Senda del Rey 13, 28040 Madrid.

³Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-INAGEA). Ctra. de la Coruña km. 7.5, 28040 Madrid.

contribuyendo con ello a mejoras incluso a nivel de productividad y calidad final de la cosecha (Smith y Read, 2008).

Debido a los beneficios que proporcionan, el manejo agronómico de los sistemas agrarios debe incluir prácticas que estimulen los HMA nativos y potencien su simbiosis con los cultivos. Dado que los HMA son simbiosiontes obligados y precisan de una planta huésped, la sustitución del barbecho tradicional por CC en las rotaciones favorece la supervivencia del inóculo durante el periodo de intercultivo, lo que facilita una colonización más temprana y rápida de las raíces del cultivo principal subsiguiente. Este efecto se ve potenciado si el uso de CC se combina con un laboreo reducido que conserve en mayor medida la integridad del micelio del hongo (Brito *et al.*, 2012).



Ensayo de campo en la Finca Experimental "La Chimenea" (IMIDRA) en Aranjuez.

Pero surgen varios interrogantes con respecto a los beneficios de los CC en relación con los HMA y la micorrización del cultivo subsiguiente: ¿Importa la elección de la especie de CC? ¿Hasta dónde persiste la herencia de los CC en el cultivo principal subsiguiente? ¿Hasta qué punto influyen las condiciones ambientales de cada año agrícola? ¿El aumento en la micorrización se traduce en un aumento de producción?

Para dar respuesta a estas preguntas, hemos llevado a cabo un estudio para evaluar cómo el uso de CC en sustitución del barbecho influye en la actividad de los HMA y la micorrización del cultivo principal subsiguiente y en qué medida afecta a la calidad del suelo y al estado nutricional y de desarrollo del cultivo principal. Nuestra hipótesis es que los CC transmiten un legado al cultivo principal de forma que los CC favorecen el inóculo de los HMA, potenciando la micorrización del cultivo principal subsiguiente; lo anterior tiene efectos positivos en el desarrollo y en la calidad del suelo con el consiguiente aumento del rendimiento.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la Finca Experimental La Chimenea (IMIDRA) situada en el valle del río Tajo cerca de Aranjuez (Madrid, España). El clima es Mediterráneo semiárido, con una temperatura media anual de 14.6°C y una precipitación media anual de 373 mm. El suelo es un Calcisol Háplico, con un horizonte superficial que presentaba al inicio del ensayo un pH de 8,2, un contenido de materia orgánica del 1,8%, una riqueza en carbonato cálcico del 20% y una textura franco-arcillosa.

El ensayo de campo se estableció en 2006 y consistió en introducir dos CC de invierno (cebada, veza) en el intercultivo del cultivo principal de verano, normalmente maíz y en menor medida girasol, ambos en regadío. Inicialmente se estableció un tercer tratamiento de CC (crucífera) pero finalmente se descartó por problemas de desarrollo. El tratamiento control consistió en un barbecho con suelo desnudo. Los tres tratamientos (2 CC+ barbecho) fueron distribuidos al azar en parcelas experimentales de 12 m x 12 m con 4 repeticiones de campo que se mantuvieron desde abril de 2006 hasta noviembre de 2016 (10 años).

En otoño, la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y la veza (*Vicia villosa* L. o *V. sativa* L.) se sembraron a voleo (180 y 150 kg/ha, respectivamente) y se enterraron ligeramente con un pase de cultivador a 5 cm de profundidad. Los CC no recibieron ninguna fertilización y a finales de marzo fueron terminados con glifosato al 2%. El pase de cultivador y el glifosato se aplicaron en todo el ensayo. En abril se sembró el cultivo principal (*Zea mays* L. o *Helianthus annuus* L.) con una sembradora directa sobre los restos de los CC. Este manejo supuso una reducción del laboreo en comparación con el laboreo convencional empleado previamente. El riego



Detalle del cultivo cubierta.

se realizó por aspersión atendiendo a las necesidades de evapotranspiración del cultivo. La fertilización mineral fue variable a lo largo de los 10 años del ensayo con una reducción en algunas campañas para potenciar la respuesta de los HMA al estrés nutricional. La cosecha se realizó normalmente a finales de septiembre.

En esta publicación nos centramos en el caso del maíz como cultivo principal y mostramos una selección de variables del total analizado. El estudio se realizó en

**TECNOLOGÍA
MICHELIN ULTRAFLEX
MENOR COMPACTACIÓN
PARA MAYOR PRODUCCIÓN**

+4%



Harper Adams
University



ESTUDIOS DE LA UNIVERSIDAD HARPER ADAMS
DEMUESTRAN QUE LA UTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS
CON TECNOLOGÍA MICHELIN ULTRAFLEX
APORTAN HASTA UN **4% ADICIONAL DE RENDIMIENTO**
AGRONÓMICO GRACIAS A SU MENOR PRESIÓN
Y COMPACTACIÓN DEL SUELO.



Más información en la web agricola.michelin.es
o en tu taller certificado MICHELIN Exelagri.



las campañas de 2012-13, 2013-14 y 2015-16, esto es, 7, 8 y 10 años respectivamente desde el inicio del ensayo. En cada campaña se seleccionaron varias fechas de muestreo entre 21 y 69 días después de la siembra del maíz. Para cada fecha y parcela experimental se tomaron 4-5 plantas de maíz con sus raíces y suelo (aprox. 8-10 cm por lado y profundidad) que conformaron posteriormente una muestra compuesta por parcela.

En el laboratorio se procedió a la separación de biomasa aérea, raíces y suelo. Para determinar el porcentaje de colonización micorrícica, las raíces se tiñeron después de su vaciado con KOH 10% (Philips y Hayman, 1970) y se cuantificó la colonización en microscopio (McGonigle *et al.*, 1990). La longitud del micelio extra radical se determinó a partir de 2 g de suelo que fue tamizado, teñido, filtrado y cuantificado según una adaptación de García-González *et al.* (2016) basada en el método de Jacobsen *et al.* (1992). La abundancia de esporas se determinó por conteo al microscopio después de un tamizado en húmedo y posterior centrifugación con sacarosa (Sieverding *et al.*, 1991). La biomasa aérea se desecó a 60-65°C y se molió para posterior análisis. Las concentraciones de C y N se obtuvieron mediante el método de combustión Dumas (Trumac CN, Leco Instruments). La concentración de fósforo (P) se obtuvo colorimétricamente (Watababe y Olsen, 1965) o por espectroscopia ICP-OEA. Como indicador de calidad del suelo, se determinó el % de agregados estables al agua (%AEA) a partir de 4 g de agregados de tamaño 1-2 que se tamizaron en húmedo a través de un tamiz de 250 micras (Kemper y Roseanau, 1986). Como medida de desarrollo de las plantas se registró la altura de las plantas (30 plantas por parcela) a distintas fechas. En el momento de la cosecha, se registró la biomasa y la producción de grano.

Para el análisis estadístico se comprobó la normalidad y homocedasticidad de las variables, transformándolas en caso necesario. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y el test LSD de Fisher para comparar las medias ($P < 0,05$) entre los tres tratamientos. Se estudiaron las relaciones lineales entre las variables a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson. El estudio estadístico se llevó a cabo con el programa STATGRAPHICS Centurion XVII.

Resultados y discusión

La cebada estimuló la abundancia de HMA y la micorrización en el siguiente maíz

Todas las variables analizadas relacionadas con los HMA mostraron los valores más altos cuando el maíz



Detalles del suelo.

se cultivó después de la cebada (García-González, 2016, 2018; Hontoria *et al.*, 2019). Así, con respecto al tratamiento del barbecho, el uso de la cebada incrementó 10-50% la colonización de las raíces, 40-120% la longitud de micelio y 50-90% la abundancia de esporas (Figura 1). El gran desarrollo radical de la cebada y su arquitectura pueden explicar el efecto beneficioso de la gramínea. Destacamos que este comportamiento se observó en diferentes años y bajo condiciones ambientales diversas.

La veza mostró un comportamiento intermedio, más próximo al barbecho

En general, la veza mostró un comportamiento intermedio entre la cebada y el barbecho en el mejor de los casos y muy a menudo no diferente de él. Este resultado fue en parte inesperado porque las plantas leguminosas

son conocidas por su alta afinidad por los HMA. Además, hay estudios que indican que los CC de leguminosas mejoran los parámetros micorrícicos con respecto al barbecho e incluso en mayor medida que las gramíneas según un metaestudio (Bowles *et al.*, 2016). En contra

de ello, nuestros datos muestran una mayor capacidad de la gramínea para transmitir su legado al cultivo principal que se establece después, lo que no es incompatible con que la veza pudiera tener mayor colonización por HMA en sí misma que la cebada. Sin embargo, la

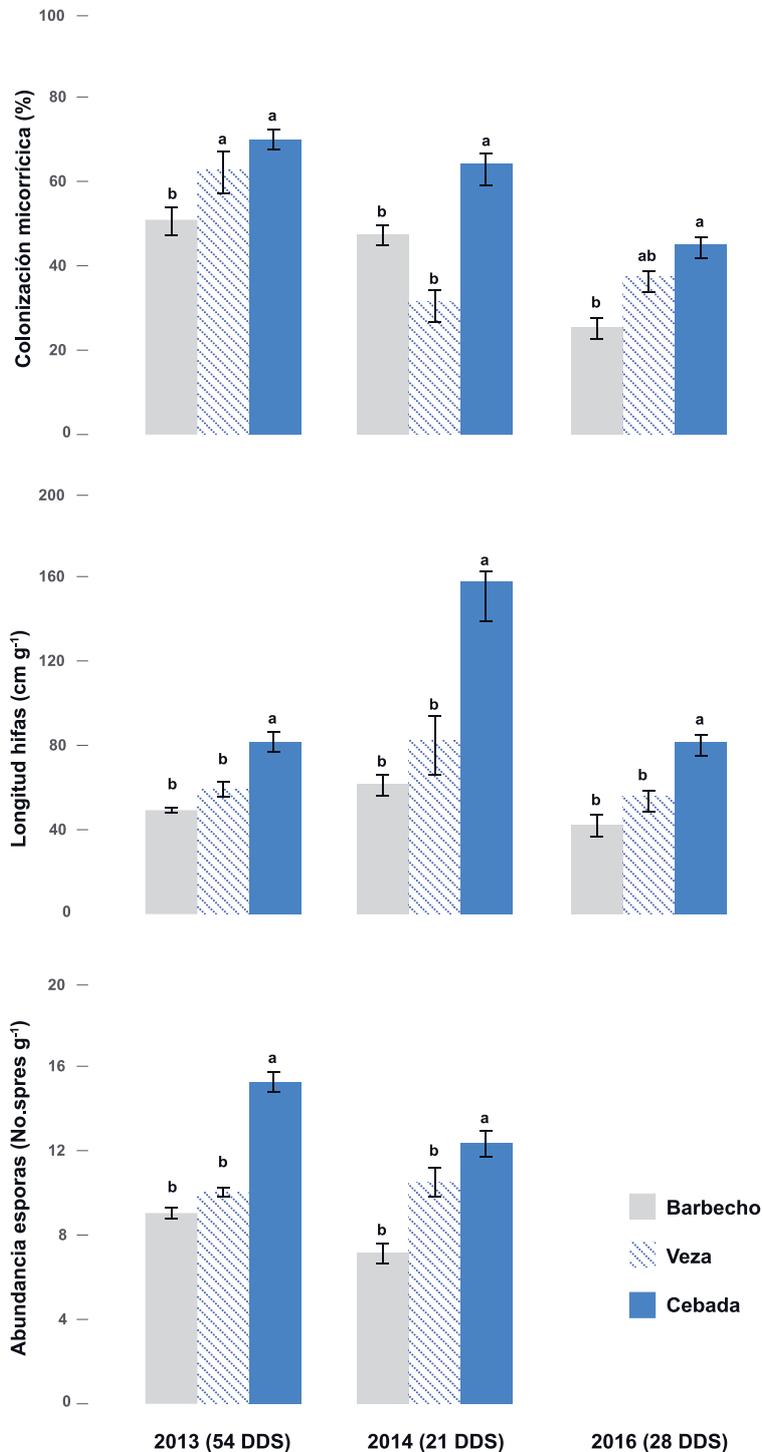


Figura 1. Colonización micorrizica, longitud de hifas y abundancia de esporas en primeros estadios del cultivo del maíz en los años 2013, 2014 y 2016 para los tratamientos de cebada, veza y barbecho. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de LSD ($P < 0,05$). Las barras indican el error estándar; DDS: días después de la siembra del maíz

menor generación de inóculo en la veza, tanto micelio como esporas, hace que su impacto en la colonización del siguiente maíz no difiera del tratamiento con barbecho (Figura 1).

La colonización micorrícica fue sensible al momento del muestreo y a las condiciones ambientales

El estudio ha puesto de manifiesto que el porcentaje de colonización de las raíces por los HMA es una variable sensible a la fecha de muestreo y a las condiciones ambientales. Así, en 2014 las condiciones de temperatura y humedad fueron muy propicias para la actividad fúngica y se alcanzaron muy pronto valores muy altos de colonización (80-90%). Se encontraron diferencias debidas a los tratamientos sólo en el muestreo más temprano (21 días después de la siembra), pero a medida que el cultivo principal fue desarrollándose, éste fue dejando su propia huella y la herencia de los CC precedentes fue desvaneciéndose (García-González *et al.*, 2018). Sin embargo, en años con condiciones no tan favorables, el legado del CC antecedente se manifestó claramente y la herencia se mantuvo durante más tiempo. A diferencia de la colonización, la longitud de micelio y la abundancia de esporas son indicadores muy estables que muestran y mantienen las diferencias entre tratamientos en el tiempo.

La mejora en la micorrización incrementó la concentración de fósforo en los primeros estadios del maíz

Con respecto al estado nutricional del maíz en sus primeros estadios, la concentración del P en la parte aérea fue más alta en el maíz después de la cebada que en el resto (Figura 2). La mayor capacidad del maíz para la adquisición del P se relaciona con la mayor colonización por HMA encontrada en este tratamiento, como sugiere la alta correlación ($r = 0,82^{**}$) entre la colonización y la concentración de P. Además, la mayor longitud de micelio que deja tras de sí la cebada actúa como una extensión del sistema radical del maíz, ampliando su radio de búsqueda y absorción, lo cual es de especial interés para aquellos nutrientes relativamente inmóviles como el fósforo, y más en suelos calizos donde se acentúa su inmovilización. Esta mejora nutricional en la planta debido al estímulo en las comunidades nativas de HMA puede llegar a implicar una reducción de la fertilización, rebajando con ello la presión sobre las ya escasas fuentes de fertilizantes fosfóricos.

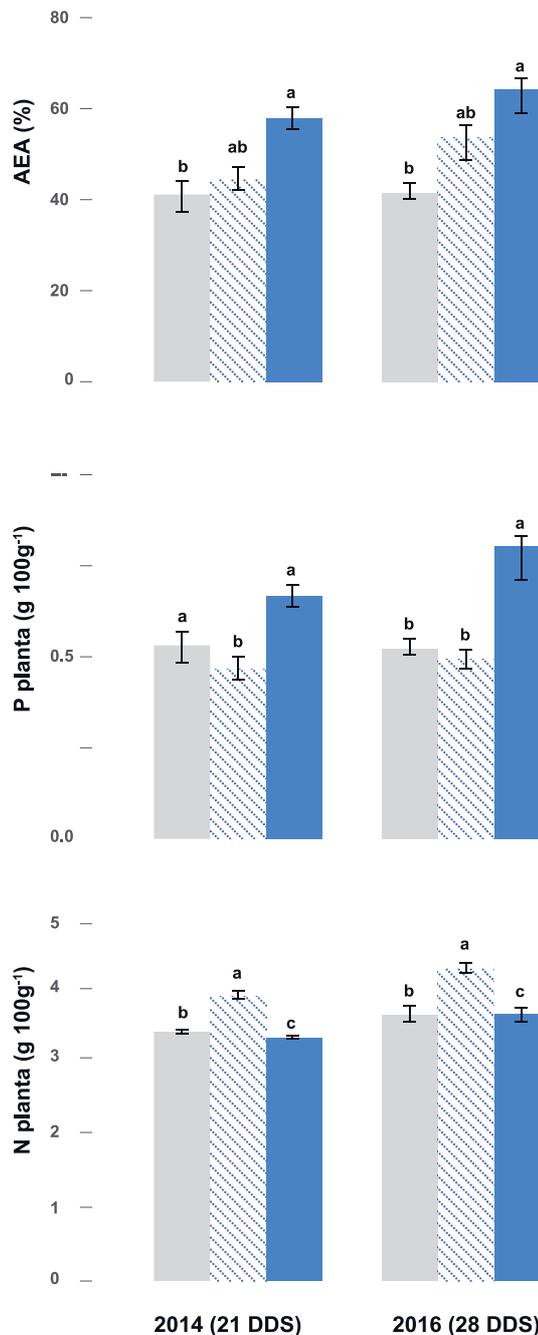


Figura 2. Agregados estables al agua (AEA) y concentración de P y N en la biomasa aérea en primeros estadios del cultivo del maíz en los años 2014 y 2016 para los tratamientos de cebada, veza y barbecho. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de LSD ($P < 0,05$). Las barras indican el error estándar. DDS: días después de la siembra del maíz.

La actividad de los HMA y los CC mejoraron la calidad del suelo

La introducción de CC en las rotaciones anuales también tuvo un efecto positivo en la agregación del suelo con incrementos del orden de 30-40% en el porcentaje de agregados estables al agua con respecto al barbecho. Estos incrementos son aún mayores y alcanzan el 50% para la cebada en muestreos fuera de la temporada de riego (García-González *et al.*, 2018). La correlación positiva que muestra %AEA con los parámetros micorrícicos confirma el papel de los HMA en la formación y estabilización de los agregados. El hecho de que la cebada favorezca en mayor medida la acumulación de materia orgánica en el suelo (García-González *et al.*, 2018) y la estimulación de los HMA, explica el mayor efecto de este CC en la agregación. Esta mejora en la calidad del suelo tiene especial relevancia en suelos calizos en regadío con tendencia a la formación de costra en superficie y problemas de nascencia asociados.

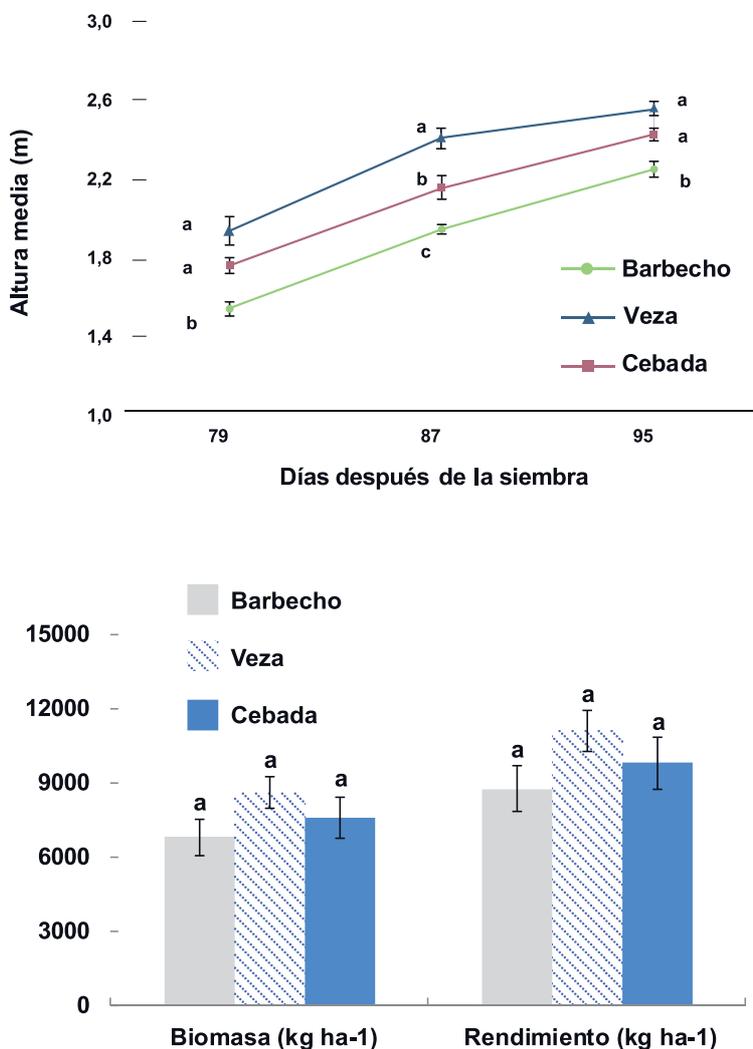
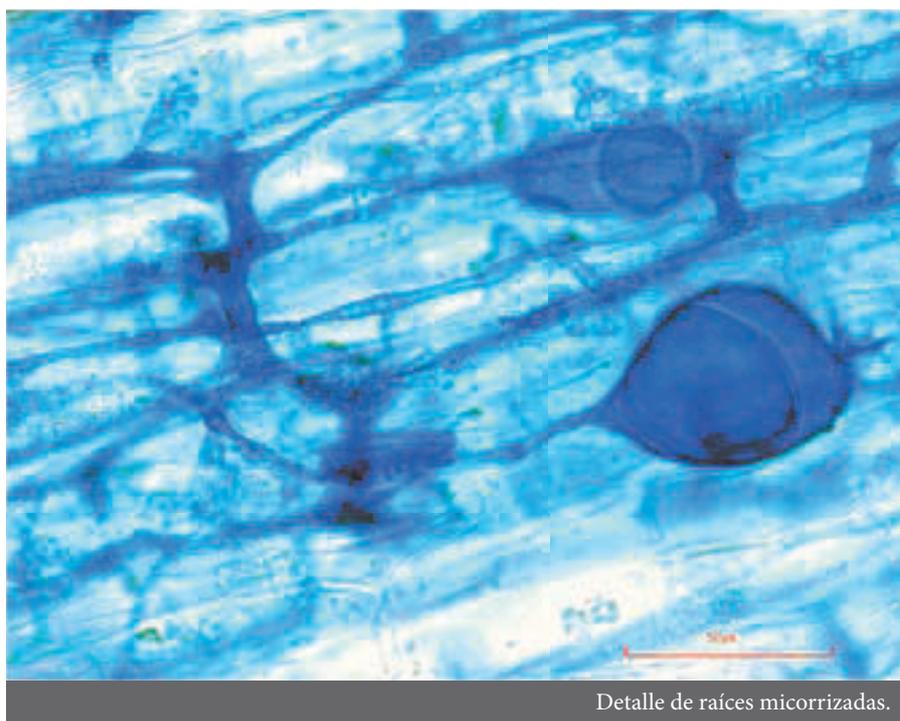


Figura 3. Altura media de las plantas del maíz a los 79, 87 y 95 días después de la siembra del maíz (a) y producción de biomasa y rendimiento del cultivo en cosecha(b) para los tratamientos de cebada, veza y barbecho en 2014. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de LSD ($P < 0,05$). Las barras indican el error estándar. DDS: días después de la siembra del maíz.

Las mejoras en el cultivo y en el suelo no se tradujeron en mayores rendimientos

En cuanto al desarrollo del cultivo (Figura 3), los registros de altura tomados en 2014 muestran valores mayores en los tratamientos con CC que en barbecho, pero este efecto no se ha traducido en nuestro ensayo en una mayor biomasa o rendimiento del maíz en cosecha. Además, los parámetros micorrícicos no mostraron ninguna correlación con los parámetros de crecimiento de la planta o de rendimiento. Tampoco una mejor adquisición de P en fases tempranas del maíz o unas mejores propiedades físicas del suelo, parecen haber repercutido en el rendimiento del maíz.



Detalle de raíces micorrizadas.

Conclusiones

La introducción de CC de invierno en rotaciones con maíz en regadío estimuló los HMA nativos, incrementando la colonización del cultivo principal, así como la formación de micelio extra-radical y la abundancia de esporas. Este efecto se produjo en condiciones ambientales variables típicas del clima mediterráneo. La cebada potenció en mayor medida la micorrización que la veza, con lo cual la elección de la especie es un factor importante a tener en cuenta. Nuestros resultados apuntan a que especies gramíneas pueden ser más efectivas que leguminosas en cuanto a la micorrización del cultivo principal subsiguiente.

La estimulación de los HMA reforzó la agregación del suelo aumentando así la resistencia del suelo al encostramiento y a la erosión, que son dos amenazas importantes en estos suelos. Además, trajo consigo una mejora en el estado nutricional del maíz con una mayor adquisición de P en las primeras fases de crecimiento.

La medida de la colonización por HMA en raíces resultó sensible a las condiciones ambientales y a la fecha de muestreo, por lo que recomendamos complementar esta medida con otros parámetros micorrícicos menos sensibles y más estables.

Aunque los CC promovieron mejoras en la calidad del suelo y en la nutrición y desarrollo de la planta, estos beneficios no culminaron en un mayor rendimiento del maíz con respecto al barbecho.

La sustitución del barbecho por CC en las rotaciones anuales constituye una práctica que potencia la sostenibilidad de los sistemas agrarios con mejoras en la calidad del suelo y la nutrición de la planta, reforzando la resistencia del suelo a las amenazas ambientales y rebajando la dependencia de los fertilizantes.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyectos AGL2014-52310-R, AGL2017-83283-C2-1-R y 2-R). Agradecemos a la Comunidad de Madrid y a los fondos estructurales 2014-2020 (ERDF y ESF) su apoyo financiero (proyecto AGRISOST-CM S2018/BAA-4330). Reconocemos el valioso apoyo prestado por el personal de la Finca experimental La Chimenea perteneciente al IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario).

Referencias

Bowles, T.M., Jackson, L.E., Loeher, M., Cavagnaro, T.R., 2016. Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects. *Journal of applied Ecology*.

Brito, I., Goss, M.J., De Carvalho, M., 2012. Effect of tillage and crop on arbuscular mycorrhiza colonization of winter wheat and triticale under Mediterranean conditions. *Soil Use and Management* 28, 202-208.

Clark, A., 2008. *Managing cover crops profitably*. DIANE Publishing, Beltsville, MD.

García-González, I., Quemada, M., Gabriel, J.L., Hontoria, C., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungal activity responses to winter cover crops in a sunflower and maize cropping system. *Applied Soil Ecology* 102, 10-18.

García-González, I., Quemada, M., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., Hontoria, C. 2018. Legacy of eight-year cover cropping on mycorrhizae, soil, and plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181, 818-826.

Hontoria, C., García-González, I., Quemada, M., Roldán, A., & Alguacil, M. M. (2019). The cover crop determines the AMF community composition in soil and in roots of maize after a ten-year continuous crop rotation. *Science of The Total Environment*, 660, 913-922.

Jakobsen, I., Abbott, L.K., Robson, A.D., 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. *New Phytologist* 120, 371-380.

Kaye, J. P., Quemada, M. 2017: Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37, 4.

Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2dn Edition), Madison, WI, 425-442.

Lehman, R.M., Cambardella, C.A., Stott, D.E., Acosta-Martinez, V., Manter, D.K., Buyer, J.S., Maul, J.E., Smith, J.L., Collins, H.P., Halvorson, J.J., 2015. Understanding and enhancing soil biological health: the solution for reversing soil degradation. *Sustainability* 7, 988-1027.

McGonigle, T., Miller, M., Evans, D., Fairchild, G., Swan, J., 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New phytologist*, 495-501.

Phillips, J.M., Hayman, D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55, 158.

Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M.R., Finney, D.M., Haider, K., Kaye, J.P., Kemanian, A.R., Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Tooker, J., 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems* 125, 12-22.

Sieverding, E. 1991: *Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Friedland, Germany.

Smith, S. E., Read, D. J., 2008. *Mycorrhizal symbiosis*, 3rd Ed.. Academic press, London, UK.

Snapp, S., Swinton, S., Labarta, R., Mutch, D., Black, J., Leep, R., Nyiraneza, J., O'Neil, K., 2005. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal* 97, 322-332.

Watanabe, F., Olsen, S., 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Science Society American Journal* 29, 677.