

CRECIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE BIOMASA DE OCHO ESPECIES DE *MIMOSA* (LEGUMINOSAE) Y SU RELACIÓN CON LA NODULACIÓN Y MICORRIZACIÓN ARBUSCULAR

GROWTH AND BIOMASS ALLOCATION OF EIGHT *MIMOSA* SPECIES (LEGUMINOSAE) LINKED TO NODULATION AND ARBUSCULAR MYCORRHIZATION

SUSANA A. MONTAÑO-ARIAS¹, NOÉ MANUEL MONTAÑO^{1*}, SARA LUCÍA CAMARGO-RICALDE^{1*},
 ROSAURA GREYER¹, GENARO MONTAÑO-ARIAS², EDUARDO CHIMAL-SÁNCHEZ³

¹ Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México.

² Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental, Carrera de Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

³ Laboratorio de Zonas Áridas y Carrera de Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

*Autores de correspondencia: nmma@xanum.uam.mx / slcr@xanum.uam.mx

Resumen

Antecedentes: En plantas, las compensaciones morfo-fisiológicas, así como las asociaciones microbianas, regulan el uso de recursos limitantes y el ensamblaje de las comunidades vegetales.

Pregunta: ¿Qué relación tienen la micorrización arbuscular y nodulación bacteriana con el crecimiento y asignación de biomasa de ocho especies de *Mimosa*?

Especies de estudio: *Mimosa adenanthoides*, *M. biuncifera*, *M. calcicola*, *M. lacerata*, *M. luisana*, *M. polyantha*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*.

Sitio de estudio y fechas: Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México, 2013 y 2014.

Método: Las plantas crecieron en dos tratamientos: i) Con inóculo de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) y bacterias fijadoras de N₂ (BFN) de islas de recursos (IR) de *Mimosa*, y ii) sin inóculo, con nueve réplicas por especie/tratamiento. Se evaluó el crecimiento de las plantas, la micorrización arbuscular y la nodulación en las raíces.

Resultados: Las especies de *Mimosa*, creciendo sin inóculo, variaron en crecimiento y asignación de biomasa con valores inferiores al tratamiento con inóculo, y se agruparon en tres diseños morfológicos: i) *M. calcicola* y *M. lacerata*; ii) *M. adenanthoides*, *M. luisana* y *M. polyantha*; y iii) *M. biuncifera*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*. Asimismo, las ocho especies conformaron un cuarto diseño cuando crecieron con inóculo que favoreció su crecimiento y modificó sus patrones de asignación de biomasa.

Conclusiones: Los resultados contribuyen a delinear posibles grupos funcionales en *Mimosa*, pero se requiere la evaluación de otros rasgos funcionales para seleccionar especies con potencial en la restauración ambiental y comprender el ensamblaje de las comunidades vegetales.

Palabras clave: Bacterias, crecimiento, Glomeromycota, islas de recursos, leguminosas, Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Abstract

Background: Morpho-physiological compensations and microbial associations in plants regulate the use of limiting resources and the assemblage of plant communities.

Question: What is the relationship between arbuscular mycorrhization and bacterial nodulation with the growth and biomass allocation of eight species of *Mimosa*?

Species study: *Mimosa adenanthoides*, *M. biuncifera*, *M. calcicola*, *M. lacerata*, *M. luisana*, *M. polyantha*, *M. purpusii* and *M. texana* var. *filipes*

Study site and date: Tehuacán-Cuicatlán Valley, Puebla-Oaxaca, Mexico, 2013 and 2014.

Methods: Plants were grown under two treatments: i) With soil inoculum with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and N₂-fixing bacteria (NFB) from *Mimosa* resource islands (RI), and ii) Control (without AMF neither NFB inoculum), with nine replicates per species/treatment; plant growth, arbuscular mycorrhization, and root nodulation were evaluated.

Results: *Mimosa* species growing without AMF neither NFB (control) vary in growth and biomass allocation, and were grouped into three morphological designs: i) *M. calcicola* and *M. lacerata*; ii) *M. adenanthoides*, *M. luisana* and *M. polyantha*; and iii) *M. biuncifera*, *M. purpusii* and *M. texana* var. *filipes*. Also, the eight *Mimosa* species formed a fourth design, when they grew inoculum of soil with AMF and NFB, which favored their growth and modified their biomass allocation patterns.

Conclusions: This study contributes to delineate possible functional groups in *Mimosa*, but other functional traits should be evaluated in order to select species with potential for environmental restoration and to understand the assemblage of plant communities.

Keywords: Bacteria, Glomeromycota, legumes, plant growth, resource islands, Tehuacán-Cuicatlán Valley.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License CCBY-NC (4.0) internacional.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



El ensamblaje de especies en la conformación de comunidades vegetales depende de compensaciones morfo-fisiológicas a nivel de la planta para utilizar los recursos limitantes (Tilman 1982, 2020). Así, las comunidades vegetales podrían estar compuestas por especies con un alto grado de diferenciación y con capacidad de establecer múltiples estrategias, entre ellas reasignar recursos a su biomasa en respuesta al ambiente (Puglielli *et al.* 2021) y establecer alianzas con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) y bacterias del suelo (Huante *et al.* 1995, Aerts 1999, Tilman 2020).

En consecuencia, un rápido crecimiento vegetal ocurre cuando se establece una asociación funcional con HMA y bacterias fijadoras de nitrógeno (N_2), lo que puede promover el establecimiento y minimizar el tiempo en el que la plántula permanece vulnerable, incrementando su probabilidad de sobrevivir, en especial, durante la época seca, ya que se favorecería la exploración, explotación e incorporación de los recursos del suelo (Rincón *et al.* 2000, Pineda-García *et al.* 2011). Estas características son particularmente relevantes en especies que suelen ser dominantes o codominantes en las comunidades vegetales y altamente variables en sus simbiosis microbianas como es el caso de las leguminosas (Sprent & James 2007, Varennesa & Goss 2007, Bontemps *et al.* 2016, Sprent *et al.* 2017).

Las leguminosas tienen diferentes respuestas a la disponibilidad de recursos expresadas en sus patrones de crecimiento y asignación de biomasa que a su vez moldean su coexistencia con otras especies dentro de las comunidades (Negreiros *et al.* 2009, Roscher *et al.* 2015). De manera que, cuando los nutrientes son escasos, las leguminosas, como otras plantas, reducen sus tasas de crecimiento e incrementan la translocación de biomasa a sus raíces al asociarse con HMA y bacterias para adquirir recursos como agua, fósforo y/o nitrógeno (Veresoglou *et al.* 2012). Esto podría implicar que las leguminosas ajustan su plasticidad morfo-fisiológica en condiciones de elevado estrés ambiental, lo que aumenta su éxito en ecosistemas secos, convirtiéndolas en una buena opción para la restauración ambiental (Camargo-Ricalde *et al.* 2010a).

Se ha documentado que leguminosas como *Acacia concurrens* Pedley y *A. saligna* (Labill.) H. Wendl. (Jasper *et al.* 1989), *A. mangium* Willd., *A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. y *A. melanoxylon* R. Br. (Sun *et al.* 1992); así como *Prosopis laevigata* -ahora *Neltuma laevigata*- (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. (Monroy-Ata *et al.* 2007, Hernández-Madrigal *et al.* 2022) y varias especies del género *Mimosa* (Huante *et al.* 1995, Gavito *et al.* 2008, Negreiros *et al.* 2009, Camargo-Ricalde *et al.* 2010a, Peña-Becerril *et al.* 2016) generalmente, pueden aumentar su asignación de biomasa aérea y subterránea bajo condiciones de sequía, fertilización y en condiciones de colonización micorrízica y nodulación en sus raíces.

Algunas especies de *Mimosa* son elementos florísticos que potencian la restauración de sus ambientes (Camargo-Ricalde *et al.* 2002, Montaño-Arias *et al.* 2015, 2017, 2018), tal es el caso del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC), Puebla-Oaxaca, México, región que alberga 16 especies, entre ellas, *M. adenanthroides* (M. Martens & Galeotti) Benth., *M. biuncifera* Benth., *M. calicicola* B.L. Rob., *M. lacerata* Rose, *M. luisana* Brandegees, *M. polyantha* Benth., *M. purpusii* Brandegees y *M. texana* (A. Gray) Small var. *filipes* (Britton & Rose) Barneby (Martínez-Bernal & Grether 2006), las cuales, en su mayoría, forman islas de recursos (IR) (Camargo-Ricalde *et al.* 2002, 2010b) y presentan algún uso local (Dhillion & Camargo-Ricalde 2005).

Estudios realizados en el VTC muestran que las especies de *Mimosa* forman IR micorrízicas (Camargo-Ricalde & Dhillion 2003, Camargo-Ricalde & Esperón-Rodríguez 2005) con suelos ricos en nutrientes (Camargo-Ricalde *et al.* 2010b) que contienen una diversa comunidad de HMA (Chimal-Sánchez *et al.* 2016, 2022) y una alta dependencia micorrízica que, en conjunto con las bacterias nodulantes, favorecen su propio crecimiento (Camargo-Ricalde *et al.* 2010a). Lo anterior, podría regular la circulación de nutrientes entre plantas, particularmente con aquellas que son filogenéticamente distantes (Montesinos-Navarro *et al.* 2016). Sin embargo, el conocimiento sobre el crecimiento de las especies de *Mimosa*, la asignación de biomasa y los efectos que tienen los HMA y las bacterias fijadoras de N_2 sobre estas variables es escaso (Camargo-Ricalde *et al.* 2010a, Montaño-Arias *et al.* 2021). Este conocimiento permitiría seleccionar, adecuadamente, las especies propicias para inducir procesos de facilitación que promuevan el ensamblaje de las comunidades vegetales y la restauración ambiental.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la micorrización arbuscular y la nodulación bacteriana en el crecimiento y la asignación de biomasa de *M. adenanthroides*, *M. biuncifera*, *M. calicicola*, *M. lacerata*,

M. luisana, *M. polyantha*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*. Lo anterior, bajo el supuesto de que las ocho especies, al formar parte del mismo género y enfrentar los mismos problemas ambientales de un ecosistema semiárido estacional, presenten patrones de crecimiento similares, producto de un beneficio semejante debido a sus asociaciones micorrízicas y bacterianas.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y colecta de semillas. Las especies de *Mimosa* seleccionadas se distribuyen en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México ($17^{\circ} 20' - 18^{\circ} 53' \text{ N}$ y $96^{\circ} 55' - 97^{\circ} 44' \text{ W}$), en donde predomina un clima semiárido con una temperatura promedio de 21°C y una precipitación anual que varía de 400 a 600 mm con una estación seca que se extiende de noviembre a abril y, aproximadamente, el 74 % de la lluvia ocurre entre mayo y octubre (Valiente-Banuet 1991). Los suelos predominantes en las áreas donde ocurren estas especies se clasifican como Leptosols y Calcisols (WRB 2014).

Dentro del Valle se establecieron cinco sitios de muestreo en donde se localizaron las especies de *Mimosa* (Figura 1) y, en la temporada de máxima fructificación (octubre del 2013), se recolectaron sólo los frutos maduros de siete individuos por especie, abarcando el área total de la copa de la planta. Las semillas fueron extraídas inmediatamente y se seleccionaron únicamente las sanas. Todas las semillas de la misma especie fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta que representara la variabilidad de cada especie. Las semillas se almacenaron en contenedores de plástico bajo condiciones ambientales de temperatura y humedad de la Ciudad de México (20°C y 50-60 % de humedad relativa). Los ejemplares botánicos de respaldo están depositados en el Herbario Metropolitano (UAMIZ, el acrónimo del herbario de acuerdo con Thiers 2020), de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

Caracterización de semillas y tratamientos previos a la siembra. Se seleccionaron 100 semillas por especie, con la finalidad de considerar el ámbito de variación morfológica. Se determinó el tamaño de la semilla registrando la longitud, ancho y grosor con un calibrador Vernier Digital (Absolute Digimatic, CD-6" CS) (Tabla 1). Una vez carac-

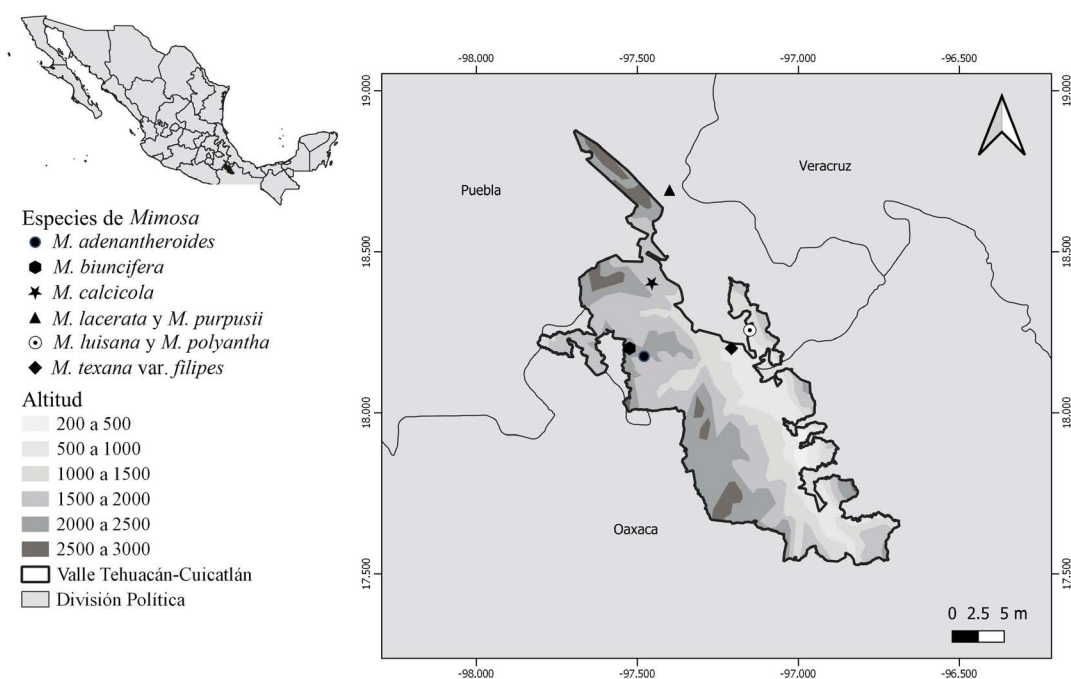


Figura 1. Sitios de colecta de semillas y localización altitudinal de ocho especies de *Mimosa* en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México.

terizadas las semillas, éstas fueron desinfectadas, lavándolas con detergente comercial (3 g en 100 mL de agua) e hipoclorito de sodio al 5 % durante 3 minutos (Camargo-Ricalde & Grether 1998).

Tabla 1. Tamaño de las semillas de ocho especies de *Mimosa* presentes en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México.

Especie/Variables	Tamaño (mm)		
	Largo	Ancho	Grosor
<i>M. adenantheroides</i>	2.3-3.7	1.5-3.5	1.2-2.4
<i>M. biuncifera</i>	3.6-5.8	1.9-2.7	1.0-1.8
<i>M. calcicola</i>	2.3-3.6	1.7-3.5	1.4-2.4
<i>M. lacerata</i>	3.8-5.4	2.6-3.9	0.9-1.6
<i>M. luisana</i>	2.6-3.5	1.8-2.4	2.0-2.7
<i>M. polyantha</i>	2.6-4.3	1.9-4.0	0.8-2.0
<i>M. purpusii</i>	3.2-4.9	2.5-3.8	1.2-2.4
<i>M. texana</i> var. <i>filipes</i>	5.4-6.7	2.7-3.3	0.7-1.6

Diseño experimental. En marzo del 2014, las semillas se germinaron en semilleros con Peat moss (*Sphagnum*) comercial estéril como sustrato. Cuando la protófila se expandió, se eligieron al azar, 18 plántulas por especie (144 plántulas en total). Cada plántula se trasplantó en un tubo constituido de policloruro de vinilo (PVC) con capacidad de 3.5 kg. De las 144 plántulas, 72 fueron trasplantadas en arena sílica pura y esterilizada en autoclave (120 °C; 1.4 kg cm⁻²; 3 h⁻¹) como grupo control, y otras 72 plántulas en suelo que se usó como inóculo con raíces, esporas de HMA y propágulos bacterianos, ya que en estudios previos se ha demostrado la presencia de HMA y bacterias fijadoras de N₂ en los suelos de IR de *Mimosa* (Camargo-Ricalde & Dhillion 2003, Camargo-Ricalde & Esperón-Rodríguez 2005, Camargo-Ricalde *et al.* 2010a).

El inóculo utilizado se recolectó de los primeros 15 cm del perfil del suelo en dos islas de recursos (IR) por especie de *Mimosa*. El inóculo se mezcló para formar un sustrato compuesto, con la finalidad de que las especies se enfrentaran a la misma condición de fertilidad edáfica, comunidad micorrízica y microbiana. Asimismo, para facilitar la aireación y el drenaje del sustrato, el inóculo se mezcló con arena sílica pura (10:1 v/v), la cual fue esterilizada en autoclave (120 °C; 1.4 kg cm⁻²; 3 h). Así, el diseño experimental fue factorial 8 × 2, y consistió en 8 especies de *Mimosa* y 2 tratamientos (con inóculo y sin inóculo -control-), con nueve réplicas por tratamiento/especie.

Crecimiento en condiciones de invernadero. Las plántulas crecieron en un invernadero bajo las siguientes condiciones: temperatura fluctuante entre 22 y 39 °C (22 / 39 °C noche/día) y humedad relativa entre 40 y 60 %. Las plántulas se regaron cada tercer día con agua destilada y cada 20 días con solución Long-Ashton al 5 %, ya que tiene bajo contenido de fósforo, el cual no inhibe la micorrización arbuscular (Hewitt 1966) y también para hacer comparable el experimento con otros estudios previos. Esta solución nutritiva sirvió también para enmendar los requerimientos nutricionales de las plántulas en particular en el tratamiento control.

El experimento inició en marzo y finalizó en octubre del 2014, tuvo una duración de siete meses con una sola cosecha final realizada a los 215 días de edad. Al término del experimento, se cosecharon los individuos de cada especie; fueron medidos en altura del tallo (parte aérea) y en longitud de la raíz con una cinta métrica graduada, y se registró el número de pinnas por hoja. Asimismo, se determinó el área foliar total de cada individuo con un medidor de área foliar Delta-T Image Analysis System (DIAS II Cambridge CB5 OEJ, England).

Finalmente, en cada individuo por especie, se separaron las hojas, el tallo y la raíz, y se secaron en un horno (Ríos Rocha, S.A., Model EC-33) a 60 °C hasta alcanzar un peso seco constante. Cabe señalar que las raíces fueron pre-

viamente examinadas en fresco para obtención de los nódulos. Con el peso seco, se estimó la biomasa seca esto para cada especie; además, se calculó la proporción raíz:tallo, que expresa la relación entre la biomasa seca asignada a la raíz y la biomasa seca asignada a la parte aérea (tallo más hojas) y que se utiliza como un índice de la asignación de recursos en la planta. También, se calculó el área foliar específica (AF_e) que expresa la relación área:peso seco de la hoja, como el área foliar dividida entre el peso seco foliar total por planta. Por otra parte, se estimó el contenido de agua del tallo, con base en el peso fresco y peso seco del tallo y dividiendo el contenido de agua entre la masa seca del tallo. Los parámetros seleccionados se han utilizado como rasgos suaves para evaluar la diferenciación morfológica y fisiológica a nivel de plántula en especies características de bosques secos, entre éstas, varias leguminosas (Pineda-García *et al.* 2011, Roscher *et al.* 2015).

Evaluación de la colonización micorrízica arbuscular y nódulos. Las raíces de cada individuo fueron examinadas visualmente, localizando los nódulos formados para, posteriormente, desprenderlos y fijarlos en lactoglicerol. Se contó el número de nódulos totales por cada raíz sin diferenciarlos en activos o inactivos, y este parámetro se utilizó como un índice de nodulación.

Las raíces finas fueron rehidratadas y aclaradas con KOH al 10 % por 48 h a temperatura ambiente, se eliminó el KOH y se enjuagaron las raíces con agua; posteriormente, se cubrieron con una solución de peróxido de hidrógeno al 10 % durante 20 min, seguido de un lavado con agua destilada. Después, las raíces fueron lavadas con HCl al 10 % por 15 min para neutralizar el KOH y acidificar el medio para teñir las estructuras de los HMA con azul de tripano (0.05 %) en lactoglicerol (ácido láctico + glicerol + agua) en proporciones 1:1:1 v/v/v (Phillips & Hayman 1970). Con las raíces teñidas, se elaboraron preparaciones permanentes con alcohol polivinílico en lactoglicerol (PVLG). Las preparaciones contenían 20 segmentos de raíces de aproximadamente dos centímetros de longitud, donde se evaluó el porcentaje de colonización de los hongos a través de la cuantificación de hifas cenocíticas, ovillos, arbuscúlos y vesículas características de los HMA (Hernández-Cuevas & García-Sánchez 2008), las cuales fueron observadas en un microscopio de luz Olympus BX41 (Tokyo, Japón) y reportadas como colonización micorrízica arbuscular total.

Análisis estadísticos. Los datos fueron analizados con varios ANOVA de dos vías. Un análisis por parámetro evaluado, en donde los factores fueron la especie y el tratamiento, con una $n = 9$. En todos los casos, los datos cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Cuando alguno de los factores fue significativo, una prueba Tukey (HDS) se utilizó para comparar los promedios. La relación entre la micorrización arbuscular, la formación de nódulos bacterianos y los parámetros de crecimiento, se examinó mediante un análisis de correlación de Pearson (Sokal & Rohlf 1995). Además, con el fin de examinar la variación de las respuestas de las especies y seleccionar grupos de especies de *Mimosa* con estrategias funcionales similares, se llevó a cabo un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS por sus siglas en inglés), basado en todo el conjunto de datos para todas las especies, seguido de un ANOSIM para validar los grupos. Datos redundantes fueron eliminados y aquellos con magnitudes extremas fueron estandarizados para evitar su sobre representación. En datos con gradientes diferentes de varianza, como en este caso, el NMDS utiliza toda la varianza del conjunto de datos para construir el biplot (Legendre & Legendre 2012). Los análisis se realizaron en el programa Statistica 6.1® y en todos los casos una $p \leq 0.05$ fue considerada como significativa.

Resultados

Las ocho especies de *Mimosa* examinadas son epígeas, fanerocotilares y germinaron entre el primer y segundo día después de la siembra; asimismo, la protófila surgió entre los días 27 y 28 después de la germinación y la metáfila 10 días después de la protófila. El crecimiento difirió entre las ocho especies y los parámetros para evaluarlo fueron influenciados por el tratamiento (con inóculo vs. sin inóculo). Cabe señalar que sólo la proporción raíz:tallo, el área foliar y el número de nódulos presentaron interacción significativa entre los factores especie y tratamiento (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de F y niveles de significancia del análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros de crecimiento de ocho especies de *Mimosa* crecidas en condiciones de invernadero con y sin inóculo de hongos micorrizógenos arbusculares y bacterias fijadoras de nitrógeno (N₂) proveniente de islas de recursos.

Parámetros	Especie (E)	Tratamiento (T)	E × T
Altura del tallo	17.1*	36.41***	1.23 ^{ns}
Longitud de la raíz	3.21*	4.36**	0.34 ^{ns}
Número de pinnas/hoja	10.37**	13.34***	1.26 ^{ns}
Área foliar	6.45**	19.2**	2.24 ^{ns}
Área foliar específica	4.43*	21.0***	3.12*
Proporción raíz:tallo	5.36**	32.1***	4.21*
Biomasa seca total	7.16**	24.5***	3.24 ^{ns}
Contenido de agua en la planta	9.23**	31.2***	3.39 ^{ns}
Número de nódulos	17.1*	131.4**	4.12*
Micorrización arbuscular	12.45 ^{ns}	137.4***	1.22 ^{ns}

ns= no significativo, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Las plantas de las ocho especies que crecieron con inóculo incrementaron, en promedio, 3.2 veces más la altura de sus tallos y 2.6 veces la longitud de sus raíces, con respecto a las crecidas en suelo sin inóculo. *Mimosa adenanthroides*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes* tuvieron tallos más altos que las otras cinco especies. En contraste, la altura del tallo de las plantas crecidas sin inóculo fue mayor en *M. texana* var. *filipes*, intermedia en *M. adenanthroides*, *M. biuncifera* y *M. purpusii*, y menor en *M. calcicola*, *M. lacerata*, *M. luisana* y *M. polyantha* (Figura 2A y B).

Respecto a la longitud de la raíz, también se detectaron diferencias significativas entre las plantas crecidas con y sin inóculo. En el caso de las inoculadas se observó que *M. adenanthroides* y *M. texana* var. *filipes* registraron las mayores longitudes de raíz, *M. lacerata* las menores y las otras cinco especies desarrollaron raíces con longitudes intermedias; por el contrario, la longitud de la raíz fue similar entre las especies del tratamiento sin inóculo, excepto en *M. lacerata* que registró la menor longitud de raíz (Figura 2B).

Por otro lado, los resultados muestran que el número de pinnas por hoja, así como el área foliar total y la específica, también, variaron dependiendo de la especie y del tratamiento. En el caso de las plantas que provenían del inóculo, se observó que *Mimosa biuncifera*, *M. lacerata*, *M. luisana*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes* generaron mayor número de pinnas por hoja, que *M. adenanthroides* y *M. polyantha*; mientras que *M. calcicola* tuvo un número de pinas intermedio. En contraste, las plantas sin inóculo de *M. lacerata* y *M. texana* var. *filipes* fueron las que presentaron el mayor número de pinnas por hoja, y *M. purpusii* registró valores intermedios en el número de pinas (Figura 3A).

Los valores de área foliar total y específica presentaron un patrón similar al de formación de pinnas, siendo *M. texana* var. *filipes* la que mostró los valores más altos de área foliar total y *M. lacerata* los más bajos; mientras que, en las plantas sin inóculo, *M. adenanthroides*, *M. polyantha* y *M. texana* var. *filipes* tuvieron las mayores áreas foliares totales y específicas en comparación con el resto de las especies examinadas (Figura 3B y C).

Las ocho especies de *Mimosa* que crecieron con inóculo incrementaron entre 2 y 2.5 veces la proporción raíz:tallo, la biomasa seca y el contenido de agua, en comparación con las plantas sin inóculo (Figura 4A-C). En el tratamiento con inóculo, *M. texana* var. *filipes* tuvo mayor proporción raíz:tallo y más biomasa seca que las otras siete especies, destacando una menor biomasa seca en *M. calcicola* y *M. polyantha*. Además, las plantas de *M. adenanthroides*, *M. biuncifera*, *M. luisana*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes* tuvieron mayor contenido de agua que *M. calcicola*, *M. lacerata* y *M. polyantha* (Figura 4C). En contraste, las plantas sin inóculo no mostraron diferencias significativas en la proporción raíz:tallo. Sin embargo, la biomasa seca y el contenido de agua sí difirieron entre las especies, siendo *M. biuncifera*, *M. lacerata* y *M. texana* var. *filipes* las que presentaron mayor biomasa seca y contenido de agua.

El número de nódulos de bacterias fijadoras de N₂ observado en las raíces de las especies estudiadas, dependió de la especie y del tratamiento. Las plantas sin inóculo no presentaron ningún nódulo; en contraste, las plantas de *M.*

texana var. *filipes* crecidas con inóculo, presentaron la mayor cantidad promedio de nódulos bacterianos; mientras que *M. calcicola*, *M. polyantha* y *M. purpusii* mostraron la menor nodulación (< 10 nódulos por planta) (Figura 5A).

Por otra parte, solo las raíces de las plantas de *M. adenantheroides* y *M. polyantha* que crecieron sin inóculo registraron colonización micorrízica arbuscular menor al 3 %; mientras que las crecidas con inóculo presentaron porcentajes de colonización micorrízica en un intervalo de 28 a 73 %, los cuales variaron entre las especies. Los valores más altos de colonización micorrízica arbuscular se registraron en *M. adenantheroides*, *M. lacerata*, *M. luisana* y *M. polyantha*; mientras que los más bajos se presentaron en *M. biuncifera* y los intermedios en *M. calcicola*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes* (Figura 5B).

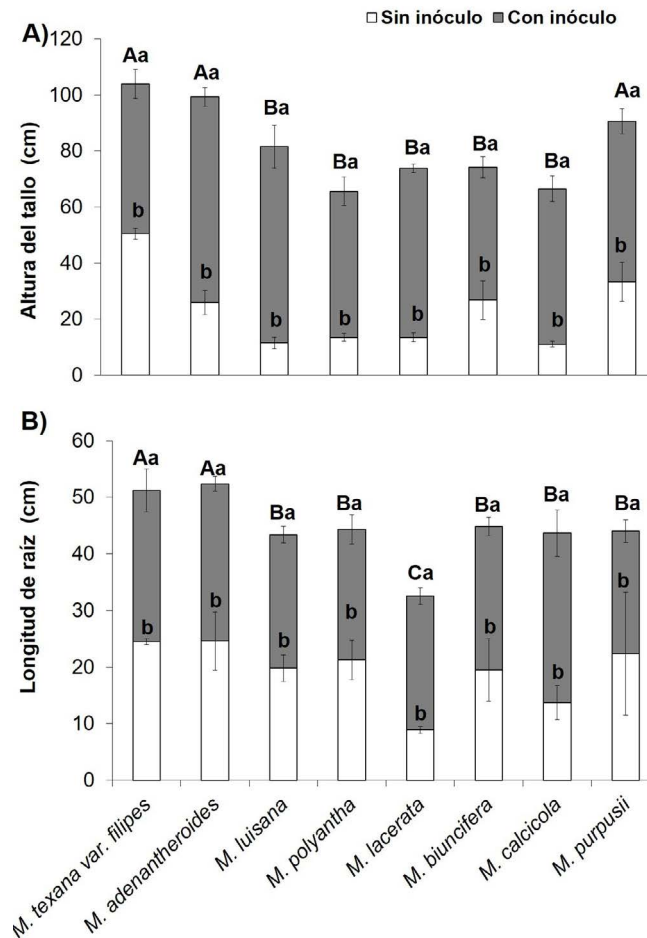


Figura 2. Variación de la altura del tallo (A) y longitud de la raíz (B) de plantas de ocho especies de *Mimosa* creciendo con inóculo (gris) y sin inóculo (blanco) de suelo de islas de recursos en condiciones de invernadero. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, las mayúsculas entre especies y las minúsculas entre las inoculadas y el control.

Los coeficientes de correlación entre los parámetros de crecimiento evaluados, respecto al número de nódulos bacterianos y el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular, indican que la altura del tallo y la longitud de raíz alcanzadas están relacionadas con la colonización micorrízica; mientras que los demás parámetros se relacionan tanto con la colonización micorrízica como con la cantidad de nódulos, aunque, en general, los coeficientes de correlación fueron mayores con la colonización micorrízica que con la nodulación, excepto en el caso del área foliar y la proporción raíz:tallo, que estuvieron mejor correlacionados con el número de nódulos (Tabla 3).

El NMDS mostró que, con base en los atributos morfológicos de crecimiento evaluados, se conforman cuatro grupos, tres de estos incluyen a todas las especies creciendo sin inóculo y cada uno de estos tres grupos está conformado por especies que tuvieron similitudes en algunos de sus rasgos de desarrollo morfológico; mientras que el cuarto grupo está conformado por todas las especies de *Mimosa* estudiadas creciendo con inóculo; es decir, con presencia de simbiontes fúngicos y bacterianos en sus raíces (Figura 6).

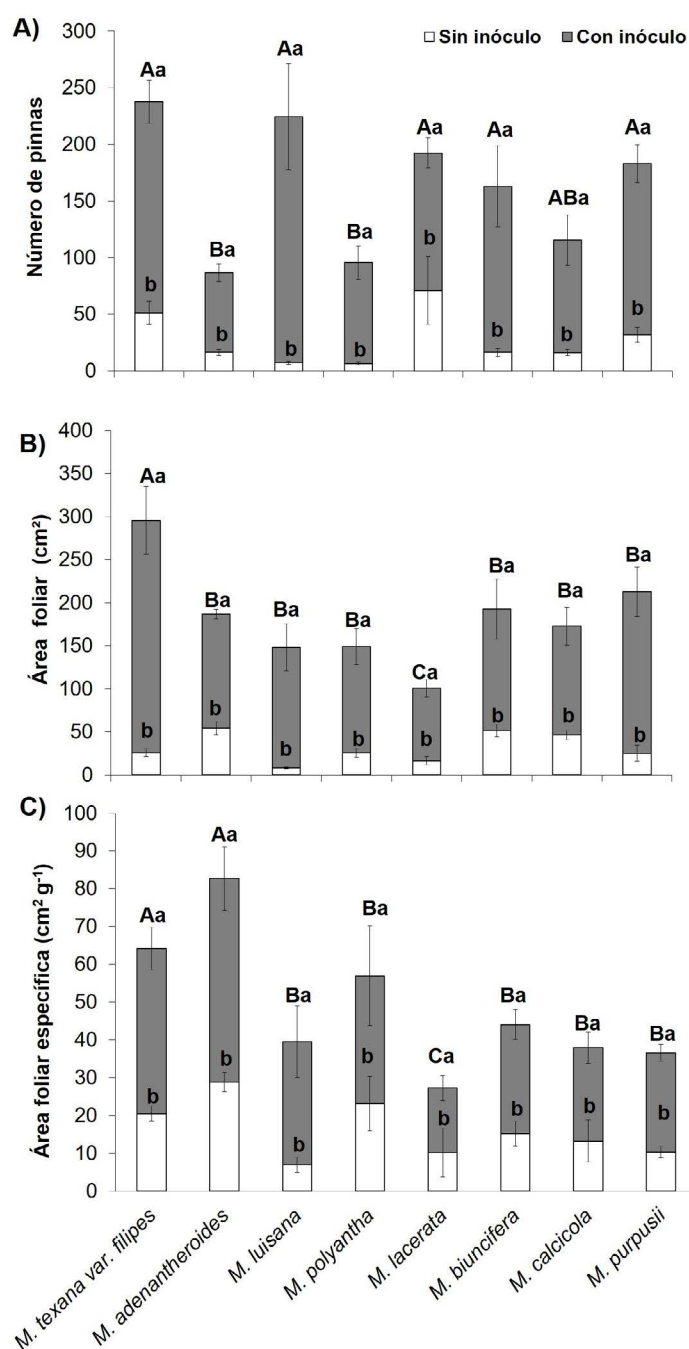


Figura 3. Variación del número de pinnas/hoja (A), área foliar total (B) y específica (C) de plantas de ocho especies de *Mimosa* creciendo con inóculo (gris) y sin inóculo (blanco) de suelo de islas de recursos en condiciones de invernadero. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, las mayúsculas entre especies y las minúsculas entre inoculadas y sin inóculo.

Discusión

Las plantas presentan diferentes combinaciones de rasgos morfológicos y fisiológicos que influyen en la estructura de las comunidades y en el funcionamiento del ecosistema (Escudero & Valladares 2016), por lo que es importante considerar estos rasgos, además de los taxonómicos y filogenéticos, en la estimación de la diversidad funcional de las comunidades (Violle *et al.* 2007).

Los patrones de crecimiento de las ocho especies de *Mimosa*, crecidas con y sin inóculo, se muestran relativamente diferentes, a pesar de las similitudes inherentes a su historia de vida y filogenia (Simon *et al.* 2011). No obstante, algunas especies tuvieron mayor similitud en algunos de sus rasgos morfológicos de crecimiento que, a su vez, difirieron de las otras especies de *Mimosa*. Tales diferencias sugieren que cuando las plantas crecen sin inóculo y no tienen posibilidad de establecer asociaciones micorrízicas y bacterianas, podrían conformar tres grupos de especies con diferentes tipos de respuestas morfo-fisiológicas al ambiente. De acuerdo con Rincón *et al.* (2000), estos grupos son llamados diseños y fueron propuestos por primera vez en leguminosas del género *Caesalpinia*. Estos diseños involucran el registro cualitativo de los rasgos morfológicos de las plantas como un primer paso para categorizar a las especies en grupos funcionales tradicionales mediante rasgos suaves (Violle *et al.* 2007, Funk *et al.* 2017).

Tabla 3. Coeficientes de Correlación de Pearson entre las variables de crecimiento, y las de nodulación bacteriana y micorrización arbuscular para cada una de las ocho especies de *Mimosa* examinadas en este estudio.

Parámetros	Número de nódulos	Micorrización arbuscular
Altura del tallo	0.17 ^{ns}	0.76 ^{***}
Longitud de la raíz	0.14 ^{ns}	0.39 ^{***}
Número de pinas/hoja	0.35 ^{**}	0.44 ^{***}
Área foliar	0.58 ^{***}	0.44 ^{***}
Área foliar específica	0.06 ^{ns}	-0.058 ^{ns}
Proporción raíz:tallo	0.44 ^{**}	0.08 ^{ns}
Biomasa seca total	0.29 [*]	0.58 ^{***}
Contenido de agua en la planta	0.33 ^{**}	0.61 ^{***}
Número de nódulos	---	0.15 ^{ns}

ns= no significativo, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Un diseño corresponde a un grupo de especies, en este caso de *Mimosa*, que reúnen un conjunto de características morfológicas, fisiológicas e, incluso, anatómicas, moldeadas por las características ecológicas relevantes para su crecimiento y reproducción (Rincón *et al.* 2000) y, probablemente, heredadas a estas plantas a través de sus semillas como se ha demostrado en otras leguminosas como *P. laevigata* (Hernández-Madriral *et al.* 2022). La biomasa de las especies estudiadas de *Mimosa* está en el intervalo reportado en 34 especies de leguminosas leñosas, entre ellas, *M. tenuiflora* (Willd.) Poir.; en donde se observó que cuando las especies están limitadas de nutrientes, presentan los valores más bajos de biomasa (Huante *et al.* 1995), esto coincide con los registrados en las plantas sin inóculo y los más altos en las plantas con inóculo, lo que sugiere que tanto la disponibilidad de nutrientes, como la interacción planta-simbionte, podrían moldear la existencia de estos diseños morfo-fisiológicos en leguminosas.

Con base en lo anterior y en el crecimiento y asignación de biomasa de las especies de *Mimosa* examinadas sin inóculo, se registraron tres diseños. El primero corresponde a *M. calcicola* y *M. lacerata*, el segundo a *M. adenanthoides*, *M. luisana* y *M. polyantha* y, el tercer diseño a *M. biuncifera*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*. Los resultados indican que estas especies de *Mimosa* presentan similitudes conformando diseños morfo-fisiológicos particulares y, a su vez, difieren de otros diseños, lo que les confiere la capacidad de explorar, explotar o incorporar de forma diferencial los recursos del suelo, lo que favorece su coexistencia.

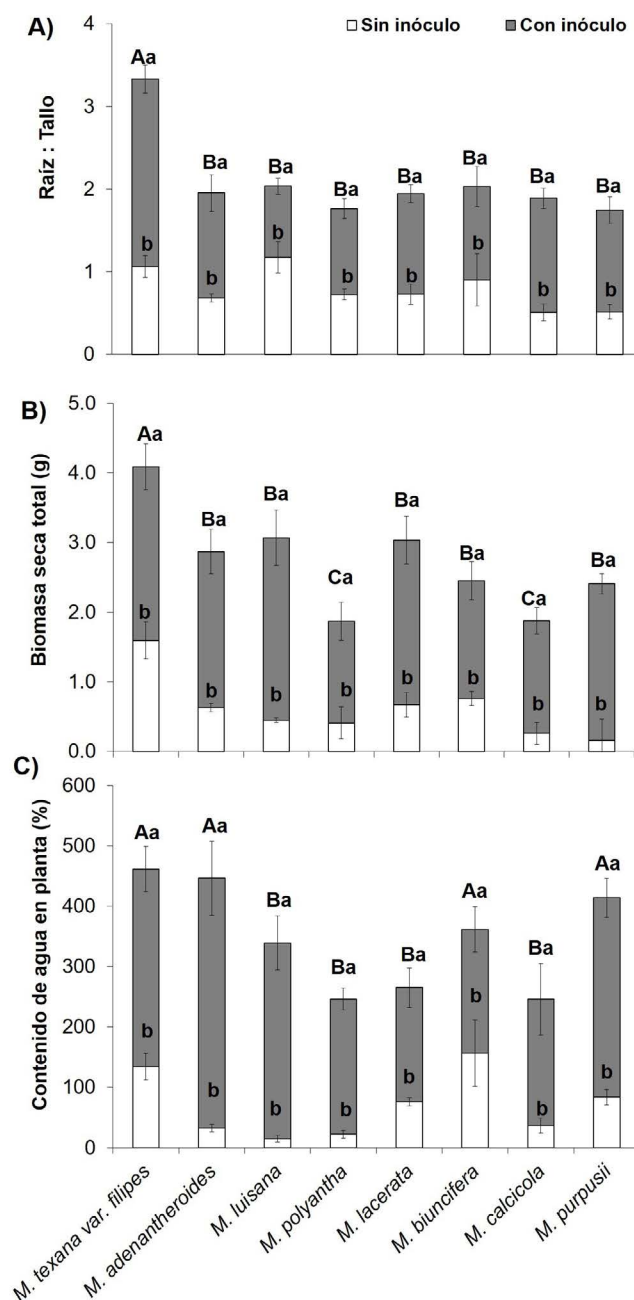


Figura 4. Variación de la proporción raíz:tallo (A), biomasa seca total (B) y contenido de agua (C) de plantas de ocho especies de *Mimosa* creciendo con inóculo (gris) y sin inóculo (blanco) de suelo de islas de recursos en condiciones de invernadero. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, las mayúsculas entre especies y las minúsculas entre inoculadas y sin inóculo.

Se considera que el desfasamiento en la altura del tallo principal, el número de pinnas por hoja, la biomasa que alcanzan durante el período de crecimiento y el contenido de agua en sus tejidos, son factores importantes para la conformación de estos diseños morfo-fisiológicos. No obstante, otros parámetros no evaluados en este estudio como la edad en la que los individuos de cada especie alcanzan su máxima tasa de crecimiento, la morfología de la raíz (Huante *et al.* 1988, Rincón *et al.* 2000) y los rasgos fisiológicos (Funk *et al.* 2017), así como el utilizar un sustrato estéril con nutrientes como control (*e.g.*, suelo de un área abierta o de otras IR) podrían ser, incluso, más informati-

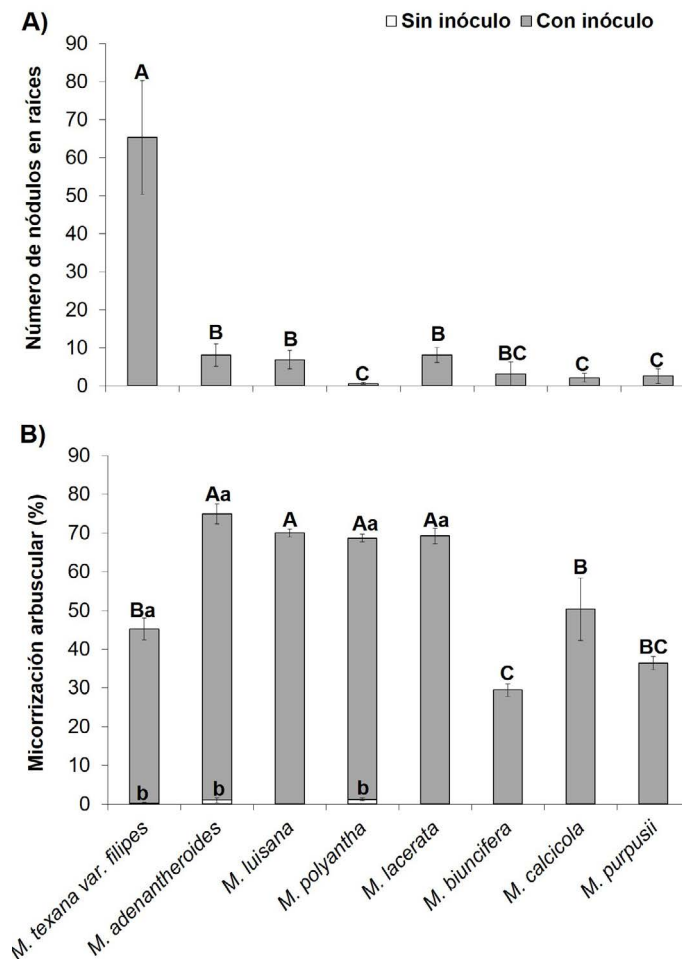


Figura 5. Variación en el número de nódulos en la raíz (A) y el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular (B) en plantas de ocho especies de *Mimosa* creciendo con inóculo (gris) y sin inóculo (blanco) de suelo de islas de recursos en condiciones de invernadero. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, las mayúsculas entre especies y las minúsculas entre inoculadas y sin inóculo.

vos. Asimismo, el tamaño y la masa de las semillas podrían tener relevancia en germinación, desarrollo y sobrevivencia de las plantas (Matilla 2004). Este estudio consideró el tamaño de las semillas e indica que los diseños podrían no modificarse al incorporar la masa, ya que, en general, los intervalos de tamaño se superponen entre las especies. No obstante, todos estos aspectos deberán documentarse en futuras investigaciones con estas especies de *Mimosa*.

El diseño conformado por *M. calicicola* y *M. lacerata* indica que las plantas evaluadas alcanzan similares alturas, longitud de raíces, área foliar específica, biomasa seca y contenido de agua, pero difieren en el número de pinnas por hoja y en el área foliar. Respecto a la asignación de recursos, *M. calicicola* asigna más recursos al tallo y *M. lacerata* más a la raíz, lo que podría explicar su coexistencia dentro del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en donde se han registrado como elementos florísticos de una misma comunidad vegetal (Conde 2016) o bien reflejar el hecho de que no comparten intervalos de distribución altitudinal dentro del Valle (Camargo-Ricalde *et al.* 2002).

El diseño en el que se agruparon *M. adenanthroides*, *M. luisana* y *M. polyantha* está explicado porque las plantas evaluadas tienen similitud en la altura de sus tallos, longitud de raíces, cantidad de pinnas por hoja, biomasa seca y contenido de agua. No obstante, estos rasgos, en conjunto con una mayor asignación de biomasa al tallo, área foliar total y específica, en el caso de *M. adenanthroides* y *M. polyantha*, podrían explicar por qué estas especies no coexisten en las comunidades y ocupan distintos intervalos altitudinales. En contraste, las diferencias entre *M. luisana* y *M.*

polyantha enfatizan el hecho de que esta última asigna mayor biomasa a la raíz que al tallo; esto podría explicar la coexistencia de ambas especies en algunas comunidades dentro del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Camargo-Ricalde *et al.* 2002), ya que tienen estrategias distintas de explotación de los recursos del suelo.

El tercer diseño integrado por *M. biuncifera*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*, incluye a las especies con diferente forma de vida (arborescente erecta, arborescente decumbente y arbórea, respectivamente) y patrones de crecimiento, en donde las plantas de *M. texana* var. *filipes* alcanzaron mayor altura del tallo, longitud de raíz, número de pinnas por hoja y biomasa seca que las de *M. biuncifera* y *M. purpusii*, siendo estas dos últimas similares en su crecimiento, pero con mayor área foliar y biomasa que las otras especies. Además, las plantas de las tres especies difieren en cantidad y asignación de biomasa (*M. texana* var. *filipes* > *M. biuncifera* > *M. purpusii*), mientras que el contenido de agua fue similar entre las dos primeras especies y menor en *M. purpusii*. Esto sugiere que las tres especies de este diseño tienen estrategias particulares de explotación de recursos dentro del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, que las podrían situar en sitios ambientalmente distintos que no implican, necesariamente, su coexistencia.

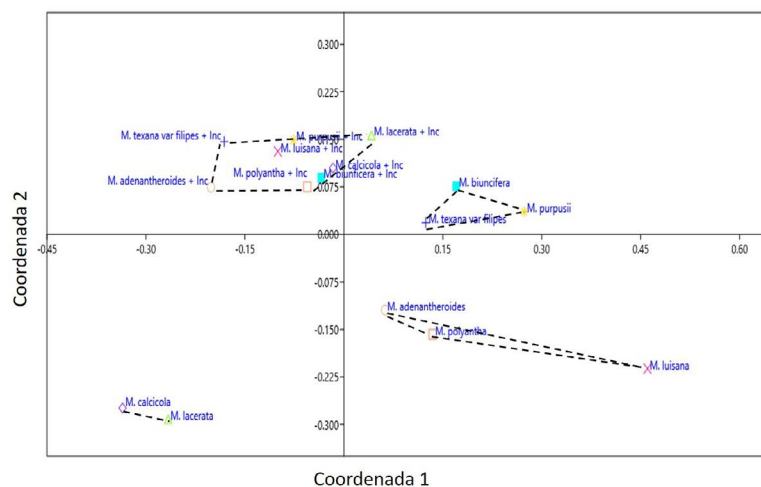


Figura 6. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS por sus siglas en inglés) basado en el total de parámetros de crecimiento de plantas de ocho especies del género *Mimosa* creciendo con y sin inóculo de suelo de islas de recursos en condiciones de invernadero. Nivel de Stress = 0.22; ANOSIM: N = 9999, R = -0.46, $p = 0.05$. Las líneas punteadas indican los polígonos de convergencia entre grupos de especies creciendo con inóculo (+Inc) y sin inóculo.

Las ocho especies de *Mimosa* crecidas en suelo con inóculo y con registro significativo de colonización micorrízica arbuscular y presencia de nódulos fijadores de N_2 en sus raíces, respecto al control, conformaron el cuarto diseño morfo-fisiológico, lo que indica que el establecimiento de asociaciones simbióticas modifica los patrones de crecimiento y asignación de biomasa en las especies de *Mimosa*. Así, el crecimiento de las ocho especies de *Mimosa* fue favorecido cuando las plantas crecieron con inóculo, ya que en este tratamiento incrementaron entre 2 y 3.5 veces su altura del tallo, longitud de raíces, biomasa seca y asignación de biomasa; así como de 3 a 4 veces su número de pinnas por hoja, área foliar total y específica, y contenido de agua. Esto coincidió con los porcentajes de micorrización arbuscular en las raíces de las ocho especies, los cuales variaron entre el 30 y 72 % y con la presencia de nódulos en las raíces; aunque, en cantidades bajas, con un promedio menor a 10 nódulos por raíz, excepto para *M. texana* var. *filipes*, que registró, en promedio, hasta 68 nódulos. En las ocho especies examinadas, la colonización micorrízica y nodulación influenciaron el crecimiento, lo que podría promover sus posibilidades de establecimiento, como se ha reportado en otras especies de *Mimosa* (Gavito *et al.* 2008, Camargo-Ricalde *et al.* 2010a, Souza *et al.* 2016), así como la conservación de los reservorios de HMA dentro del Valle al formar IR micorrízicos (Camargo-Ricalde & Dhillon 2003, Camargo-Ricalde & Esperón-Rodríguez 2005, Chimal-Sánchez *et al.* 2016, Chimal-Sánchez *et al.* 2020, 2022).

El mejoramiento del crecimiento en las plantas de *Mimosa*, en simbiosis, podría estar relacionado con sus cambios fisiológicos, ya que los hongos micorrizógenos arbusculares incrementan la absorción de nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno al explorar un mayor volumen de suelo (Smith & Read 2008, Veresoglou *et al.* 2012) y esto promueve la nutrición, acumulación de clorofila y azúcares, favoreciendo el estado fisiológico de las plantas, como se ha reportado en diferentes especies del clado mimosoide (Monroy-Ata *et al.* 2007, Gavito *et al.* 2008, Peña-Becerril *et al.* 2016). Además, es aceptado que el efecto de la micorriza arbuscular sobre el crecimiento, en leguminosas, puede potenciarse a través de la simbiosis tripartita que se establece con bacterias fijadoras de N_2 (Varennesa & Goss 2007, Camargo-Ricalde *et al.* 2010a, Sprent *et al.* 2017).

Bajo el escenario de conformación del cuarto diseño, resultante de las dos asociaciones microbianas evaluadas, puede darse una reducción en la fuerza de la competencia interespecífica por recursos, lo que promovería la coexistencia de las especies e incrementaría la biomasa de la comunidad. Así, las diferencias interespecíficas de los rasgos morfo-fisiológicos tendrían influencia, no sólo en el ensamblaje, sino también en la estructura funcional de la comunidad (Escudero & Valladares 2016). En una región semiárida como el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, las múltiples formas de vida presentes permiten a las especies utilizar, de manera diferenciada, los recursos, lo que implica que las diversas respuestas de las ocho especies de *Mimosa* con y sin simbiontes micorrizicos y/o bacterianos fijadores de N_2 podrían jugar un papel crucial para adaptarse a los cambios ambientales que ocurren en este ecosistema. Esto se debe a que la variación en la distribución de los diseños en el espacio, estaría ligada a cambios en la importancia relativa de los rasgos funcionales de las especies de *Mimosa* estudiadas (*e.g.*, estrategias adaptativas basadas en la morfología, fisiología, variación en la forma de vida), lo que llevaría a una diferenciación en la explotación de los recursos del suelo, que podría reflejarse a largo plazo en el ensamblaje y funcionamiento de las comunidades vegetales (Datry *et al.* 2016).

En el contexto de la restauración ambiental, los resultados sugieren que, dadas las respuestas favorables de las ocho especies de *Mimosa* a sus simbiontes, el cuarto diseño morfo-fisiológico, tendría mayor potencial de favorecer el establecimiento de estas especies ante las condiciones de estrés ambiental y limitación de recursos impuestas por un disturbio. Los resultados sugieren que *M. texana* var. *filipes* y *M. adenanthroides* son las más apropiadas para la restauración. No obstante, es también necesario elegir las en función de otros rasgos como su distribución, las propiedades de su madera (Montaño-Arias *et al.* 2017, 2018) y otros aspectos fisiológicos ligados al tiempo en el que establecen las simbiosis, esto brindaría mayor certeza en el uso de una u otra especie de *Mimosa* con fines de tener mayor éxito en la restauración ambiental de sitios degradados dentro del Valle.

Este estudio es el primero en documentar el crecimiento y asignación de biomasa de ocho especies de *Mimosa* que se distribuyen en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México, con el propósito de detectar posibles grupos funcionales dentro del género. Las ocho especies de *Mimosa* estudiadas varían en crecimiento y asignación de biomasa, conformando tres diseños morfo-fisiológicos cuando crecen sin el efecto de HMA y bacterias fijadoras de N_2 : i) *M. calcicola* y *M. lacerata*; ii) *M. adenanthroides*, *M. luisana* y *M. polyantha*; y iii) *M. biuncifera*, *M. purpusii* y *M. texana* var. *filipes*, pero cuando sus raíces están colonizadas por HMA y bacterias fijadoras de N_2 que favorecen significativamente su desarrollo y modifican sus patrones de crecimiento, las ocho especies conforman un cuarto diseño. Los cuatro diseños representan una síntesis de algunos rasgos funcionales suaves que contribuyen a delinear posibles grupos funcionales dentro de este género. Aún es necesario evaluar aquellos rasgos funcionales duros (*e.g.*, procesos fisiológicos) que permitan conocer cómo estas especies responden a recursos limitantes del suelo y a sus simbiontes para su coexistencia, con el propósito de seleccionar a las especies de *Mimosa* con mayor potencial para la restauración ambiental y el ensamblaje de las comunidades en este ecosistema semiárido de México.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a Jesús Ramírez Galindo y Susana Padrón por su apoyo técnico en el invernadero y laboratorio, respectivamente. SAM-A, NMM y GM-A dedicamos esta publicación en memoria de Evaristo Montaño Quezada†, nuestro padre, orgulloso campesino, quien nos apoyó cuidando del experimento y desde pequeños nos inculcó amor por el campo y la naturaleza.

Literatura citada

- Aerts R. 1999. Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant soil-feedbacks. *Journal of Experimental Botany* **50**: 29-37. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/50.330.29>
- Bontemps C, Rogel MA, Wiechmann A, Mussabekova A, Moody S, Simon MF, Moulin L, Elliott GN, Lacercat-Didier L, Dasilva C, Grether R, Camargo-Ricalde SL, Chen W, Sprent JI, Martínez-Romero E, Young JPW James EK. 2016. Endemic *Mimosa* species from Mexico prefer alphaproteobacterial rhizobial symbionts. *New Phytologist* **209**: 319-333. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13573>
- Camargo-Ricalde SL, Grether R. 1998. Germinación, dispersión y establecimiento de plántulas de *Mimosa tenuiflora* (Leguminosae) en México. *Revista de Biología Tropical* **46**: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v46i3.20088>
- Camargo-Ricalde SL, Dhillion SS, Grether R. 2002. Community structure of endemic *Mimosa* species and environmental heterogeneity in a semi-arid Mexican Valley. *Journal of Vegetation Sciences* **13**: 697-704. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02097.x>
- Camargo-Ricalde SL, Dhillion SS. 2003. Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal “resource islands” within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Mycorrhiza* **13**: 129-136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0206-5>
- Camargo-Ricalde SL, Esperón-Rodríguez M. 2005. Efecto de la heterogeneidad espacial y estacional del suelo sobre la abundancia de esporas de hongos micorrizógenos arbusculares en el valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Revista de Biología Tropical* **53**: 339-352. DOI: <https://doi.org/10.15517/RBT.V53I3-4.14594>
- Camargo-Ricalde SL, Montaño NM, Reyes-Jaramillo I, Jiménez-González C, Dhillion SS. 2010a. Effect of mycorrhizae on seedlings of six endemic *Mimosa* L. species (Leguminosae-Mimosoideae) from the semi-arid Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Tress Structure and Function* **24**: 67-78. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0379-z>
- Camargo-Ricalde SL, Reyes-Jaramillo I, Montaño NM. 2010b. Forestry insularity effect of four *Mimosa* L. species (Leguminosae-Mimosoideae) on soil nutrients of a Mexican semiarid ecosystem. *Agroforestry Systems* **80**: 385-397. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9330-y>
- Chimal-Sánchez E, Montaño NM, Camargo-Ricalde SL, García-Sánchez R, Hernández-Cuevas LV. 2016. Nuevos registros de hongos micorrizógenos arbusculares para México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **20**: 242-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.024>
- Chimal-Sánchez E, Montaño NM, Camargo-Ricalde SL, García-Sánchez R, Hernández-Cuevas LV. 2022. Endemic *Mimosa* species, forming resource islands or not, and rainfall seasonality jointly influence arbuscular mycorrhizal fungi communities in a semiarid ecosystem of Mexico. *Trees Structure and Function* (Online). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02234-4>
- Chimal-Sánchez E, Senés-Guerrero C, Varela L, Montaño NM, García-Sánchez R, Pacheco A, Montaño-Arias SA, Camargo-Ricalde SL. 2020. *Septoglomus mexicanum*, a new species of arbuscular mycorrhizal fungi from semi-arid regions in Mexico. *Mycologia* **112**: 121-132. DOI: <https://doi.org/10.1080/00275514.2019.1671147>
- Conde A. 2016. *Estructura y composición florística de los estratos arbóreo y arbustivo en Villa Alegría, Valle de Tehuacán, Puebla*. MSc. Thesis, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. 113 pp.
- Datry T, Bonada N, Heino J. 2016. Towards understanding the organization of metacommunities in highly dynamic ecological systems. *Oikos* **125**: 149-159. DOI: <https://doi.org/10.1111/oik.02922>
- Dhillion SS, Camargo-Ricalde SL. 2005. The cultural and ecological roles of *Mimosa* species in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Economic Botany* **59**: 390-394. DOI: [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2005\)059\[0390:NOEPJ2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2005)059[0390:NOEPJ2.0.CO;2)
- Escudero A, Valladares F. 2016. Trait-based plant ecology: moving towards a unifying species coexistence theory. *Oecologia* **180**: 919-922. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3578-5>
- Funk JL, Larson JE, Ames GM, Butterfield BJ, Cavender-Bares J, Firn J, Laughlin DC, Sutton Grier AE, Williams

- L, Wright J. 2017. Revisiting the Holy Grail: using plant functional traits to understand ecological processes. *Biological Reviews* **92**: 1156-1173. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.12275>
- Gavito ME, Pérez-Castillo D, González-Monterrubio CF, Vieyra-Hernández T, Martínez-Trujillo M. 2008. High compatibility between arbuscular mycorrhizal fungal communities and seedlings of different land use types in a tropical dry ecosystem. *Mycorrhiza* **19**: 47-60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-008-0203-4>
- Hernández-Madrigal F, Contreras-Negrete G, Aguilar-Romero R, Pineda-García F, González-Rodríguez A. 2022. Differentiation in seed mass and seedling biomass allocation in *Prosopis laevis* throughout its distribution range in Mexico is associated to water availability. *Botanical Sciences* **100**: 274-290. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2846>
- Hernández-Cuevas LV, García-Sánchez R. 2008. Propagación por esporas: el caso de las micorrizas arbusculares. In: Álvarez-Sánchez J, Monroy-Ata A, eds. *Técnicas de estudio de las asociaciones micorrícicas y sus implicaciones en la restauración*. DF México: Las Prensas de Ciencias. Facultad de Ciencias-UNAM. pp. 29-42. ISBN: 978-970-32-5527-6
- Hewitt EJ. 1966. The composition of nutrient solution. In: Hewitt EJ ed. *Sand and Water Culture Methods Used in the Study of Plant Nutrition*. Commonwealth Agricultural Bureau, United Kingdom, pp.187-246 DOI: <https://doi.org/10.1017/s0014479700021852>
- Huante P, Rincón E, Acosta I. 1995. Nutrient availability and growth rate of 34 woody species from a tropical deciduous forest in Mexico. *Functional Ecology* **9**: 849-858. DOI: <https://doi.org/10.2307/2389982>
- Huante P, Rincón E, Gavito M. 1988. Root system analysis of seedlings of seven tree species from a tropical dry forest in Mexico. *Trees Structure and Function* **6**: 77-82. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00226584>
- Jasper DA, Abbott LK, Robson AD. 1989. Acacias respond to additions of phosphorus and to inoculation with VA mycorrhizal fungi in soils stockpiled during mineral sand mining. *Plant and Soil* **115**: 99-108.
- Legendre P, Legendre L. 2012. *Numerical Ecology*. The Netherlands: Elsevier. ISBN: 978-0-444-53868-0.
- Matilla A. 2004. Ecofisiología de la germinación de semillas. In: Sánchez A, Reigosa MJ, Pedrol N, eds. *La Ecofisiología Vegetal: Una Ciencia de Síntesis*. España: Thomson. pp. 901-922. ISBN: 84-9732-267-3.
- Martínez-Bernal A, Grether R. 2006. *Mimosa*. In: Novelo A, Medina-Lemus R. eds. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Fascículo 44. México DF: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México pp. 42-99. ISBN: 970-32-3866-1.
- Monroy-Ata A, Estévez-Torres J, García-Sánchez R, Ríos-Gómez R. 2007. Establecimiento de plántulas mediante el uso de micorrizas y de islas de recursos en un matorral xerófilo deteriorado. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **80**: 49-57. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.1756>
- Montaño-Arias SA, Camargo-Ricalde SL, Grether R, Díaz-Pontones D. 2015. Effect of scarification and temperature on seed germination of two Mexican species of *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae). *Botanical Sciences* **93**: 649-659. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.185>
- Montaño-Arias SA, Camargo-Ricalde SL, Grether R, Díaz-Pontones D. 2017. Ecoanatomía de la madera de dos taxa mexicanos del género *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae). *Acta Botanica Mexicana* **118**: 105-120. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm118.2017.1203>
- Montaño-Arias SA, Camargo-Ricalde SL, Grether R, Díaz-Pontones D. 2018. Distribución conocida y potencial de dos taxa del género *Mimosa* (Leguminosae) endémicos de México. *Revista de Biología Tropical* **66**: 321-335. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27910>
- Montaño-Arias SA, Zavaleta-Mancera HA, Camargo-Ricalde SL, Grether R. 2021. Effect of seed age on germination, seedling survival and growth of *Mimosa luisana* (Leguminosae). *Trees* **35**: 231-239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02031-5>
- Montesinos-Navarro A, Verdú M, Querejeta JJ, Sorbitrán L, Valiente-Banuet A. 2016. Soil fungi promote nitrogen transfer among plants involved in long-lasting facilitative interactions. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **18**: 45-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.01.004>

- Negreiros D, Fernandes GW, Silveira FAO, Chalub C. 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. *Acta Oecologica* **35**: 301-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2008.11.006>
- Peña-Becerril JC, Monroy-Ata A, Orozco-Almanza MS, García-Amador EM. 2016. Establishment of *Mimosa biuncifera* (Fabaceae) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi in greenhouse and field drought conditions. *Revista de Biología Tropical* **64**: 791-803. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i2.20289>
- Pineda-García F, Paz H, Tinoco-Ojanguren C. 2011. Morphological and physiological differentiation of seedlings between dry and wet habitats in a tropical dry forest. *Plant, Cell and Environment* **34**: 1536-1547. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02351.x>
- Puglielli G, Laanisto L, Pooter H, Niinemets U. 2021. Global patterns of biomass allocation in woody species with different tolerances of shade and drought: evidence for multiple strategies. *New Phytologist* **229**: 308-322. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.16879>
- Phillips JB, Hayman DS 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**: 158-160. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Rincón E, Huante P, Álvarez-Añorve M. 2000. Análisis de crecimiento de tres especies de *Caesalpinia* (Leguminosae) de la selva baja caducifolia de Chamela, Jalisco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **66**: 5-13. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsoci.1606>
- Roscher C, Schumacher J, Schmid B, Schulze ED. 2015. Contrasting effects of intraspecific trait variation on trait-based niches and performance of legumes in plant mixtures. *PLoS ONE* **10**: e0119786. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119786>
- Simon MF, Grether R, de Queiroz LP, Särkinen TE, Dutra VF, Hughes CE. 2011. The evolutionary history of *Mimosa* (Leguminosae): toward a phylogeny of the sensitive plants. *American Journal of Botany* **98**: 1201-1221. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.1000520>
- Sokal R, Rohlf F. 1995. *Biometry*. San Francisco, California: Freeman and Company. ISBN: 84-291-1862-4
- Souza TA, Rodríguez-Echeverría S, de Andrade LA, Freitas H. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi in *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. from Brazilian semi-arid. *Brazilian Journal of Microbiology* **47**: 359-366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.023>
- Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. San Diego, California: Academic Press. ISBN: 9780123705266
- Sprent JI, Ardley J, James EK. 2017. Biogeography of nodulated legumes and their nitrogen-fixing symbionts. *New Phytologist* **215**: 40-56. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14474>
- Sprent JI, James EK. 2007. Legume evolution: where do nodules and mycorrhizas fit in? *Plant Physiology* **144**: 575-581. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.107.096156>
- Sun JS, Sands R, Simpson RJ. 1992. Genotypic variation in growth and nodulation by seedlings of *Acacia* species. *Forest Ecology and Management* **55**: 209-223. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90101-E](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90101-E)
- Tilman D. 1982. *Resource Competition and Community Structure*. Chichester, West Sussex, UK: Princeton University Press. ISBN: 9780691083025
- Tilman D. 2020. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. (MPB-26). Princeton: Princeton University Press. DOI: <https://doi.org/10.1515/9780691209593>
- Valiente-Banuet L. 1991. *Patrones de precipitación en el Valle semiárido de Tehuacán, Puebla, México*. B.Sc. Thesis. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Varennesa AD, Goss MJ. 2007. The tripartite symbiosis between legumes, rhizobia and indigenous mycorrhizal fungi is more efficient in undisturbed soil. *Soil Biology and Biochemistry* **39**: 2603-2607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.05.007>
- Violle C, Navas ML, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**: 882-892. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>

- Veresoglou SD, Menexes G, Rillig MC. 2012. Do arbuscular mycorrhizal fungi affect the allometric partition of host plant biomass to shoots and roots? A meta-analysis of studies from 1990 to 2010. *Mycorrhiza* **22**: 227-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-011-0398-7>
- WRB. 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. No. 106. Rome: World Soil Resources Reports, FAO, ISBN: 978-92-5-108369-7

Editor de sección: Alejandro Casas

Contribuciones de los autores: SAMA y NMM diseñaron el experimento, SAMA, NMM y SLCR realizaron el análisis e interpretación de los datos. RG identificó a las especies y aportó las semillas para el experimento. GMA proporcionó el invernadero, registró las variables y elaboró el mapa de localización de las especies. ECHS realizó los análisis estadísticos. Todos los autores contribuyeron a la escritura, discusión, revisión y aprobación del manuscrito final.