

Arbuscular mycorrhizal fungi related to rosetophyll scrub in Sierra de Catorce, S.L.P.

Hongos micorrízicos arbusculares asociados al matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, S.L.P.

Reyna P. Hipólito-Piedras¹; Heriberto Méndez-Cortés^{1*}; Hugo M. Ramírez-Tobías¹
Catarina Loredó-Osti¹; Pedro Castillo-Lara¹; Juan F. Martínez-Montoya²;
Víctor Olalde-Portugal³

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria, carretera San Lis Potosí-Matehuala, km 14.5 Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. C. P. 78321.

²Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Postgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Iturbide núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, C. P. 78620.

³Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Irapuato, Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Libramiento Norte Carretera Irapuato-León km 9.6, Irapuato, Guanajuato, México. C. P. 36824.

*Corresponding author: heriberto.mendez@uaslp.mx Tel: 444 8261314, ORCID ID: 0000-0001-9537-9794.

Abstract

The natural plant communities in the Sierra de Catorce, located in the northern part of San Luis Potosí, have a low diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species. The objective of this research was to document the richness of AMF present in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce. Three sampling periods were involved; in each of them a 1 km transect was delimited where soil samples were taken every 200 m. The abundance of spores and the richness of AMF species were evaluated in each period. A total of 20 AMF species were recorded. The abundance of AMF spores varied significantly between sampling seasons. The highest number of spores belonged to the dry season, while the cold season presented the highest AMF richness. This research is the first to report AMF species richness in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí

Keywords: Richness, Glomeromycota, sampling epoch, xerophytic scrub.

Resumen

La riqueza de especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA's) en las comunidades vegetales naturales de la Sierra de Catorce localizada en el norte de estado de San Luis Potosí, es escasa. Esta investigación tuvo como objetivo documentar la riqueza de HMA presente en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce. Tres épocas de muestreo fueron involucradas; en cada una de ellas se delimitó un transecto de 1 km en el cual cada 200 m se tomaron muestras de suelo. La abundancia de esporas y la riqueza de especies de HMA's se evaluaron en cada una de las épocas. Un total de 20 especies de HMA se registraron. La abundancia de esporas de HMA's varió significativamente entre las épocas de muestreo. En la época seca se encontró el mayor número de esporas, mientras que la época fría presentó la mayor riqueza de HMA's. La presente investigación es la primera en informar la riqueza de HMA's en el matorral desértico rosetófilo de la sierra de Catorce, San Luis Potosí.

Palabras clave: Riqueza, Glomeromycota, época de muestreo, matorral xerófilo.



Introduction

Sierra de Catorce, located in the state of San Luis Potosí, is considered a priority area for biological conservation, particularly for birds (SEMARNAT, 2008). The vegetation includes oak forests, pine forests, grasslands, and scrubland (González-Costilla et al., 2007). Among the scrublands we can find the rosetophyll scrub, characteristic of extreme climatic zones, where precipitation is exceeded by evapotranspiration, resulting in reduced vegetation growth and, consequently, low ecosystem productivity (Granados-Sánchez et al., 2013). Floristic diversity in the rosetophyll scrub is the result of ecological and evolutionary processes that have been shaped over millions of years (FAO, 2006).

The ability of plants to withstand extreme environmental conditions, such as those in the rosetophyll scrub, may be linked to the presence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (Martínez-García, 2011). AMF are obligate symbionts that form a mutualistic association with the roots of 80 % of vascular plants and bryophytes (Brundrett & Tedersoo, 2018; Delavaux et al., 2019). In this partnership, the fungus relies on the plant as its main carbon source (Wipf et al., 2019), while in return, it enhances the plant's nutrient uptake from the soil, especially phosphorus (Le Pioufle et al., 2019; Zhang et al., 2020). Additionally, this association improves the soil's physicochemical properties (Frey, 2019).

Currently, 163 AMF species have been recorded in Mexico, with at least 75 of these species found in the country's xerophytic scrub (Polo-Marcial et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2021; Polo-Marcial et al., 2022; Hipólito-Piedras et al., 2024). In the state of San Luis Potosí, there are only two studies focused on AMF. The first study characterized, identified, and propagated different AMF species associated with agricultural crops in saline soils in the high plateau and mid-region of the state (Tapia-Goné et al., 2008). Mena-Echeverría et al. (2021) identified and evaluated AMF in two soils from different plant communities in relation to the growth of sorghum and maize. However, we still have little knowledge about the richness of AMF in natural plant communities in the state of San Luis Potosí.

The richness of plant species present in a community is directly related to a higher richness support of AMF (Pagano and Gupta, 2016). In this regard, the rosetophyll scrub is the most diverse plant community in the Sierra de Catorce, as it has more than 40 % of the 530 plant species identified (González-Costilla et al., 2007); therefore, it makes it a key area for AMF (Montaño et al., 2012). The timing of sampling is a factor that influences the potential for finding AMF (Hernández-Zamudio et al., 2018). Given the local ecological importance of the Sierra de Catorce and the global impact of dif-

Introducción

La Sierra de Catorce, ubicada en el estado de San Luis Potosí, se considera área prioritaria para la conservación biológica, principalmente de aves (SEMARNAT, 2008). En sus formaciones vegetales alberga encinares, piñonares, pastizales y matorrales (González-Costilla et al., 2007). Entre los matorrales se encuentra el matorral desértico rosetófilo, característico de zonas climáticas extremas, donde la precipitación es superada por la evapotranspiración, provocando una reducción en el crecimiento de la vegetación, y a su vez una baja productividad del ecosistema (Granados-Sánchez et al., 2013). La diversidad florística en el matorral desértico rosetófilo es el resultado de procesos ecológicos y evolutivos que se han moldeado a lo largo de millones de años (FAO, 2006).

La resistencia que muestran las plantas a condiciones ambientales extremas, como el matorral desértico rosetófilo, puede estar relacionada con la presencia de hongos micorrízicos arbusculares (Martínez-García, 2011). Los HMA's son simbioses obligados que forman una asociación mutualista con la raíz del 80 % de las plantas vasculares y briófitas (Brundrett & Tedersoo, 2018; Delavaux et al., 2019). En esta asociación, el hongo depende de la planta como su principal fuente de carbono (Wipf et al., 2019), mientras éste compensa a la planta con el incremento en la absorción de nutrientes del suelo, principalmente fósforo (Le Pioufle et al., 2019; Zhang et al., 2020). Además, esta asociación mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo (Frey, 2019).

Actualmente, en México se tiene el registro de 163 especies de HMA, de las cuales al menos 75 han sido encontradas en matorrales xerófilos del país (Polo-Marcial et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2021; Polo-Marcial et al., 2022, Hipólito-Piedras et al., 2024). En el estado de San Luis Potosí, los estudios dirigidos a HMA's son dos. En el primer manuscrito se caracterizaron, identificaron y propagaron diferentes especies de HMA's asociados a cultivos agrícolas en suelos salinos en la zona altiplano y media del estado (Tapia-Goné et al., 2008). Mientras que Mena-Echeverría et al. (2021) identificaron y evaluaron los HMA's de dos suelos de diferentes comunidades vegetales en relación con el crecimiento de sorgo y maíz. Sin embargo, el conocimiento de la riqueza de HMA's en comunidades vegetales naturales en el estado de San Luis Potosí aún es escasa.

La riqueza de especies vegetales presentes en una comunidad está directamente relacionada con un mayor soporte de riqueza de HMA's (Pagano y Gupta, 2016). En este sentido, el matorral desértico rosetófilo es la comunidad vegetal más diversa en la Sierra de Catorce, ya que presenta más del 40 % de las 530 especies vegetales identificadas (González-Costilla et al., 2007); por ello, lo convierte en área clave para los HMA's (Mon-

ferent forms of life within the microbiota, this study aimed to document the temporal richness and abundance of AMF present in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Mexico.

Materials and Methods

This research was conducted in the Sierra de Catorce, located in the northeastern part of the Altiplano Potosino-Zacatecano, within the municipality of Catorce, San Luis Potosí. The climate in the area is semi-arid and temperate with summer rainfall (Barboza-Gudiño et al., 2004). A representative soil profile was described at coordinates 23° 34' 41.3 N and 100° 55' 06.6 W. The soil is classified as Lithic Ustic Torriorthent according to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), which corresponds to an Eutric Lithosol (Ie/2b) according to the FAO-UNESCO World Soil Map legend (CETENAL, 1972). Soil properties were determined using five individual samples that were combined to form a composite sample, following NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). The soil has a loamy texture with a predominance of silt and sand, a moderately alkaline pH, low salinity, moderate organic matter, and low nitrogen levels (Table 1).

Table 1. Physical and chemical properties of the soil in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P. Values according to NOM-021-RECNAT-2000.

Soil characteristics	Value
Bulk density (g·cm ⁻³)	1.4
Sand (%)	39.5
Silt (%)	40
Clay (%)	20.5
pH in water (1:2)	7.8
Electrical conductivity (dS·m ⁻¹)	1
Total carbonates (%)	0.5
Organic matter (%)	2.7
Inorganic nitrogen (kg·ha ⁻¹)	7.7
Extractable phosphorus (kg·ha ⁻¹)	18.8
Potassium (kg·ha ⁻¹)	2600.7

The type of vegetation corresponds to rosetophyll scrub. A pre-sampling study found that the most important species are *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyllirion acotriche* and *Lindleya mespiloides*, in addition to various species of cacti.

Sampling

Sampling was carried out between the coordinates 23° 34' 27.5 N, 100° 55' 12.5 W and 23° 34' 56.2" N, 100° 55' 00.8" W. For this purpose, a 1 km long transect was

taño et al., 2012). La época en que se muestrea es un factor que determina el potencial de los HMA's para ser encontrados (Hernández-Zamudio et al., 2018). En este sentido, dada la importancia ecológica que representa localmente la Sierra de Catorce y, aunado al impacto global que implica la existencia de diferentes formas de vida en la microbiota, el presente trabajo tuvo como objetivo documentar la riqueza y abundancia temporal de HMA's presentes en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.

Materiales y métodos

La presente investigación se llevó a cabo en la Sierra de Catorce, misma que se ubica en el noreste del Altiplano Potosino-Zacatecano, y pertenece al municipio de Catorce, San Luis Potosí. El clima en la zona es semiseco templado con lluvias en verano (Barboza-Gudiño et al., 2004). A través de un muestreo, el perfil representativo del suelo realizado en las coordenadas 23° 34' 41.3 N y 100° 55' 06.6 W fue descrito. El suelo se clasifica como Lithic Ustic Torriorthent según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), lo cual corresponde a un Litosol eútrico (Ie/2b), según leyenda del mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO (CETENAL, 1972). Las determinaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo se realizaron a través de cinco muestras simples que conformaron una muestra compuesta, considerando la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El suelo presenta una textura franca en el cual predominan limo y arena, con pH medianamente alcalino, poca salinidad, materia orgánica media y bajos niveles de nitrógeno (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades físico-químicas del suelo del matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, S.L.P. Valores obtenidos conforme a la NOM-021-RECNAT-2000.

Característica del suelo	Valor
Densidad aparente (g·cm ⁻³)	1.4
Arena (%)	39.5
Limo (%)	40
Arcilla (%)	20.5
pH en agua (1:2)	7.8
Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)	1
Carbonatos totales (%)	0.5
Materia orgánica (%)	2.7
Nitrógeno inorgánico (kg·ha ⁻¹)	7.7
Fósforo extraíble (kg·ha ⁻¹)	18.8
Potasio (kg·ha ⁻¹)	2600.7

El tipo de vegetación corresponde a matorral desértico rosetófilo. A través de un pre-muestreo se encontró que

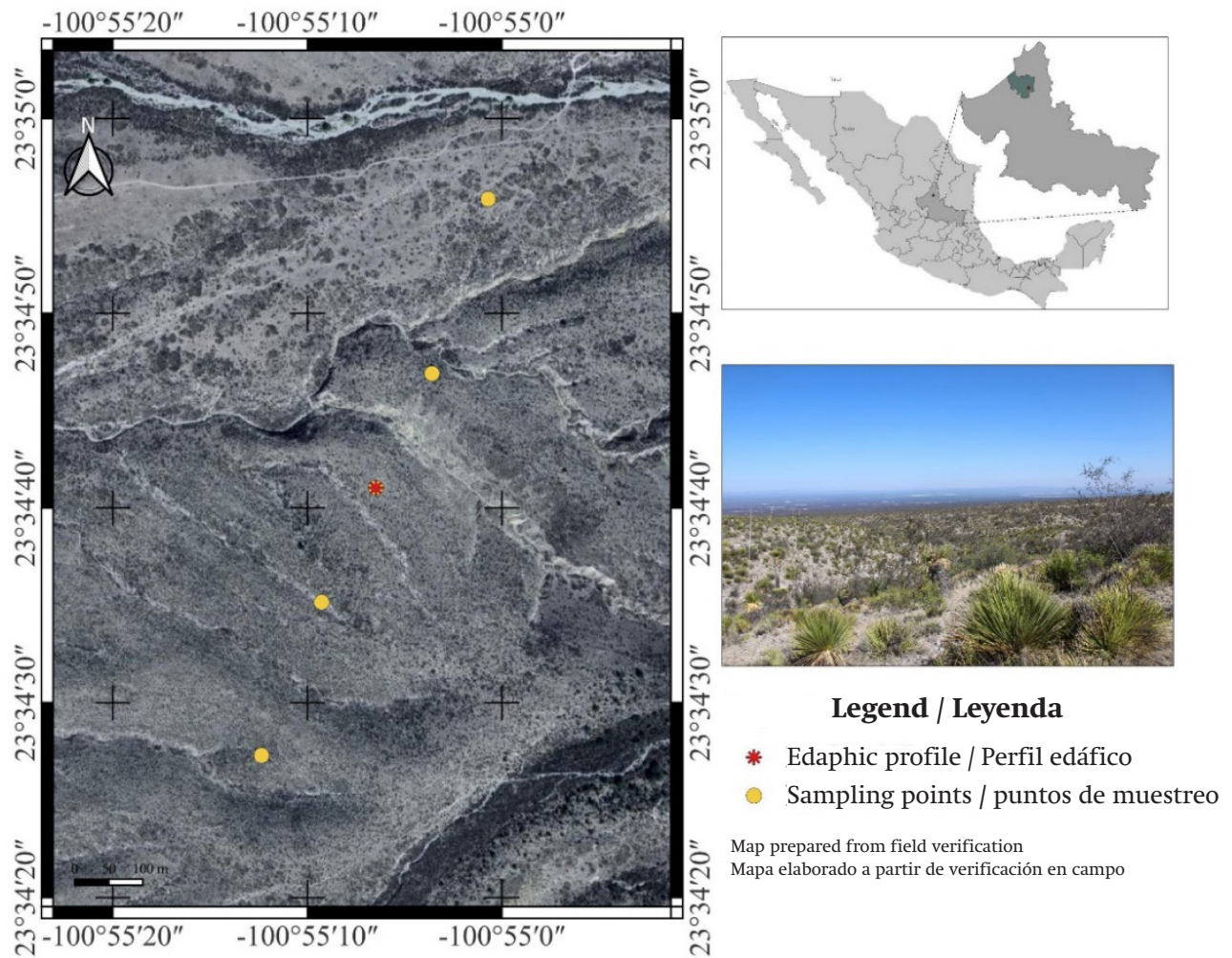


Figure 1. Location of sampling points in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Mexico.

Figura 1. Localización de puntos de muestreo en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.

defined; sampling points were located every 200 m (Figure 1); in each of them, 1 kg of soil was collected considering a stratum from 0 to 30 cm, in an area close to the base of the most representative plant species of the sampling point in the rosetophyll scrub.

Sampling was carried out in three seasons: dry (April), rainy (August) and cold (December). The soil collected at each of the sampling points was homogenized to form a composite sample and placed in properly labeled polyethylene bags for transfer to the Phytopathology laboratory at the Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Extraction and identification of AMF

The extraction of AMF spores was carried out on 500 g of soil for each sampling period using wet sieving and decantation methods (Gerdemann & Nicolson, 1963), and sucrose gradient centrifugation (Daniels & Skipper, 1982). Using a stereo microscope, AMF spores were quantified

las especies más importantes son *Agave striata*, *A. lechuquilla*, *Dasyliiron acotriche* y *Lindleya mespiloides*, además de diversas especies de cactáceas.

Muestreo

El muestreo se realizó entre las coordenadas 23° 34' 27.5 N, 100° 55' 12.5 W y 23° 34' 56.2" N, 100° 55' 00.8" W. Para ello se definió un transecto de 1 km de longitud; cada 200 m se ubicaron puntos de muestreo (Figura 1); en cada uno de ellos se recolectó 1 kg de suelo considerando un estrato de 0 a 30 cm, en un área cercana a la base de las especies vegetales más representativas del punto de muestreo en el matorral desértico rosetófilo.

Los muestreos se realizaron en tres épocas: seca (abril), lluviosa (agosto) y fría (diciembre). El suelo recolectado en cada uno de los puntos de muestreo se homogenizó para formar una muestra compuesta y se colocó en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas para su

and grouped according to size and color. Subsequently, AMF spores were mounted on slides with polyvinyl alcohol-lactoglycerol (PVLG) (Morton et al., 1993) and PVLG + Melzer (Koske & Tessier, 1983) and observed under a Zeiss® (Primo Star) optical microscope with Koehler fixed illumination. Taxonomic identification was performed according to the morphological characteristics proposed by Walker (1983) and Morton (1988), such as: color, size, presence/absence and type of hyphae, layers comprising the spore wall and the reaction of the layers to Melzer's reagent. We also consulted the original publications of the species reported worldwide and the species descriptions available in the International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular Mycorrhizal Fungi (<http://invam.caf.wvu.edu/>) and Phylogeny and taxonomy of Glomeromycota (<http://www.amf-phylogeny.com>).

Data Analysis

Spore abundance data per g of soil were analyzed by the non-parametric method of Kruskal & Wallis (1952), with a level of $P = 0.05$ in Minitab 15 software.

Parameter and ecological analysis

The relative abundance of species was calculated by considering the number of spores of each species divided by the total number of spores of all species found, multiplied by 100 (Marrugan, 2004). A Bray-Curtis ordination model was generated by calculating the percent similarity between sampling epochs over the year using Biodiversity Pro 2.0 software (McAleece et al., 1997).

Sampling effort

To estimate the total number of AMF species in the rosetophyll scrub, an evaluation of sampling effort was made. This was done by using fitted models of species accumulation curves with the non-parametric estimators of Chao2 and Jackknife of first order. The mathematical expression of the Chao2 model is: $Chao2 = Sobs + (L^2/2M)$, where Sobs is the number of known species; L = number of species occurring only in one sample and M = number of species occurring in exactly two samples. The mathematical expression of the Jackknife model is $Jack\ 1 = Sobs + L(m - 1/m)$, where: m = number of samples. To smooth the accumulation curve, the negative exponential model was used. The mathematical expression is: $S_n = (a[1 - \exp(-b \cdot n)]) / b$ where: a = rate of increase of new species at the beginning of the inventory, b = parameter in relation to the shape of the curve (Jiménez-Valverde & Hortal, 2000).

Results

Richness and abundance of AMF

A total of 20 AMF species were identified and distributed in six families (Table 2). Fifty-five percent

traslado al laboratorio de Fitopatología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Extracción e identificación de HMA's

La extracción de esporas de HMA se realizó en 500 g de suelo por cada época de muestreo, mediante los métodos de tamizado en húmedo y decantación (Gerdemann & Nicolson, 1963), así como de centrifugación en gradiente de sacarosa (Daniels & Skipper, 1982). Por medio de un microscopio estereoscópico se cuantificaron las esporas de HMA's y se agruparon conforme a su tamaño y color. Posteriormente, las esporas de HMA's se montaron en portaobjetos con alcohol polivinílico-lacto-glicerol (PVLG) (Morton et al., 1993) y PVLG + Melzer (Koske & Tessier, 1983) y fueron observadas bajo un microscopio óptico Zeiss® (Primo Star) con iluminación fija Koehler. La identificación taxonómica se realizó de acuerdo con las características morfológicas propuestas por Walker (1983) y Morton (1988), tales como: color, tamaño, presencia/ausencia y tipo de hifa, capas que constituyen la pared de la espora y la reacción de las capas al reactivo de Melzer. Asimismo, realizamos una consulta de las publicaciones originales de las especies reportadas a nivel mundial y las descripciones de las especies disponibles en la Colección Internacional de Cultivos de Hongos Micorrizógenos Arbusculares y Vesiculares (<http://invam.caf.wvu.edu/>) y Phylogeny and taxonomy of Glomeromycota (<http://www.amf-phylogeny.com>).

Análisis de datos

Los datos de abundancia de esporas por g de suelo se analizaron por el método no paramétrico de Kruskal & Wallis (1952), con un nivel de $P = 0.05$ en el software Minitab 15.

Parámetro y análisis ecológico

La abundancia relativa de las especies se calculó considerando el número de esporas de cada una de las especies divididas entre el total de esporas de todas las especies encontradas, multiplicado por 100 (Marrugan, 2004). Un modelo de ordenación Bray-Curtis se generó mediante el cálculo del porcentaje de similitud entre las épocas de muestreo a través del año, utilizando el software Biodiversity Pro 2.0 (McAleece et al., 1997).

Esfuerzo de muestreo

Para estimar el número total de especies de HMA's del matorral desértico rosetófilo se realizó una evaluación del esfuerzo de los muestreos. Lo anterior se hizo mediante el uso de modelos ajustados de curvas de acumulación de especies con los estimadores no paramétricos de Chao2 y Jackknife de primer orden. La expresión matemática del modelo de Chao2 es: $Chao2 = Sobs + (L^2/2$

Table 2. Species list and relative abundance of AMF in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P. in three sampling seasons.**Cuadro 2. Listado de especies y abundancia relativa de HMA en el matorral desértico rosetófilo en las Sierra de Catorce, S.L.P. en tres épocas de muestreo.**

Family/HMA species/ Familia/Especie HMA	Relative abundance of AMF species/ Abundancia relativa de las especies de HMA's		
	Dry/ Seca	Rainy/ Lluviosa	Cold/ Fría
Acaulosporaceae			
<i>Acaulospora denticulata</i> (Sieverd. & S. Toro)	2.86	5.32	2.30
<i>Acaulospora laevis</i> (Gerd. & Trappe)	1.90	0	5.75
<i>Acaulospora morrowiae</i> (Spain & N.C. Schenck)	3.81	3.19	0
<i>Acaulospora rehmi</i> (Sieverd & S. Toro)	0	0	3.45
Ambisporaceae			
<i>Ambispora fennica</i> (C. Walker, Vestberg & Schüßler)	3.81	8.51	8.05
Entrophosporaceae			
<i>Entrophospora etunicata</i> (W.N. Becker & Gerd.) Błaszcz., B.T. Goto, Magurno, Niezgodna & Cabello	19.05	27.66	17.24
<i>Entrophospora infrequens</i> (I.R. Hall) R.N. Ames & R.W. Schneid	9.52	13.83	5.75
Gigasporaceae			
<i>Gigaspora margarita</i> (W.N. Becker & I.R. Hall)	9.52	13.83	10.34
<i>Scutellospora scutata</i> (C. Walker & Dieder) Oehl, F.A. De Souza & Sieverding	11.43	11.70	10.34
Glomeraceae			
<i>Funneliformis mosseae</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler	8.57	0	6.90
<i>Glomus macrocarpum</i> (Tul. & C. Tul.)	9.52	10.64	6.90
<i>Glomus microcarpum</i> Tul. & C. Tul.	0	0	3.45
<i>Glomus rubiforme</i> (Gerd. & Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenck	0	0	2.30
<i>Sclerocystis sinuosa</i> (Gerd. & B.K. Bakshi)	1.90	0	3.45
<i>Rhizophagus aggregatum</i> (N.C. Schenck & G.S. Sm.) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	2.86	2.13	1.15
<i>Rhizophagus irregularis</i> (Wubet, Renker & Buscot) G.A. Silva & Oehl	0.95	0	1.15
<i>Rhizoglomus microaggregatum</i> (Koske, Gemma & PD Olexia) Sieverd., G.A. Silva & Oehl, Sieverding, Da Silva, Berndt & Oehl	2.86	0	3.45
<i>Rhizophagus fasciculatus</i> (Thaxt.) C. Walker & A. Schüßler	8.57	0	5.75
<i>Septoglomus deserticola</i> (Trappe, Bloss & J.A. Menge) G.A. Silva, Oehl & Sieverd	0	1.06	2.30
<i>Septoglomus mexicanum</i> (E.Chimal-Sánchez, C. Senés-Guerrero, N.M.Montaña, L. Varela, R. Gracia-Sánchez, A. Pacheco, S. Montaña-Arias & S.L. Camargo-Ricalde)	2.86	2.13	0

of the AMF species belong to the family Glomeraceae, 20 % to Acaulosporaceae, 10 % to Gigasporaceae, 10 % to Entrophosporaceae and 5 % to Ambisporaceae. Of the 20 species recorded only eight were found in the three sampling seasons.

The abundance values of AMF spores showed significant ($P < 0.007$) differences according to the sampling seasons. The dry season had the highest abundance of spores, while the cold season had the lowest abundance. The highest AMF richness was

M), donde Sobs es el número de especies conocidas; L= número de especies que ocurren solo en una muestra y M = número de especies que ocurren exactamente en dos muestras. La expresión matemática del modelo de Jackknife es: $Jack\ 1 = Sobs + L(m - 1/m)$, donde: m = número de muestras. Para suavizar la curva de acumulación se utilizó el modelo exponencial negativo. La expresión matemática es: $S_n = (a[1 - \exp(-b \cdot n)]) / b$ donde: a = tasa de incremento de nuevas especies al comienzo del inventario, b = parámetro en relación con la forma de la curva (Jiménez-Valverde & Hortal, 2000).

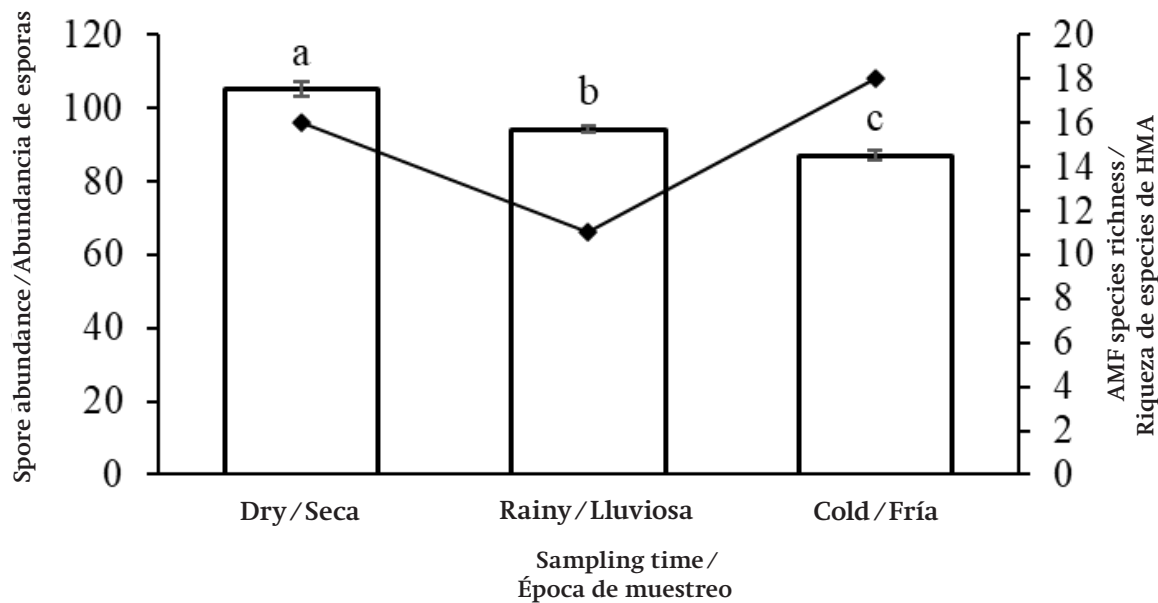


Figure 2. Spores per gram of soil (bars) and species richness (dots) of AMF in three sampling seasons. Data represent the mean \pm standard error (different letters indicate significant differences).

Figura 2. Esporas por gramo de suelo (barras) y riqueza de especies (puntos) de HMA's en tres épocas de muestreo. Los datos representan la media \pm el error estándar (Letras diferentes indican diferencias significativas).

recorded in the cold season with 18 species, while the lowest richness was detected in the rainy season with 11 AMF species (Figure 2).

Eight species belonging to the six AMF families were identified and recorded, without any relationship with seasonality, because they were recorded in the three sampling seasons; *Entrophospora etunicata* (formerly *Claroideoglosum etunicatum*), *Gigaspora margarita* and *Scutellospora scutata*, were the species with the highest abundance.

The species that were found in only one sampling season coincided in being the less abundant AMF species such as *Glomus microcarpum*, *G. rubiforme*, as well as *Rhizophagus irregularis*. Although the last one was recorded in two seasons, its abundance was minimal.

The sampling seasons with the highest 82 % similarity in terms of AMF species richness were the dry and cold seasons (Figure 3), sharing 13 of the 20 species recorded. The rainy season was 74 % similar to the dry and cold seasons, although the lowest AMF species richness was found in this season.

The values of AMF species richness estimated by means of the Jackknife and Chao2 methods showed non-significant differences between the known richness values (Figure 4). The Jackknife estimator showed an increase of maximum 22 species from the second sampling that corresponded to the rainy season; however, after that value, the curve stabilized. The

Resultados

Riqueza y abundancia de HMA's

Un total de 20 especies de HMA fueron identificadas y se distribuyen en seis familias (Cuadro 2). El 55 % de las especies de HMA's pertenecen a la familia Glomeraceae, 20 % a Acaulosporaceae, 10 % a Gigasporaceae, 10 % a Entrophosporaceae y 5 % a Ambisporaceae. De las 20 especies registradas solo ocho se encontraron en las tres épocas de muestreo.

Los valores de abundancia de esporas de HMA's mostraron diferencias significativas ($P < 0.007$) en función de las épocas de muestreo. La época seca presentó la mayor abundancia de esporas, mientras en la época fría se registró la menor abundancia. La mayor riqueza de HMA's se registró en la época fría con 18 especies, mientras que la menor riqueza se detectó en la época lluviosa con 11 especies de HMA's (Figura 2).

Ocho especies pertenecientes a las seis familias de HMA fueron identificadas y registradas, sin alguna relación con la estacionalidad, debido a que se registraron en las tres épocas de muestreo; *Entrophospora etunicata* (antes *Claroideoglosum etunicatum*), *Gigaspora margarita* y *Scutellospora scutata*, fueron las especies con mayor abundancia.

Las especies que se encontraron en una sola época de muestreo coinciden en ser las especies de HMA's menos abundantes como *Glomus microcarpum*, *G. rubiforme*,

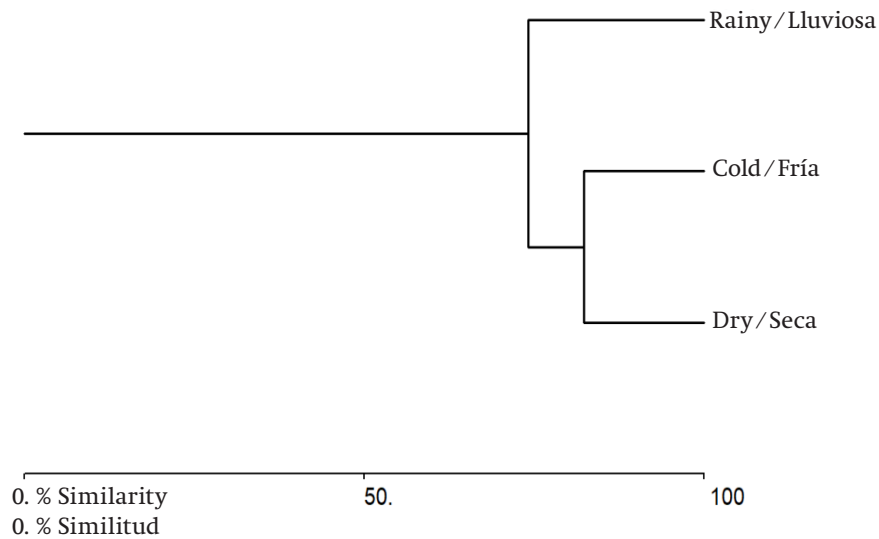


Figure 3. Bray-Curtis similarity analysis by sampling season in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P.
Figura 3. Análisis de similitud de Bray-Curtis por época de muestreo en el matorral desértico rosetófilo, en la Sierra de Catorce, S.L.P.

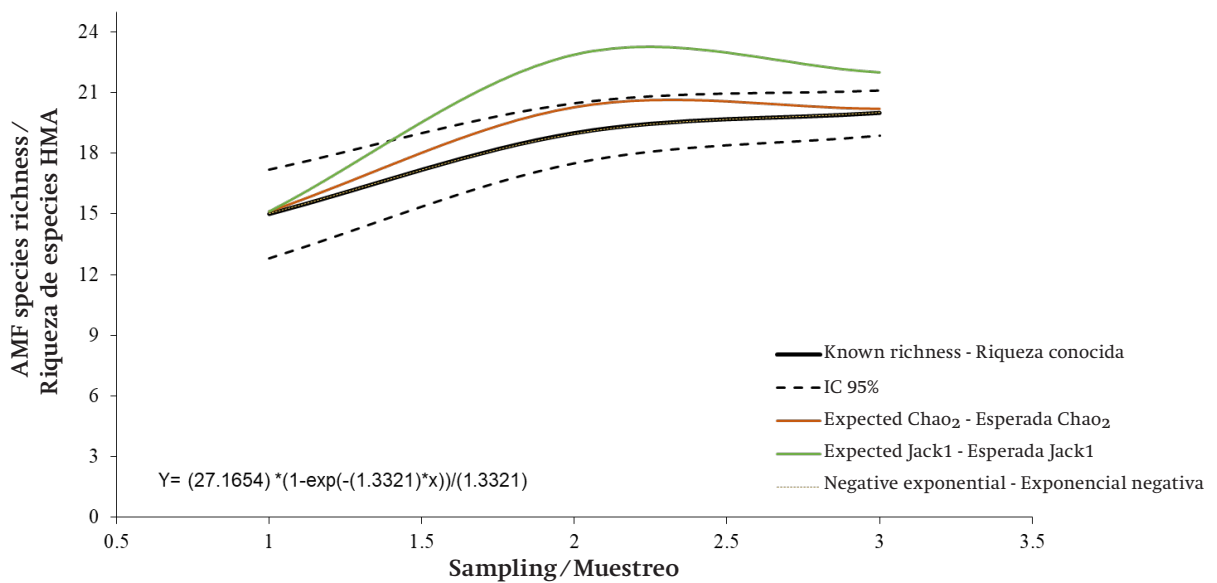


Figure 4. Cumulative curves of species and negative exponential model of AMF species recorded in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce S.L.P. in three sampling seasons (dry, rainy and cold) by means of the Jackknife and Chao2 estimators.

Figura 4. Curvas de acumulación de especies y modelo exponencial negativo de especies de HMA's registradas en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce S.L.P. en tres épocas de muestreo (seca, lluviosa y fría) por medio de los estimadores Jackknife y Chao2.

Chao2 estimator showed a similar tendency since it did not modify the richness (20 AMF species already recorded). To smooth these results in the negative exponential expression, it is observed that regardless of increasing the sampling effort, the richness of AMF maintains similar values to those observed.

Discussion

así como *Rhizophagus irregularis*. Aunque la última se registró en dos épocas, su abundancia fue mínima.

Las épocas de muestreo mayores al 82 % de semejanza conforme a la riqueza de especies de HMA's fueron las épocas seca y fría (Figura 3), compartiendo 13 de las 20 especies registradas. La época lluviosa se asemeja a las

The rosetophyll scrub covers 21.7 % of the total area of the state of San Luis Potosí (CONAFOR, 2018). In the Sierra de Catorce, this plant community represents a priority area for flora conservation, harboring representative species of the territory, in addition to an outstanding number of threatened cacti (González-Costilla et al., 2007). The rosetophyll scrub belongs to the xerophytic scrub, the largest vegetation type in the country and the richest in endemism (Rzedowski, 2006), a factor that influences the concentration of a high diversity of AMF (Montaño et al., 2012). According to the results, the rosetophyll scrub located in the Sierra de Catorce presented a taxonomic richness of 20 species of AMF; however, so far, no national study has been directed to species such as *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyliirion acotriche*, and *Lindleya mespiloides*, which belong to the rosetophyll scrub studied.

The richness of AMF's documented in the present study falls within the range of records published for other plant communities belonging to xerophytic vegetation in Mexico; such records range from 5 to 29 species (Pimienta-Barrios et al., 2002; Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Ochoa-Meza et al., 2009; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Hernández-Zamudio et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021 and Chimal-Sánchez et al., 2022).

The richness of the Glomeraceae family represents 50 % of the total AMF species documented in the present study; this family shares 25 to 31 % of the AMF species recorded in other xerophytic scrubs in the country (Chimal-Sánchez et al., 2015; Hernández-Zamudio et al., 2018; Monroy-Ata et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019). Chimal-Sánchez et al. (2015) mention that species of this family tend to distribute in arid and semi-arid environments where they associate with a wide variety of species due to their high functionality. Additionally, these species are attributed with high competitiveness compared to those of other AMF families (Trejo-Aguilar et al., 2013).

Since spore abundance was higher during the dry season, it is possible to consider seasonality as a factor influencing the populations of these fungi. This phenomenon can be particularly related to sporulation. Sporulation is used as a survival strategy, which is more intense and significant when host plants experience water stress (da Silva et al., 2014).

The abundance and richness of AMF vary according to the different phenological stages of the plant, which are associated with seasonal changes throughout the year (Scott-Denton et al., 2006). The greater richness of AMF found in the cold season and its similarity to

épocas seca y fría en un 74 %, aunque en esta época se encontró la menor riqueza de especies de HMA's.

Los valores de la riqueza de especies de HMA's estimados por medio de los métodos de Jackknife y Chao2 presentaron diferencias no significativas entre los valores de riqueza conocidas (Figura 4). El estimador Jackknife mostró un aumento de máximo 22 especies a partir del segundo muestreo que correspondió a la época de lluvia; sin embargo, después de dicho valor, la curva se estabilizó. El estimador de Chao2 mostró una tendencia similar ya que no modificó la riqueza (20 especies de HMA's ya consignadas). Para suavizar estos resultados en la expresión exponencial negativa, se observa que a pesar de aumentar el esfuerzo de muestreo la riqueza de HMA's mantiene valores similares a los observados.

Discusión

El matorral desértico rosetófilo cubre el 21.7 % de la superficie total del estado de San Luis Potosí (CONAFOR, 2018). En la Sierra de Catorce, esta comunidad vegetal representa un área prioritaria para la conservación de flora, albergando especies representativas del territorio, además de un sobresaliente número de cactáceas amenazadas (González-Costilla et al., 2007). El matorral desértico rosetófilo pertenece al matorral xerófilo, el tipo de vegetación con mayor extensión en el país y la más rica en endemismo (Rzedowski, 2006), factor que influye en concentrar una alta diversidad de HMA's (Montaño et al., 2012). De acuerdo con los resultados, el matorral desértico rosetófilo ubicado en la Sierra de Catorce presentó una riqueza taxonómica de 20 especies de HMA's; no obstante, hasta el momento, ningún estudio a nivel nacional ha sido dirigido a especies como *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyliirion acotriche*, y *Lindleya mespiloides*, pertenecientes al matorral desértico rosetófilo estudiado.

La riqueza de HMA's documentada en la presente investigación está en el rango de los registros publicados dentro de otras comunidades vegetales pertenecientes a la vegetación xerófila en México; tales registros oscilan entre 5 y 29 especies (Pimienta-Barrios et al., 2002; Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Ochoa-Meza et al., 2009; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Hernández-Zamudio et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021 y Chimal-Sánchez et al., 2022).

La riqueza de la familia Glomeraceae representa el 50 % del total de las especies de HMA's documentadas en la presente investigación; esta familia comparte del 25 al 31 % de las especies de HMA's registradas en otros matorrales xerófilos del país (Chimal-Sánchez et al., 2015; Hernández-Zamudio et al., 2018; Monroy-Ata et

that of the dry season aligns with Sommerfeld et al. (2013), who mention that AMF richness is consistent in winter and summer seasons. However, further research documenting AMF richness during the cold season is necessary to generate more information on the seasonality of AMF throughout the year

Of the 20 AMF species found in the rosetophyll scrub of the Sierra de Catorce, *Entrophospora etunicata* was one of the most frequent and the most abundant; its presence, along with *Funneliformis mosseae*, has been consistently documented in most studies focused on the arid and semi-arid zones of the country (Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2020; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2022).

Among the most abundant and frequent species are *Gigaspora margarita* and *Scutellospora scutata*; these results differ from those of Reyes-Jaramillo et al. (2019) who mention that *S. scutata* (formerly *Dentiscutata scutata*) is a species of low frequency associated with mezcal agaves in xerophytic scrub in Oaxaca. *G. margarita* is a species with few records in xerophytic vegetation (Pimienta-Barrios et al., 2002; Chimal-Sánchez et al., 2015). However, its presence in the three sampling seasons and being one of the most abundant, could be because it is a species with multiple germination, a strategy to adapt to adverse effects (Stürmer et al., 2018).

Some of the AMF morphospecies represent the second report at the national level in natural plant communities. According to Varela et al. (2019), *Ambispora fennica* has been reported only in temperate forests; however, Hernández-Zamudio et al. (2018) reports it associated with *Larrea tridentata* in Coahuila. Chimal-Sánchez et al. (2020) reported for the first time *Septoglomus mexicanum* associated with *Prosopis laevigata*; therefore, this species is considered, so far, typical of xerophytic scrubs in the country (Polo-Marcial et al., 2021). This contribution reports the first record of *Rhizophagus irregularis* in xerophytic scrub, but this species has already been recorded in coastal dunes and tropical deciduous forest in Yucatán (Lara-Pérez et al., 2020), as well as in the low deciduous forest and cloud forest in the state of Veracruz (Peñuelas-Rubio et al., 2021).

The richness of AMF was fully documented. The Chao2 ecological estimator showed no significant difference between observed and expected species; however, the Jackknife estimator predicted at least two species that were not detected in our study. López-Gómez & Williams-Linera (2006) mention that

al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019). Chimal-Sánchez et al. (2015) mencionan que las especies de esta familia tienden a distribuirse en ambientes áridos y semiáridos donde se asocian con una amplia variedad de especies por poseer una alta funcionalidad. Aunado a esto, a esas especies se les adjudica una alta competitividad con respecto a las de otras familias de HMA's (Trejo-Aguilar et al., 2013).

Debido a que la abundancia de esporas fue mayor en la época seca, lo posible es considerar que la estacionalidad es un factor que influye en las poblaciones de estos hongos. Este fenómeno puede ser relacionado particularmente con la esporulación. La esporulación es utilizada como estrategia de supervivencia, la cual es más intensa y significativa cuando las plantas hospederas presentan estrés hídrico (da Silva et al., 2014).

La abundancia y riqueza de los HMA's varía según las diferentes etapas fenológicas de la planta, mismas que se asocian con los cambios estacionales durante el año (Scott-Denton et al., 2006). La mayor riqueza de HMA's encontrada en la época fría y su similitud con la de la época seca concuerda con Sommerfeld et al. (2013), pues ellos mencionan que la riqueza de HMA's en las épocas invernal y de verano es consistente. Sin embargo, alguna investigación que documente la riqueza de HMA en la época fría es necesaria, para generar más información sobre la estacionalidad de los HMA's a través del año.

De las 20 especies de HMA's encontradas en el matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, *Entrophospora etunicata* fue una de las más frecuentes y la más abundante, su presencia junto con *Funneliformis mosseae* han sido constantemente documentadas en la mayoría de los estudios enfocados en las zonas áridas y semiáridas del país (Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2020; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2022).

Entre las especies más abundantes y frecuentes se encuentran *Gigaspora margarita* y *Scutellospora scutata*; estos resultados difieren de los de Reyes-Jaramillo et al. (2019) quienes mencionan que *S. scutata* (antes *Dentiscutata scutata*) es una especie de baja frecuencia asociada a agaves mezcaleros en matorrales xerófilos de Oaxaca. Por su parte, *G. margarita* es una especie con pocos registros en la vegetación xerófila (Pimienta-Barrios et al., 2002; Chimal-Sánchez et al., 2015). Sin embargo, su presencia en las tres épocas de muestreo y el ser una de las más abundantes, podría deberse a que es una especie con germinación múltiple, una estrategia para adaptarse a efectos adversos (Stürmer et al., 2018).

a difference between two to five species between the Jackknife estimator and the observed demonstrates an appropriate sampling effort that uncovers many AMF species. Our study detected 90 % of the species that could be found in the rosetophyll scrub of the Sierra de Catorce, San Luis Potosí. However, it is important to mention that the increase of explorations in xerophytic scrubs of the country could increase the richness of AMF documented so far in this vegetation type (Chimal-Sánchez et al., 2015).

Conclusions

The richness and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi associated with rosetophyll scrub varied with the time of year. The highest abundance of AMF spores corresponds to the dry season, while the highest richness was observed in the cold season. This study allowed us to document for the first time the richness of AMF associated with the rosetophyll scrub in the Potosino-Zacatecan highlands; in addition, the first record of *Rhizophagus irregularis* in this type of vegetation corresponds to this study.

Acknowledgments

Thanks to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship awarded to the first author for her postgraduate studies in Agricultural Sciences at the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine of UASLP.

References / Referencias

- Barboza-Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., & Martínez-Macías, P. R. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299-319
- Bashan, Y., Khaosaad, T., Salazar, B. G., Ocampo, J. A., Wiemken, A., Oehl, F., & Vierheilig, H. (2007). Mycorrhizal characterization of the boojum tree, *Fouquieria columnaris*, an endemic ancient tree from the Baja California Peninsula, Mexico. *Trees*, 21, 329-335. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0126-2>
- Bautista-Cruz A. A., Montañón N. M., Camargo-Ricalde, S. L., & Pacheco L. (2014). Hongos micorrizógenos arbusculares y nutrimentos del suelo asociados a cuatro especies de helechos es dos ecosistemas de Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20, 199-212. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.007>

Algunas de las morfoespecies de HMA's representan el segundo reporte a nivel nacional en comunidades vegetales naturales. Según Varela et al. (2019), *Ambispora fennica* ha sido reportada solo en bosques templados; sin embargo, Hernández-Zamudio et al. (2018) la reporta asociada a *Larrea tridentata* en Coahuila. Chimal-Sánchez et al. (2020) reportaron por primera vez a *Septoglomus mexicanum* asociada a *Prosopis laevigata*; por lo tanto, esa especie es considerada, hasta el momento, propia de matorrales xerófilos del país (Polo-Marcial et al., 2021). En esta contribución se reporta el primer registro de *Rhizophagus irregularis* en matorrales xerófilos, pero esta especie ya ha sido registrada en dunas costeras y bosque tropical caducifolio en Yucatán (Lara-Pérez et al., 2020), así como en la selva baja caducifolia y bosque mesófilo de montaña en el estado de Veracruz (Peñuelas-Rubio et al., 2021).

La riqueza de HMA's se documentó en su totalidad. El estimador ecológico de Chao2, mostró diferencia no significativa entre especies observadas y esperadas; sin embargo, el estimador de Jackknife predijo al menos dos especies que no fueron detectadas en nuestro estudio. López-Gómez & Williams-Linera (2006) mencionan que una diferencia entre dos a cinco especies entre el estimador de Jackknife y lo observado, demuestran un esfuerzo de muestreo apropiado que descubre la mayoría de las especies de HMA's. Nuestro estudio detectó el 90 % de las especies que se podrían encontrar en el matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, en San Luis Potosí. Sin embargo, es importante mencionar que el aumento de exploraciones en matorrales xerófilos del país podría aumentar la riqueza de HMA's documentada hasta el momento en este tipo de vegetación (Chimal-Sánchez et al., 2015).

Conclusiones

La riqueza y abundancia de hongos micorrízicos arbusculares asociados al matorral desértico rosetófilo varían con la época del año. A época seca corresponde la mayor abundancia de esporas de HMA'a, mientras que la mayor riqueza se observó en la época fría. Este estudio permitió documentar por primera vez la riqueza de HMA's asociados al matorral desértico rosetófilo, en el altiplano Potosino-Zacatecano; además, el primer registro de *Rhizophagus irregularis* en dicho tipo de vegetación corresponde a esta contribución.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la primera autora para sus estudios de posgrado en Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP.

Fin de la versión en español

- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220, 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- CETENAL. (1972). Cartas de uso del suelo y edafológicas F14 A25, F14 A24, F14 A23 y F14 A14, escala 1:50 000. SPP, México.
- Chimal-Sánchez, E., Araiza-Jacinto, M. L., & Román-Cárdenas, V. J. (2015). El efecto del fuego en la riqueza de especies de hongos micorrizógenos arbusculares asociada a plantas de matorral xerófilo en el Parque Ecológico "Cubitos". *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 182, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2015.09.002>
- Chimal-Sánchez, E., García-Sánchez, R., & Hernández-Cuevas, L. V. (2015). Gran riqueza de hongos micorrizógenos arbusculares en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Micología*, 41, 14-26
- Chimal-Sánchez, E., I. Reyes-Jaramillo, J. Y., Salmerón-Castro, N., Vázquez-Pérez, L., & Varela-Fregoso, L. (2018). Cuatro nuevos registros de hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) asociados con *Agave karwinskii* y *A. angustifolia* (Agavaceae) de Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana*, 125: 173-187. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1356>
- Chimal-Sánchez, E., Reyes-Jaramillo, I., Camargo-Ricalde, S. L., Varela, L., Salmerón Castro, J. Y., & Montaña, N. M. (2021). *Racocetra cromosomica* sp. nov. from Oaxaca, Mexico. *Mycotaxon*, 136(3), 615-626.
- Chimal-Sánchez, E., Senés-Guerrero, C., Varela, L., Montaña, N. M., García-Sánchez, R., Pacheco, A., Montaña-Arias, S. A., & Camargo-Ricalde, S. L. (2020). *Septoglosum mexicanum*, a new species of arbuscular mycorrhizal fungi from semiarid regions in Mexico. *Mycologia*, 112, 121-132. <https://doi.org/10.1080/00275514.2019.1671147>
- Chimal-Sánchez, E., Montaña, N. M., Camargo-Ricalde, S. L., García-Sánchez, R., & Hernández Cuevas, L. V. (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*, 36(2), 609-625. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02234-4>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). Inventario Nacional Forestal y del suelo. Procedimientos de muestreo. Guadalajara, Jal., México. Recuperado 15 junio 2022, de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>
- da Silva, I. R., de Mello, C. M. A., Neto, R. A. F., da Silva, D. K. A., de Melo, A. L., Oehl, F., & Maia, L. C. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology*, 84, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.07.008>
- Daniels, H. B. A., Skipper, H. D. (1982). Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In: Schenck, N.C. (ed.), *Methods and principles of mycorrhizal research*. American Society for Phytopathology, St Paul, Minn. pp. 29-37
- Delavaux, C. S., Weigelt, P., Dawson, W., Duchicela, J., Essl, F., van Kleunen, M., König, C., Pergl, J., Pyšek, P., Stein, A., Winter, M., Schultz, P., Kreft, H., & Bever, J. D. (2019). Mycorrhizal fungi influence global plant biogeography. *Nature ecology and evolution*, 3, 424-429. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0823-4>
- Frey, S. D. (2019). Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 237-259. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331>
- 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, 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- González-Costilla, O., Jiménez de Azcárate, J. García-Pérez, J. R., & Aguirre-Rivera, J. R. (2007). Flórmula vascular de la Sierra de Catorce y territorios adyacentes, San Luis Potosí, México. *Acta Botánica Mexicana*, 78, 1-38. <https://doi.org/10.21829/abm78.2007.1027>
- Granados-Sánchez, D., M. Á. Hernández-García, A. Vázquez-Alarcón, P., & Ruiz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19, 45-66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Hernández-Zamudio G., Sáenz-Mata J., Moreno-Reséndez A., Castañeda-Gaytán G., Ogaz A., Carballar-Hernández S., & Hernández-Cuevas, L. (2018). Dinámica de la diversidad temporal de los hongos micorrízicos arbusculares de *Larrea tridentata* (Sesse & Mocino ex DC) Coville en un ecosistema semiárido. *Revista Argentina de Microbiología*, 50, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.07.007>
- Hipólito-Piedras, R. P., Méndez-Cortés, H., Ramírez-Tobías, H. M., & Olalde-Portugal, V. (2024). *Glomus nanolumen* (Glomeraceae), un hongo micorrízico arbuscular en México. *Acta Botánica Mexicana*, (131). <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2226>
- International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM). (2022). Species descriptions from reference cultures. West Virginia University. Recuperado 15 junio, 2022 de: <https://invam.wvu.edu/>
- Jiménez-Valverde, A. (2000). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar los inventarios biológicos. *Revista Ibérica de Aracnología*, 8, 151-161
- Koske, R. E., & Tessier B. (1983). A convenient, permanent slide mounting medium. *Mycological Society of America Newsletter*, 34, 59
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583-621. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lara-Pérez, L. A., Oros-Ortega, I., Córdova-Lara, I., Estrada-Medina, H., O'Connor-Sánchez, A., Góngora-Castillo, E., & Sáenz-Carbonell, L. (2020). Seasonal shifts of arbuscular mycorrhizal fungi in *Cocos nucifera* roots

- in Yucatan, Mexico. *Mycorrhiza*, 30, 269-283. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00944-0>
- Le Pioufle, O., Ganoudi, M., Calonne-Salmon, M., Ben Dhaou, F., & Declerck, S. (2019). *Rhizophagus irregularis* MUCL 41833 improves phosphorus uptake and water use efficiency in maize plants during recovery from drought stress. *Frontiers in plant science*, 897. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00897>
- López-Gómez, A. M., & Williams-Linera, G. (2006). Evaluación de métodos no paramétricos para la estimación de riqueza de especies de plantas leñosas en cafetales. *Botanical Sciences*, (78), 7-15. <https://doi.org/10.17129/botsci.1717>
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Science. Malden, MA, USA.
- Martínez-García, L. B. (2011). Micorrizas arbusculares en ecosistemas semiáridos. Respuesta a factores de estrés ambiental. *Ecosistemas*, 20, 2-3.
- McAleece, P. H. D. Lamshead, G. L. J., & Paterson y Cage J. D. 1997. *Biodiversity Professional (V.2.0)*. Natural History Museum and Scottish Association for Marine Science. Oban, UK. Recuperado 10 de julio, 2023 de: <https://www.sams.ac.uk/science/outputs/>.
- Mena-Echevarría, A., Méndez-Cortés, H., Ramírez-Tobías, H. M., & Rojas-Velázquez, Á. N. (2021). Comparación de dos suelos para la producción de inoculantes micorrízicos en San Luis Potosí, México. *Scientia Fungorum*, 51. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1315>
- Monroy-Ata, A., & Ramírez-Saldivar, K. Y. (2018). Relación entre sucesión ecológica vegetal y hongos micorrizógenos arbusculares en un matorral xerófilo en el centro de México. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas*, 21. <https://doi.org/0.22201/fesz.23958723e.2018.0.157>
- Montaño, N. M., Alarcón, A., Camargo-Ricalde, S. L., Hernández-Cuevas, L. V., Álvarez-Sánchez, J., González-Chávez, M. A., Gavito, M. E., Sánchez-Gallen, I., Ramos-Zapata, J., Guadarrama, P., Maldonado-Mendoza, I. E., Castillo-Argüero, S., García-Sánchez, R., Trejo, D., & Ferrera-Cerrato, R. (2012). Research on arbuscular mycorrhizae in Mexico: an historical synthesis and future prospects. *Symbiosis*, 57, 111-126. <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0184-0>
- Morton, J. B. (1988). Taxonomy of VA mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon* 32, 267-324
- Morton, J. B., Bentivenga, S. P., & Wheeler, W. W. (1993). Germoplasm in the International Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon*, 48, 491-528
- Ochoa-Meza, A., Esqueda, M., Fernández-Valle, R., & Herrera-Peraza, R. (2009). Variación estacional de hongos micorrízicos arbusculares asociados con *Agave angustifolia* Haw. en la Sierra Sonorense, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 189-199
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2006). Estudio 147. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: Hacia la ordenación forestal sostenible. FAO, Roma.
- Pagano, M. C., & Gupta, V. K. (2016). Overview of the recent advances in mycorrhizal fungi. *Recent Advances on Mycorrhizal Fungi*, pp. 1-13. Brazil
- Peñuelas-Rubio, O., Trejo-Aguilar, D., Cervantes-Gómez, R. G., & Maldonado-Mendoza, I. E. (2021). Análisis microbiómico de hongos micorrízicos arbusculares asociados a papaya, inoculada con consorcios de dos ecosistemas naturales. *Scientia Fungorum*, 51. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1292>
- Pezzani, F., Montaña, C., & Guevara, R. (2006). Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and grasses in the successional context of a two-phase mosaic in the Chi-huahuan Desert. *Mycorrhiza*, 16, 285-295. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0044-y>
- Pimienta-Barrios, E., Pimienta-Barrios, E., Salas-Galván, M. E., Zañudo-Hernández, J., & Nobel, P. S. (2002). Growth and reproductive characteristics of the columnar cactus *Stenocereus queretaroensis* and their relationships with environmental factors and colonization by arbuscular mycorrhizae. *Tree Physiology*, 22, 667-674. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.9.667>
- Polo-Marcial, M. H., Lara-Pérez, L. A., Goto, B. T., Margarito-Vista, X., & Andrade-Torres, A. (2021). Glomeromycota in Mexico, a country with very high richness. *Sydowia*, 74, 33-63. <http://dx.doi.org/10.12905/0380.sydowia74-2021-0033>
- Polo-Marcial, M. H., Lara-Pérez, L. A., Goto, B. T., Noa-Carrazana, J. C., Díaz-Fleischer, F., & Andrade-Torres, A. (2022). Tropical deciduous species under different land use retain a high glomerospores diversity and arbuscular and septate endophyte colonization. *Nova Hedwigia*, 487-517. http://dx.doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2022/0723
- Reyes-Jaramillo I., Chimal-Sánchez E., Salmerón-Castro J. Y., Vázquez-Pérez N., & Varela-Fregoso L. (2019). Comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) asociada con agaves mezcaleros de Oaxaca y su relación con algunas propiedades edáficas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1-15. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2777>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Schüßler, A. (2022). *The Glomeromycota. A species list with new families and new genera*. Gloucester, Inglaterra: The Royal Botanic Garden Edinburgh/ The Royal Botanic Garden Kew/ Botanische Staatssammlung Munich/ Oregon State University. Recuperado 15 de junio, 2022 de: www.amf-phylogeny.com
- Scott-Denton, L. E., Rosenstiel, T. N., & Monson, R. K. (2006). Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration. *Global Change Biology*, 12, 205-216. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01064.x>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

- (SEMARNAT). (2008). Programa estratégico forestal del estado de San Luis Potosí (PEFE-SLP) 2006-2025. Vol. 1. Comisión Nacional Forestal. México. 204 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Diario oficial de la Federación 85-85
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. Traducción de: Ortiz-Solorio C.A., M.C. Gutiérrez, E.V. Gutiérrez. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales
- Sommerfeld, H. M., Díaz, L. M., Alvarez, M., Villanueva, C. A., Matus, F., Boon, N., Boeckx, P., & Huygens, D. (2013). High winter diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities in shallow and deep grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.002>
- Stürmer, S. L., Oliveira, L. Z., & Morton, J. B. (2018). Gigasporaceae versus Glomeraceae (phylum Glomeromycota): a biogeographic tale of dominance in maritime sand dunes. *Fungal Ecology*, 32, 49-56. doi: 10.1016/j.funeco.2017.11.008
- Tapia-Goné, J., Ferrera-Cerrato, R., Varela-Fregoso, L., Rodríguez-Ortiz, J. C., Lara-Mireles, J., Soria-Colunga, J. C., Cuellar-Torres, H., Tiscareño-Iracheta, M. A., & Cisneros-Almazán, R. (2008). Caracterización e identificación morfológica de hongos formadores de micorriza arbuscular, en cinco suelos salinos del estado de San Luis Potosí, México. *Revista mexicana de micología*, 26, 1-7
- Trejo-Aguilar, D., Lara-Capistrán, L., Maldonado-Mendoza, I. E., Zulueta-Rodríguez, R., Sangabriel-Conde, W., Mancera-López, M. E., Negrete-Yankelevich, S., & Barois, I. (2013). Loss of arbuscular mycorrhizal fungal diversity in trap cultures during long-term subculturing. *IMA fungus*, 4, 161-167. <https://dx.doi.org/10.5598%2Fimafungus.2013.04.02.01>
- Trinidad-Cruz, J. R., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., López-Pérez, L., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizósfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Micología*, 45, 13-25
- Varela, L., Hernández-Cuevas, L. V., Chimal-Sánchez, E., & Montaña, N. M. (2019). Taxonomic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi cited from Mexico. *Biodiversidad de Microorganismos de México: Importancia, Aplicación y Conservación*. Ed. Electrónica. Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Méx., México
- Walker, C. (1983). Taxonomic concepts in the Endogonaceae: spore wall characteristics in species descriptions. *Mycotaxon*, 18, 443-455
- Wipf, D., Krajinski, F., van Tuinen, D., Recorbet, G., & Courty, P. E. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 223, 1127-1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>
- Zhang, S., Guo, X., Yun, W., Xia, Y., You, Z., & Rillig, M. C. (2020). Arbuscular mycorrhiza contributes to the control of phosphorus loss in paddy fields. *Plant and Soil*, 447, 623-636. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04394-2>