



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

**Mosaicos de plantas inoculadas con hongos
micorrizógenos arbusculares (HMA) para la
naturación de azoteas bajo un sistema de
riego por goteo**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G O
P R E S E N T A:
DÍAZ HERNÁNDEZ IMELDA SOCORRO

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN ECOLOGÍA VEGETAL

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ARCADIO MONROY ATA

Investigación realizada con financiamiento de la DGAPA,
UNAM mediante los proyectos PAPIIME (clave: PE205109) y
PAPIIT (clave: IN216610).



MÉXICO, D. F.

ENERO DE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

	PÁGINA
ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	3
ÍNDICE DE CUADROS	4
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
MARCO TEÓRICO	7
Azoteas verdes.....	7
Mosaicos de vegetación.....	9
Vegetación xerófitas.....	9
Especies xerófitas a emplear en la naturación de azoteas.....	11
<i>Bergerocactus emoryi</i>	
<i>Mammillaria bombycina</i>	
<i>Mammillaria voburnensis</i>	
<i>Sedum moranense</i>	
<i>Stenocereus pruinosus</i>	
Simbiosis micorrícica.....	14
Clasificación de las micorrizas.....	16
Evapotranspiración real.....	18
PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN	19
HIPÓTESIS	20
OBJETIVOS	20
Objetivo general	
Objetivos particulares	
MATERIAL Y MÉTODOS	21
Material biológico	
Lugar de trabajo	
Preparación del sustrato e inóculo	
Análisis físico y químico del sustrato	
Preparación de macetas	
Riego	
Tasa de crecimiento relativo (TCR)	
Biomasa total y cociente R/S	
Eficiencia en el uso del agua (WUE)	
Evaluación de la colonización micorrícica	
Diseño estadístico.....	25
Diagrama de flujo.....	26

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	44
LITERATURA CITADA	45
ANEXO	52

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

		PÁGINA
Figura 1	<i>Bergerocactus emoryi</i>	11
Figura 2	Acercamiento de espinas radiales y centrales de <i>Mammillaria bombycina</i> ..	11
Figura 3	Flores pequeñas en forma de campana de <i>M. bombycina</i>	12
Figura 4	Flores y espinas de <i>Mammillaria voburnensis</i>	13
Figura 5	<i>Sedum moranense</i>	13
Figura 6	Inflorescencia de <i>Sedum moranense</i>	14
Figura 7	<i>Stenocereus pruinosus</i>	14
Figura 8	Arbúsculo.....	15
Figura 9	Ectomicorrizas, micorrizas arbusculares, micorrizas ericoides, micorrizas orquidoides, micorrizas arbutoides y micorrizas monotropoides.....	17
Figura 10	Clasificación taxonómica de los hongos micorrízico arbusculares (HMA) de acuerdo a Schüßler (2011).....	19
Figura 11	Contenedor cubierto de pellón.....	22
Figura 12	Modelo de mosaico de vegetación en un contenedor de plástico.....	24
Figura 13	Modelo de los cordones evaporadores, tezontle como sustrato para retener humedad.....	24
Figura 14	Hifas y vesículas observadas a 16X en <i>M. bombycina</i>	40
Figura 15	Hifas y vesículas observadas a 40X en <i>M. voburnensis</i>	40
Figura 16	Micelio externo y esporas observadas a 16X en <i>Bergerocactus emoryi</i>	40
Figura 17	Hifas y vesículas observadas a 40X; arbúsculo e hifa observados a 100X en <i>Sedum moranense</i>	41
Figura 18	Micelio externo, vesículas e hifas observadas a 16X en <i>Stenocereus pruinosus</i>	41
Figura 19	Modelo de mosaico de vegetación de bajo mantenimiento.....	42
Gráfico 1	Altura y diámetro de <i>M. bombycina</i> obtenido al final del experimento.....	27
Gráfico 2	Tasa de crecimiento relativo (TCR) de <i>M. bombycina</i> al final del experimento.....	28
Gráfico 3	Altura y diámetro de <i>M. voburnensis</i> obtenido al final del experimento.....	29
Gráfico 4	TCR de <i>M. voburnensis</i> al final del experimento.....	29
Gráfico 5	Altura y diámetro de <i>Bergerocactus emoryi</i> obtenido al final del experimento.....	30
Gráfico 6	TCR de <i>B. emoryi</i> al final del experimento.....	30
Gráfico 7	Altura de <i>Sedum moranense</i> al final del experimento.....	31
Gráfico 8	TCR de <i>S. moranense</i> al final del experimento.....	31
Gráfico 9	Altura y diámetro de <i>Stenocereus pruinosus</i> obtenido al final del experimento.....	32
Gráfico 10	TCR de <i>S. pruinosus</i> al final del experimento.....	33
Gráfico 11	Evapotranspiración real semanal de ambos tratamientos durante 24 semanas.....	33

Gráfico 12	Evapotranspiración media semanal de ambos tratamientos al final del experimento.....	34
Gráfico 13	Evapotranspiración real acumulada de ambos tratamientos durante 24 semanas.....	35

ÍNDICE DE CUADROS

	PÁGINA	
Cuadro 1	Parámetros indicadores del crecimiento vegetal de plantas durante un periodo de seis meses.....	27
Cuadro 2	Promedios de evapotranspiración real (en mm) para los tratamientos no micorrizados y micorrizados.....	34
Cuadro 3	Evapotranspiración real acumulada para el tratamiento no micorrizado y micorrizado al final del experimento.....	34
Cuadro 4	Promedios por especie de cociente raíz/vástago y eficiencia en el uso del agua (WUE).....	36
Cuadro 5	Promedios de peso húmedo y seco entre ambos tratamientos, así como el cociente biomasa radical/biomasa del vástago y WUE.....	36
Cuadro 6	Porcentaje de supervivencia al final del experimento para plantas no micorrizadas y micorrizadas.....	37
Cuadro 7	Promedios obtenidos de los parámetros físicos de color, densidad aparente, densidad real, porcentaje poroso y textura.....	38
Cuadro 8	Promedios obtenidos de los parámetros químicos de pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y conductividad eléctrica.....	38
Cuadro 9	Porcentaje de colonización total por especie.....	39
Cuadro 10	Precios del material utilizado para producir un contenedor con un mosaico de vegetación.....	42

RESUMEN

El aumento de edificaciones, como parte del desarrollo poblacional y de actividades humanas, ha contribuido a la expansión de la mancha urbana y a la consecuente pérdida de áreas verdes, ocasionando un incremento en la temperatura, debido a la liberación nocturna de energía calórica absorbida durante el día por las construcciones y superficies viales, generando cambios en el clima y microclima de la ciudad. Debido a esto, las zonas verdes son importantes ya que son capaces de capturar contaminantes y partículas suspendidas y disminuir el efecto “isla de calor”, haciendo el clima menos extremo. Así, el instalar sistemas de naturación a nivel urbano ha mostrado grandes beneficios ambientales en diversas ciudades del mundo, sin embargo, son onerosos de instalar, requieren riego, mantenimiento y personal especializado en jardinería. Por ello, el presente trabajo busca generar un modelo para naturar azoteas que sea ecológico, como una alternativa tanto económica como tecnológica, para incidir en un incremento en las áreas verdes. Para esto, se diseñó un experimento en condiciones de invernadero, consistente en un modelo de maceta que tiende a ser autosuficiente, el cual consta de un doble contenedor que facilita la evaporación del exceso de agua de lluvia y una olla de barro poco cocido para almacenar agua pluvial y tener un riego suplementario, para un mosaico vegetal formado por *Mammillaria bombycina*, *M. voburnensis*, *Bergerocactus emoryi*, *Sedum moranense* y *Stenocereus pruinosus*. A 10 de estos mosaicos se les aplicó un inóculo de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) y 10 mosaicos fueron testigos no micorrizados. Las preguntas a resolver con este estudio fueron:

- ¿La micorrización con HMA favorece significativamente el crecimiento en altura de las plantas en condiciones de invernadero?
- ¿Cuál es la influencia de la micorrización sobre la evapotranspiración real acumulada del mosaico de plantas?
- ¿Cuál será el efecto de los HMA sobre la tasa de crecimiento relativo y la eficiencia del uso del agua de las plantas que conforman el mosaico?
- ¿Cuál será el efecto de los HMA sobre la supervivencia de las plantas que conforman el mosaico de vegetación?

Los resultados obtenidos, en relación a la inoculación de los HMA sobre el desarrollo vegetal, no presentaron diferencias significativas en las especies cultivadas, en cuanto a altura, diámetro, tasa de crecimiento relativo, biomasa de raíz y vástago, eficiencia en el uso del agua (excepto *M. bombycina*) y supervivencia, entre plantas no micorrizadas y micorrizadas. Tampoco se observaron diferencias estadísticas en la evapotranspiración de las plantas de ambos tratamientos, aunque sí una ligera tendencia que indica que las plantas micorrizadas evapotranspiraron más que las no micorrizadas. Por lo anterior, se puede afirmar que la inoculación con HMA en el cultivo de las especies estudiadas, no favorece significativamente su crecimiento aunque tampoco lo inhibe. Lo anterior debido a que las plantas crasas crecen lentamente, la micorrización es un proceso demandante de recursos para el vegetal al inicio de la simbiosis mutualista y el tiempo de registro de datos fue relativamente corto (24 semanas). Finalmente, se concluye que el modelo de mosaico de vegetación para naturar azoteas es eficiente ya que la mortalidad de plantas fue nula en el tratamiento micorrizado y muy baja (2%) en los no inoculados. Por ello este tipo de mosaico de vegetación sería recomendable para naturar azoteas bajo un esquema de bajo mantenimiento y de cero riego.

INTRODUCCIÓN

En ciudades densamente pobladas las necesidades de espacio para diversas actividades antrópicas provocan que se modifique el uso del suelo, cubriéndolo con materiales que retienen el calor. Este proceso produce el efecto llamado “isla urbana de calor”, el cual contribuye a incrementar el cambio climático global, que finalmente deriva en un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos como tormentas, huracanes y disminución en la calidad del aire, por la emisión de gases producto de la quema de combustibles fósiles como el ozono, CO₂ y otros contaminantes (Kumar y Kaushik, 2005; Alexandri y Jones, 2008; Imyunku, 2009).

Existe una fuerte influencia de la radiación solar incidente y de la absorbancia de la superficie del suelo urbano, sobre la temperatura en el pavimento, asfalto o cemento. Ante esta problemática, se ha planteado la posibilidad de cubrir parte de las zonas urbanas con vegetación. Con esta idea se ha propuesto naturalizar con plantas algunos espacios urbanos, tales como azoteas o muros en edificaciones.

Las zonas verdes son importantes ya que son capaces de capturar contaminantes y partículas suspendidas, disminuir el efecto “isla de calor” a través de la absorción del calor, haciendo el clima menos extremo. Además, estos sistemas pueden retener el agua pluvial para su posterior evapotranspiración y consecuente incremento de la humedad ambiental; es decir, son medios de reutilización del agua, entre otras ventajas (Alexandri y Jones, 2008; Sailor, 2008).

Las azoteas verdes funcionan incrementando el aislamiento térmico de las edificaciones y reduciendo la demanda de aire acondicionado y calentadores. Por lo tanto, se reducen las necesidades de energía en tiempos de calor o de frío (Sailor, 2008).

Sin embargo el instalar un sistema de naturalización y pensar que se trata de un beneficio para el medio ambiente, no es totalmente cierto, ya que el empleo masivo de insecticidas, herbicidas o el consumo excesivo de agua en el riego, son signos deletéreos para el ambiente. Por ello, elegir plantas que son más resistentes a la sequía, a las plagas y que requieren menos cuidados como las agaváceas, cactáceas, liliáceas o crasuláceas, es una excelente opción para naturalizar espacios urbanos en latitudes ubicadas en la franja intertropical. Además, el sustituir los fertilizantes y pesticidas químicos por formulaciones orgánicas o de origen biológico, evita la contaminación del suelo, agua y aire.

MARCO TEÓRICO

Azoteas verdes

La vegetación puede presentarse en diferentes estratos como árboles, arbustos y pastos y ocupa cierta proporción de la superficie terrestre en las ciudades siendo en éstas una parte importante del uso del suelo urbano. Por ello, ha sido cada vez más popular el uso de los techos de edificaciones para el crecimiento de plantas, no solo por razones de estética, sino para la mejora del ambiente (Kumar y Kaushik, 2005).

Debido a que la contaminación del aire es uno de los principales problemas en muchas ciudades, la capacidad de la vegetación para la purificación del aire urbano ha sido objeto de una atención cada vez mayor, ya que los beneficios ambientales de la naturación de azoteas derivan de su funcionamiento como ecosistemas vivos (Jim y Hongming, 2010).

La azotea verde también conocida como azotea viva, azotea ajardinada, naturación de azotea, techo verde, “green roof” o “sky garden”, consiste en un sistema integral compuesto por varias capas de materiales diseñados para proteger al inmueble contra daños ocasionados por la filtración de agua, penetración de raíces vegetales y el peso del sistema de naturación, el cual permite el crecimiento de vegetación en azoteas, terrazas y áreas abiertas poco utilizadas. Estos sistemas de establecimiento vegetal en edificaciones son una excelente opción para compensar la destrucción de áreas verdes propiciada por cada nuevo proyecto de construcción urbana¹ puesto que las plantas mejoran la calidad del aire urbano mediante la eliminación de los contaminantes y la captura de partículas en sus hojas (Fujii *et al.*, 2005).

Los techos verdes reducen la transferencia de calor mediante el aumento de la reflexión de la radiación y el sombreado y el menor consumo de energía de refrigeración de los edificios. Los procesos de transferencia de calor de una azotea, como la convección, conducción y radiación, son modificados por la naturación a través de las características térmicas y propiedades de los materiales de la superficie, la evapotranspiración y los procesos metabólicos de las plantas (Theodosiou, 2003; Koehler, 2004; Martens *et al.*, 2008).

Comúnmente la construcción de azoteas verdes consta de cinco capas: geomalla, material de drenaje, filtro de prevención de la pérdida de las partículas del suelo, el sustrato y la vegetación (Berndtsson, 2010).

Las azoteas verdes suelen dividirse en dos categorías principales: intensivo y extensivo.

¹ www.econstruccion.com.mx/verde.html Recuperado el sábado 12 de marzo de 2011.

- a. *Cubierta intensiva*: Creada por medio de añadir capas de medio de crecimiento y vegetación sobre un sistema de cubierta tradicional. Los requerimientos de mantenimiento son normales o frecuentes cuya capa de sustrato es de 20cm como mínimo y en la cual el peso de la capa de sustrato y vegetación (en estado saturado) es superior a los 250 kg/m² (NADF-013-RNAT-2007).
- b. *Cubierta extensiva*: Creada mediante capas de medio de crecimiento y vegetación sobre un sistema de cubierta tradicional con requerimientos de mantenimiento muy bajos o casi nulos cuya capa de sustrato no debe ser mayor de 18 cm y en la cual el peso en estado saturado es de entre 110 y 140 kg/m² (NADF-013-RNAT-2007).

Pocas referencias identifican una tercera categoría de azoteas verdes: intensivo simple (semi-intensivo) (FLL, 2002), que incluye vegetación con césped y plantas de cobertura. Este tipo requiere mantenimiento frecuente, incluyendo el corte, el riego y la fertilización.

La vegetación en sistemas extensivos es casi exclusivamente a base de plantas crasas como *Sedum* spp. ya que tienen sistemas de raíces superficiales, son capaces de almacenar agua en las hojas o tallos, lo que les permite sobrevivir a los ambientes secos que se encuentran en los techos. Estas plantas presentan el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), que aumenta la eficiencia del uso del agua, permitiendo la apertura de los estomas y almacenamiento de CO₂ durante la noche, cuando las tasas de evaporación son más bajas que durante el día (Emilsson, 2008).

El establecimiento de vegetación en azoteas contribuye con numerosos beneficios:

- ✓ La reducción y atenuación de la escorrentía de aguas pluviales que reduce los riesgos de inundaciones urbanas (Bengtsson *et al.*, 2005; VanWoert *et al.*, 2005; Mentens *et al.*, 2006).
- ✓ Beneficios térmicos: el costo de calefacción y aire acondicionado puede reducirse, así como el efecto isla de calor urbano (Wong *et al.*, 2003; Takebayashi y Moriyama, 2007; Fang, 2008).
- ✓ Reducción del ruido (investigado numéricamente por Van Renterghem y Booteldooren, 2009).
- ✓ Reducción de la contaminación atmosférica (Currie y Bass, 2008; Yang *et al.*, 2008).
- ✓ Proporciona un hábitat para la fauna y la mejora de la biodiversidad (Brenneisen, 2003; Gedge y Kadas, 2005; Dunnett *et al.*, 2008).

Mosaicos de vegetación

Los mosaicos de vegetación natural, en el caso de ecosistemas maduros, son ensamblajes de especies con escasa competencia por recursos, ya que ocupan nichos ecológicos distintos pero complementarios entre sí. Un mosaico vegetal es una asociación de plantas que coexisten conformando una unidad tanto estructural como funcional, que tiende a hacer un uso eficiente de los recursos limitantes en su desarrollo. Estas plantas han coevolucionado para aprovechar de manera óptima los escasos recursos de uso común y dar lugar a mutualismos múltiples. Así, las comunidades vegetales no son simples ensamblajes al azar, sino que representan subconjuntos estructurados de la diversidad regional de especies (Bastow, 1999).

Los mosaicos de vegetación natural están determinados por una serie de principios de coexistencia entre plantas, a los que se les ha denominado reglas de ensamblaje, las cuales se definen como restricciones ecológicas en la conformación de patrones de presencia de especies o su abundancia. Estas reglas de asociatividad determinan la presencia, frecuencia y riqueza de especies, o grupos de especies, en un mosaico vegetal y no sólo la respuesta individual de una especie al medio ambiente (De la Rosa y Monroy, 2006).

Vegetación xerófila

La mayor parte de las regiones áridas del territorio mexicano tienen un régimen de lluvias llamado tropical, donde llueve de mayo a octubre y de noviembre a abril es el periodo seco. Esta estacionalidad hace que las plantas que se mantienen verdes todo el año, como las cactáceas y agaváceas, tengan mecanismos para almacenar agua en la época húmeda, a fin de aprovecharla en el periodo seco. Esta propiedad vuelve a las plantas del desierto en candidatos idóneos para construir jardines *xerófitos* (o de cero riego) en las ciudades.

Xero significa seco y *fito* planta, por lo que la vegetación xerófila se refiere a especies vegetales que medran en climas secos; es decir, que pueden funcionar en condiciones de escasez de agua y llevar a cabo la totalidad de actividades que corresponden a un productor primario:

- a. Realizar la fotosíntesis
- b. Capturar dióxido de carbono
- c. Captar agua y nutrimentos del suelo
- d. Crecer, reproducirse y generar semillas para darle continuidad a la población

Entonces un jardín xerófito es aquél formado por un conjunto de plantas provenientes de zonas áridas y semiáridas. Las plantas más conocidas son las cactáceas (los cactus), crasuláceas (plantas con hojas crasas o gruesas por la retención de humedad

en sus tejidos), agaváceas (los magueyes), algunas liliáceas (como la yuca) y eventualmente otro tipo de arbustos como *Mimosa*, *Prosopis*, *Acacia*, *Condalia* y herbáceas como el zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*), el pasto navajita azul (*Bouteloua gracilis*), el pasto pata de gallo (*Cynodon dactylon*) o el pasto salado (*Distichlis spicata*).

Las cactáceas son una familia originaria del continente americano que posee unas 1200 especies y en México existen alrededor de 800 especies, la mayoría de las cuales son endémicas (Monroy, 2007).

Las plantas xerófitas poseen un gran reservorio de respuestas para hacer frente a la sequía; básicamente hay cuatro mecanismos generales:

- I. **Resistencia:** Implica tener reservas de agua para hacer frente a la época seca.
- II. **Tolerancia:** Implica soportar el estrés de la época seca mediante mecanismos fisiológicos y funcionales
 - a. *Mecanismos fisiológicos.* Las plantas liberan sales en su citoplasma celular, para retener la humedad de sus tejidos y utilizan la reserva hídrica de las vacuolas para mantener un balance hídrico compatible con su metabolismo y con las condiciones externas al vegetal (altas temperaturas, aire seco, suelo sin agua disponible para el vegetal, viento sin humedad).
 - b. *Mecanismos funcionales.* Muchos vegetales secan sus hojas y las liberan (plantas caducifolias) manteniendo un estado de latencia durante la época seca.
- III. **Evasión:** Implica que la planta pasa en forma de semilla la época desfavorable, formando parte del banco de semillas del suelo y germinando en el siguiente periodo de lluvias.
- IV. **Compensación:** Son plantas leñosas llamadas freatofitas, cuya raíz alcanza mantos acuíferos en profundidades mayores a 20 m, como en el caso de los géneros *Prosopis* y *Acacia*, entre otros; adquieren cierta autonomía hídrica respecto al agua pluvial.

Tanto cactáceas como crasuláceas poseen un mecanismo llamado metabolismo ácido de las crasuláceas o CAM por sus siglas en inglés (Crassulacean Acid Metabolism). Gracias a este proceso tienen una elevada eficiencia en el uso del agua unas diez veces superior al de plantas de ambientes húmedos, ya que transpiran de noche, bajo temperaturas de unos 5°C y cierran sus estomas durante el día, para no perder agua con temperaturas superiores a los 30°C.

Asimismo, un mecanismo natural de hidratación de las cactáceas, y de muchas plantas de zonas áridas en la época de secas, es mediante el proceso llamado *nodrizaje hídrico*. Este consiste en condensar la neblina nocturna de los inviernos fríos, especialmente

en altitudes superiores a los dos mil metros sobre el nivel del mar, gracias a las superficies hidrófobas de las plantas y a la red de espinas que atrapan el flujo de humedad atmosférica. El agua así condensada forma microgotas que por gravedad se unen a otras y conforman gotas que escurren hacia la base de la planta donde pueden tomarla las raíces de lluvia (*rain roots*) (Sudzuki, 1995).

Especies xerófitas a emplear en la naturación de azoteas

Con la cantidad de lluvia que cae en muchos ambientes urbanos, hay humedad suficiente para el desarrollo de un sistema de naturación xerófita, solo se debe cuidar la naturaleza del sustrato, el cual debe ser arenoso o a base de tezontle en la capa superficial, para facilitar el drenaje de agua. Las especies xerófitas empleadas en este estudio se enlistan a continuación.

Bergerocactus emoryi (Engelm.) Britton & Rose

- *Arbusto* que se expande fuertemente con sus tallos ramificados y delgados, con una altura de hasta 1 m y de apenas 5 cm de diámetro.
- *Espinas* densas, que a menudo cubren el tallo verde, que presenta hasta 16 costillas. Hasta 30 espinas de color amarillo dorado, de las cuales 3 pueden considerarse como centrales, una de las cuales está orientada hacia abajo con una longitud de hasta 5 cm.
- *Flor* de hasta 4 cm de diámetro, amarilla.
- El *fruto* está tan densamente cubierto de espinas como la misma planta, y tiene el mismo color (Lamb, 2003).
- *Distribución*: MÉXICO: Baja California. ESTADOS UNIDOS (Bravo y Sánchez, 1991).



Figura 1. *Bergerocactus emoryi*.

Mammillaria bombycina Quehl, Monatsschr.

- *Tallo* simple o cespitoso en la base, globoso hasta claviforme, de 20 cm de altura y 6 cm de diámetro; ápice hundido y provisto de abundante lana blanca.
- *Tubérculos* dispuestos en 11 y 18 series espiraladas, cónicos hasta cilíndricos, con el ápice redondeado, de 15 mm de longitud y 10 mm de espesor en la base, de consistencia firme, con jugo acuoso.
- *Axilas* con abundante lana blanca que, en



Figura 2. Acercamiento de espinas radiales y centrales de *Mammillaria bombycina*.

el ápice de la planta cubren los tubérculos, provistas también algunas veces, de cerdas.



Figura 3. Flores pequeñas en forma de campana de *M. bombycina*.

- *Aréolas* circulares cuando jóvenes, después alargadas, al principio con algo de lana blanca, después desnudas.
- *Espinas radiales* 30 a 40, de 2 a 10 mm de longitud, las laterales más largas, todas muy delgadamente aciculares, rígidas, rectas, algo pubescentes, bulbosas en la base, blancas, brillantes, casi siempre horizontales, las superiores y las inferiores más ascendentes que las laterales.
- *Espinas centrales* 2 a 4; la superior de 7 mm de longitud, recta; las laterales, cuando existen, de 10 mm de longitud, rectas, extendidas y algo ascendentes; la inferior de 20 mm de longitud, erecta, ganchuda; todas delgadamente aciculares, lisas, blancas, volviéndose de color ámbar, con la punta de color café rojizo.
- *Flores* infundibuliformes, situadas cerca del ápice, de 15 mm de longitud y diámetro; segmentos exteriores del perianto lanceolados, acuminados, con el margen ciliado, de color verde rojizo hacia la base y arriba de color blanco rojizo; segmentos interiores del perianto largamente elípticos, con el ápice hendido y el margen ciliado, de color violeta rojizo; filamentos blancos abajo y hacia arriba rojo carmín; anteras amarillentas; estilo blanco basalmente, y apicalmente muy rojo; lóbulos del estigma de 4 a 6, purpúreo rojizos.
- *Fruto* claviforme, de 15 mm de longitud por 12 mm de diámetro, blanquecino.
- *Semillas* muy pequeñas negras (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991).
- *Distribución*: MÉXICO: Aguascalientes, Jalisco (Guzmán *et al.*, 2003).

Mammillaria voburnensis Scheer, Lond.

- *Planta* cespitosa, con ramificaciones basales o apicales.
- *Tallo* cilíndrico, de 5 a 20 cm de altura y 3 a 8 cm de diámetro; ápice redondeado y ligeramente hundido en el centro.
- *Tubérculos* apretadamente dispuestos en 8 y 13 series espiraladas, obtusamente piramidales, con muchos lados, algo angulados arriba, de 10 mm de altura y 8 mm de espesor en la base, de color verde oscuro, con tinte rojizo hacia el ápice, con jugo lechoso.
- *Axilas* con lana blanca persistente, casi cubriendo los tubérculos, y con 4 a 10 cerdas algo tortuosas, blancas, de 4 a 10 mm de longitud.
- *Aréolas* ovaladas, con lana blanca cuando jóvenes, después desnudas.

- *Espinas radiales* 5 a 9, de 4 a 7 mm de longitud, las 3 inferiores más largas que las superiores, rectas, hasta irregularmente recurvadas, aciculares, crema, con la punta castaño rojiza, horizontales.
- *Espinas centrales* 1 a 3, de 7 a 35 mm de longitud, rectas, aciculares, tiesas, cuando jóvenes de color café oscuro, después de color marfil con la punta castaño rojiza, erectas.



Figura 4. Espinas y flores de *Mammillaria voburnensis*.

- *Flores* infundibuliformes, de 20 cm de longitud; segmentos exteriores del perianto linear-lanceolados, con el margen desde irregular hasta finamente ciliado, de color amarillo pálido hacia la base, arriba amarillo más oscuro, frecuentemente con tintes más verdosos; segmentos interiores del perianto de 10 mm de longitud, con el ápice acuminado y el margen entero o ciliado, amarillentos, ventralmente con una franja media rojiza o parduzca; filamentos blancos; anteras amarillo intenso; estilo blanco, de 1mm de espesor; lóbulos del estigma 5, amarillo verdosos, sobresaliendo de las anteras unos 2 mm.
- *Fruto* claviforme, de 25 mm de longitud, rojo hasta rojo carmín, conservando adheridos los restos secos del perianto.
- *Semillas* de 0.5 mm de longitud, castaño amarillentas (Bravo y Sánchez, 1991).
- *Distribución*: MÉXICO: Chiapas, Oaxaca. GUATEMALA, HONDURAS, NICARAGUA (Guzmán *et al.*, 2003).

Sedum moranense H.B.K.

- *Planta* herbácea rastrera, procumbente o colgante, glabra, hasta de 20 cm de largo; tallos muy ramificados, verdes cuando jóvenes, después de color café o gris-rojizo; hojas densamente imbricadas, ovadas, muy gruesas y carnosas, de alrededor de 3 mm de largo y de grueso, con la base ancha a veces papilosas.



Figura 5. *Sedum moranense*.

- *Inflorescencia* cimosa, de 1 ó 2 cincinos, cada uno con 1 a pocas flores sésiles o cortamente pediceladas; sépalos desiguales, ovados lanceolados, un poco gibosos en la base, de 2 a 2.5 mm de largo; pétalos lanceolados, mucronados, de 5 mm de largo, blancos, a veces teñidos con rojo, sobre todo en la punta y en la línea media del dorso; nectarios subcuadrados, blanquecino-amarillentos; carpelos blancos, erguidos cuando tiernos, estilo filamentosos, estigma pequeño, globoso; folículos de ca. 4 mm de largo, rojizos,

divergentes, unidos en la base o a veces hasta la mitad de su largo, estilo persistente.

- *Semillas* pocas por folículo, oblongas a piriformes, de alrededor de 0.5 mm de largo, de color café-verdoso a café oscuro, densamente papilosas en líneas longitudinales (Pérez-Calix, 2008).
- *Distribución:* MÉXICO: Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Veracruz (Meyrán-García, 2003).



Figura 6. Inflorescencia de *Sedum moranense*.

Stenocereus pruinosus Otto Buxbaun

- *Arborescente*, con tronco muy definido, de 4 a 5 m de alto ramoso. Ramas de 8 a 10 cm de diámetro de color verde oscuro hacia la extremidad de las ramas azulado, con una pruinosidad blanquecina.
- *Costillas* 5 a 6 prominentes agudas, algo onduladas.
- *Aréolas* distantes entre sí 3 a 4 cm, grandes, de 10 mm de diámetro, circulares, provistas de fieltro grisáceo claro.
- *Espinas radiales* 5 a 7 de 1 a 2 cm de largo, radiadas, subuladas, al principio amarillentas después grises con la punta oscura.
- *Espinas centrales* 1 a 4 grises, de 2 a 3 cm de longitud.
- *Flores* infundibuliformes, de 9 cm de longitud, con tubo receptacular largo; escamas y segmentos exteriores del perianto de color blanco, más largos y delgados que los exteriores; pericarpelo con numerosos podarios pequeños que llevan escamas con areolas provistas de lana corta.



Figura 7. *Stenocereus pruinosus*.

• *Fruto* ovoide, de 5 a 8 cm de largo, de color variable, rojo púrpura, anaranjado verdoso, con pulpa carnosa, del mismo color que el pericarpelo; las areolas grandes, lanosas y espinosas de que está provisto se desprenden con facilidad cuando el fruto madura.

• *Semillas* pequeñas, de 2 a 2.5 mm de largo, y 1.8 mm de ancho; amplio hilo basal; testa negra con gruesas puntuaciones (Bravo-Hollis, 1978).

• *Distribución:* MÉXICO: Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán. GUATEMALA (Guzmán *et al.*, 2003).

Simbiosis micorrícica

El segundo grupo con mayor número de especies entre los seres vivos, después de los insectos, es el de los hongos. Se estima que existen cerca de 1.5 millones de especies

de hongos, de las cuales sólo se han descrito 72 000; aunque, cada año se registran cerca de 1500 nuevas especies. Los hongos, son por lo tanto, uno de los reinos biológicos menos conocido (Montaño *et al.*, 2008).

Algunos grupos funcionales con papeles fundamentales en las comunidades vegetales son los hongos parásitos y los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA); éstos últimos formadores de las llamadas micorrizas arbusculares (MA). Los HMA surgieron antes de la colonización del medio terrestre por las plantas (fotótrofos) de hábitat acuático, ya que el origen de los HMA se ha establecido durante el Ordovícico, hace ca. 460 millones de años (Helgason y Fitter, 2005; Bofante y Genre, 2008).

Asimismo, el hecho de que cerca del 95 por ciento de las plantas terrestres (fitobiontes) tengan uno o más de estos hongos asociados (micobiontes), muestra la eficiencia de esta asociación mutualista, su carácter cosmopolita, la estrecha coevolución planta-hongo micorrícico, así como su relevancia en el reino vegetal (Montaño *et al.*, 2008). El cinco por ciento de plantas que no se micorrizan es porque frecuentemente viven en hábitats con suelos ricos en nutrimentos y recursos hídricos, por lo que es innecesaria esta asociación (Monroy, 2009).

Los HMA establecen una asociación mutualista con las raíces de las plantas vasculares (tanto cultivadas como silvestres) formando las micorrizas arbusculares (gr. *mykes*, hongo y *rhiza*, raíz). En esta asociación, el hongo ofrece un beneficio a su hospedero a cambio de recibir otro, es decir, hay un beneficio mutuo producto de un intercambio bidireccional “hongo-planta”: la planta suministra al hongo fuentes de carbono procedentes de la fotosíntesis y le brinda protección; mientras que el hongo le facilita a la planta la absorción de agua y nutrimentos, recursos del suelo que en condiciones extremas la planta difícilmente obtendría eficientemente sin la ayuda del hongo (Helgason y Fitter, 2005).

Las micorrizas arbusculares (MA) se caracterizan porque el hongo que coloniza la raíz desarrolla una estructura en forma de un diminuto arbolillo en las células de la raíz del hospedero, estructura llamada “arbúsculo” (Figura 8) que es el sitio donde se lleva a cabo el intercambio bidireccional (hongo-planta) de nutrimentos como son fosfatos, nitrógeno y otros iones indispensables para el desarrollo de la planta y de carbohidratos necesarios para el desarrollo del hongo micorrizógeno arbuscular (Bago *et al.*, 2000; Espinosa, 2000; Cruz *et al.*, 2007). El sistema micorrícico está formado por un conjunto de hifas (micelio) que están conectadas con el tejido de la raíz y que salen de ella ramificándose en el suelo (Montaño *et al.*, 2008). La expansión del micelio externo del hongo por el suelo rizosférico permite la captación de



Figura 8. Arbúsculo tomado de http://www.perkinsltda.com.co/articulos/AGRICULTURA_archivos/frame.htm

nutrimentos mas allá de la zona de agotamiento que se crea alrededor de las raíces, por la propia absorción de la planta (Varela y Estrada, 1999).

Se ha encontrado que los HMA asociados a plantas, reciben entre el 60 y el 90 por ciento de su carbono de los árboles, arbustos y herbáceas pudiendo ser un sumidero importante del carbono de la comunidad (Montaño *et al.*, 2008).

Clasificación de las micorrizas

La asociación micorrícica se divide en dos grupos principales, basados en su morfología: *ectomicorriza* y *endomycorriza*.

La *ectomicorriza* consta de una cubierta fungosa que rodea a las raíces del hospedero denominada red de Harting, así como un desarrollo intracelular fúngico en las primeras capas de la corteza radicular. El hongo crece intercelularmente en el córtex pero nunca intracelularmente, lo que provoca que los pelos radicales de la planta no se desarrollen; por consiguiente, la planta depende en gran medida del hongo para obtener agua y nutrimentos (Carlson, 1990; Peterson, 1992; Finlay, 2008).

La *endomycorriza* provoca pocos cambios en la morfología de la raíz. No hay manto. Sin embargo, hay dos redes miceliarias, una externa y otra interna. El micelio interno penetra en la raíz tanto intercelularmente como intracelularmente (Bolan, 1991; Schüßler *et al.*, 2001; Finlay, 2008).

Se han identificado siete diferentes categorías de simbiosis micorrícica (Figura 9) con base en sus características morfológicas y sobre todo de las especies de plantas y hongos involucrados; los tipos de micorrizas son: arbuscular, *ectomicorriza*, ericoide, orquideoide, monotropoide, arbutoide y *ectendomycorriza* (Finlay, 2008).

- a. **Arbuscular (HMA)**. Las hifas penetran la pared rígida de los espacios ocupados por las células corticales de la raíz e invaginan la membrana móvil (plasmalema) para formar una estructura de crecimiento dicotómico, llamada arbusculo, que es el sitio de intercambio entre la planta y el hongo.
- b. **Ectomicorriza**. Los hongos forman un manto alrededor de la corteza externa de las raíces y una red en los espacios intercelulares de la epidermis y la corteza.
- c. **Ericoide**. Hifas septadas, penetran intercelularmente en la corteza radical, no forman manto e invaginan el plasmalema para formar abultamientos que ocupan la mayor parte del volumen celular.

- d. **Orquidoide**. Hifas septadas que penetran las células corticales de la raíz para invaginar el plasmalema a fin de formar estructuras de intercambio planta-hongo llamados rizos.
- e. **Monotropoide**. Hifas septadas que forman un manto sobre la corteza radical y se asocian solo con angiospermas; éstas penetran en espacios intercelulares de la corteza interna e invaginan el plasmalema para formar proyecciones llamadas estacas.
- f. **Arbutoide**. Formación de un manto hifal (septado) sobre la corteza, sólo penetra en los espacios intercelulares y en algunas células epidérmicas desarrollando abultamientos llamados pelotones.
- g. **Ectendomicorriza**. Las hifas septadas forman un manto muy delgado, penetran intercelularmente y forman rizos al invaginar el plasmalema de células corticales de la raíz (Monroy, 2009).

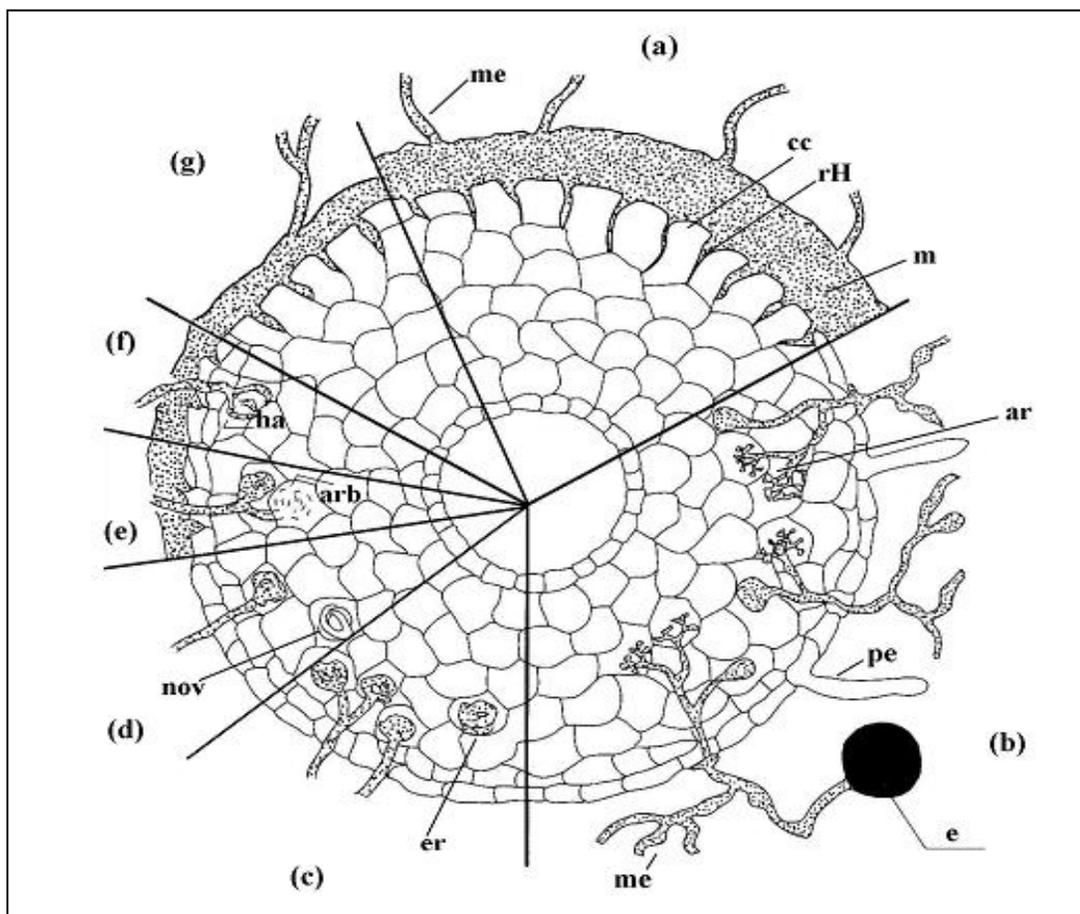


Figura 9. Ectomicorrizas (a), micorrizas arbusculares (b), micorrizas ericoides (c), micorrizas orquidoides (d), micorrizas arbutoides (e), micorrizas monotropoides (f), arbusculo (ar), arbutoides (arb), célula cortical (cc), espora (e), enrolamientos (er), haustorios (ha), manto (m), micelio extrarradical (me), novelos (nov) y red de Harting (rH). Tomado de http://www.uc.pt/grasses/Divers_fungica/tipos_de_micorrizas.

El papel de la simbiosis es fundamental en la captación de elementos minerales de lenta difusión en los suelos, como los fosfatos solubles, el Zn y el Cu. La absorción de nitrógeno también se favorece con la micorrización (Barea *et al.*, 1984). Otros elementos como el K y el Mg se encuentran a menudo en concentraciones más altas en las plantas micorrizadas (Arroyo *et al.*, 1998). La absorción del Ca es estimulada también con la MA (Plenchette *et al.*, 1983). Respecto a los micronutrientes Zn, Cu y B, éstos son activamente absorbidos por las hifas del hongo y transportados hasta el hospedero (Gianinazzi-Pearson y Gianinazzi, 1983).

Existen otros efectos producidos por la MA entre los que destacan un aumento de la resistencia de la planta al estrés hídrico y a la salinidad, un aumento de la resistencia y/o tolerancia a determinados patógenos del suelo, una elevación del porcentaje de supervivencia al trasplante y un incremento de la fijación del nitrógeno (Linderman, 1992).

Gracias a la eficiencia nutrimental aportada en zonas agrícolas, es cada vez mayor el interés de estudio en ambientes naturales, sin embargo estos beneficios dependen de las comunidades fúngicas en un determinado ecosistema, por ello es de vital importancia conocer la identidad de estos organismos.

En un inicio su estudio y taxonomía se realizó principalmente sobre las características morfológicas de las esporas pero con ayuda de las técnicas moleculares se inició la secuenciación del ARN ribosomal logrando grandes hallazgos, como el de Schüßler *et al.* (2001) quienes los propusieron como un grupo monofilético y establecieron el Phylum *Glomeromycota* (Figura 10), sus resultados indicaron que se encuentran filogenéticamente más cercanos a los Phyla *Ascomycota* y *Basidiomycota* que con el Phylum *Zygomycota* donde eran anteriormente agrupados.

Evapotranspiración real

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. Transpiración es el proceso físico-biológico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso a través del metabolismo de las plantas y pasa a la atmósfera. La dificultad de la medición en forma separada de ambos fenómenos obliga a introducir el concepto de evapotranspiración como la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación (Were *et al.*, 2003).

Thornthwaite (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos, es la llamada *evapotranspiración potencial* o pérdida por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanente completa. Thornthwaite designa así a la altura de agua que sería efectivamente evaporada si los recursos de agua

movilizables en la cuenca fueran en cada instante por lo menos iguales a los que pueden ser transformados en vapor por el juego de los factores hidrometeorológicos y la vegetación.

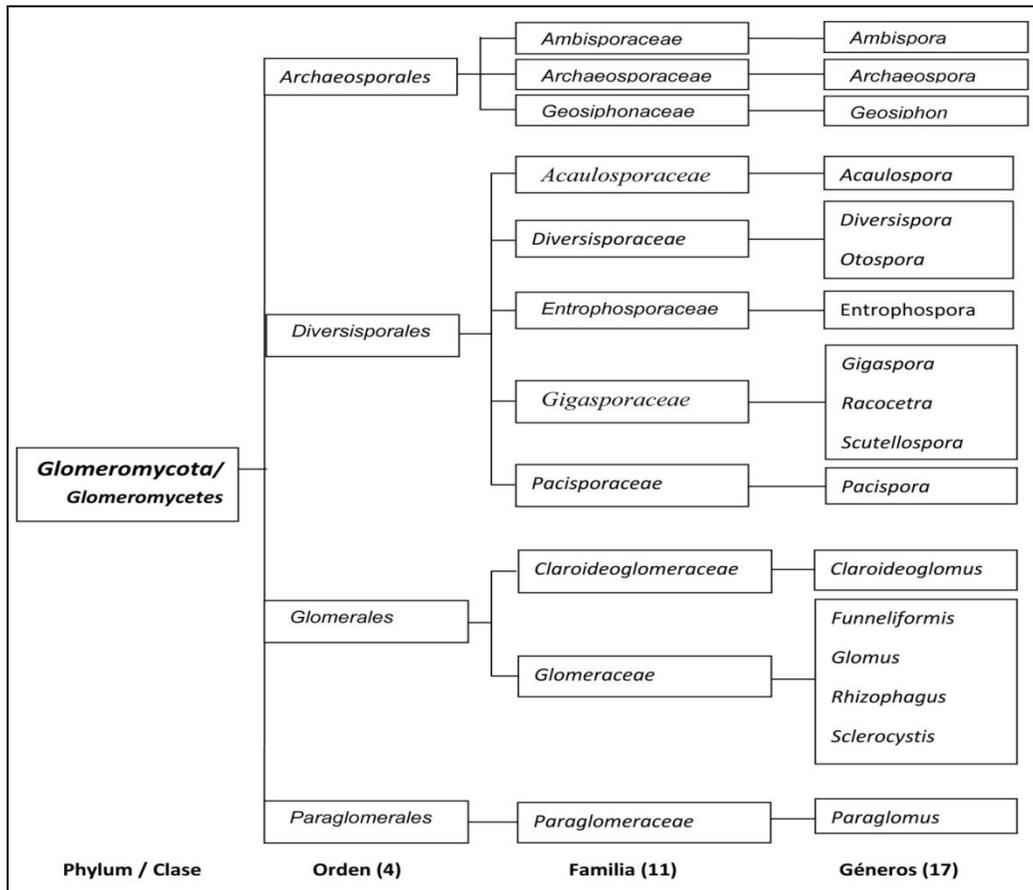


Figura 10. Clasificación taxonómica de los hongos micorrízico arbusculares (HMA) de acuerdo a Schüßler (2011). Disponible en sitio web: <http://www.lrz.de/~schuessler/amphylo/> Cuadro editado por el Biól. Eduardo Chimal Sánchez (2011).

La cantidad de agua que realmente vuelve a la atmosfera por evaporación y transpiración se conoce con el nombre de evapotranspiración real. Ésta es la suma de las cantidades de vapor de agua evaporada por el suelo y transpirada por las plantas durante un periodo determinado, bajo las condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes.

PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

El aumento de edificaciones, como parte del desarrollo de la actividad humana, ha contribuido a la expansión de la mancha urbana y la consecuente pérdida de áreas verdes por el incremento de zonas edificadas, ocasionando entre otros, problemas ambientales, de salud y sociales, ante la reducción de una significativa capacidad del medio natural para limpiar el ambiente de los agentes contaminantes producidos por el medio urbano, sus medios de transporte y su industria.

Paralelo a esta situación, al disminuir la cantidad de áreas verdes se ha reducido la cantidad de absorción de rayos solares por la vegetación deviniendo esto en un incremento en la temperatura, debido a la liberación nocturna de la energía calórica absorbida durante el día por las construcciones y superficies impermeables, generando cambios en el clima y microclima de la ciudad.

La gran cantidad de áreas verdes que se pierden en la ciudad son ocupadas por edificaciones de tipos diversos, por ello el presente trabajo busca generar un modelo para naturar azoteas que sea ecológico y sustentable, como una alternativa factible, tanto económica como tecnológica para incidir en un incremento de las áreas verdes.

En la actualidad, el uso de sistemas de naturación a nivel urbano ha mostrado grandes beneficios ambientales en diversas ciudades del mundo, además se cuenta con prototipos avanzados para su construcción, lo que garantiza el correcto funcionamiento operativo de dichos sistemas. Sin embargo, son onerosos de instalar y requieren riego, mantenimiento y personal especializado en jardinería.

Por ello, este estudio está dirigido a responder las siguientes preguntas:

1. ¿La micorrización con HMA favorece significativamente el crecimiento en altura de las plantas en condiciones de invernadero?
2. ¿Cuál es la influencia de la micorrización sobre la evapotranspiración real acumulada del mosaico de plantas?

Asimismo, después de seis meses de cultivo en invernadero:

3. ¿Cuál será el efecto de los HMA sobre la tasa de crecimiento relativo y la eficiencia del uso del agua de las plantas que conforman el mosaico?
4. ¿Cuál será el efecto de los HMA sobre la supervivencia de las plantas que conforman el mosaico de vegetación?

HIPÓTESIS

Si los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) proveen beneficios a las plantas tales como una mayor captación de agua y nutrimentos del suelo, entonces las plantas inoculadas con HMA, en condiciones de invernadero, presentaran una mayor tasa de crecimiento relativo que sus testigos no micorrizados.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el efecto de la inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares en el crecimiento de plantas en contenedores, en condiciones de invernadero, durante el

establecimiento de plantas agrupadas en mosaicos de vegetación bajo un sistema de riego por goteo para naturalizar azoteas.

Objetivos Particulares

- Comparar, mensualmente, el efecto de los HMA en cactáceas y crasuláceas respecto a: crecimiento en diámetro y altura.
- Determinar los efectos de los HMA sobre las cactáceas y crasuláceas respecto a: evapotranspiración real (ETR) acumulada y tasa de crecimiento relativo (TCR).
- Determinar la supervivencia de los individuos de los mosaicos micorrizados vs. los no micorrizados.
- Realizar análisis de suelo para determinar parámetros físicos (color, densidad aparente y real, porcentaje de espacio poroso y textura) y químicos (pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y conductividad eléctrica) antes y después del experimento.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material biológico

Se adquirieron en un comercio del mercado de Cuemanco, Xochimilco, D. F. 20 ejemplares de cada una de las siguientes especies: *Bergerocactus emoryi*, *Mammillaria bombycina*, *Stenocereus pruinosus*, *Mammillaria voburnensis* y *Sedum moranense*.

Lugar de trabajo

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de la Unidad de Investigación en Ecología Vegetal de la FES Zaragoza, Campus II con una duración de 24 semanas.

Preparación del sustrato e inóculo

El suelo, proveniente de un agostadero semiárido (un matorral xerófilo) del Municipio de Santiago de Anaya, ubicado en el Valle de Actopan, Estado de Hidalgo, se tamizó en una malla metálica con una apertura de 2 mm y se mezcló en una proporción 2:1 (v/v) arena sílica:suelo. Posteriormente se esterilizó dos veces durante 90 minutos en una autoclave a 15 libras de presión por pulgada cuadrada para asegurar la eliminación de cualquier microorganismo que pudiera afectar los resultados del experimento y se determinó la capacidad de campo del sustrato.

Para la preparación del inóculo de hongos micorrícicos, el suelo colectado del Valle del Mezquital, Hidalgo, será incorporado con las raíces del mismo. Este suelo será la fuente de propágulos (esporas y raíces) de hongos micorrizógenos arbusculares.

Análisis físico y químico del sustrato

Se realizaron los análisis correspondientes para el sustrato empleado antes y después del experimento:

- Color (tablas Munsell)
- Densidad Aparente (método de la probeta)
- Densidad Real (método del picnómetro)
- Porcentaje de Espacio Poroso
- Textura (Hidrómetro de Bouyoucos)
- pH (potenciómetro: suelo-agua 1:1 y pasta de saturación)
- Capacidad de Intercambio Cationico (Acetato de Amonio)
- Materia Orgánica (Walkley – Black)
- Conductividad Eléctrica (Conductímetro)

Preparación de macetas

Se utilizaron veinte contenedores de plástico con paredes y fondo en forma de rejilla de 17 x 24 cm de base, cubiertos con pellón (de color blanco) para evitar que el suelo contenido se pierda (Figura 11). Sobre el pellón se colocó una olla de barro (de aproximadamente 500 ml) en el centro del contenedor y se conformaron dos lotes de diez macetas cada uno de la siguiente manera:



Figura 11. Contenedor cubierto de pellón.

- Tratamiento no micorrizado (M-)

El recipiente (con la olla al centro) se le adicionaron 7000 g de la mezcla de suelo-arena sílica.

- Tratamiento micorrizado (M+)

Se adicionó la mezcla de suelo-arena hasta alcanzar 6800 g más 200 g de inóculo micorrízico (suelo con esporas).

Los ejemplares fueron plantados (según el modelo de la figura 12) sobre tela de yute (con malla de 2 x 1 mm de apertura color beige) con la finalidad de evitar el crecimiento de especies vegetales ajenas así, como la evaporación del agua de la olla y al mismo tiempo permitir la entrada de agua.

En un contenedor de plástico de 32.6 x 26.7 cm de base y 13.7 cm de altura, se colocaron cordones evaporadores en la base, acomodados en forma de ondas (figura 13a) de manera que las puntas salgan del contenedor para que el exceso de agua suba por capilaridad y escurra hacia el exterior del contenedor. Sobre los cordones se colocaron 1058 g de tezontle y sobre éste el mosaico de vegetación (figura 13b).

Riego

Semanalmente se pesaron los contenedores (para determinar la evapotranspiración real) y se regaron con agua de la llave a capacidad de campo; cada cuatro semanas se midió la altura máxima, el diámetro mayor y el diámetro menor de las plantas.

El método pitcher es uno de los sistemas de riego más eficientes y antiguo que utiliza una olla de barro poroso enterrada llena de agua. El agua se filtra a través de la pared de arcilla de la olla suministrando un riego controlado de acuerdo al uso del agua de la planta proporcionando una eficacia 10 veces mayor que el riego de superficie convencional (Bainbridge, 2001).

Tasa de crecimiento relativo (TCR)

La tasa relativa de crecimiento de las plantas, o RGR por sus siglas en inglés (Relative Growth Rate), se calculó a partir de la altura máxima de las plantas al inicio y al final del periodo de cultivo en condiciones de invernadero. Como una medida de la eficiencia de crecimiento, un TCR más alto significa que una planta individual, o de una especie, puede crecer más eficientemente cuando los recursos son limitados (Weigelt y Jolliffe, 2003).

Se utilizó el modelo de crecimiento exponencial, el cual describe adecuadamente la fase inicial del desarrollo vegetal (Charles-Edwards *et al.*, 1986). La fórmula empleada fue la siguiente:

$RGR = [\ln(\text{altura final en mm}) - \ln(\text{altura inicial en mm})] / [\text{tiempo (días)}]$ por lo que las unidades de la tasa de crecimiento son: [(mm/mm)/d] o [d⁻¹].

Biomasa total y cociente R/S

La biomasa seca total de las plantas y el cociente: (biomasa radical) / (biomasa aérea) o raíz/vástago o proporción R/S, por sus siglas en inglés (Root/Shoot), fue calculado al final del periodo de crecimiento (24 semanas) en el invernadero. Para esto, las plantas se extrajeron cuidadosamente de los contenedores para no perder las raicillas, se lavaron con agua de la llave, se cortó la raíz del brote y se pusieron a secar por separado en una estufa a 75°C durante 72 horas; posteriormente, se obtuvo el peso seco de ambas partes en una balanza analítica. Finalmente, se calcularon las medias de la biomasa seca total y del cociente R/S para los tratamientos no micorrizados y micorrizados.

Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua, o WUE por sus siglas en inglés (Water Use Efficiency), se define como la proporción entre la materia seca producida y el consumo de agua en un periodo determinado; este cociente es importante para las plantas de zonas áridas y semiáridas, determina qué especies -o bajo qué condiciones- producen mayor

biomasa por unidad de agua consumida, es decir qué plantas son más eficientes para producir biomasa bajo condiciones hídricas limitantes. Asimismo la WUE se puede estimar a partir del “costo” en moléculas de agua, de la captura de una molécula de CO₂ en los estomas de la planta (Nobel, 1998).

En este trabajo se definió la eficiencia en el uso del agua a partir del siguiente índice (Salisbury y Ross, 1994):

$$WUE = (\text{g de biomasa seca total}) / (\text{kg de agua irrigada total})$$

Por lo que las unidades son: [g biomasa/kg agua].

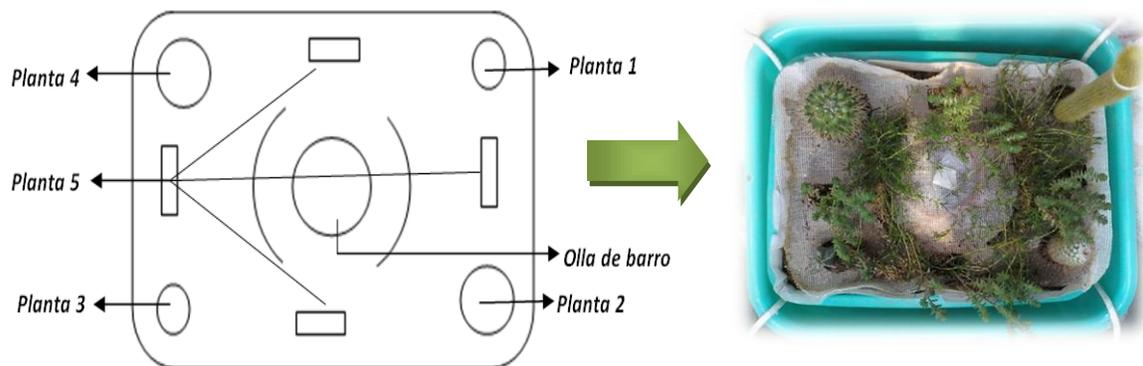


Figura 12. Modelo de mosaico de vegetación en un contenedor de plástico. Las especies empleadas fueron: *Bergercactus emoryi* (1), *Mammillaria bombycina* (2), *Stenocereus pruinosus* (3), *Mammillaria voburnensis* (4) y *Sedum moranense* (5).

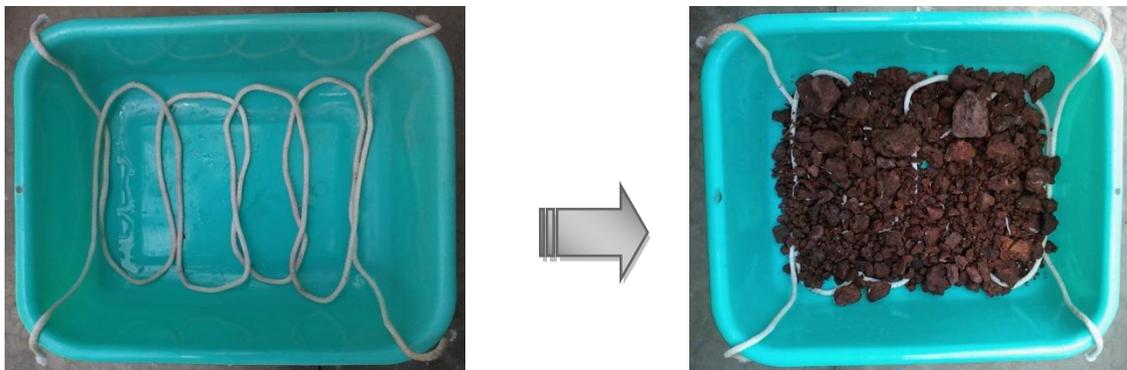


Figura 13. Modelo de los cordones evaporadores (13a izquierda), tezontle como sustrato para retener humedad (13b).

Evaluación de la colonización micorrícica

Para la tinción de las raíces se utilizó la técnica de Phillips y Hayman, (1970) modificada que consiste en varios pasos:

Preparaciones de raíces

1. *Clareo*. Las raíces, libres de suelo, se colocaron en recipientes de plástico a los que se les agregó suficiente KOH al 5% para cubrirlos. Se procedió a calentar en baño maría por 20 minutos. El KOH fue retirado y los recipientes con las raíces se enjuagaron con agua destilada.
2. *Blanqueo*. Se agregó H₂O₂ al 10% en suficiente cantidad para que cubriera las raíces durante 3 minutos; pasado ese tiempo se procedió a enjuagar con agua destilada.
3. *Acidificación*. Las raíces se cubrieron con HCl al 10% por 3 minutos; se eliminó el ácido y sin enjuagar se procedió a la tinción.
4. *Tinción*. Los recipientes que contenían las raíces se cubrieron con la solución colorante (azul de tripano al 0.05% en lactoglicerol) y se dejaron reposar 24 hrs.
5. *Decoloración*. El colorante se eliminó y se decoloraron las raíces con lactoglicerol limpio.

Se colocaron las raíces clareadas y teñidas en cajas Petri con suficiente agua. En un portaobjetos se colocaron 10 segmentos de raíz de aproximadamente 1 cm, paralelamente unos a otros. Sobre las raíces se adicionaron gotas de PVLG, se colocaron los cubreobjetos, se eliminaron las burbujas y se realizó el “squash”. Para realizar la evaluación se observó al microscopio con los objetivos de 16, 40 y 100X; se efectuaron tres pasajes equidistantes por laminilla, de forma ortogonal a los segmentos.

Al revisar el campo óptico donde se encontró un segmento que contiene hifas, vesículas y/o arbusculos, independientemente de la intensidad de la micorrización, se dio el valor de uno para la evaluación total. El porcentaje de colonización micorrízica total se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

% de colonización total: $(N^{\circ} \text{ de segmentos colonizados} \times 100) / (N^{\circ} \text{ de segmentos totales})$

Diseño estadístico

El diseño experimental consistió en pruebas estadísticas de significancia, que se basó en la comparación de medias entre el tratamiento micorrizado y el testigo, utilizando la ANOVA de un factor y la prueba de Kolmogorov-Smirnov para datos no paramétricos, según fuese el caso, utilizando el programa estadístico InfoStat, versión 2011. En cada lote, al final de la fase de cultivo (6 meses) se analizaron las siguientes variables de respuesta:

- a. Tasa de crecimiento relativo (TCR) por especie
 - Altura
 - Cobertura
- b. Evapotranspiración real (ETR) acumulada
- c. Supervivencia del mosaico
- d. Cociente R/S
- e. Eficiencia en el uso del agua (WUE)

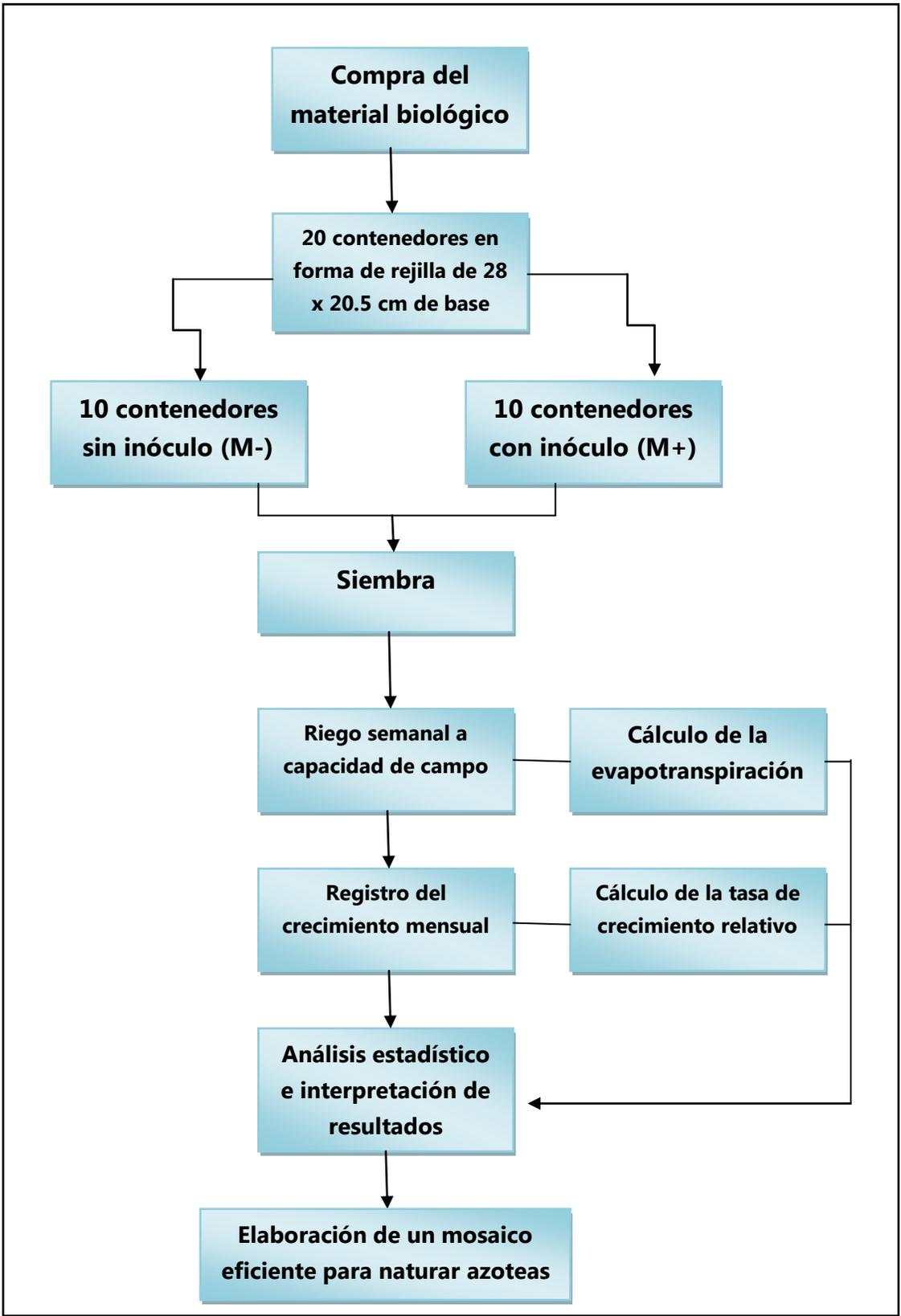


Diagrama de flujo del método.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 1. Parámetros indicadores del crecimiento vegetal durante un periodo de seis meses. Abreviaciones: - no determinado, M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas, TCR tasa de crecimiento relativo; letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

	<i>Mammillaria bombycina</i>		<i>Mammillaria voburnensis</i>		<i>Bergerocactus emoryi</i>		<i>Sedum moranense</i>		<i>Stenocereus pruinosus</i>	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
Crecimiento altura (mm)	66.44 ^a	71.37 ^a	75.67 ^a	75.49 ^a	227.6 ^b	200.3 ^a	149.9 ^a	160.38 ^a	50.97 _a	50.99 _a
Crecimiento diámetro (mm)	57.94 ^a	61.24 ^a	68.78 ^a	67.55 ^a	29.59 ^a	28.66 ^a	-	-	34.71 _a	35.62 _a
TCR (días ⁻¹)	8.3 x 10 ⁻⁴ _a	7.6 x 10 ⁻⁴ _a	6.9 x 10 ⁻⁴ _a	8.1 x 10 ⁻⁴ _a	9 x 10 ⁻⁴ _a	6.1 x 10 ⁻⁴ _a	4.8 x 10 ⁻³ _a	4.9 x 10 ⁻³ _a	9 x 10 ⁻⁴ _a	1.5 x 10 ⁻³ _a

Como puede observarse (Cuadro 1), en general, la asociación mutualista entre HMA y las especies estudiadas no mostraron diferencias significativas para las variables altura, diámetro y tasa de crecimiento relativo, muy probablemente debido a la multifuncionalidad de los hongos micorrizógenos, aunque en *Mammillaria bombycina* y *Sedum moranense* se apreció un crecimiento incipiente en cuanto a la altura, con respecto al diámetro *M. bombycina* y *Stenocereus pruinosus* se vieron ligeramente favorecidos y *M. voburnensis* para la variable tasa de crecimiento relativo.

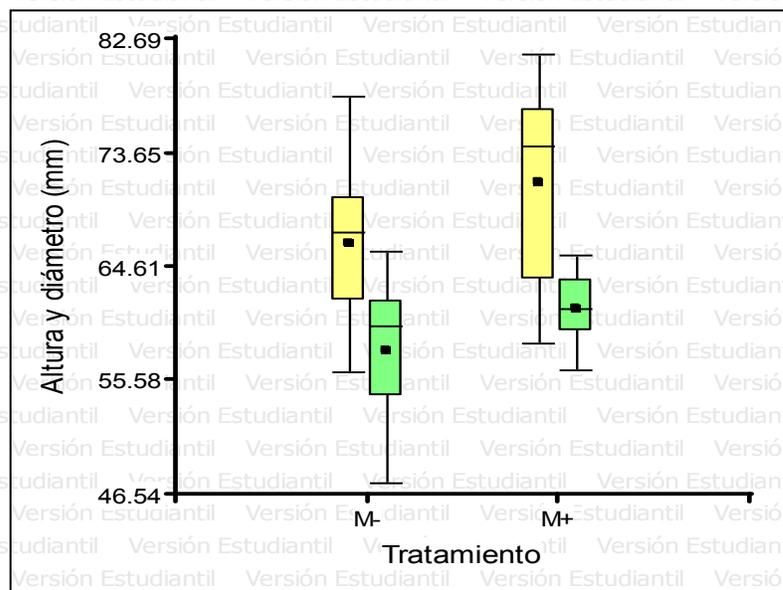


Gráfico 2. Altura (amarillo) y diámetro (verde) de *Mammillaria bombycina* obtenido al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

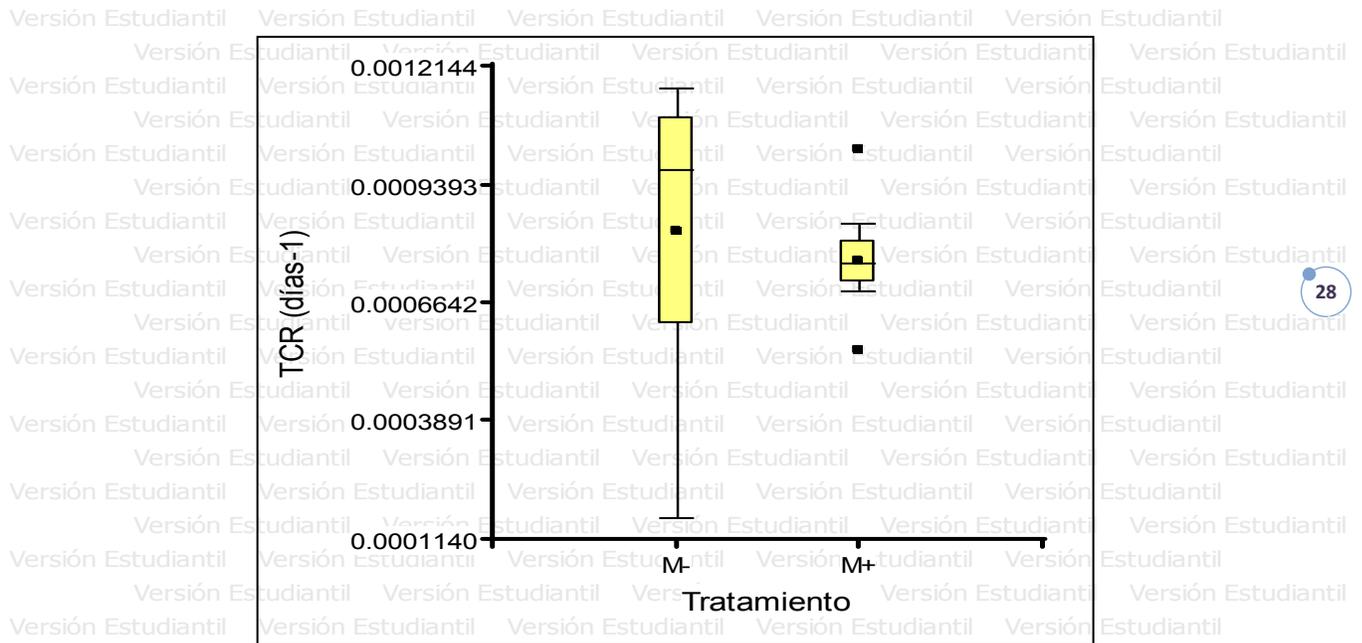


Gráfico 3. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de *Mammillaria bombycina* al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

En base en los resultados del crecimiento en altura y diámetro en *Mammillaria bombycina* (Gráfico 1), se puede decir que aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos, sí se observó una tendencia hacia un mayor crecimiento en las plantas del tratamiento micorrizado (M+), la cual es atribuida al efecto de los hongos micorrizógenos arbusculares, ya que favorecen la toma y transporte de nutrimentos hasta el hospedero, debido a que las hifas extra-radicales multiplican el área de contacto con las partículas de suelo (Marschner, 1994), por lo que se sugiere, con base en estos resultados, que la simbiosis micorrícica a pesar de presentarse en un bajo porcentaje (5.55%) permite a las plantas de *M. bombycina* la absorción de minerales necesarios para presentar un incipiente crecimiento vegetal.

Es bien conocido que el crecimiento está influenciado por las condiciones ambientales, pero las tasas de crecimiento tienen también un importante componente genético. Una ventaja ecológica sería el conseguir un mayor tamaño (biomasa) en menor tiempo, que le permite a su vez captar más recursos y en definitiva le confiere una mayor capacidad competitiva. Pero lo que supone una ventaja en condiciones ambientales favorables (donde la competencia es un proceso determinante de la supervivencia) puede no serlo en condiciones adversas (sequía, altas o bajas temperaturas, escasez de nutrimentos, salinidad, etc.) donde lo importante es tener capacidad de tolerancia al estrés (Villar *et al.*, 2008). En general, la tolerancia implica un coste energético que supone un menor crecimiento pero a cambio tiene una mayor probabilidad de supervivencia como es el caso de *Mammillaria bombycina* (Gráfico 2).

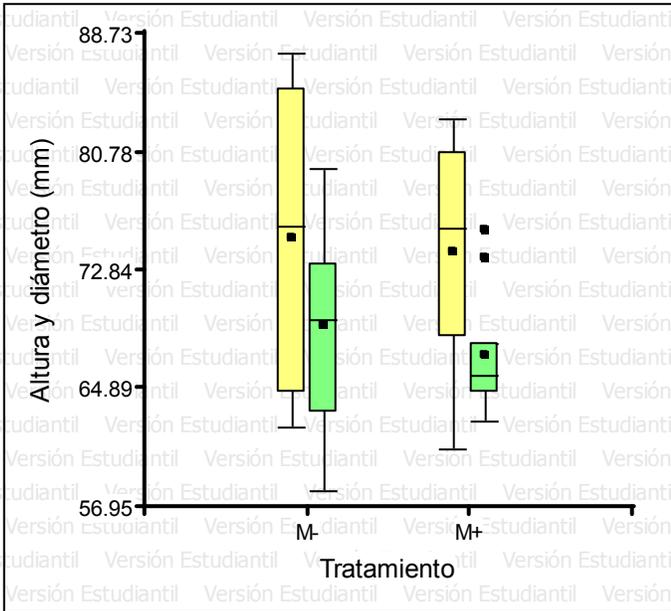


Gráfico 4. Altura (amarillo) y diámetro (verde) de *Mammillaria voburnensis* obtenido al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

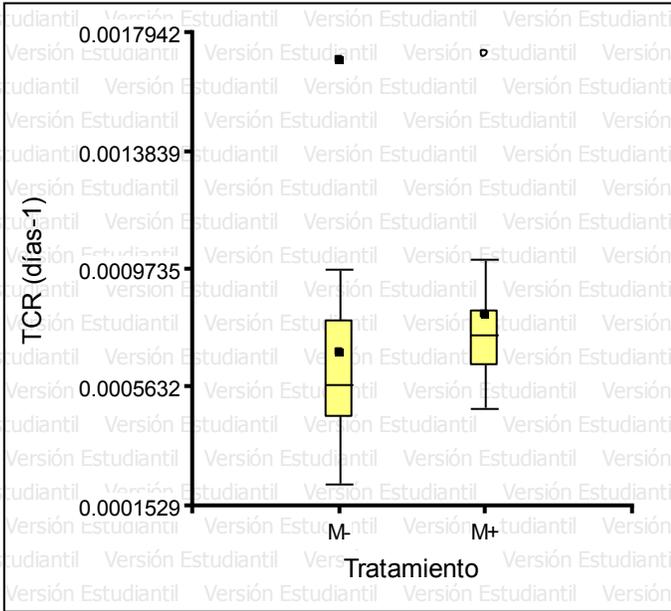


Gráfico 5. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de *Mammillaria voburnensis* al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

En el caso de *M. voburnensis*, no se encontraron diferencias significativas, entre tratamientos, para las variables altura, diámetro (Gráfico 3) y TCR (Gráfico 4), muy probablemente esto se debe al lento crecimiento de la especie y al corto periodo de tiempo del registro de datos (24 semanas).

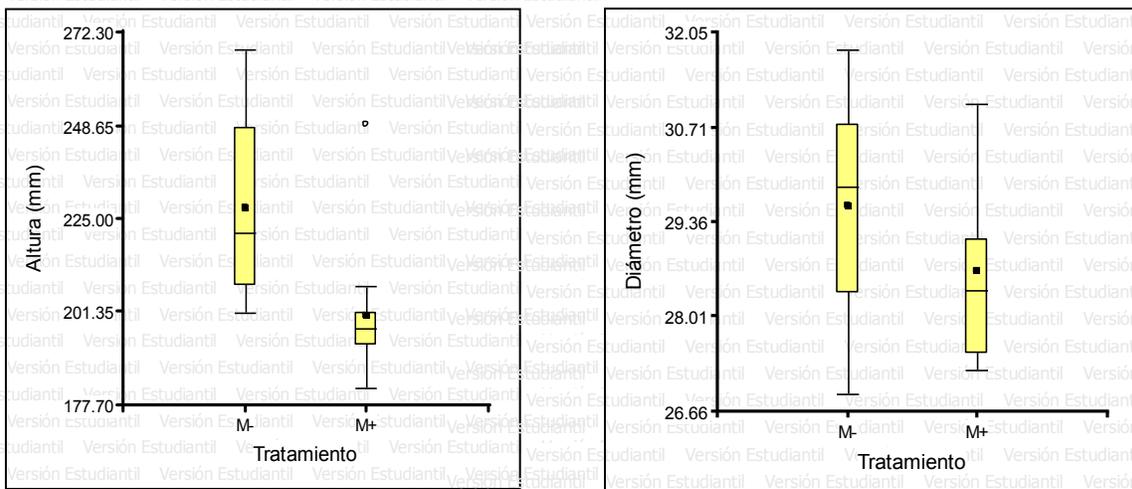


Gráfico 6. Altura (izquierda) y diámetro (derecha) de *Bergerocactus emoryi* obtenido al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

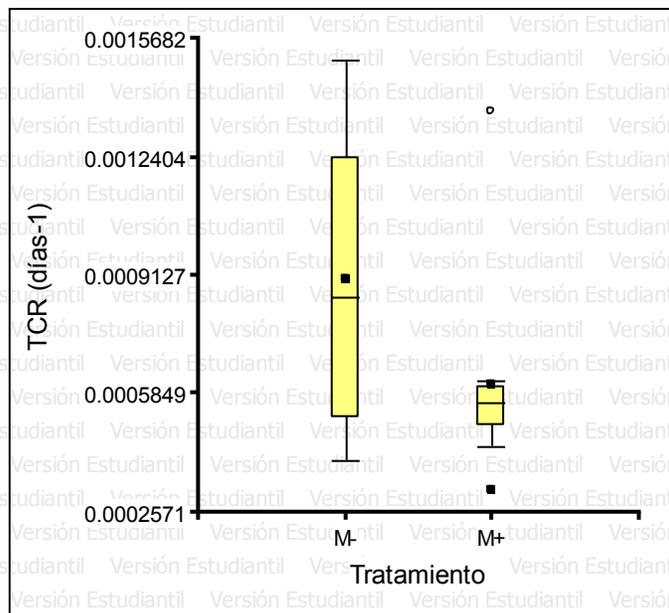


Gráfico 7. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de *Bergerocactus emoryi* al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

Bergerocactus emoryi no presentó diferencias significativas en cuanto a la altura, diámetro (Gráfico 5) y TCR (Gráfico 6), esto puede deberse al bajo porcentaje de colonización así como la presencia de una gran cantidad de pelos radicales.

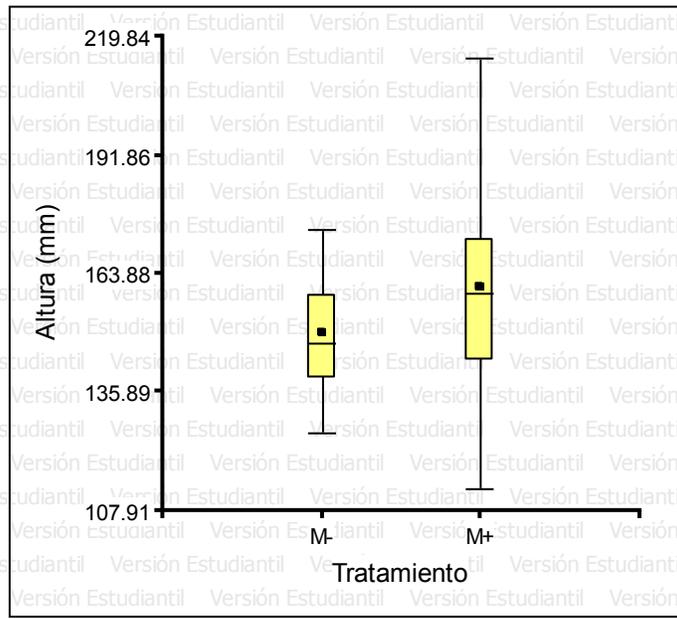


Gráfico 8. Altura de *Sedum moranense* obtenida al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

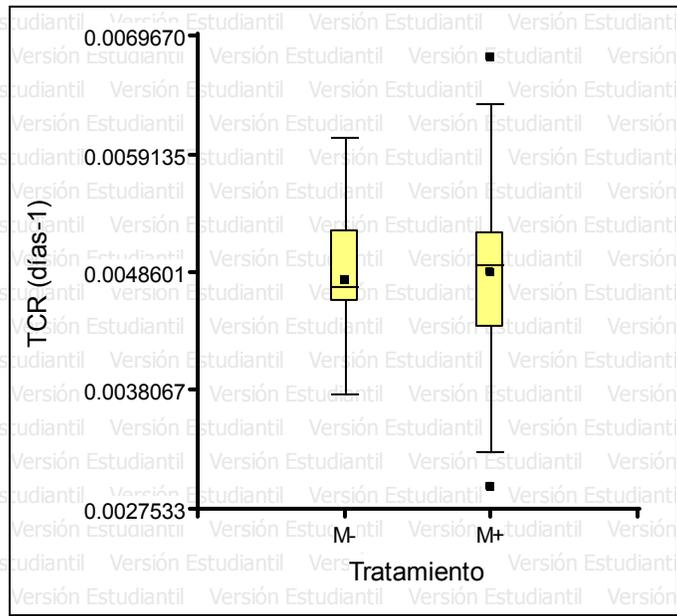


Gráfico 9. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de *Sedum moranense* al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

A partir de los datos obtenidos del crecimiento vegetal de *Sedum moranense* (Gráfico 7) no se encontraron diferencias significativas entre ambos tratamientos (micorrizados y no micorrizados), aunque sí un mayor crecimiento en las plantas del tratamiento con inóculo fúngico (Cuadro 1), debido a que *Sedum* puede establecerse en sustratos con menos de 10 cm de profundidad (Monterusso *et al.*, 2005; Müller Garcia, 2005; Durhman *et al.*, 2006).

Bertness y Callaway (1994) sugieren que las especies de *Sedum* actúan como competidores en condiciones productivas y como facilitadores en condiciones de sequía. Hay varios mecanismos que podrían contribuir a la facilitación.

Primera, la competencia reduce el tamaño de la planta y la hace menos susceptible a la sequía. Segundo, el enfriamiento del suelo disminuye el estrés abiótico experimentado por otras especies (Butler y Orians, 2009). Tercera, las especies de *Sedum* reducen la pérdida de agua del sustrato. Aunque la mayoría de las plantas aceleran la pérdida de agua del suelo, a través de la transpiración, con *Sedum* spp. (comúnmente utilizado en techos verdes), se retiene más agua que sólo con macetas y suelo (Wolf y Lundholm, 2008).

Este resultado puede ser debido al alto grado de plasticidad de la fotosíntesis de *Sedum*. Esta especie puede cambiar de C3 a CAM en respuesta al déficit de agua (Gravatt y Martin, 1992; Castillo, 1996), esta es la razón de su éxito como planta de azotea verde, lo que le permite crecer rápidamente cuando el agua es abundante (típico de C3) y sobrevivir a la sequia (típico de CAM), mostrando en este caso, un crecimiento ligeramente mayor aunque no significativo (Gráfico 8).

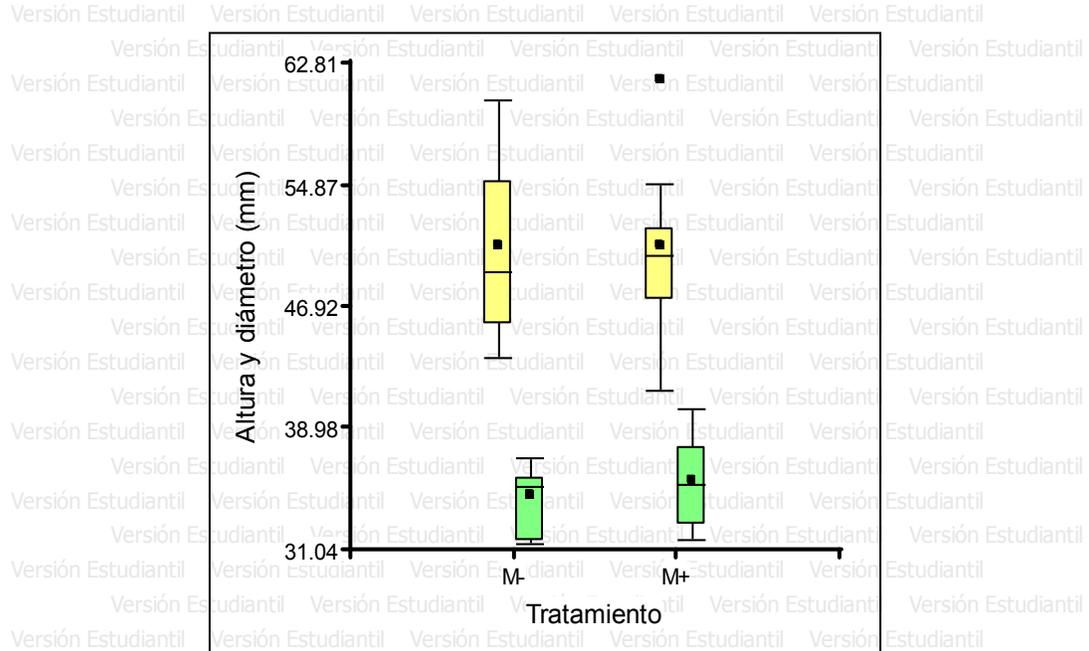


Gráfico 10. Altura (amarillo) y diámetro (verde) de *Stenocereus pruinosus* obtenido al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

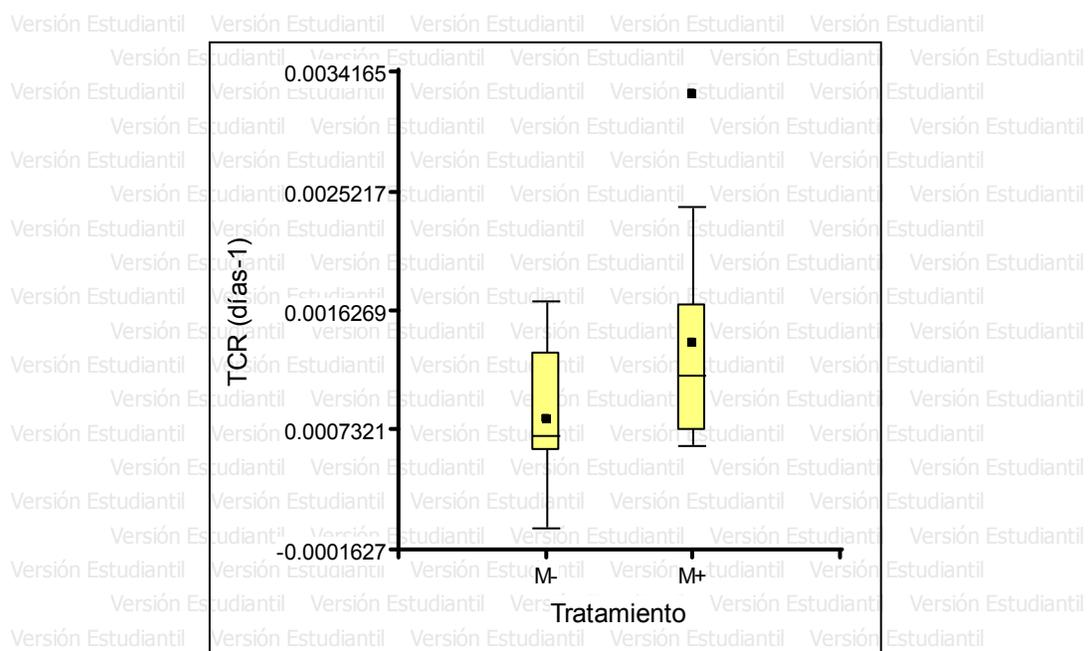


Gráfico 11. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de *Stenocereus pruinosus* al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

En las variables de altura, diámetro (Gráfico 9) y TCR (Gráfico 10), los datos obtenidos no muestran diferencias significativas para la especie *Stenocereus pruinosus* debido al lento crecimiento, característico de las cactáceas, así como el bajo porcentaje de colonización.

Evapotranspiración real (ETR) semanal

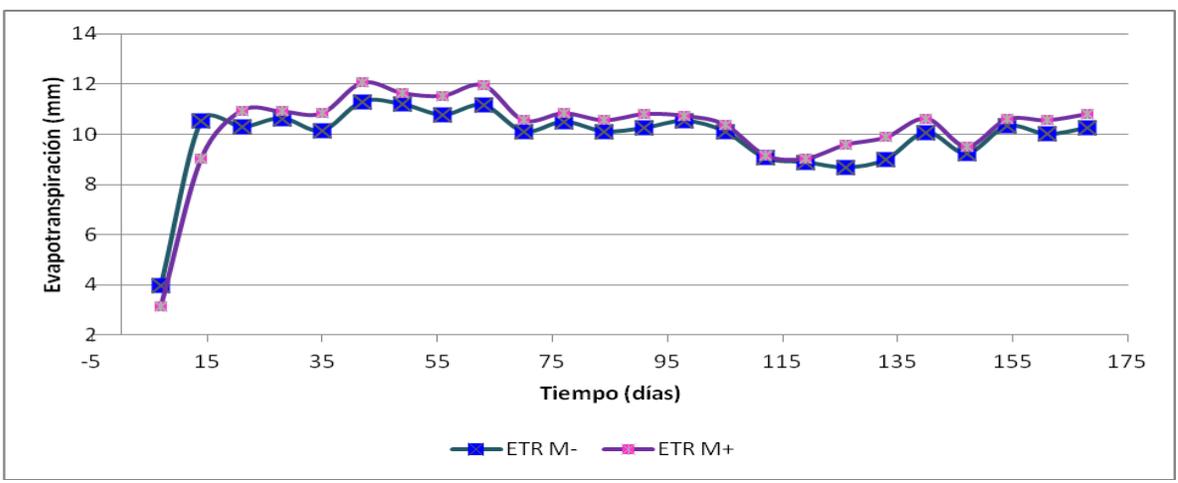


Gráfico 11. Evapotranspiración real semanal de ambos tratamientos durante 24 semanas. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

Cuadro 2. Promedios de evapotranspiración real (en mm) para los tratamientos no micorrizados y micorrizados. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

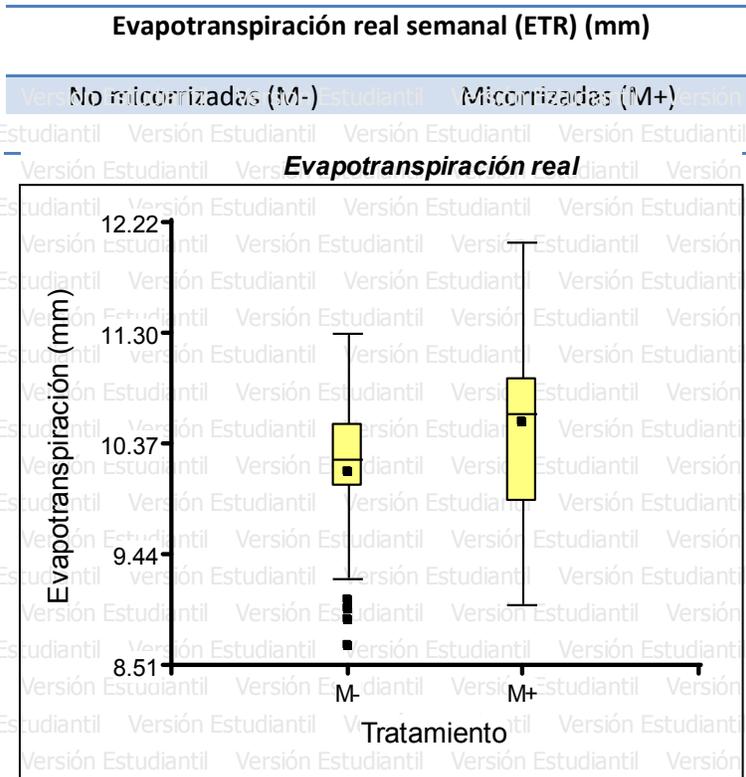


Gráfico 12. Evapotranspiración media semanal de ambos tratamientos al final del experimento. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

No se encontraron diferencias significativas (Cuadro 2 y Gráfico 12) para la evapotranspiración real semanal debido a que las plantas utilizadas son de ciclo de vida largo, lo cual combinado con los bajos porcentajes de colonización micorrícica, no fue suficiente como para presentar en el periodo de cultivo mayores diferencias entre no micorrizados y micorrizados. Sin embargo, en el gráfico 11 se puede apreciar la tendencia que indica que las plantas que fueron inoculadas con HMA evapotranspiraron más que el testigo.

Cuadro 3. Evapotranspiración real acumulada para el tratamiento no micorrizado (M-) y micorrizado (M+) al final del experimento. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Evapotranspiración acumulada (ETR) (mm)	
No micorrizadas (M-)	Micorrizadas (M+)
236.96 ^a	245.62 ^a

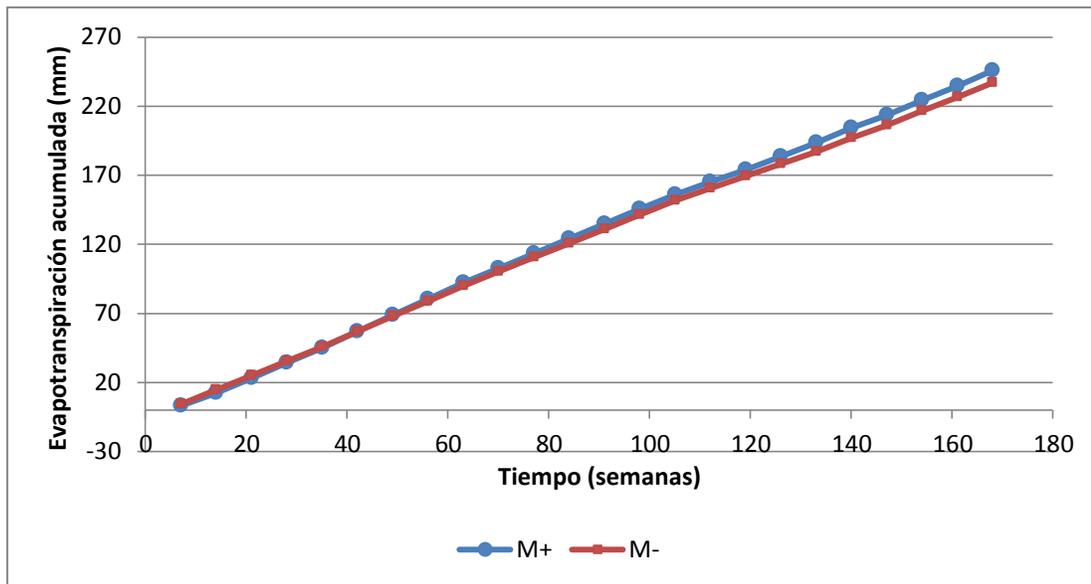


Gráfico 13. Evapotranspiración real (ETR) acumulada de ambos tratamientos durante 24 semanas.
 Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

Para la evapotranspiración real acumulada, no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 3) entre no micorrizadas y micorrizadas, ya que presentaron un valor de $p= 0.87$, esto puede ser debido a que el metabolismo que presentan este tipo de plantas es CAM, el cual se caracteriza por efectuar el intercambio gaseoso (CO_2-O_2) por la noche para evitar la deshidratación por la apertura de los estomas.

Sin embargo, en el gráfico 13 se puede observar que las plantas inoculadas transpiraron más que las no micorrizadas, a pesar de presentar niveles bajos de colonización (ver Cuadro 9); también puede notarse que los hongos micorrizógenos arbusculares aumentan el contenido de agua debido a un incremento en la conductividad hídrica de la planta o a una disminución de la resistencia al flujo del agua a través de ella, de tal manera que permitieron que la plantas se encontraran mejor hidratadas y por ende una tasa ligeramente mayor de evapotranspiración.

Biomasa total, cociente R/S y eficiencia en el uso del agua (WUE)

Cuadro 4. Promedios por especie de cociente raíz/vástago y eficiencia en el uso del agua. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas; letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Especie	Tratamiento	Cociente Raíz/Vástago	WUE (g/kg H ₂ O irrigada)
<i>Mammillaria bombycina</i>	M-	0.14 ^a	0.19 ^a
	M+	0.26 ^b	0.47 ^b
<i>Mammillaria voburnensis</i>	M-	0.27 ^a	1.02 ^a
	M+	0.55 ^a	0.36 ^a
<i>Bergerocactus emoryi</i>	M-	0.42 ^a	0.38 ^a
	M+	0.26 ^a	0.29 ^a
<i>Sedum moranense</i>	M-	0.63 ^b	0.07 ^a
	M+	0.09 ^a	0.12 ^a
<i>Stenocereus pruinosus</i>	M-	0.46 ^a	0.15 ^a
	M+	0.5 ^a	0.1 ^a

El balance en la inversión de biomasa entre parte aérea y parte radical (Cuadro 4) tiene una gran incidencia tanto en el crecimiento como en la supervivencia y en muchas ocasiones puede tener aspectos contradictorios. Por un lado, la mayor proporción de parte aérea es positiva para el crecimiento durante la estación favorable, pero aumenta la transpiración y desajusta el balance hídrico de la planta durante la sequía, reduciendo su probabilidad de supervivencia.

Por otro lado, la mayor proporción de parte radical, aunque beneficia la capacidad de captar agua durante la sequía, puede actuar como sumidero de carbono y determinar un balance de carbono negativo (mayores gastos respiratorios dada una mayor proporción de raíces y menores entradas por fotosíntesis) (Villar-Salvador, 2003).

Cuadro 5. Promedios de peso húmedo y seco (en gramos) entre ambos tratamientos, así como el cociente biomasa radical/biomasa del vástago y la eficiencia en el uso del agua (WUE). Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas; letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Tratamiento	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		Cociente Raíz/Vástago	Agua irrigada (kg)	WUE (g/kg H ₂ O irrigada)
	Raíz	Vástago	Raíz	Vástago			
M-	1.87	29.06	0.96	4.00	0.41	13.55	0.366 ^a
M+	1.46	24.72	0.69	3.03	0.31	14.15	0.262 ^a

Se puede observar que, en general, el tratamiento con micorrizas no tuvo un efecto positivo en el aumento de biomasa radical y aérea (Cuadro 5) puesto que al inicio del experimento las plantas del tratamiento no micorrizado eran más grandes que las

micorrizadas, esto se debe a la multifuncionalidad de los HMA ya que dichos efectos pueden verse reflejados en otras variables tales como la supervivencia (Cuadro 6) o el estado hídrico de la planta y variables asociadas que son indicadoras, directas o indirectas, del desempeño de las plantas.

Además, se ha comprobado que la simbiosis micorrícica disminuye la cantidad de biomasa seca en las raíces de las plantas hospederas (Cavagnaro *et al.*, 2001), ya que la planta no necesita invertir energía en el aumento de la biomasa de las raíces para aumentar el área de captura de iones y agua, debido a que el micelio externo cumple esta función y solo aumenta el área de colonización por medio de la producción de una mayor cantidad de raíces laterales finas.

Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) son importantes en el uso eficiente del agua de las plantas, ya que le permiten regular su transpiración de manera eficiente y, además, proporcionan un aumento en la absorción de agua. También incrementan eficientemente la toma de CO₂ de la atmósfera y la tasa fotosintética, además de proporcionar al hospedero minerales de difícil disponibilidad, por lo que la influencia de estos micobiontes mutualistas permite un incremento en la cantidad de biomasa producida por unidad de agua irrigada, es decir aumentan la eficiencia del uso del agua o los gramos de biomasa seca total producida por litro de agua irrigada; tal es el caso de la especie *Mammillaria bombycina* (Cuadro 4), que presenta diferencias significativas en cuanto a este parámetro, debido a –seguramente- la mayor exploración del perfil de humedad del sustrato por parte de las hifas extrarradicales de los HMA.

Cuadro 6. Porcentaje de supervivencia al final del experimento para plantas no micorrizadas (M-) y micorrizadas (M+).

Supervivencia (%)	
No micorrizadas (M-)	Micorrizadas (M+)
98 ^a	100 ^a

La supervivencia de las 5 especies, en el caso del tratamiento micorrizado, se registró favorecida, aunque no presenta diferencias significativas (Cuadro 6), esto probablemente se deba a que los hongos micorrizógenos proporcionan resistencia a condiciones ambientales estresantes como pH, temperaturas extremas (Harley y Smith, 1983), mejoran la nutrición e inducen de manera local los mecanismos de defensa de las plantas (Mansfeld-Giese *et al.*, 2002).

Análisis del sustrato utilizado en el experimento

En el cuadro 7 y 8 se presenta la caracterización física y química del suelo empleado antes (suelo estéril) y después (HMA) del experimento.

Cuadro 7. Promedios obtenidos de los parámetros físicos de color, densidad aparente (D.A), densidad real (D.R), porcentaje poroso (%EP) y textura.

Tratamiento	Color		D.A g/cm ³	D.R g/cm ³	% EP	Textura		
	Seco	Húmedo				Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
Suelo estéril	grisáceo (10YR5/2)	café muy oscuro (7.5R2.5/2)	1.54	2.27	32.16	1.8	10.02	88.18
HMA			1.5	2.63	42.97	0.48	11.34	88.18

El cuadro 7 muestra las propiedades físicas del sustrato empleado en el experimento. El suelo presenta color grisáceo (10YR5/2) en seco y color café muy oscuro en húmedo (7.5YR.5/2) según las tablas Munsell. En lo que se refiere a la textura, se clasifica como un suelo franco-arenoso, lo cual contrasta con lo reportado por Luna (2005), quien lo clasifica como un suelo franco-arcilloso; esto se debe a que a pesar de que el suelo proviene del mismo municipio, no lo es así para el sitio de colecta, el tipo de textura encontrada se caracteriza por presentar una infiltración excesiva, capacidad de retención de humedad baja y una aireación de buena a excelente.

El porcentaje de espacio poroso sufrió un incremento una vez que el suelo fue mezclado con el inóculo, lo cual fue debido a la glomalina, una glicoproteína con características cementantes producida abundantemente por el micelio externo de los HMA, siendo esta responsable de la estabilización de agregados (Wright y Upadhyaya, 1998). Presenta una densidad aparente de 1.5 g/cm³ y densidad real entre 2.27-2.63 g/cm³, lo que concuerda con lo reportado para el mismo municipio por Luna (2005) (D.A: 1.52 g/cm³, D.R: 2.59 g/cm³) y Ortega (2006) (D.A: 1.02 g/cm³, D.R: 2.33 g/cm³).

Cuadro 8. Promedios obtenidos de los parámetros químicos de pH, capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.), materia orgánica (M.O.) y conductividad eléctrica (C.E.).

Tratamiento	pH (suelo- agua 1:1)	pH Pasta de saturación	C.I.C. (meq/100 g)	M.O. (%)	C.E. (dS/m)
Suelo estéril	7.4	8.38	7.54	0.87	2.08
HMA	7.18	7.74	8.4	0.83	3.34

En cuanto a las propiedades químicas mostradas en el cuadro 8, se observa que este suelo es bajo en materia orgánica (M.O), con un pH medianamente alcalino, lo cual es de esperarse para suelos de zonas áridas. La importancia de realizar el análisis de M.O radica en que esta puede afectar (si se encuentra en porcentajes altos) otras propiedades como estructura, retención de humedad, color, pH y densidad real y aparente (Rodríguez y Rodríguez, 2002). Rzedowski (1994) reporta que para la zona del municipio de Santiago de Anaya el pH varía de 6 a 8.5, con contenido de M.O frecuentemente bajo.

La conductividad eléctrica muestra un suelo moderadamente salino con valores que van de 2.08-3.34 dS/m, valor de tolerancia a la salinidad de cactáceas, ya que el crecimiento de sus raíces se inhibe de manera drástica en suelos salinos. La capacidad de intercambio catiónico es bajo siendo similar para todos, lo cual indica que es un suelo con poca fertilidad.

Evaluación de la colonización micorrícica

El grado de colonización micorrícica depende de varios factores, entre ellos está la compatibilidad genética en los hongos simbioses con el hospedero, exudados de la raíz, pH, salinidad, temperatura y humedad (Nobel, 1998).

Por otro lado, la hipótesis de Baylis indica que el nivel de colonización micorrícica disminuye en una raíz de tipo “graminoide”, donde la gran cantidad de raíces finas con diámetros menores a 0.03 mm no hace tan necesaria la presencia de los HMA y se presenta un desarrollo favorable (Janos, 1980; St. John *et al.*, 1983) como es el caso de *M. bombycina*, *M. voburnensis* y *B. emoryi*.

Cuadro 9. Porcentaje de colonización total por especie. Abreviaciones: M- plantas no micorrizadas, M+ plantas micorrizadas.

Especies	<i>Mammillaria bombycina</i>		<i>Mammillaria voburnensis</i>		<i>Bergerocactus emoryi</i>		<i>Sedum moranense</i>		<i>Stenocereus pruinosus</i>	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
Tratamiento	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
Colonización micorrícica total (%)	0	5.55	0	6.66	0	8.88	1.14	59.04	1.11	18.66

El porcentaje de colonización micorrícica se obtiene por el número de hifas, vesículas y/o arbuscúlos encontrados en el total de campos observados (Cuadro 9). En este experimento se encontró que la colonización de *M. bombycina*, para el tratamiento M+, fue de 5.55% presentando el porcentaje más bajo y el más alto lo presentó *S. moranense* con el 59%. Esto significa la baja dependencia micotrófica de *M. bombycina* en contraste con la estrecha relación simbiótica de *S. moranense* con los HMA.

Las estructuras encontradas en cada especie se presentan en las figuras 14-18 donde se puede observar que los HMA forman asociaciones simbióticas efectivas con las raíces de las especies utilizadas. En *M. bombycina*, *M. voburnensis* y *S. pruinosus* (Figuras 14, 15 y 18) además de hifas (su principal función es la absorción de nutrimento) pueden apreciarse vesículas, estructuras que contienen lípidos y sirven como órganos de reserva de energía para los hongos (Bago, *et al.*, 2000). *Sedum moranense* (Figura 17) presenta hifas, vesículas y arbuscúlos (estructuras que siempre se localizan dentro de las células corticales de la raíz y son los sitios de intercambio de nutrimentos entre el hongo MA y la planta).

En *B. emoryi* (Figura 16) la presencia de micelio externo indica que el contacto entre el hongo micorrizógeno arbuscular y la raíz ha sido fructífero, ya que las hifas exploradoras forman estructuras con apariencia de árbol denominadas estructuras ramificadas de absorción (BAS por sus siglas en inglés) que pueden presentarse solos o asociados a esporas (como es el caso) y de esta manera son consideradas idóneas para la formación de estructuras de propagación de los HMA, debido a que las esporas son consideradas como los propágulos infeccivos más importantes (Carlson, 1990; Brundrett y Abbott, 1994; González-Chávez *et al.*, 1998; Bago *et al.*, 2000; Hause y Fester, 2005).

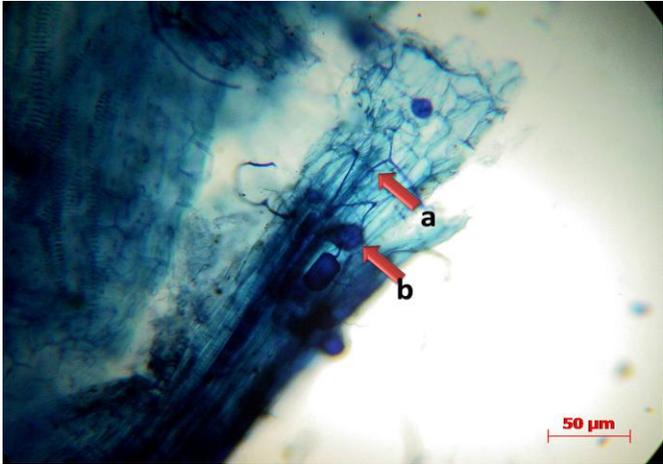


Figura 14. Hifas (a) y vesículas (b) observadas a 16X en *Mammillaria bombycina*.

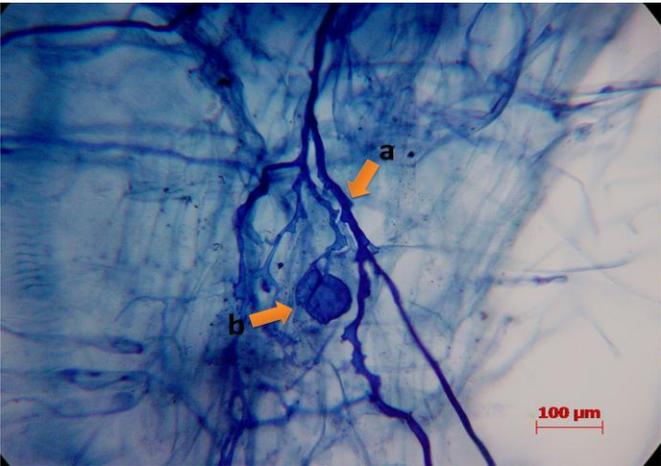


Figura 15. Hifas (a) y vesículas (b) observadas a 40X en *Mammillaria voburnensis*.

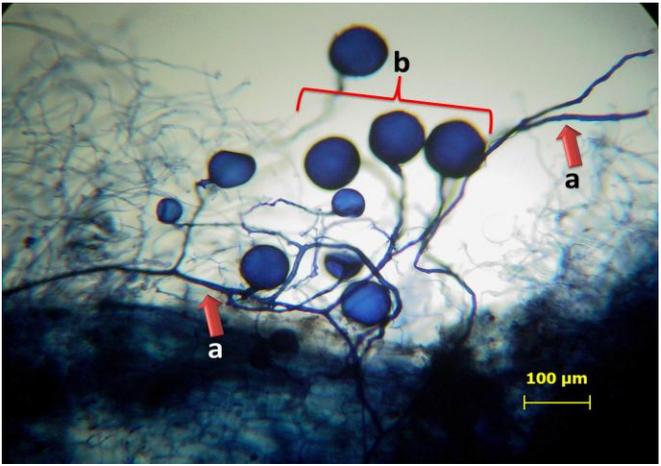


Figura 16. Micelio externo (a) y esporas (b) observadas a 16X en *Bergerocactus emoryi*.

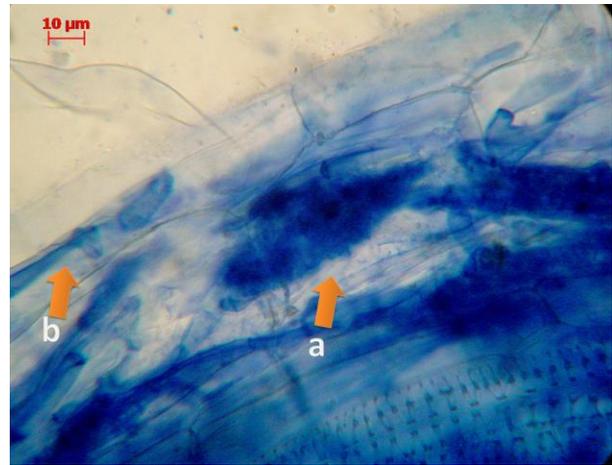
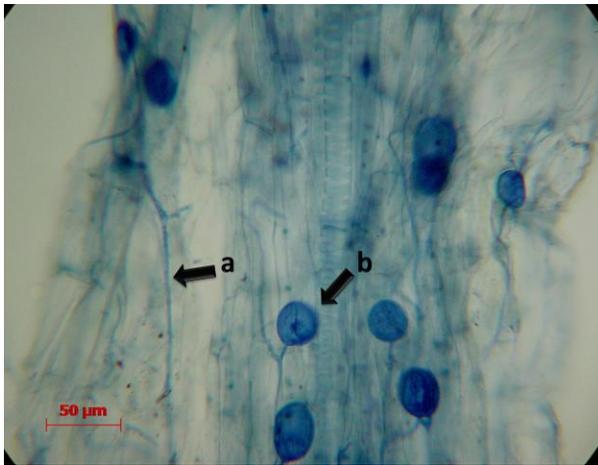


Figura 17. Hifas (a) y vesículas (b) observadas a 40X (izquierda); arbúsculo (a) e hifa (b) observados a 100X (derecha) en *Sedum moranense*.

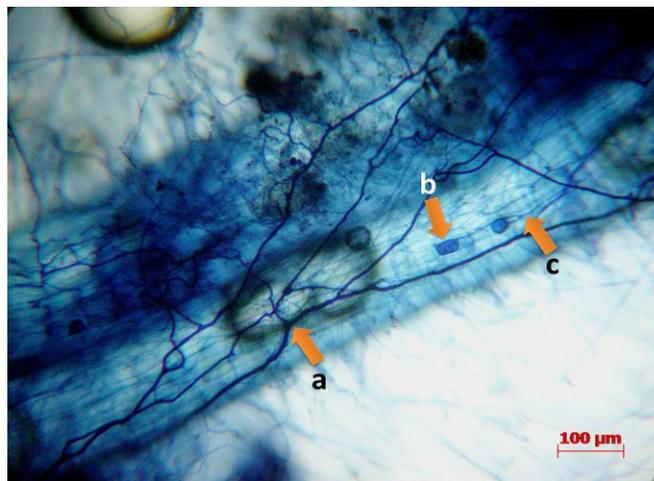


Figura 18. Micelio externo (a), vesículas (b) e hifas (c) observadas a 16X en *Stenocereus pruinosus*.

Finalmente, con el modelo analizado (Figura 19), 1 m² de azotea verde pesa 90.24 kg en estado saturado adecuándose a lo determinado en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal, donde define que el peso de la naturación extensiva (esto es, con requerimientos de mantenimiento muy bajos o casi nulos) a capacidad máxima de agua debe ser 110 a 140 kg/m² con un sustrato no mayor a los 18 cm. Considerando asimismo, que la precipitación media anual en el Distrito Federal es 800 mm en la zona Oriente, el mantenimiento hídrico del modelo propuesto requirió 241.29 mm de agua en 24 semanas, por lo que el sistema es funcional bajo las condiciones meteorológicas del Distrito Federal.



Figura 19. Modelo de mosaico de vegetación de bajo mantenimiento.

Asimismo, cada contenedor tiene un costo de \$200.00 M.N. y considerando que se requieren 9.37 contenedores para 1 m², su precio se estima en \$1874.00 M.N. de acuerdo a los precios del siguiente cuadro (noviembre 2011):

Cuadro 10. Precios del material utilizado para producir un contenedor con un mosaico de vegetación.

	Cantidad	Costo
Contenedor (rejilla)	1 pza.	\$17.00
Pellón	1 m	\$10.00
Olla de barro (500 ml aprox)	1 pza.	\$10.00
Arena sílica	4370 g	\$6.12
Suelo	6900 g	\$5.60
Yute (con malla de apertura de 2x1 mm)	1 m	\$13.00
Contenedor	1 pza.	\$40.00
Cordón	3.36 m	\$16.80
Tezontle	1058 g	\$1.48
<i>Bergerocactus emoryi</i>	1 pza.	\$10.00
<i>Mammillaria bombycina</i>	1 pza.	\$25.00
<i>Mammillaria voburnensis</i>	1 pza.	\$25.00
<i>Sedum moranense</i>	1 pza.	\$10.00
<i>Stenocereus pruinosus</i>	1 pza.	\$10.00
	Total	\$200.00

CONCLUSIONES

En lo referente al crecimiento en altura y diámetro no se encontraron diferencias significativas, lo que muestra que las plantas empleadas crecen lentamente; asimismo, 24 semanas es muy poco tiempo para el registro de un crecimiento detectable experimentalmente además de que la micorrización es un proceso demandante de recursos energéticos para el vegetal al inicio de la simbiosis mutualista.

En relación al cociente raíz/vástago, se encontró que el tratamiento micorrizado fue significativamente más bajo que el tratamiento no micorrizado, ya que las plantas no necesitan invertir energía en el aumento de biomasa de la raíz para aumentar el área de captura de agua.

En cuanto a la eficiencia del uso del agua, a pesar de no haber presentado diferencias significativas, las plantas inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares mostraron una hidratación ligeramente mayor.

La inoculación con HMA hace más eficiente la evapotranspiración real (ETR) del mosaico en condiciones de invernadero, durante un periodo de 24 semanas, aunque no presenta diferencias significativas.

El modelo de mosaico de vegetación para natural azoteas es práctico, ya que favorece la supervivencia de las especies utilizadas y cultivadas en contenedores, con sustrato a capacidad de campo, en un periodo de 6 meses, en condiciones de invernadero. Asimismo el peso del contenedor con el sustrato a capacidad de campo es de 9.620 kg en promedio, por lo que al ser menor de 10 kg, es idóneo para su manejo por amas de casa o jóvenes que deseen natural azoteas.

Finalmente, el mosaico de vegetación para natural azoteas propuesto es un modelo altamente comercializable por su eficiencia como sistema, comodidad de transporte e instalación y fácil mantenimiento, además de sus múltiples beneficios no sólo al ambiente sino también sociales.

RECOMENDACIONES

En las especies donde el beneficio de la asociación no se refleja en parámetros de crecimiento, es necesario valorar otros indicadores de la influencia de la simbiosis micorrícica sobre el desarrollo vegetal.

Debido a que la evapotranspiración en el sistema es más física que biológica, colocar un colchón de gravilla sobre el suelo reducirá el efecto de pérdida de agua.

En este caso no es recomendable la especie *Bergerocactus emoryi* puesto que a mayor disponibilidad de agua haya en el sistema, mayor crecimiento presenta y por ende el agotamiento de los recursos disponibles para las demás especies.

Sedum puede tener un papel importante en la biodiversidad de los techos verdes ya que su capacidad para cambiar entre fotosíntesis C3 y CAM es la razón de su éxito que le permite crecer rápidamente cuando el agua es abundante (típico de C3) y sobrevivir a la sequía (típico de CAM).

Cuando se utilicen plantas adultas o de origen desconocido es recomendable realizar un análisis para corroborar que estén libres de microorganismos ajenos al experimento.

LITERATURA CITADA

- Alexandri E., Jones P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*. 43, 480-493.
- Arroyo, V. A., Martínez, M. G., Sánchez, M.J., 1998. Efecto de las micorrizas arbusculares (VA) en cultivos de maíz en dos sitios del Estado de México. Universidad Veracruzana, 201-215.
- Bainbridge, D.A, 2001. Buried clay pot irrigation: A Little know but very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural Water Management*. 48, 79-88.
- Barea, J. M., Azcón Aguilar, C., Roldán Fajardo, B., 1984. Avances recientes en el estudio de la micorriza vesículo arbuscular. Formación, funcionamiento y efectos recientes en nutrición vegetal. *Anales de edafología y agrobiología*. Granada, España, 659-677.
- Bastow Wilson, J., 1999. Assembly rules in plant communities in: *Ecological Assembly Rules: Perspectives, advances, retreats* (eds. Weiher, E. & Keddy, P.). Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña, 130-164.
- Bago, B., Azcón-Aguilar, C., Shachar, H., Pfeffer, P.E., 2000. El micelio externo de la micorriza arbuscular como puente simbiótico entre la raíz y su entorno. En: *Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza Arbuscular*. Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. (eds.). IRENAT-Colegio de Postgraduados Montecillo. Mundi Prensa, México, 78-92.
- Bengtsson, L., Grahn, L., Olsson, J., 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrol*. 36 (3), 259-268.
- Berndtsson, J.C., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. 36, 351-360.
- Bertness, M.D., Callaway, R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends Ecol. Evol*. 9 (5), 191-193.
- Bolan, N.S., 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and soil*. 134: 189-207.
- Bonfante, P., Genre, A., 2008. Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: an evolutionary-developmental perspective. *Trends in plants Science*. Vol.13. 9:492-498.
- Bravo-Hollis, H., 1978. *Las cactáceas de México*. 2a ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 1. 743 pp.

Bravo-Hollis, H., Sánchez-Mejorada, R.H., 1991. Las cactáceas de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 3.

Brenneisen, S., 2003. The benefits of biodiversity from green roofs-key design consequences. In: Conference proceedings Greening Rooftops for Sustainable Communities, Chicago.

Brundrett, C.M., Abbott, K.L., 1994. Mycorrhizal fungus propagules in the jarrah forest: I. Seasonal study of inoculum levels. *New Phytologist*. 127: 539-546.

Butler, C., Orians, C.M., 2009. Sedum facilitates the growth of neighboring plants on a green roof under water limited conditions. Paper presented at the Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Atlanta, G.A.

Carlson, R.P., 1990. Biología de la producción de cultivos. Editor AGT. S.A. México. Cap.6, 201-217.

Castillo, F.J., 1996. Antioxidative protection in the inducible CAM plant *Sedum album* L. following the imposition of severe water stress and recovery. *Oecologia* 107 (4), 469-477.

Cavagnaro, T.R., Smith, S.E., Dickson, S., 2001. Backseat driving? Accessing phosphate beyond the rhizosphere depletion zone. *Trends in Plant Science* 6, 5.

Charles-Edwards, D.A., Doley D., Rimmington, G.M., 1986. Modelling plant growth and development. Academic Press. Marrickville, Australia, 10-14.

Cruz, C., Egsgaard, H., Trujillo, C., Ambus, P., Requena, N., Martins, L.M.A., Jacobsen, I., 2007. Enzymatic Evidence for the Key Role of Arginine in Nitrogen Translocation by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Plant Physiology*. 144: 782-792.

Currie, B.A., Bass, B., 2008. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*. 11, 409-422.

De la Rosa Mera, C.J., Monroy Ata, A., 2006. Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 9 (2), 96-100.

Dunnett, N., Nagase, A., Hallam, A., 2008. The dynamics of planted and colonizing species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: influence of substrate depth. *Urban Ecosystems*. 11, 373-384.

- Durhman, A.K., Rowe, D.B., Rugh, C.L., 2006. Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of select green roof plant taxa. *HortScience* 41 (7), 1623-1628.
- Emilsson, T., 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*. 33, 265-277.
- Espinosa, V.D., 2000. Diálogo molecular: Hongo micorrízico arbuscular-raíz en: *Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza Arbuscular*. Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. (eds.). IRENAT-Colegio de Postgraduados Montecillo. Mundi Prensa, México, 93-116.
- Fang, C.F., 2008. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy Build.* 40, 1048-1052.
- Finlay, D.R., 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 5. 5: 1115-1126.
- FLL., 2002. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen (in German) (Guidelines for planning execution and upkeep of Green roof sites). Bonn, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E. V.
- Fujii, S., Cha, H., Kagi, N., Miyamura, H., Kim, Y.S., 2005. Effects on air pollutant removal by plant absorption and adsorption. *Building and Environment* 40:105-112.
- Gedge, D., Kadas, G., 2005. Green roofs and biodiversity. *Biologist*. 52 (3), 161-169.
- Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S., 1983. The physiology of vesicular-arbuscular mycorrhizal roots. *Plant and soil*. 7:19-29.
- González-Chávez, C., Ferrera-Cerrato, R., Pérez, M.J., 1998. *Biotecnología de la micorriza arbuscular en fruticultura*. Universidad Autónoma Veracruzana y Colegio de Postgraduados. México, 131.
- Gravatt, D.A., Martin, C.E., 1992. Comparative ecophysiology of 5 species of *Sedum* (Crassulaceae) under well-watered and drought-stressed conditions. *Oecologia* 92 (4): 532-541.
- Guzmán, U., Arias, S., Dávila, P., 2003. *Catálogo de cactáceas mexicanas*. UNAM, CONABIO, 315 pp.

- Hause, B., Fester, T., 2005. Molecular and biology of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant* 221: 184-196.
- Harley, J.L., Smith, S.E., 1983. *Mycorrhizal simbiosis*. Academic Press, Londres. 483 pp.
- Helgason, T., Fitter, A., 2005. The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycologist*. Vol. 19. Part 3: 96-101.
- Imyunku., 2009. *Learning About Urban Heat Islands*. Pusan National University.
- Janos, D.P., 1983. Topical mycorrhizae, nutrient cycles and plant growth. En: Sutton, S.L., Whitmore T.C., Chadwick, A.C. (eds.). *Tropical rain forest: Ecology and Management*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Jim, C.Y., Hongming, H., 2010. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering* 36: 1052-1063.
- Koehler, M., 2004. Energetic effects of green roofs to the urban climate near to the ground and to the building surfaces. In: *International Green Roofs Congress*, 14-15 September 2004, Nürtingen, Germany, 72-79.
- Kumar, R., Kaushik, S.C., 2005. Performance evaluation green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40, 1505-1511.
- Lamb, E., Lamb, B., 2003. *Guía de los cactus y otras suculentas*. Ediciones Omega. España. 364 pp.
- Linderman, R.G., 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. In: *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. Bethlenfalvay, G. J., Linderman, R. Eds. ASA Special Publication 54, Madison, Wi. USA, 45-70.
- Luna, C.L.A., 2005. *Influencia de Hongos Micorrizógenos Arbusculares (HMA) sobre el desarrollo de Agave salmiana (Agavaceae) y Opuntia streptacantha (Cactaceae) en condiciones de invernadero*. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Biólogo. FES Zaragoza. UNAM.
- Mansfeld-Giese, K., Larsen, J., Bodker, L., 2002. Bacterial populations associated with mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *Microbiological Ecology* 41, 133-141.
- Marschner, H., Dell, B., 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal simbiosis. *Plant and soil* 159: 89-102.

- Martens, R., Bass, B., Alcazar, S.S., 2008. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems* 11, 399-408.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rain-water runoff problem in the urbanized 21st century. *Landscape Urban Plan.* 77, 217-226.
- Meyrán-García, J., 2003. Las crasuláceas de México. México. Sociedad Mexicana de Cactología A.C.
- Monroy Ata, A., 2007. Los jardines del futuro serán xerófitos o de cero riego. *Conversus.* 66: 20-23.
- Monroy Ata, A., 2009. Micorrizas: Una historia de las alianzas de la naturaleza. *Conversus.* 82: 22-25.
- Montaño, N.M., Camargo-Ricalde, S.L., García-Sánchez, R., Monroy-Ata, A. (eds.), 2008. Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos (Arbuscular mycorrhizae in arid and semi-arid ecosystems). Mundi-Prensa S.A. de C.V., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, UAM-Iztapalapa, FES Zaragoza-UNAM. México, Distrito Federal.
- Monterusso, M.A., Rowe, B.D., Rugh, C.L., 2005. Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *HortScience* 40 (2), 391-396.
- Müller Garcia, T., September, 2005. Evaluation of the first green roof in the District of Xochimilco in Mexico City after 15 months.
- Nobel, P.S., 1998. Los incomparables agaves y cactus. Ed. Trillas. México, D.F. México. 211 pp.
- Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, Que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal.
- Ortega, H.A., Ordoñez, V.C., 2006. Hongos Micorrícicos Arbusculares de ocho localidades del Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Biólogo. FES Zaragoza. UNAM.
- Pérez-Calix, E., 2008. Crassulaceae. En Rzedowski, G.C. de y J. Rzedowski (eds.). Flora del Bajío y regiones adyacentes. Fascículo 156. Instituto de Ecología-Centro Regional del Bajío. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán, México.

- Peterson, R.L., 1992. Adaptations of root structure in relation to biotic and abiotic factors. *Can. J. Bot.* 70: 661-675.
- Phillips, J.B., Hayman, D.S., 1970. Improved procedures of clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society.* 55: 158-160.
- Plenchette, C., Fortín, J. A., Furlan, V., 1983. Growth responses of several plants species to mycorrhizal in a soil of moderate P fertility. *Plant and Soil.* 70, 2:199-209.
- Rodríguez, F.H., Rodríguez, A.J., 2002. Métodos de análisis de suelos y plantas –criterios de interpretación-. Ed. Trillas. México. 196 pp.
- Rzedowski, J., 1994. Vegetación de México. 6a reimpression. Ed. Noriega Limusa. México D.F.
- Sailor D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40, 1466–1478.
- Salisbury, F.B., Ross, C.W., 1994. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica. Mexico. D.F.
- Schüßler, A., Schwarzott, D., Walker, C., 2001. A new phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105 (12): 1413-1421.
- St. John, T.V., Coleman, D.C., 1983. The role of mycorrhizae in plant ecology. *Canadian Journal of Botany.* 61: 1005-1014.
- Sudzuki, F., 1995. Anatomy and morphology. In: Barbera, G., Inglese, P., Pimienta-Barrios, E. (eds.). *Agroecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear.* Plant Production and Protection Paper, 132, 213.
- Takebayashi, H., Moriyama, M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for migration of urban heat island. *Build. Environ.* 42, 2971-2979.
- Theodosiou, T.G., 2003. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energ. Buildings* 35, 909-917.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. R.* 38: 55-94.
- Van Renterghem, T., Booteldooren, D., 2009. Reducing the acoustical façade load from traffic with green roofs. *Buil. Environ.* 44, 1081-1087.

- VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., Xiao, L., 2005. Green roofs stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *J. Environ. Qual.* 34, 1036-1044.
- Varela, L., Estrada T., A., 1999. El papel de los microorganismos de la rizósfera y de la micorriza en la absorción de nutrientes minerales y agua. En: Orellana, R., Escamilla, J., Larqué-Saavedra, A. (eds). *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. CICY. Mérida, Yucatán, México.
- Villar, F., Ruiz-Robledo, J., Quero, J.L., Poorter, H., Valladares, F., Marañón, T., 2008. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: Valladares, F. (ed). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid, 193-230.
- Villar-Salvador, P., 2003. Importancia de la calidad de la planta en los proyectos de revegetación. *Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos*. En: Rey-Benayas, J.M., Espigares Pinilla, T. y J.M., Nicolau Ibarra, J.M. (eds). *Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos*, Universidad de Alcalá, Asociación Española de Ecología Terrestre, 65-68.
- Weigelt, A., Jolliffe, P., 2003. Indices of plant competition. *J. Ecol.* 91, 707-720.
- Were, A., Villagarcía, L., Domingo, F., 2003. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración? Estado actual y evolución. *Ecosistemas: Revista científica y técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 12 (1).
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*. 198: 97-107.
- Wolf, D., Lundholm, J.T., 2008. Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Ecol. Eng.* 33 (2), 179-186.
- Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A., 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Build. Environ.* 38, 261-270.
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos. Environ.* 42, 7266-7273.

ANEXOS

I. PRUEBAS ESTADÍSTICAS APLICADAS A LAS VARIABLES ALTURA Y DIÁMETRO DE AMBOS TRATAMIENTOS, AL FINAL DE LA FASE EXPERIMENTAL.

Análisis de la varianza aplicada a la variable altura en la especie *Mammillaria bombycina*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PROD ALT FIN	20	0.11	0.06	10.63

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	121.23	1	121.23	2.26	0.1500
TRATAMIENTO	121.23	1	121.23	2.26	0.1500
Error	965.05	18	53.61		
Total	1086.28	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=6.87962

Error: 53.6140 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M-	66.44	10	2.32 A
M+	71.37	10	2.32 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza aplicada a la variable diámetro en la especie *Mammillaria bombycina*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PROD DIAM FIN	20	0.13	0.08	7.61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	54.57	1	54.57	2.66	0.1205
TRATAMIENTO	54.57	1	54.57	2.66	0.1205
Error	369.79	18	20.54		
Total	424.35	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.25858

Error: 20.5437 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M-	57.94	10	1.43 A
M+	61.24	10	1.43 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable altura en la especie *Mammillaria voburnensis*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)			
TRATAMIENTO PROD ALT FIN	M-	M+		10	10	75.04
74.03	10.20	7.98	<0.20			

Análisis de la varianza aplicada a la variable diámetro en la especie *Mammillaria voburnensis*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PROD DIAM FIN	20	0.03	0.00	8.87

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	19.33	1	19.33	0.53	0.4761
TRATAMIENTO	19.33	1	19.33	0.53	0.4761
Error	656.80	18	36.49		
Total	676.12	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.67550

Error: 36.4887 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
M+	67.15	10	1.91	A
M-	69.11	10	1.91	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable altura en la especie *Bergerocactus emoryi*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)			
Tratamiento PROD alt fin	M-	M+		10	10	227.60
200.30 23.87	18.78	<0.02				

Análisis de la varianza aplicada a la variable diámetro en la especie *Bergerocactus emoryi*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PROD diam fin	20	0.10	0.05	5.19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4.36	1	4.36	1.91	0.1836
Tratamiento	4.36	1	4.36	1.91	0.1836
Error	41.05	18	2.28		
Total	45.41	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.41884

Error: 2.2804 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
M+	28.66	10	0.48	A
M-	29.59	10	0.48	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza aplicada a la variable altura en la especie *Sedum moranense*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
alt fin	20	0.06	0.01	14.40

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	548.63	1	548.63	1.10	0.3084
Tratamiento	548.63	1	548.63	1.10	0.3084
Error	8988.18	18	499.34		
Total	9536.81	19			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=20.99542

Error: 499.3434 gl: 18

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
M-	149.90	10	7.07	A
M+	160.38	10	7.07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable altura en la especie *Stenocereus pruinosus*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
	Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)		
TRATAMIENTO PROD ATL FIN		M-	M+	9	9	51.05
	48.51	5.45	9.24	<0.20		

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable diámetro en la especie *Stenocereus pruinosus*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
	Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)		
TRATAMIENTO PROD DIAM FIN		M-	M+	9	9	34.38
	33.90	2.19	5.99	<0.20		

II. PRUEBAS ESTADÍSTICAS APLICADAS A LA VARIABLE TASA DE CRECIMIENTO RELATIVO (TCR) DE AMBOS TRATAMIENTOS, AL FIANL DE LA FASE EXPERIMENTAL.

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable tasa de crecimiento relativo en la especie *Mammillaria bombycina*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable		Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	
	Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)				
TRATAMIENTO	ASEN	TCR	bombycina	M-		10	10	0.03
	0.03	0.01	2.2E-03					<0.20

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable tasa de crecimiento relativo en la especie *Mammillaria voburnensis*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable		Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	
	Media(1)	Media(2)	DE(1)	DE(2)			p(2 colas)
TRATAMIENTO	ASEN	TCR	voburnensis	M-		10	10
	0.03	0.03	0.01	0.01			<0.20

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable tasa de crecimiento relativo en la especie *Bergerocactus emoryi*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable		Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	
	Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)				
TRATAMIENTO	ASEN	TCR	notocactus	M-		10	10	0.03
	0.02	0.01	4.9E-03					<0.20

Es importante mencionar que para la variable tasa de crecimiento relativo en las especies *M. bombycina*, *M. voburnensis* y *B. emoryi* se aplicó el arco seno debido a que los datos no se ajustaban a la normalidad.

Análisis de la varianza aplicada a la variable tasa de crecimiento relativo en la especie *Sedum moranense*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TCR sedum	20	1.5E-03	0.00	19.72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.4E-08	1	2.4E-08	0.03	0.8721
TRATAMIENTO	2.4E-08	1	2.4E-08	0.03	0.8721
Error	1.6E-05	18	9.1E-07		
Total	1.6E-05	19			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.00089

Error: 0.0000 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
M-	4.8E-03	10	3.0E-04	A
M+	4.9E-03	10	3.0E-04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza aplicada a la variable tasa de crecimiento relativo en la especie *Stenocereus pruinosus*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TCR stenocereus	18	0.15	0.10	59.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.4E-06	1	1.4E-06	2.88	0.1092
TRATAMIENTO	1.4E-06	1	1.4E-06	2.88	0.1092
Error	7.8E-06	16	4.8E-07		
Total	9.1E-06	17			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.00070

Error: 0.0000 gl: 16

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
M-	9.0E-04	9	2.3E-04	A
M+	1.5E-03	9	2.3E-04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

III. PRUEBAS ESTADÍSTICAS APLICADAS A LA VARIABLE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR) DE AMBOS TRATAMIENTOS, AL FINAL DE LA FASE EXPERIMENTAL.

Análisis de la varianza aplicada a la variable evapotranspiración real semanal.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ETR	46	0.07	0.04	7.67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.96	1	1.96	3.12	0.0844
TRATAMIENTO	1.96	1	1.96	3.12	0.0844
Error	27.66	44	0.63		
Total	29.62	45			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.47124

Error: 0.6287 gl: 44

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
M-	10.13	23	0.17	A
M+	10.54	23	0.17	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza aplicada a la variable evapotranspiración real acumulada.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ETR acum	48	5.1E-04	0.00	58.65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	126.34	1	126.34	0.02	0.8785
Tratamiento	126.34	1	126.34	0.02	0.8785
Error	245745.56	46	5342.29		
Total	245871.90	47			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=42.47120

Error: 5342.2948 gl: 46

Tratamiento	Medias	n	E.E.
M-	123.00	24	14.92 A
M+	126.24	24	14.92 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

IV. PRUEBAS ESTADÍSTICAS APLICADAS A LA VARIABLE EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE) DE AMBOS TRATAMIENTOS, AL FINAL DE LA FASE EXPERIMENTAL.

Análisis de la varianza aplicada a la variable eficiencia en el uso del agua en la especie *Mammillaria bombycina*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
wue bombycina	14	0.32	0.27	66.20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.28	1	0.28	5.75	0.0336
Tratamiento	0.28	1	0.28	5.75	0.0336
Error	0.58	12	0.05		
Total	0.86	13			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.25613

Error: 0.0484 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.
M-	0.19	7	0.08 A
M+	0.47	7	0.08 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable eficiencia en el uso del agua en la especie *Mammillaria voburnensis*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
	Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)		
Tratamiento	wue vobur	M-	M+	7	7	1.02
0.36	0.73	0.15	<0.10			

Análisis de la varianza aplicada a la variable eficiencia en el uso del agua en la especie *Bergerocactus emoryi*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
wue noto	14	0.26	0.20	23.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.03	1	0.03	4.26	0.0614
Tratamiento	0.03	1	0.03	4.26	0.0614
Error	0.07	12	0.01		
Total	0.10	13			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.09030

Error: 0.0060 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.
M+	0.29	7	0.03 A
M-	0.38	7	0.03 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Análisis de la varianza aplicada a la variable eficiencia en el uso del agua en la especie *Sedum moranense*.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
wue sedum	14	0.12	0.04	70.22

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.01	1	0.01	1.61	0.2289
Tratamiento	0.01	1	0.01	1.61	0.2289
Error	0.05	12	4.4E-03		
Total	0.06	13			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.07767

Error: 0.0044 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.
M-	0.07	7	0.03 A
M+	0.12	7	0.03 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05)

Prueba Kolmogorov-Smirnov basada en dos muestras aplicada a la variable eficiencia en el uso del agua en la especie *Stenocereus pruinosus*.

Kolmogorov-Smirnov

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)
Media(2)	DE(1)	DE(2)	p(2 colas)			
Tratamiento wue stenoc	M-	M+		7	7	0.15
0.10	0.11	0.10	<0.20			