

# PRODUCTIVIDAD EN ALFALFA Y SORGO: ¿DISTINTOS INÓCULOS DE HONGOS MICORRÍDICOS ARBUSCULARES (HMA) TIENEN EFECTO SOBRE SU PRODUCTIVIDAD PRIMARIA?

*Alfalfa and sorghum productivity: ¿Do different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculum affect their primary productivity?*

**Roberto Emanuel Ontivero<sup>1,2</sup>**

ema.onti@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0094-1460>

**Lucía Risio Allione<sup>1,3</sup>**

luciarisio@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4742>

**Mónica A. Lugo<sup>1,2</sup>**

monicalugo63@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7592-0528>

Pág. 35 - 48

RECIBIDO

[28/04/2022]

ACEPTADO

[17/07/2022]

PUBLICADO

[31/08/2022]



## RESUMEN

La productividad primaria (PP) es una tasa que mide un proceso ecosistémico importante y que determina el rendimiento de los cultivos agrícolas. Los manejos agronómicos de alta intensidad han contribuido notablemente al deterioro de los recursos naturales, por lo que la producción agrícola sustentable es un gran desafío para la agricultura moderna. Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) forman una asociación simbiótica (micorrizas arbusculares, MA) con las raíces de las plantas que contribuye con su crecimiento mediante el aumento de la absorción de nutrientes minerales. Estos hongos pueden influir notablemente en la productividad y en el rendimiento de las cosechas, por lo tanto se los puede usar como promotores naturales de la PP sin impacto negativo sobre el

### Palabras clave

*producción primaria aérea, producción agrícola, lomeromycota, Sorghum bicolor, Medicago sativa*

<sup>1</sup>Micología, Diversidad e Interacciones Fúngicas (MICODIF), Área Ecología, FQByF, Universidad Nacional de San Luis (UNSL).

<sup>2</sup>Instituto Multidisciplinario de Investigaciones Biológicas (IMIBIO). Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de San Luis.

<sup>3</sup>Laboratorio de Dasonomía, FICA, UNSL.

medio ambiente. Así, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de diferentes usos del suelo utilizados como inóculos de HMA sobre la PP en bioensayos de plantas trampa con alfalfa y sorgo, dos cultivos predominantes en la región. Los resultados indicaron que la mayor PP estuvo asociada a las plantas inoculadas con suelos provenientes de los usos con escasa actividad agrícola. La mayor perturbación agrícola influye negativamente en la diversidad y desarrollo de los HMA y por ende, los agroecosistemas menos perturbados presentan una mayor diversidad de HMA que favorecen la PP del cultivo. Las plantas que crecieron en contacto con mayor diversidad de HMA podrían establecer MA con diferentes especies fúngicas que podrían contribuir de modo complementario a su beneficio y crecimiento.

## ABSTRACT

*Primary productivity (PP) is a rate that measures an important ecosystem process and determines the yield of agricultural crops. High-intensity agronomic management has notably contributed to the deterioration of natural resources, which is why sustainable agricultural production is a great challenge for modern agriculture. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) form a symbiotic association (arbuscular mycorrhiza, AM) with plant roots that contributes to their growth by increasing the absorption of mineral nutrients. These fungi can significantly influence the productivity and yield of crops; therefore, they can be used as natural promoters of PP without negative impact on the environment. Thus, the objective of this work was to determine the effect of different land uses used as AMF inoculum on PP in trap plant bioassays with alfalfa and sorghum, two predominant crops in the region. The results indicated that the highest PP was associated with plants inoculated with soils from uses with low agricultural activity. The greater agricultural disturbance negatively influences the diversity and development of the AMF and therefore, the less disturbed agroecosystems present a greater diversity of AMF that favor the PP of the crop. The plants that grew in contact with a greater diversity of AMF could establish AM with different glomeralean fungal species that could contribute in a complementary ecosystem function to their benefit and growth.*

### Keywords

*Aerial primary production, agricultural production, Glomeromycota, Sorghum bicolor, Medicago sativa*

---

## INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa* L., Fabaceae) es considerada la principal especie forrajera del mundo (Martínez-Rubin de Celis *et al.*, 2011). Esta leguminosa perenne es la más ampliamente utilizada en la alimentación del ganado por su contenido proteico (Martínez-Rubin de Celis *et al.*, 2011). En Argentina, el monocultivo de la alfalfa ha sido tradicionalmente la base de la producción ganadera y, junto con el trigo, uno de los cultivos fundadores de la agricultura nacional (Guiñazú *et al.*, 2010). En la actualidad, constituye uno de los principales recursos forrajeros debido a su enorme adaptación a diferentes climas (Guiñazú *et al.*, 2010), a su longevidad, y al hecho de que puede mejorar el suelo donde se cultiva (Campanelli *et al.*, 2013).

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench, Poaceae) es una gramínea de origen tropical. En Argentina se adapta muy bien al clima templado y es ampliamente utilizado para la alimentación ganadera. El excelente potencial que ha demostrado el sorgo en diversas regiones del país y la importancia del cultivo para el desarrollo de un sistema sustentable han incidido notablemente sobre el incremento en la superficie sembrada, así como en las exportaciones de este grano, ubicando al país como

segundo exportador a nivel mundial (Carrasco *et al.*, 2011). El sorgo presenta un sistema radical muy desarrollado y profundo que le permite muy buena exploración del perfil del suelo contribuyendo a mejorar la estructura del mismo, ayudando a mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas (Carrasco *et al.*, 2011).

El cultivo de alfalfa y sorgo en Argentina, al igual que la agricultura de alta intensidad en el resto del mundo se ha centrado principalmente en la productividad. La mecanización, los monocultivos y el mayor uso de insumos sintéticos han degradado la calidad del agua, reducido las tierras cultivables, los recursos forestales y la fertilidad del suelo (Ejersa, 2021 y referencias allí citadas). La agricultura es la interfaz más grande entre los seres humanos y el medio ambiente, por lo que conciliar la producción de cultivos y la integridad ambiental, en otras palabras, la producción sostenible de cultivos, es un gran desafío para la agricultura moderna (Ejersa, 2021 y referencias allí citadas). Esto implica la necesidad de desarrollar estrategias de manejo de cultivos que optimicen la fertilidad del suelo, la diversidad biológica y la solidez de los cultivos mediante la creación de formas de agroecosistemas que respeten los procesos ecológicos naturales y respalden la productividad a largo plazo (Ejersa, 2021).

La productividad es uno de los procesos más importantes de los ecosistemas en general y de los agroecosistemas en particular, en los que se define como “la cantidad de alimento, combustible o fibra para uso humano, que produce un agroecosistema” (Marten, 1988). En cultivos como la alfalfa y el sorgo la fracción vegetal utilizable por el hombre, en general, es la región aérea de la planta, es decir la productividad primaria neta aérea. Esta productividad, en adelante “productividad primaria” (PP), está determinada por la estructura y función de las comunidades de plantas y el acceso a los recursos que sustentan su crecimiento (Connor *et al.*, 2011). En ocasiones, la PP está limitada por la disponibilidad de recursos minerales del suelo (Neri-Luna & Villarreal-Ruiz, 2012). Para poder superar esta limitación, la mayoría de las plantas terrestres forman asociaciones simbióticas con microorganismos edáficos (van der Heijden & Scheublin, 2007).

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) constituyen un grupo filogenético, el filum Glomeromycota (Schüßler *et al.*, 2001) y funcional clave de la biota del suelo que puede contribuir en gran medida a la productividad de los cultivos y la sostenibilidad de los ecosistemas (Jeffries *et al.*, 2003). Los HMA son capaces de establecer una interacción simbiótica con las raíces del 80 % de las familias de plantas terrestres formando la interacción simbiótica denominada micorriza arbuscular (MA) (Smith & Read, 2008). Esta interacción no solo mejora el crecimiento de las plantas a través de una mayor absorción nutrientes minerales esenciales para el crecimiento de ellas, sino que también tienen otros efectos que no se relacionan directamente sino indirectamente con la nutrición del hospedante como la estabilización de los agregados del suelo, en la prevención de la erosión y en el alivio del estrés en las plantas causado por factores bióticos y abióticos (Smith & Read, 2008). Así, los microorganismos simbióticos como los HMA y su diversidad en el suelo son uno de los principales actores en el mantenimiento del funcionamiento de los ecosistemas, ocupando una importante función en la PP (Wagg *et al.*, 2011) y afectándola directamente.

Los HMA, son un grupo de hongos endofíticos y biótrosos obligados que establecen relaciones simbióticas con los órganos de absorción (raíces, rizomas, rizoides) y están presentes en la gran mayoría las plantas, incluidas las cultivadas, y de los ecosistemas. En la simbiosis MA ambos integrantes, hongo y planta, se ven beneficiados (Smith & Read, 2008). Así, el hongo contribuye con la planta en el aumento de su capacidad de absorción al explorar mayor volumen de suelo que la raíz sola, desempeñando una función primordial en la obtención de nutrientes, acceso a iones minerales a partir de fuentes inorgánicas y orgánicas de fósforo (P) y nitrógeno (N), que generalmente no están disponibles para las plantas en forma directa (Neri-Luna & Villarreal-Ruiz, 2012 y referencias allí. Por su parte, la planta proporciona al hongo productos carbonados derivados de la fotosíntesis, esenciales para el crecimiento y un nicho ecológico protegido (Jaizme-Vega & Rodríguez-Romero, 2008) para el desarrollo del ciclo vital fúngico. Como resultado de esta relación, los HMA tienen el potencial de afectar en gran medida la productividad de la planta (van der Heijden *et al.*, 1998) en todos los ecosistemas que los albergan. Además, debido a su carácter de biótrosos obligados los HMA solo pueden crecer en cultivo en presencia

de las raíces de plantas hospedantes cultivadas in vitro o con las plantas hospedantes completas (Smith & Read, 2008). Así, los HMA no pueden cultivarse aisladamente de sus hospedantes, inconveniente que es superado por el empleo de las llamadas “plantas trampa”, que consiste en el cultivo conjunto en maceta de plantas hospedantes con HMA (INVAM, 2022). Este método es uno de los más utilizados en experimentos para determinar la productividad primaria y para la propagación de los HMA.

El efecto negativo de las prácticas agrícolas sobre la diversidad y funcionalidad de los HMA ha sido demostrado en diferentes estudios (Verbruggen *et al.*, 2010). Esta disminución de la diversidad de HMA puede tener efectos negativos sobre la PP de los ecosistemas naturales y de los cultivos (Maherali & Klironomos, 2007; van der Heijden *et al.*, 1998; Wagg *et al.*, 2011). Así, van der Heijden *et al.* (1998) propone que la productividad de los ecosistemas aumentarán con el incremento del número de especies de HMA, debido al efecto beneficioso adicional de cada una de las especies de estos hongos, ya que diferentes especies de hospedantes podrían beneficiarse de diferentes taxones de HMA. Así, la PP puede depender de la diversidad de los hongos simbiotes (van der Heijden *et al.*, 1998). Esta multifuncionalidad de los HMA podría traducirse en mayores beneficios para el hospedante que crece en contacto y asociación con comunidades con mayor diversidad de especies de HMA, ya que teóricamente cada una podría brindar servicios adicionales a las plantas hospedantes que contribuyan a una mayor productividad (Wagg *et al.*, 2011).

Teniendo en cuenta la importancia de la alfalfa y el sorgo en la economía de la región, la influencia de los HMA en la producción primaria, y los efectos de las prácticas agrícolas sobre la comunidad de estos hongos, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del origen del inóculo de HMA sobre la productividad primaria mediante bioensayos de plantas trampa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Bioensayos de cultivos con plantas trampa para determinar la productividad primaria (PP)

Se realizó un bioensayo para determinar la PP, que se cuantificó como, la totalidad de la materia vegetal aérea en peso seco en gramos. Las especies hospedantes de los HMA utilizadas como plantas trampa fueron una Poaceae, *Sorghum bicolor* (L.) Moench (sorgo) y una Fabaceae, *Medicago sativa* L. (alfalfa). Ambas especies frecuentemente cultivadas en la región y reconocidas por ser eficientes hospedantes de los HMA. Los cultivos con plantas trampa (PT) pueden iniciarse a partir de alguna de los diferentes fuentes de propágulos, entre las que se destacan el suelo rizosférico, esporas y fragmentos de raíz (Morton *et al.*, 1996).

Los cultivos de las PT se realizaron en macetas de 20 litros, conteniendo sustrato inerte esterilizado. Este sustrato consistió en una mezcla de suelo estéril proveniente de parcelas frecuentemente cultivadas con alfalfa y sorgo; y de arena estéril (en una proporción 2:1). Las macetas se mantuvieron en un invernadero (Figura 1) con condiciones controladas a 25 °C de temperatura y 50 % de humedad relativa, durante 4 meses en la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Villa Mercedes, provincia de San Luis, República Argentina.

En cada maceta, a 2 cm de profundidad en el sustrato, se colocaron 2 semillas de cada una de las especies vegetales elegidas para el bioensayo; junto a las semillas se colocó el inóculo de HMA (80 gramos de suelo original de cada uso estudiado). Las macetas se regaron periódicamente con agua corriente, a capacidad de campo, cada 2 ó 3 días, dependiendo del requerimiento hídrico de la planta. Al cabo de 4 meses de crecimiento, los vástagos de las PT fueron cosechados y secados a temperatura ambiente para cuantificar la PP de cada uso de suelo.



**Figura 1.** Bioensayos de plantas trampa en el Invernadero de la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

### ***Esterilización de semillas, preparación de sustrato y montado de macetas***

Las semillas de alfalfa y cariopsis de sorgo al igual que todos los elementos a utilizar durante el trabajo con plantas trampa fueron esterilizados en superficie con alcohol etílico (96 %) y los elementos inertes además se expusieron a luz UV durante 3 horas previas al inicio del trabajo.

Para la esterilización de las semillas se las sumergió en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 10 % durante 10 minutos; posteriormente, se retiraron de la solución y se las lavaron con agua estéril durante un minuto. El procedimiento de sumersión y lavado de las semillas se repitió cuatro veces.

El sustrato estéril utilizado como soporte para el crecimiento de los cultivos con las PT estuvo compuesto por una mezcla de suelo estéril de las parcelas permanentes de cultivo y arena fina estéril, en una proporción 2:1. El suelo original de cada una de las parcelas permanentes con distintos usos, se tamizó con una malla de 2 mm para descartar los restos vegetales; el suelo obtenido del tamizado se fraccionó en bolsas resistentes a altas temperatura y se sometió a una sucesión de tratamientos de esterilización con vapor de agua a alta temperatura y presión durante una hora (121 °C; 1,2 atm) en autoclave y enfriamiento posterior por 24 h; este tratamiento se repitió dos veces antes de almacenarse en heladera para su posterior utilización para el armado de las macetas de las PT. La misma secuencia se utilizó para esterilizar la arena fina.

Para el armado de las macetas se siguió un procedimiento descrito por Lugo et al. (2018) y se adicionó una capa de arena estéril de 1 a 3 cm de altura en el fondo de la maceta para facilitar el drenaje. Posteriormente, se rellenó aproximadamente  $\frac{3}{4}$  del volumen total de la maceta con el sustrato estéril preparado. En el centro de la de la maceta se colocó el inóculo y por encima de éste se colocaron las semillas esterilizadas. Finalmente, toda la superficie del sustrato contenido en la maceta se cubrió con una capa de arena estéril para evitar la contaminación y se regó a capacidad de campo con agua corriente.

## **DESARROLLO**

### **Determinación de la biomasa vegetal bajo distintos usos de suelo**

Una vez finalizado el período de crecimiento de las especies vegetales utilizadas como plantas trampa, la totalidad de la materia vegetal aérea fue cosechada, secada a temperatura ambiente hasta peso constante y éste se registró como productividad primaria (PP).

### **Inóculo**

### **Obtención del Inóculo**

Las muestras de suelo que se utilizaron como inóculo (inóculo-suelo) para el cultivo de las PT se recolectaron durante el mes de febrero de 2017, correspondiente a la estación verano en el área de estudio ubicada en el Distrito del Caldén, Ecorregión Espinal, República Argentina. El procedimiento consistió en establecer 4 parcelas rectangulares (n=4) de 90 m X 30 m en cada unidad de uso de suelo estudiadas; de cada vértice y del centro de cada parcela se recolectó una submuestra de suelo, las 5 submuestras obtenidas fueron homogeneizadas. En el laboratorio, el homogeneizado se tamizó y secó a temperatura ambiente para eliminar el exceso de humedad y la proliferación de contaminantes. Finalmente, los suelos-inóculos se almacenaron en heladera a 4°C hasta el momento de su utilización en los bioensayos de PT.

Cada uno de los inóculos provino de una parcela diferente y de diferentes usos de suelo. En total se estudiaron 4 usos de suelo:

- Bosques de Caldén (*Prosopis caldenia* Burkart)= Bosque
- Pasturas de pasto llorón (*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees)= Llorón
- Cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L.)= Alfalfa
- Monocultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)= Soja

El número total de inóculos-suelo utilizados fue de 16; se realizaron 4 repeticiones de cada uno de los inóculos utilizados, es decir, hubo 4 macetas inoculadas con suelo proveniente del mismo homogeneizado, teniendo un total 64 macetas con inóculos (16 inóculos-suelo x 4 repeticiones). Además, por cada parcela se utilizó una maceta control sin inóculo-suelo (16 macetas) para confirmar la viabilidad de la semilla y el crecimiento de las plantas, teniendo en los bioensayos de PT un total final de 80 macetas.

### **Caracterización del Inóculo**

La composición de las comunidades de HMA presentes en cada inóculo utilizado se determinó previamente al bioensayo de PT. Para ello, cada muestra de suelo original de donde se obtuvo cada inóculo-suelo se procesó para la extracción de esporas y esporocarpos de los HMA en 100 g de suelo siguiendo los métodos de tamizado húmedo, decantación (Gerdemann & Nicolson, 1963) y centrifugación en gradiente de sacarosa (Walker et al., 1982). Las esporas y esporocarpos de HMA fueron aislados y montados en preparados semipermanentes en una solución de glicerina:agua al 70% V/V y en una mezcla de esta solución con reactivo de Melzer. Posteriormente, los HMA extraídos de las muestras fueron observados con un microscopio óptico (40X y 100X) para cuantificar su diversidad medida como riqueza absoluta de especies y abundancia de cada especie por 100 g de peso seco del suelo original.

### **Análisis estadístico**

Para determinar si había diferencia entre la productividad asociada a los diferentes inóculos provenientes de los distintos usos del suelo estudiados se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Se eligió este tipo de prueba debido a que los datos no cumplían con todos los supuestos de ANAVA. La prueba de comparación de medias se realizó por el test de Conover al 0,05 de probabilidad con corrección de Bonferroni. Además, se realizó un análisis de correlación de Spearman para determinar si había relación entre la riqueza de especies de HMA del inóculo, la abundancia de esporas y la PP. El programa estadístico utilizado para realizar los análisis fue R (versión 4.0.3) (R Core Team, 2021), con el paquete "conover.test" (versión 1.1.5) para análisis estadísticos específicos, y los paquetes "ggplot2" y "plotly" para realizar gráficos.

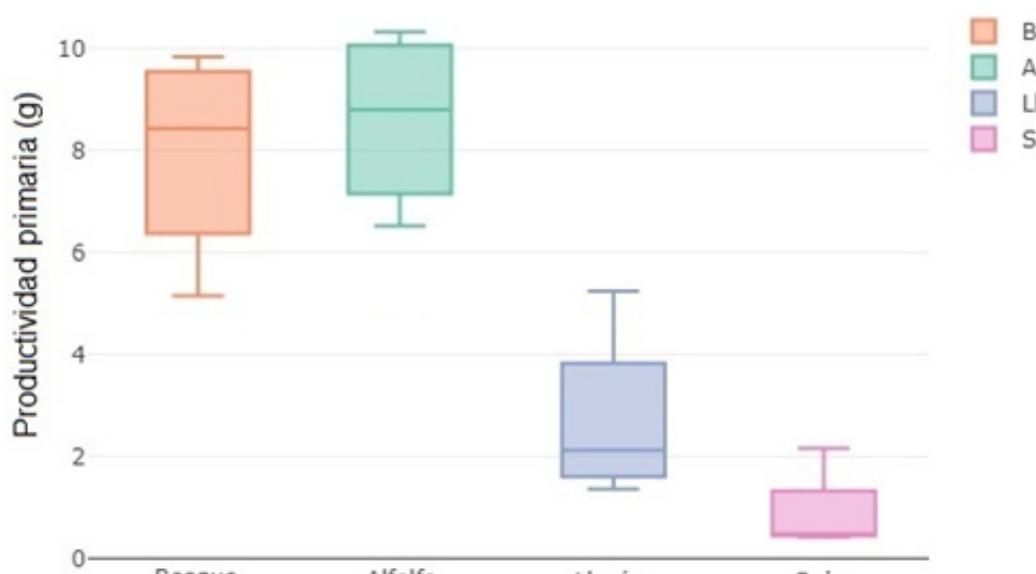
## RESULTADOS

La PP medida a través de la producción de biomasa vegetal utilizando el método de plantas trampa difirió significativamente entre los distintos usos del suelo original ( $H= 11,669$   $p= 0,008$ ). Se observó una mayor biomasa vegetal en las PT con inóculos provenientes del uso Alfalfa, seguido por los inóculos-suelo provenientes del uso Bosque, Llorón y Soja (Tabla 1, Figura 2). Al realizar las comparaciones múltiples entre las macetas con inóculos diferentes, se observaron diferencias significativas entre las macetas con inóculos de Bosque vs las macetas con inóculos Soja ( $p= 0,0010$ ), las macetas con inóculos de Llorón vs las macetas con inóculos de Alfalfa ( $p= 0,0075$ ) y las macetas con inóculos de Alfalfa vs las macetas con inóculos de Soja ( $p=0, 0003$ ) (Tabla 2). La PP solo estuvo correlacionada positivamente y significativamente ( $p= 0,01003$ ) con la riqueza de especies de HMA presentes en el inóculo (Figura 3), mientras que correlación entre la PP y la abundancia de HMA no fue significativa.

**Tabla 1.** Productividad primaria medida como peso seco en gramos en relación con la presencia de inóculo de cada uso del suelo (Alfalfa, Bosque, Llorón, Soja). Riqueza de especies y abundancia de esporas de HMA en cada tipo de inóculo. Los valores representan la media  $\pm$  la desviación estándar (D. E.) de la variable

Variable	Bosque	Llorón	Alfalfa	Soja
Productividad primaria (g)	8.61 $\pm$ 1.77	2.72 $\pm$ 1.74	7.97 $\pm$ 2.10	0.89 $\pm$ 0.85
Riqueza de especies de HMA	33 $\pm$ 8	14 $\pm$ 1	31 $\pm$ 10	17 $\pm$ 6
Abundancia de esporas de HMA	272 $\pm$ 181	822 $\pm$ 262	1435 $\pm$ 514	1613 $\pm$ 1288

Fuente: Elaboración propia



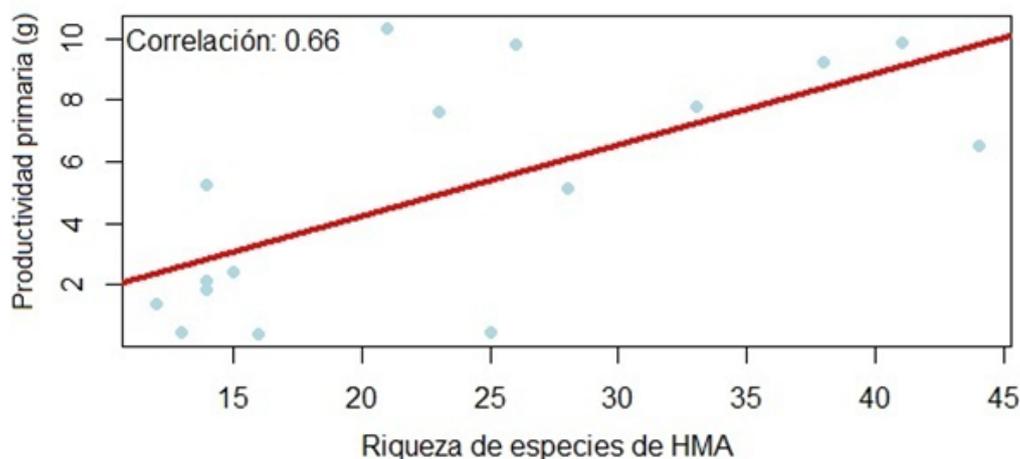
**Figura 2.** Productividad primaria medida en gramos de materia seca en bioensayos de plantas trampa en los distintos usos de suelo (Alfalfa, Bosque, Llorón, Soja).

*Nota.* Los datos se representan mediante gráfico de cajas y barras truncadas; las cajas representan la productividad primaria (PP) medida como peso seco en gramos y las barras truncadas la desviación estándar del tratamiento con inóculos.

**Tabla 2.** *Tabla 2. Resultados del test de Conover. Los asteriscos (\*) representan diferencias significativas en la PP en presencia de los diferentes tipos de inóculos.*

	<b>Alfalfa</b>	<b>Bosque</b>	<b>Llorón</b>
<b>Bosque</b>	0.704761		
	1.0000		
<b>Llorón</b>	3.805711	3.100950	
	0.0075*	0.0275	
<b>Soja</b>	5.638091	4.933330	1.832379
	0.0003*	0.0010*	0.2754

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.** *Diagrama de dispersión y gráfico de correlación entre la riqueza de especies de HMA presente en cada inóculo y la PP de plantas trampa en gramos. Referencias: Correlación, indica el coeficiente de correlación de Spearman.*

## DISCUSIÓN

En los bioensayos se registraron diferencias significativas en cuanto a la PP de las PT hospedantes de los HMA bajo tratamiento con inóculos-suelo de los diferentes usos de la tierra del Distrito del Caldén en el Espinal. Teniendo en cuenta que las condiciones en las que crecieron todas las plantas hospedantes fueron las mismas, y las variables experimentales se mantuvieron controladas en el bioensayo, se asume que los cambios en la PP están relacionados con los diferentes inóculos-suelo utilizados. Así, las diferencias en la PP estarían directamente relacionados con cambios en la comunidad de microorganismos edáficos, particularmente con cambios en la comunidad de HMA que componen cada uno de los inóculos-suelo (Bosque, Alfalfa, Llorón y Soja) aplicados. En este trabajo, se demuestra que grandes cambios en la composición general de la comunidad de HMA se manifestaron principalmente a través de una marcada alteración en la producción de biomasa vegetal (PP), provocada probablemente por un cambio en la estructura de la comunidad de HMA en el suelo de

cada uso agronómico analizado coincidiendo con otros autores (van der Heijden *et al.*, 1998). Además, las diferencias en la PP podrían atribuirse a las diferencias en la intensidad de la perturbación causada por cada tipo de uso de la tierra (Bosque, alfalfa, Llorón y Soja), ya que una mayor intensidad de uso agronómico disminuye la diversidad de HMA, y cada uno de los usos del suelo estudiados presenta una intensidad de disturbio propia y por lo tanto, cada tipo de inóculo utilizado posee una diversidad propia de HMA, afectando diferencialmente a la producción y acumulación de biomasa en las plantas hospedantes. Asimismo, el análisis de correlación apoya la presencia de este efecto diferencial de cada suelo-inóculo sobre la PP ya que hubo una relación positiva entre la riqueza de especies de HMA que componen cada tipo de inóculo y PP obtenida de cada planta hospedante.

Más aún, el conjunto de análisis y de resultados obtenidos en nuestro experimento con plantas trampa, coincide con los resultados obtenidos por otros autores en diferentes regiones del mundo (Köhl *et al.*, 2014; Maherali & Klironomos, 2007). En general, la productividad de las plantas hospedantes es una función del aumento de la riqueza de HMA y de las diferentes comunidades de HMA en los suelos que modifican el crecimiento de las plantas (Köhl *et al.*, 2014), que puede estar afectado directamente tanto por la densidad como por la composición de especies del inóculo de HMA (Neri-Luna & Villarreal-Ruiz, 2012).

La menor PP fue observada en macetas inoculadas con suelo proveniente de las parcelas con mayor actividad agrícola (parcelas con monocultivo de soja). Esta menor productividad estuvo directamente correlacionada con la menor diversidad de especies de HMA que contenía este inóculo. La menor riqueza de especies observadas en el suelo-inóculo Soja sería consecuencia de la actividad agrícola sostenida, ya que existe evidencia de que la diversidad microbiana subterránea en general, y particularmente la diversidad de HMA se ve afectada por la actividad antropogénica, particularmente las prácticas agrícolas reducen el número de especies encontradas en el suelo (Wagg *et al.*, 2011 y referencias allí), habiéndose demostrado que la riqueza de HMA se reduce con la intensificación de las prácticas agrícolas (Wagg *et al.*, 2011 y referencias allí). Particularmente, la riqueza de especies así como la abundancia de esporas de HMA puede verse ampliamente afectada por la fertilización, la secuencia de cultivos y los períodos de barbecho (Köhl *et al.*, 2014). Por lo tanto, existe evidencia para afirmar que en el Distrito del Caldén, al igual que en otras regiones, la pérdida de la diversidad de HMA que se produce en los sistemas agrícolas (van der Heijden *et al.*, 1998 y referencias en él) podría afectar negativamente a la productividad del agroecosistema, aumentando además la inestabilidad del sistema completo (van der Heijden *et al.*, 1998). De esta manera, la menor PP de las plantas que crecieron en presencia de los inóculos provenientes de los sitios con mayor intensidad de uso agrícola estaría explicada por una menor diversidad de HMA en los inóculos, ya que en diferentes estudios se observó una relación directa entre la riqueza de HMA y la productividad vegetal (Wagg *et al.*, 2011 y referencias en él).

El menor crecimiento y acumulación de biomasa como PP por parte de las plantas que crecieron en presencia de los inóculos provenientes de parcelas con cultivo de soja, podría deberse a la composición de especies de este inóculo. Se ha demostrado que la alteración del suelo creada por las actividades relacionadas con el monocultivo anual pueden actuar seleccionando especies de HMA de rápido crecimiento, pero que son menos mutualistas y menos eficientes para mejorar la absorción de nutrientes de la planta hospedante allí). Además, en relación al inóculo, la alteración física producida por la actividad mecánica de la siembra directa puede destruir las redes de hifas y puede resultar en una colonización reducida del suelo y de las raíces provocando una reducción del potencial del inóculo (van der Heyde *et al.*, 2017 y referencias allí) obtenido de suelos con intensa actividad agrícola. Como consecuencia, la actividad agrícola intensa puede seleccionar taxones de HMA resistentes a la perturbación y que adquieren menores cantidades de nutrientes (Köhl *et al.*, 2014).

La mayor productividad asociada a las plantas que crecieron en contacto con inóculos provenientes de los sitios menos perturbados (Bosque y alfalfa) y que contenían una mayor riqueza de especies, podría ser sustentada por la complementariedad que puede ocurrir entre las diferentes especies de HMA (Wagg *et al.*, 2011). La complementariedad entre especies de HMA ha sido demostrada

previamente en algunos trabajos (Wagg *et al.*, 2011) y esta sugiere que si una planta es colonizada por varias especies de HMA que son complementarias en sus funciones (ej. absorción de nutrientes de diferentes depósitos del suelo), pueden resultar más beneficiosas para la planta, que si es colonizada solo por una especie (Wagg *et al.*, 2011 y referencias en él). Sin embargo, también es necesario tener en cuenta que una mayor productividad podría ser explicada por la presencia de una o de algunas especies en particular y no solo por el efecto aditivo positivo de un gran número de especies, ya que existe mayor probabilidad de que las comunidades ricas en especies contengan al azar una especie de HMA especialmente productiva (Huston, 1997) y beneficiosa para determinadas especies vegetales.

El aumento de la PP también podría ser explicado por la segregación y facilitación de nichos, ya que diferentes grupos filogenéticos de HMA poseen diferentes estrategias de vida y tienen diferentes efectos sobre el hospedante (Maherali & Klironomos, 2007). Por lo tanto, un inóculo nativo con mayor diversidad, es probable que contenga un mayor número de especies o familias de HMA, distantes filogenéticamente, que podrían ocupar distintas regiones de la raíz o de la rizósfera y contribuir de manera complementaria al crecimiento de la planta. Existen determinadas especies de HMA con una tendencia a producir una importante cantidad de micelio externo (ME) cerca de la raíz, mientras que otras producen menos cantidad de micelio pero son capaces de explorar zonas distantes (Smith *et al.*, 2000), demostrándose que diferentes especies podrían ocupar diferentes nichos en la rizósfera. El ME es potencialmente importante en la asociación simbiótica y en el crecimiento de las plantas, ya que la mayor productividad puede estar asociada a este tipo de micelio, debido a que incrementa el área de absorción de la raíz de la planta hasta en 100 veces (Carreón-Abud *et al.*, 2008). Así las plantas micorrizadas tienen mayor contenido de macro y micronutrientes (Carreón-Abud *et al.*, 2008), debido principalmente a que el ME contribuye a una mejor movilidad de iones inorgánicos en la micorrizósfera (la rizósfera de la raíz colonizada por hongos micorrícicos (Garbaye, 1991)) por cambios en el pH, producto de la expulsión de protones y de la producción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Miller & Kling, 2000). Particularmente, el aumento de la diversidad de HMA resultaría en una explotación más eficiente del fósforo del suelo y en un mejor uso de los recursos disponibles en el sistema (van der Heijden *et al.*, 1998). Incluso se ha demostrado en muchas especies de HMA la habilidad del ME para absorber y transferir no solamente  $\text{HPO}_4^{2-}$  ó  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  sino también  $\text{Zn}_2^+$ ,  $\text{Cu}_2^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  hacia las plantas hospedantes (Smith *et al.*, 2001).

Debido al efecto positivo de los HMA, en general, las plantas micorrizadas presentan un incremento en las tasas fotosintéticas, mayor tolerancia a la sequía y a la salinidad (Carreón-Abud *et al.*, 2008 y referencias en él), lo que podría explicar el aumento de la PP en nuestros experimentos. También es bien conocido que los HMA contribuyen al incremento de la tolerancia de la raíz a patógenos (Smith & Read, 2008) y además contribuyen a la captación de metales pesados en suelos contaminados (Carreón-Abud *et al.*, 2008). De esta manera las plantas micorrizadas y en un buen estado nutricional pueden soportar e incluso disminuir el daño ocasionado por la presencia de patógenos en sus raíces, impidiéndole que se propague por el resto de los órganos vegetales (Carreón-Abud *et al.*, 2008), generando así condiciones óptimas para el crecimiento y producción de biomasa por parte de sus hospedantes.

Por otro lado, algunos experimentos con plantas y microorganismos edáficos han demostrado que las propiedades y características de los ecosistemas se pueden explicar con éxito utilizando rasgos funcionales y diversidad funcional (van der Heijden & Scheublin, 2007 y referencias en él). Por lo tanto, sería interesante realizar un análisis alternativo que implique considerar la identidad de los HMA en lugar de solo la diversidad como explicación para los cambios en la productividad vegetal. Relacionando con estos análisis y resultados, y teniendo en cuenta que una mayor diversidad en el inóculo podría implicar una distribución diferente de grupos funcionales podríamos suponer que no solo existe un cambio en la diversidad de HMA presente en cada uso de suelo de donde provienen los inóculos, sino que también existen diferencias en cuanto a los grupos funcionales de los HMA en cada uso. Por lo tanto, podríamos afirmar que el cambio en el porcentaje de especies que componen diferentes grupos funcionales de HMA podría afectar directamente a la productividad de las plantas, coincidiendo con resultados obtenidos por otros autores (van der Heijden & Scheublin, 2007). Los rasgos funcionales de los HMA pueden diferir considerablemente entre las especies que pertenecen a diferentes familias.

Existen familias de HMA que pueden estar relacionadas a la defensa contra patógenos (Glomeraceae) y otras que pueden relacionarse con una mayor eficiencia de captación de P (Gigasporaceae) (Maherali & Klironomos, 2007), por lo tanto una especie hospedante que tenga la posibilidad de crecer en presencia de ambas familias podría tener mayor productividad debido a la complementación de los efectos beneficiosos. Así, más allá de los cambios en cuanto a diversidad de HMA que puede haber en cada uno de los inóculos, es importante tener en cuenta que no solo se cambia la diversidad *per se*, sino también se cambia la diversidad funcional, lo que probablemente tenga importantes efectos sobre el ecosistema suelo, sobre las plantas que habitan estos agroecosistemas y sobre la productividad de las mismas.

## CONCLUSIONES

En este estudio se muestra diferencia significativa en la productividad primaria producida por hospedantes que crecieron en presencia de distintos inóculos de suelo provenientes de usos de la tierra diferentes que contenían esporas de HMA. De esta manera la evidencia sugiere que existe una relación entre la productividad primaria y la diversidad de HMA que existe en suelos bajo diferentes usos. El aumento de la intensidad agrícola tuvo efectos negativos sobre la productividad de las plantas que crecieron en las macetas con inóculos provenientes de las parcelas con mayor perturbación (monocultivo de Soja), seguido por pasturas de pasto Llorón, cultivo de Alfalfa y Bosques.

En general, los resultados observados en este trabajo muestran el efecto negativo que pueden tener las prácticas agrícolas sobre las comunidades de HMA, y como estos efectos podrían afectar el rendimiento y la productividad primaria neta en el área de estudio. Teniendo en cuenta la importancia de la productividad en gran parte de los ecosistemas terrestres áridos y semi-áridos, y de la importancia de esta función ecosistémica en sector norte del Distrito del Caldén, de la Ecorregión Espinal, y el efecto positivo de los HMA sobre la productividad, es importante considerarlos al momento de elaborar planes de manejo y producción, sobre todo en ecosistemas áridos y semi-áridos sobreexplotados como el Caldenal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campanelli, A., Ruta, C., Mastro, G. De, & Morone-Fortunato, I. (2013). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating salt stress in *Medicago sativa* L. var. icon. *Symbiosis*, 59(2), 65–76. <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0191-1>
- Carrasco, N., Zamora, M., & Melin, A. (2011). Manual de sorgo. In N. Carrasco, M. Zamora, & A. Melian (Eds.), INTA (1º). INTA Ediciones. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_manual\\_de\\_sorgo\\_renglon\\_191.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_de_sorgo_renglon_191.pdf)
- Carreón-Abud, Y., Gomez Dorantes, N., & Martínez Trujillo, M. (2008). Las micorrizas arbusculares en la protección vegetal. *Revista Biológicas*, 10(1), 60–70.
- Connor, D. J., Loomis, R. S., & Cassman, K. G. (2011). *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems* (Second). Cambridge University Press.
- Ejersa, M. T. (2021). The role of arbuscular mycorrhizal fungi on agricultural crop productivity and ecosystem service : A review. *International Journal of Agroforestry and Silviculture*, 9(2), 1–9.
- Garbaye, J. (1991). Biological interactions in the mycorrhizosphere. *Experientia* 1991 47:4, 47(4), 370–375. <https://doi.org/10.1007/BF01972079>
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235–244.
- Guiñazú, L. B., Andrés, J. A., Del Papa, M. F., Pistorio, M., & Rosas, S. B. (2010). Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to single and mixed inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and *Sinorhizobium meliloti*. *Biology and Fertility of Soils*, 46(2), 185–190. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0408-5>
- Huston, M. A. (1997). Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 110(4), 449–460. <https://doi.org/10.1007/S004420050180>
- Jaizme-Vega, M. C., & Rodríguez-Romero, A. S. (2008). Integración de microorganismos benéficos (Hongos micorrícicos y bacterias Rizosféricas) en agrosistemas de las Islas Canarias. *Agroecología*, 3(0), 33–40.
- 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>
- Köhl, L., Oehl, F., & Van Der Heijden, M. G. A. (2014). Agricultural practices indirectly influence plant productivity and ecosystem services through effects on soil biota. *Ecological Applications*, 24(7), 1842–1853. <https://doi.org/10.1890/13-1821.1>
- Lugo, M., Iriarte, H. J., Crespo, E. M., Torres, M. L., Ontivero, E., Risio, L., Menoyo, E., & Ballesteros, S. (2018). *MICODIF: Manual de Metodologías para el trabajo con hongos y sus simbioses*. Nueva Editorial Universitaria - UNSL.
- Maherali, H., & Klironomos, J. N. (2007). Influence of phylogeny on fungal community assembly and ecosystem functioning. *Science*, 316(5832), 1746–1748. <https://doi.org/10.1126/science.1143082>
- Marten, G. G. (1988). Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural Systems*, 26, 291–316. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308521X88900467>

- Martínez-Rubin de Celis, E., Rivas-Robles, E., Martínez-Corral, L., Frías-Ramírez, J., Orozco-Vidal, J., Fortis-Hernández, M., & Segura Castruita, M. A. (2011). Alfalfa (*Medicago sativa* L.) production in soil at different bulk densities under controlled conditions. *Phyton*, 80, 189–192. <https://doi.org/10.32604/phyton.2011.80.189>
- Miller, R. M., & Kling, M. (2000). The importance of integration and scale in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 226(2), 295–309. <https://doi.org/10.1023/A:1026554608366>
- Morton, J. B., Snyder, M., Sturmer, S. L., Heldretch, K., Nichols, K. A., & Wheeler, W. (1996). Classification and Identification of arbuscular mycorrhizal fungi. In *Workshop at the First International Conference on Mycorrhizae*.
- Neri-Luna, C., & Villarreal-Ruiz, L. (2012). Simbiosis micorrícica: un análisis de su relevante función ecosistémica y en la provisión de servicios ambientales. *Interacciones Ecológicas, October 2012*, 37–62.
- R Core Team. (2021). R Core Team 2021 R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. <https://www.R-project.org/>. In *R Foundation for Statistical Computing* (Vol. 2). <https://www.r-project.org/>.
- Schüßler, A., Schwarzott, D., & Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: Phylogeny and evolution. *Mycological Research*, 105(12), 1413–1421. <https://doi.org/10.1017/S0953756201005196>
- Smith, F. A., Jakobsen, I., & Smith, S. E. (2000). Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago truncatula*. *New Phytologist*, 147(2), 357–366. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00695.x>
- Smith, & Read. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Smith, S. E., Dickson, S., & Smith, F. A. (2001). Nutrient transfer in arbuscular mycorrhizas: How are fungal and plant processes integrated? *Australian Journal of Plant Physiology*, 28(7), 683–694. <https://doi.org/10.1071/pp01033>
- van der Heijden, M. G. A., Klironomos, J. N., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A., & Sanders, I. R. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396(6706), 69–72. <https://doi.org/10.1038/23932>
- van der Heijden, M. G. A., & Scheublin, T. R. (2007). Functional traits in mycorrhizal ecology: their use for predicting the impact of arbuscular mycorrhizal fungal communities on plant growth and ecosystem functioning. *New Phytologist*, 174(2), 244–250. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02041.x>
- 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>
- Verbruggen, E., Röling, W. F. M., Gamper, H. A., Kowalchuk, G. A., Verhoef, H. A., & van der Heijden, M. G. A. (2010). Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: Large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils. *New Phytologist*, 186(4), 968–979. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03230.x>
- Wagg, C., Jansa, J., Schmid, B., & van der Heijden, M. G. A. (2011). Belowground biodiversity effects of plant symbionts support aboveground productivity. *Ecology Letters*, 14(10), 1001–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03881.x>

doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01666.x

Walker, C., Mize, C. W., & McNabb, H. S. (1982). Populations of endogonaceous fungi at two locations in central Iowa. *Canadian Journal of Botany*, 60(12), 2518–2529. <https://doi.org/10.1139/b82-305>