



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

“Establecimiento de plantas de *Yucca filifera* inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) en microcuencas artificiales en una parcela de Tezontepec de Aldama, Hidalgo”

T E S I S

Que para obtener el título de

BIÓLOGO

PRESENTA

TREJO GARCÍA ROGELIO

Director de tesis: Dr. Arcadio Monroy Ata

Unidad de Investigación en Ecología Vegetal

Investigación realizada con financiamiento de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, mediante el proyecto PAPIIT IN216610

México, D.F. abril de 2014.





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.

ÍNDICE

RESUMEN

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	ANTECEDENTES	3
3.	MARCO TEÓRICO	4
3.1	ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO	5
3.2	RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	4
3.3	HONGOS MICORRIZGENOS ARBUSCULARES	6
3.4	MICROCUENCAS	11
3.5	<i>YUCCA FILIFERA</i> CHABAUD	13
4.	JUSTIFICACIÓN.....	16
5.	HIPÓTESIS	17;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
6.	OBJETIVO GENERAL.....	17
6.1	OBJETIVOS PARTICULARES.....	17
7.	ZONA DE ESTUDIO	17
8.	MÉTODO	18
8.1	TRABAJO EN CAMPO	22
8.1.1	CONSTRUCCIÓN DE MICROCUENCAS	22
8.1.2	TRASPLANTE A CAMPO.....	22
8.1.3	REGISTRO DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS	23
8.2	TRABAJO EN LABORATORIO	23
8.2.1	ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	23
8.2.2	CONTEO DE ESPORAS	25
8.2.3	HUMEDAD DEL SUELO	26
8.2.4	REGISTRO DE VARIABLES DE RESPUESTA.....	26
8.3	TRABAJO DE GABINETE	27
8.3.1	DISEÑO EXPERIMENTAL	28
9.	RESULTADOS	28
10.	DISCUSIÓN	42
11.	CONCLUSIONES	46
12.	REFERENCIAS	47
	ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE <i>Y. FILIFERA</i> (SÁNCHEZ, 1979).....	14
TABLA 2. USOS DE SUELO EN EL MUNICIPIO DE TEZONTEPEC DE ALDAMA.....	19
TABLA 3. DIVERSIDAD DE ESPORAS EN EL INOCULO MICORRIZÓGENO UTILIZADO PARA LAS PLÁNTULAS DE <i>Y. FILIFERA</i>.....	21
TABLA 4. PRUEBAS FÍSICAS Y QUÍMICAS REALIZADAS A LAS MUESTRAS DE SUELO.	25
TABLA 5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO DEL SUELO.	29
TABLA 6. SINOPSIS DE RESULTADOS EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS LLEVADOS A CABO EN EL EXPERIMENTO.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los hongos micorrizógenos arbusculares (Redecker et al., 2013).	8
Figura 2. Corte esquemático del sistema de captación de agua mediante los Chultun (Domínguez, 2009).	13
Figura 3. <i>Y. filifera</i>, detalle de sus hojas (Sánchez, 1979).	14
Figura 4. Distribución geográfica de <i>Y. filifera</i> Chabaud en la República Mexicana (Matuda y Piña, 1980).	15
Figura 5. Mapa de la zona de estudio. Graja Integral de Policultivo de Tezontepec de Aldama, Hgo. Fuente: Google maps (2014). ..¡Error! Marcador no definido.	21
Figura 6. Modelo de microcuena de captación pluvial.	23
Figura 7. Distribución de las plantas en la zona de estudio. Los signos más (+) indican que es una planta micorrizada; mientras que el signo menos (-) de plantas no micorrizadas. Los cuadros representan las microcuenas y los círculos aquellas plantas sin microcuena.	24
Figura 8. Zonas de muestreo de suelo (marcadas con rojo) para realizar análisis de propiedades físicas y químicas. Fuente: Google maps, 2014.	25
Figura 9. Porcentaje de supervivencia promedio para cada tratamiento evaluado a los 464 días de trasplante de <i>Y. filifera</i>.	31
Figura 10. Aspecto de <i>Y. filifera</i> en sus diferentes tratamientos (a) inoculada en microcuena, (b) sin inocular en microcuena, (c) inoculada sin microcuena y (d) sin inocular sin microcuena.	31
Figura 11. Numero promedio de hojas a los 464 días por cada tratamiento de <i>Y. filifera</i>.	32
Figura 12. Número de hojas registrado al final del experimento para cada tratamiento de <i>Y. filifera</i>.	32
Figura 13. Número de hojas para las plantas de <i>Y. filifera</i>. Incisos (a) y (c) están micorrizados con y sin microcuena, respectivamente. Los tratamientos (b) y	

(d) no están micorrizados y respectivamente se plantaron en una microcuenca o a suelo plano..... 33

Figura 14. Cobertura promedio presente después de 464 días para cada uno de los tratamientos..... 34

Figura 15. Cobertura en tratamientos donde se emplean HMA y microcuenca (a), sin microcuenca (b), tratamiento sin HMA en microcuenca (c) y sin esta (d). ... 34

Figura 16. Altura máxima promedio de plantas de *Y. filifera* en cuatro tratamientos al termino de 464 días. 35

Figura 17. Altura máxima en plantas de *Y. filifera* con cada tratamiento. (a) y (c) tratamientos micorrizados trasplantados a microcuenca y suelo plano, respectivamente; (b) y (d) no micorrizados trasplantados a microcuenca y suelo plano, respectivamente. 36

Figura 18. Tasa de crecimiento relativo (TCR) para cada tratamiento evaluado.37

Figura 19. Porcentaje de humedad presente en el suelo de la zona de estudio para cada época del año 37

Figura 20. Promedio de esporas contabilizadas para cada época del año en el suelo de la zona de estudio. 38

Figura 21. Registro de precipitación y temperatura media de la zona de estudio 38

Resumen

Las zonas áridas y semiáridas de México presentan algún grado de perturbación, por lo que se requieren técnicas de recuperación de la cubierta, a fin de mitigar el deterioro de estos ecosistemas. El presente trabajo caracterizó el establecimiento y supervivencia de plantas de la especie *Yucca filifera* Chab., inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), en condiciones de campo en una parcela con vegetación remanente de zonas semiáridas, en la localidad de Tezontepec de Aldama, Hidalgo.

Se construyeron 20 micrositios en forma de microcuencas de 1 m² de superficie y 20 cm de profundidad, con un cajete en el centro para el trasplante de plantas de 1 año de edad. Se instalaron 2 lotes de 10 plantas, el primer grupo con un inóculo micorrícico proveniente de la microbiota edáfica del Parque Ecológico Cubitos, mientras que el segundo grupo se trasplantó sin inóculo. Se emplearon dos grupos testigo, los cuales fueron trasplantados al ras del suelo; uno de 10 vegetales inoculados y el otro de 7 sin inóculo. Se dio el seguimiento mensual del desarrollo de las plantas mediante los parámetros: supervivencia, altura, diámetro mínimo y máximo, número de hojas para determinar el efecto de la micorrización y el efecto de la microcuenca sobre el establecimiento vegetal. Los datos registrados se procesaron mediante un análisis de varianza no paramétrica de dos factores: micorrización: con y sin inóculo; y cosecha de agua: el vegetal trasplantado a una microcuenca o en suelo plano.

Los resultados muestran que la inoculación con HMA y el empleo de la microcuenca de captación pluvial permiten un desarrollo y crecimiento benéfico para las plantas de *Y. filifera* en comparación con los demás tratamientos. Lo anterior se explica debido a que las micorrizas permiten que la absorción de agua sea más eficiente para la planta; asimismo la microcuenca permite que se genere un microclima para que la planta se desarrolle. Se concluye que el empleo de HMA en conjunto con una técnica de captación de agua como las microcuencas permite el establecimiento de vegetación nativa. Finalmente se recomienda el empleo de estos métodos en programas de recuperación de la cobertura vegetal en zonas semiáridas deterioradas.

1. Introducción

En México, los ecosistemas áridos y semiáridos cubren más del 60% del territorio nacional, además de ser depositarios de aproximadamente 6000 especies de plantas y elevados niveles de endemismos (Montaño *et al.*, 2007). Sin embargo, estas zonas presentan distintos grados de deterioro en su vegetación y suelo, debido a que la cobertura vegetal es continuamente fragmentada y eliminada por la extracción de leña, la sobreexplotación de algunas especies, incendios, la expansión de la frontera agrícola y la ganadería, entre otras causas (Cavazos, 1997).

En las estrategias de restauración de suelos degradados, es determinante el uso de la microbiota del suelo (Haselwandter, 1997; Requena *et al.*, 2001), en especial de los hongos formadores de micorrizas, ya que éstos, entre otras ventajas, previenen la erosión del suelo porque son un factor en la formación de agregados y la retención de materia orgánica, por lo que dan estructura al suelo y reducen o evitan el efecto de la erosión tanto hídrica como eólica, lo cual conlleva siempre una pérdida de los nutrientes edáficos (Jasper, 1994; Haselwandter, 1997). Las micorrizas pueden formar asociaciones entre las raíces de las plantas terrestres y determinados hongos del suelo como los de los phyla *Basidiomycota*, *Ascomycota* y *Glomeromycota* (Frank, 1885; Lynch, 1990). Por lo anterior, es importante contar con estrategias ecológicas como modelos de reconstrucción de ecosistemas áridos y semiáridos, que permitan rehabilitar el suelo, incrementar la captación hídrica y mantener una comunidad vegetal, a fin de preservar procesos ecológicos y el hábitat de numerosos endemismos (De la Rosa y Monroy, 2006).

El papel ecológico de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) radica en su capacidad de incrementar la superficie de absorción de nutrientes y agua, explorando sitios a los que las raíces muy finas no tienen acceso; además confieren resistencia a patógenos, principalmente de raíces, a herbívoros y al estrés hídrico (Trotta *et al.*, 1996; Augé, 2001); evita la formación de parches secos entre las raíces y el suelo, lo que mantiene la continuidad del líquido a través de la interfase suelo-raíz, favoreciendo el establecimiento, la productividad y la supervivencia de las plantas (Augé, 2001; Azcón-Aguilar *et al.*, 2003; Querejeta *et al.*, 2003). Las ventajas de esta asociación micorrícica han sido documentadas ampliamente, por tal razón en los ambientes áridos, esta asociación parece ser crucial para la supervivencia de las plantas (Beena *et al.*, 2000; Stutz *et al.*, 2000).

Una de las especies ampliamente distribuida en estos ambientes, es la palma china, por su alta resistencia a la sequía; además su valor económico es importante por lo cual conviene propagarla y reintroducirla en hábitats deteriorados para la rehabilitación de la vegetación. Sin embargo, se sabe que puede inducirse con mayores probabilidades de éxito, si se micorrizan las plantas a reintroducir con inóculo de HMA nativo (Monroy *et al.*, 2007).

El Valle del Mezquital, Hidalgo se caracteriza por ser un ambiente semiárido donde se ubica la Granja Integral de Policultivo de Tezontepec de Aldama, el sitio donde se realizó este estudio, en una parcela con vegetación remanente de matorral xerófilo. El empleo de microcuencas artificiales de captación pluvial es una muestra de que una ecotecnia de fácil creación y poco mantenimiento favorece el establecimiento vegetal, lo cual en programas de restauración ecológica es un punto primordial para reestructurar o recuperar los ecosistemas perturbados.

2. Antecedentes

Algunos estudios de establecimiento vegetal que se han desarrollado de manera favorable a nivel de campo, en zonas semiáridas empleando hongos micorrizógenos arbusculares son los siguientes:

Reyes-Quintanar *et al.* (2008) analizaron con la cactácea columnar *Neobuxbaumia tetetzo* (F.A.C. Weber ex J.M. Coulter) Backeberg, la cual es de importancia para el mantenimiento de la diversidad de invertebrados y vertebrados frugívoros y nectarívoros. Esta cactácea se desarrolla en una zona árida de Puebla (México) bajo la influencia de las islas de fertilidad formada por leguminosas. En estas condiciones, la cactácea mostró una colonización micorrízica arbuscular mayor al 50%, inclusive en épocas de sequía.

Monroy *et al.* (2007), realizaron un trabajo sobre el establecimiento de plantas mediante el uso de micorrizas y de isla de recursos en un matorral xerófilo deteriorado. En este estudio se registró la supervivencia de plantas de mezquite y huizache, previamente inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares, en condiciones de campo, durante un año. Cada individuo micorrizado y no micorrizado fue trasplantado bajo una planta nodriza. Los resultados mostraron que la micorrización de plantas de mezquite y de huizache aumenta de manera significativa la supervivencia, sin embargo el nodrizaje no presentó diferencias significativas en el porcentaje de supervivencia.

En el presente trabajo se seleccionó como objeto de estudio a una planta representativa de zonas semiáridas con diversidad de usos como *Y. filifera*; esta especie se desarrolla en ambientes semiáridos debido a que es resistente a las sequías, sin embargo se reintrodujo a campo inoculada con hongos micorrizógenos arbusculares y no inoculada, a fin de comparar el desarrollo y crecimiento de esta especie. En campo, plantas de *Y. filifera* se trasplantaron dentro de microcuencas de captación pluvial (de 1 m² y 20 cm de profundidad) las cuales aportan humedad debido a la escorrentía dentro del micrositio en época de lluvias. Este sistema (HMA y microcuenca de captación pluvial), en conjunto, favorece la recuperación de la cubierta vegetal. Asimismo, *Y. filifera* forma parte de la cadena alimenticia de animales con los que coexiste en campo, tales como conejos, liebres, etc.

3. Marco teórico

3.1 Zonas áridas de México

Las zonas áridas y semiáridas de México ocupan entre 50 y 60% de la superficie total del país (Challenger, 1998). Estas regiones de baja precipitación pluvial anual son referidas usualmente como áridas, si su precipitación media anual es inferior a 250 mm y como semiáridas si la lluvia media fluctúa entre 250 y 450 mm (Nobel, 1998). En estos ambientes, el clima y la topografía son los factores que determinan, en mayor medida, los patrones de distribución espacial y temporal de las plantas en las comunidades vegetales (Valentin *et al.*, 1999).

Los ecosistemas áridos y semiáridos en México poseen una elevada diversidad, de alrededor de 6000 especies, y un porcentaje importante de endemismos: 65% de los géneros y casi el 69% de las especies que medran en estos ambientes (Rzedowski, 1991). Sin embargo, las zonas áridas y semiáridas mexicanas presentan señales de deterioro en amplios territorios del país, debido a actividades humanas como la sobreexplotación de algunas especies, por los habitantes de estas zonas, para lograr insumos con valor de uso o de cambio. Por ello, es necesario el buscar técnicas que permitan revertir la pérdida de vegetación y la erosión del suelo.

La importancia de los ecosistemas áridos y semiáridos radica en su amplia extensión, la cual es aproximadamente un tercio de las tierras emergidas a nivel mundial y en la gran presión evolutiva que han sufrido las especies que en ella

viven. Estos ecosistemas son importantes porque en ellos ocurren procesos ecológicos que permiten comprender la desertificación, que es una consecuencia de la problemática ambiental actual. Estos ecosistemas son también una fuente de germoplasma, que es la riqueza biológica básica para contrarrestar la desertificación. En México, estos ecosistemas son de particular importancia porque ocupan más de la mitad del territorio nacional, y porque en ellos habita un alto porcentaje de poblaciones humanas bajo condiciones de pobreza económica, que contrasta con la riqueza natural que prevalece, lo que indica una política inadecuada en el aprovechamiento de los recursos naturales y la falta de planificación para el desarrollo socioeconómico aplicado a estas regiones (Martínez y Pugnaire, 2009).

3.2 Restauración ecológica

La restauración ecológica es una actividad deliberada que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema con respecto a su autonomía, homeostasis, integridad y sostenibilidad. Con frecuencia, el ecosistema que requiere restauración se ha degradado, dañado, transformado o está totalmente destruido como resultado directo o indirecto de las actividades del ser humano. En algunos casos, estos impactos en los ecosistemas fueron causados o empeorados por causas naturales, tales como incendios, inundaciones, tormentas o erupciones volcánicas, hasta tal grado que el ecosistema no se puede restablecer por su cuenta al estado anterior a la alteración o a su trayectoria histórica de desarrollo.

La restauración trata de retornar un ecosistema a su trayectoria previa a la perturbación. Por lo tanto, las condiciones históricas son el punto de partida ideal para diseñar la restauración ecológica. El ecosistema restaurado puede no recuperar su condición anterior debido a limitaciones y condiciones actuales que pueden orientar su desarrollo por una trayectoria diferente.

La restauración ecológica es una disciplina que estudia los procesos ecológicos que promueven la reconstrucción de ecosistemas deteriorados y analiza técnicas que favorecen la sucesión ecológica, la descontaminación de suelo y agua, la reintroducción de especies, la rehabilitación edáfica, la captación y retención de humedad en el suelo y el establecimiento de una nueva cubierta vegetal, entre otras herramientas. Así, el repoblamiento vegetal normalmente es la primera etapa en la restauración de sitios degradados, donde aún hay suelo que sustente algunas poblaciones vegetales, resultantes de alguna perturbación (fuego, deforestación, sobrepastoreo, sobreexplotación de especies) (SER, 2004).

3.3 Hongos micorrizógenos arbusculares

El segundo grupo con mayor número de especies entre 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 se han descrito 72000; aunque, cada año se registran cerca de 1500 nuevas especies (Aguilera *et al.*, 2008).

Además de la diversidad de las especies fúngicas, es importante tomar en cuenta que este grupo de organismos es básico para el bienestar humano debido a su utilización en campos tan diversos como la producción de alimentos, la micología industrial, la salud humana, la agricultura y la biorremediación, entre otras aplicaciones; así como por ser actores fundamentales dentro de los procesos ecosistémicos.

En 1885, Frank propuso el término micorriza para describir un fenómeno común que observó en las raíces de ciertos arboles de los bosques templados de Norteamérica. Estos órganos eran diferentes morfológicamente de otras raíces cuando se encontraban asociadas a hongos del suelo (Harley y Smith, 1983). Inicialmente estas asociaciones entre los hongos del suelo y las raíces de los árboles fueron las únicas que se reconocían como micorrizas, pero trabajos posteriores mostraron que existía una gran diversidad de asociaciones de este tipo, no solo en plantas leñosas, sino en la mayoría de los vegetales. Cuando se establece la interacción, los hongos por lo general modifican la raíz, desarrollando nuevas estructuras que caracterizan a los diferentes tipos de micorrizas (Aguilera *et al.*, 2008).

La micorriza es una condición común en la mayoría de las plantas terrestres incluyendo las cultivadas. Esta simbiosis mutualista está ampliamente distribuida entre las familias vegetales y parece haberse dispersado y evolucionado junto con las primeras plantas terrestres (Allen, 1991). La micorriza arbuscular es la más antigua que se conoce y probablemente se originó hace unos 460 millones de años y se considera fue importante en la colonización del ambiente terrestre por las plantas (Simon *et al.*, 1993).

Una micorriza es la simbiosis entre un HM y las raíces de una planta. Los HM se encuentran ampliamente extendidos por toda la superficie terrestre y establecen simbiosis con al menos, el 90% de las plantas vasculares (Barea, 1998). Los hongos formadores de micorriza arbuscular son simbiosiontes obligados y no pueden cultivarse fuera de las raíces vivas de las plantas por lo que dependen totalmente de la planta fotosintética (Smith y Read, 1997). Las esporas de estos hongos

germinan en el suelo y colonizan las células corticales de una planta hospedero. El tipo de asociación hongo-raíz más extendido en la naturaleza tal vez sea la llamada endomicorriza o micorriza arbuscular, formada por especies fúngicas del phylum *Glomeromycota*, las cuales no desarrollan red de Hartig y colonizan intracelularmente la corteza de la raíz por medio de estructuras especializadas denominadas arbuscúlos, que actúan como órganos de intercambio de nutrimentos entre la célula vegetal y el hongo. Algunos géneros de estos hongos forman también otro tipo de estructuras llamadas vesículas, compuestas principalmente por lípidos. Estas vesículas están presentes intercelularmente en la corteza de la raíz y se consideran reservorios de nutrimentos fúngicos. La presencia tanto de arbuscúlos como de vesículas dio lugar a que la simbiosis se conociera originalmente como vesículo-arbuscular (V-A), sin embargo, no todas las especies de hongos forman vesículas, por lo que en la actualidad la asociación se conoce como micorriza arbuscular (Aguilera *et al.*, 2008).

Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) surgieron antes de la colonización del medio terrestre por las plantas de hábitat acuático, ya que el origen de los HMA se ha establecido durante el Ordovícico, hace cerca de 460 millones de años. Los HMA establecen una asociación mutualista con las raíces de las plantas formando las micorrizas arbusculares (Montaño *et al.*, 2008). En la Figura 1 se puede observar la clasificación actual empleada para los hongos micorrizógenos arbusculares.

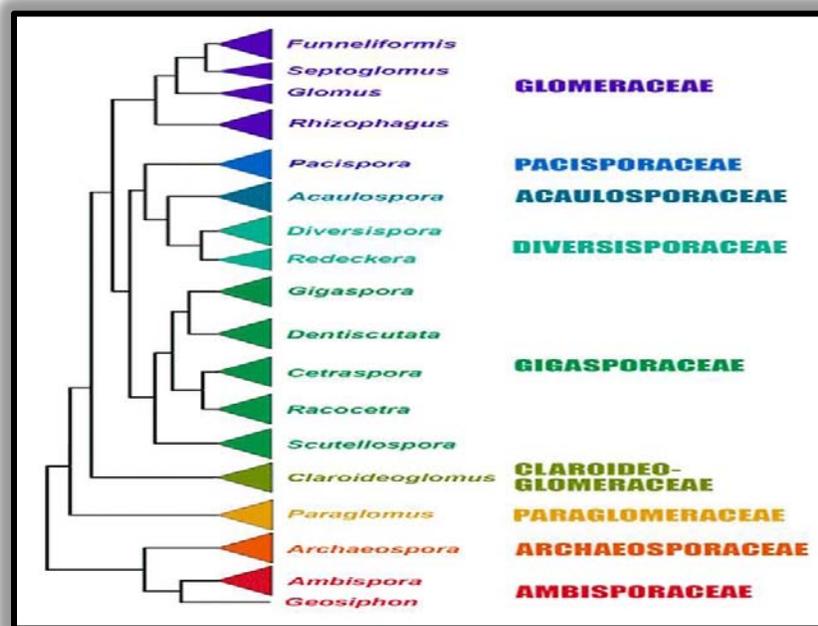


Figura 1. Clasificación de los hongos micorrizógenos arbusculares (Redecker *et al.*, 2013).

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 (proceso que los hongos no pueden realizar) 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 obtendría difícilmente sin la ayuda del hongo (Montaño *et al.*, 2008).

La calidad y salud de un suelo puede determinarse a partir de la cantidad de propágulos micorrícicos presentes en él. Así, el potencial de inóculo del suelo es la capacidad de éste para estimular la formación de la asociación micorrícica en plantas hospederas.

Este potencial micorrícico se relaciona con el estado de conservación del suelo, la historia previa de manejo, la disponibilidad de propágulos y la composición de la comunidad de hongos micorrizógenos (Ramos-Zapata *et al.*, 2011).

Los intentos de evaluar la densidad de los propágulos de HMA en los suelos para diagnosticar la calidad de éstos incluyen el conteo directo de las esporas extraídas del suelo (Allen *et al.*, 2003; Carvalho *et al.*, 2003), evaluación del porcentaje de raíces colonizadas (Corkidi y Rincón, 1997), y estimación del largo de la biomasa hifal en el suelo (Pearson y Jakobsen, 1993; Simard y Durall, 2004). Esta técnica microbiológica provee una estimación real de la condición promedio de la comunidad de HMA (Cabello, 1997) y permite detectar qué especies de HMA no producen esporas.

Por su efecto sobre las plantas de interés agrícola o forestal, los HMA se usan como inoculantes de aplicación práctica en la agricultura y en programas de reforestación de los bosques. Al respecto, se ha documentado que las plantas micorrizadas resisten mejor las condiciones adversas en el suelo, como son la falta de agua, de nutrimentos esenciales como el fósforo (P) y el nitrógeno (N) (los HMA proporcionan hasta un 80% y 25% del P y N que son requeridos por las plantas), el ataque de microorganismos fitopatógenos e, incluso, pueden proteger a sus hospederos de efectos nocivos producidos por contaminantes tóxicos (Montaño *et al.*, 2008).

El estrés hídrico es el principal obstáculo para la supervivencia y reproducción de las especies vegetales que se encuentran en áreas áridas y semiáridas. Este estrés involucra baja disponibilidad de agua provocada por patrones de lluvia variables e impredecibles, suelos pobres en nutrimentos (nitrógeno y fósforo) con

alta variación espacial y temporal de precipitación (Zack *et al.*, 1995; Whitford, 1986; Schlesinger *et al.*, 1990) y suelos con alta salinidad (Al-Karaki, 2000). Cualquier factor biótico o abiótico que pueda inducir el desarrollo de las plantas creciendo en condiciones de estrés es realmente valioso, porque dará como resultado mayor productividad y estabilidad en la vegetación (Ferrera-Cerrato, 1983).

En el caso particular de los ecosistemas áridos y semiáridos, se ha reportado que el establecimiento vegetal se incrementa cuando se utilizan plantas micorrizadas, las cuales tienen mayor protección y tolerancia a las condiciones adversas del suelo y del clima (Caravaca *et al.*, 2003); de la misma manera, Cuenca y Lovera (1994) manifiestan que para la rehabilitación ecológica de zonas degradadas, se pueden utilizar inóculos micorrícicos nativos y semillas de plantas locales. En el caso de los suelos áridos y semiáridos, el establecimiento de árboles y arbustos leñosos es de importancia ecológica y económica, además de ser una alternativa productiva para contrarrestar el proceso erosivo (Montaño y Monroy, 2000).

En ecosistemas áridos y semiáridos, los HMA exploran grandes volúmenes de suelo a mayores profundidades y distancias de lo que lo hacen las raíces de las plantas, para suministrar agua y nutrientes a sus asociados vegetales. Por ello, en algunos desiertos, quizás la lluvia total anual, por sí misma, no puede explicar los altos niveles alcanzados en la producción primaria de los ecosistemas locales. Asimismo, se ha mostrado que gracias a sus micobiontes, numerosas especies de plantas de zonas secas adquieren beneficios nutrimentales y de protección contra parásitos y sustancias alelopáticas; igualmente, se ha demostrado el papel funcional de los HMA en la construcción de una red hifal que conecta físicamente a las plantas que conforman una comunidad o “manchón” de vegetación, en donde se aprovechan los recursos disponibles con alta eficacia (Montaño *et al.*, 2008).

Los ecosistemas semiáridos se caracterizan por una precipitación baja e irregular a lo largo del año con periodos de sequía recurrentes durante los que las comunidades vegetales se ven sometidas a situaciones de elevado estrés hídrico. Los organismos que habitan en estos ecosistemas han desarrollado estrategias para superar estas condiciones adversas. En muchos casos establecen interacciones entre plantas y especies de HMA de manera que consiguen un mayor aprovechamiento del agua disponible. Por ejemplo, las especies de HMA funcionales en suelos áridos, captan de manera más eficaz los nutrientes y el agua en condiciones de sequía, ayudando a las plantas a superar las condiciones adversas (Allen, 2007).

La vegetación de los ecosistemas áridos y semiáridos normalmente soporta condiciones adversas como largos periodos de sequía, intensas temperaturas y evaporación, suelos con alto contenido de sales, suelos arenosos o con un elevado nivel de erosión, suelos con bajas concentraciones de nutrientes, entre los factores principales. Esto lleva a aseverar que los HMA son un actor que permite a las plantas resistir estas condiciones desfavorables. Así, las hifas de los HMA son fisiológicamente más efectivas para la absorción de agua y nutrientes que las raíces mismas. Esta característica incrementa la tolerancia de las plantas a la sequía y a la captación de nutrientes, que son relativamente inmóviles como el P y N; por lo tanto, los HMA son necesarios para el crecimiento y supervivencia de las plantas del desierto (Montaño *et al.*, 2008).

Asimismo, es importante identificar a la simbiosis micorrícica como una interacción “multifuncional” y como parte de la diversidad biótica del ecosistema, la cual sugiere que algunas especies de HMA son más eficientes para el transporte de fósforo hacia la planta, otros en la defensa contra patógenos y otros como promotores de la tolerancia a la sequía a través de incrementar el contacto raíz-suelo (Leigh *et al.*, 2009); todo ello mediado por los factores ambientales como humedad, nutrientes y contenido de fósforo en el suelo. Un ejemplo de lo anterior se muestra en el hecho de que suelos con diferente pH suelen contener distintas especies de HMA (Wang *et al.*, 1985), que difieren en su respuesta a las condiciones de sequía (Kliromonos y Hart, 2000), lo cual hace difícil distinguir entre los efectos del ambiente vía planta y los efectos propios del hongo. Además, la alta diversidad de HMA aumenta la capacidad de amortiguamiento del ecosistema. En consecuencia, las evidencias sugieren que la composición de la comunidad de los HMA cambia como resultado de las especies de plantas que dominan en la comunidad vegetal durante la sucesión ecológica (García, 2011).

Cuando las comunidades vegetales sufren disturbios, la composición de los HMA cambia, lo que puede influir en la velocidad y dirección de la regeneración de las comunidades vegetales, dado el carácter positivo y generalista de esta interacción, además de que es frecuente encontrar HMA en el suelo asociados a la vegetación primaria y secundaria (Allen *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 2003; Guadarrama-Chávez, 2008).

Con base en los estudios ecológicos de los HMA en las zonas áridas y perturbadas de México, es posible conformar un acervo relacionado con la diversidad de los HMA, así como su distribución e impacto sobre las plantas que medran en condiciones de sequía y salinidad. Además, es posible crear programas de recuperación de las zonas perturbadas con base en el uso de

plantas inoculadas y con ello favorecer la paulatina recuperación de la zona y estabilización de las comunidades vegetales que en ella se establezcan tal como lo mencionan E. Allen (1995) y M. Allen (1995). Con base en los estudios revisados se puede establecer que la simbiosis micorrícica arbuscular en las zonas áridas contribuye significativamente en la regulación de los sistemas planta-suelo. De esta forma, el beneficio que la simbiosis micorrícica arbuscular aporta, tanto a las plantas como al sistema planta-suelo, se fundamenta en las siguientes características (Carrillo-García *et al.*, 1999):

- Retención de humedad edáfica, disponible para los vegetales y mineralización de rocas para transportar nutrimentos a los fitobiontes.
- Participación en la estabilización del suelo superficial, susceptible al efecto del viento, que yace bajo los doseles de las plantas.
- Inducir incrementos en la capacidad del establecimiento de plantas colonizadoras en suelos de áreas con diferente grado de perturbación.
- Influir en las diferentes asociaciones vegetales de un ecosistema a través de la respuesta diversa de las plantas (estado micotrófico) ante el desarrollo sucesional de los hongos micorrizógenos arbusculares.

Por lo anterior, el estudio de los HMA de ecosistemas desérticos es crucial, ya que ellos albergan importantes bancos de inóculos que pueden ser usados para incrementar la supervivencia de las plantas en suelos de baja fertilidad y con escasez de agua, como las áreas secas degradadas, las salinizadas y los suelos agrícolas.

3.4 Microcuencas

El riego es una práctica de la agricultura ideada para suplir una deficiencia del clima: permite compensar el desequilibrio entre el agua suministrada por la precipitación y la demanda evaporativa de la atmósfera. La utilización de un sistema u otro de riego, tiene importancia por el distinto uso que hacen del agua las plantas en ambientes áridos: escape, tolerancia y resistencia a la sequía. El método más adecuado se elige tomando en cuenta la topografía, características del suelo, funcionalidad de la planta, el volumen del agua disponible, el costo, la facilidad para el establecimiento del sistema de irrigación y la mano de obra que se requiere.

Existen diferentes sistemas de riego, pero no todos pueden ser implementados en zonas áridas y semiáridas, porque varios representan desventajas en cuanto a funcionalidad y costo-beneficio.

Una cuenca es un sistema microtopográfico que está presente en un terreno donde el agua, sedimentos y materiales disueltos escurren a un punto en común, ya sea éste un lago, humedal o a lo largo de un río (Patr, 1983).

Una microcuenca artificial es una unidad fisiográfica cóncava inducida, la cual generalmente tiene un tamaño mucho menor a una microcuenca natural, aunque no hay un rango de tamaño pre-establecido. Así, estos micrositios son depresiones sobre el terreno, que permiten almacenar agua proveniente de escurrimientos superficiales en el área de captación hídrica.

En el caso de los ecosistemas áridos, una microcuenca es un lugar que contenga una reserva hídrica en el suelo utilizable por las plantas. Pueden ser ubicados en lugares bajos, junto a declives o en pendientes, que colecten lluvia de áreas más altas por escurrimiento superficial, las cuales concentran en una pequeña superficie la lluvia colectada en el área de captación (De la Rosa y Monroy, 2006).

Dado que el concepto de microcuenca puede interpretarse desde perspectivas diferentes, siendo la geografía la más empleada; en el presente trabajo consideramos una microcuenca artificial de captación pluvial como un micrositio que permite las condiciones favorables de humedad para que una planta se establezca.

Las microcuencas artificiales son un caso particular de la captación de agua de lluvia, misma que ha sido conocida en México desde las épocas prehispánicas, tal como lo demuestra la construcción de “Chultuns” en la región Maya, esquematizada en la Figura 2.

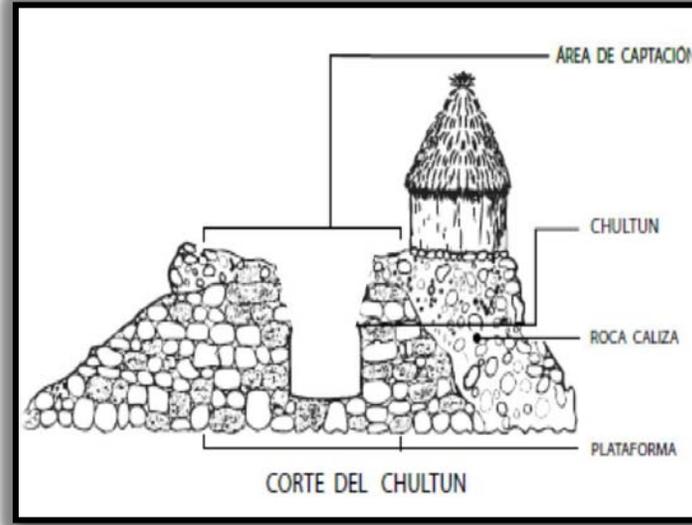


Figura 2. Corte esquemático del sistema de captación de agua mediante los Chultun (Domínguez, 2009).

Dentro de las ventajas que se presentan de la implementación de esta técnica de aprovechamiento de agua se enuncian las siguientes (Domínguez, 2009):

- Incremento en la eficiencia del uso de agua de lluvia.
- Mejora el microentorno, al apoyar a la vegetación a una absorción facilitada del agua, a la par de evitar su evaporación y desperdicio.
- No requiere consumo de energía adicional.
- Los materiales de construcción son adaptables a las condiciones particulares de cada sitio.

3.5 *Yucca filifera chabaud*

Planta arborescente de 2 hasta más de 10 m de altura, en ocasiones muy ramificadas. Sus hojas se presentan en rosetas terminales, lanceoladas de 34 a 45 cm de largo, rígidas, coriáceas, de color verde oscuro, con una espina terminal y los márgenes de éstas, filíferos (fibrosos). Presenta una inflorescencia colgante y densa, con flores de color blanco a crema de 3-4.5 cm de largo dispuestas en racimos.

Los frutos son oblongos de 5 a 7.5 cm de longitud y 2.2 a 2.7 cm de diámetro, carnosos y colgantes. Las semillas miden aproximadamente 7 mm de largo,

semicirculares y de tonalidades oscuras. Como puede observarse en la Figura 3, se encuentran descritas algunas de las partes de esta planta.

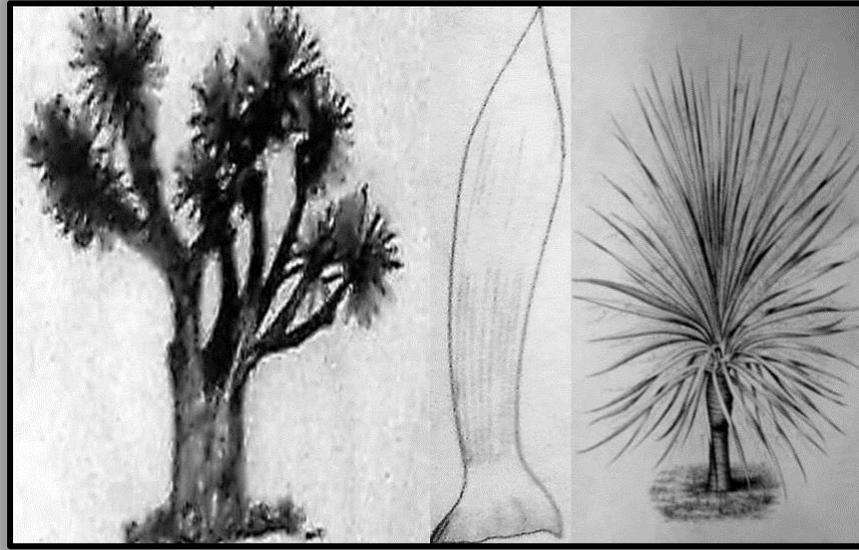


Figura 3. *Y. filifera*, detalle de sus hojas (Sánchez, 1979).

La clasificación taxonómica del ejemplar utilizado se encuentra desglosada en la tabla siguiente.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Y. filifera* (Sánchez, 1979).

Reino	Plantae
Phylum	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Liliales
Familia	Agavaceae
Género	Yucca
Epíteto específico	filifera
Nombre Científico	<i>Yucca filifera</i> Chabaud
Autor del nombre	Chabaud

Y. filifera es una especie ampliamente distribuida en las zonas semiáridas del centro y norte de México (Powell, 1992; Rentería y Cantú, 2003). Matuda y Piña (1979) indican Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Michoacán, México. Las mayores densidades se localizan en dos zonas, ubicadas una en el Municipio de Salinas Victoria, Nuevo León, y la otra en el Municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí (hasta más de 300 plantas por ha) (Matuda y Piña, 1979). Habita en planicies, suelos profundos, bien drenados o con deficiente drenaje (cuencas endorreicas), en altitudes entre 500 y 2400 m.s.n.m. Forma parte del estrato arbóreo principalmente en el matorral desértico (Matuda y Piña, 1979). Asociado con “*Y. treculiana*, *Y. queretaroensis*, *Y. endlichiana*, *Y. rigida*, *Y. potosina*, *Y. carnerosana*, *Dasyllirion longissimum*, *Agave striata*, *Agave gentry* y diferentes especies de cactus” (Hochstätter, 2004), en laderas expuestas en cañones, entre vegetación de arbustos del desierto, en suelos de piedra caliza y arcilla, en altitudes de 500-2600 m (Hochstätter, 2004). La distribución de esta especie puede observarse en la Figura 4.



Figura 4. Distribución geográfica de *Y. filifera* Chabaud en la República Mexicana (Matuda y Piña, 1980).

Se conoce popularmente como "palma china" y se utilizan todas sus partes; siendo sus flores y frutos las más aprovechadas. Éstas son empleadas en la alimentación humana y del ganado. Por otra parte, la semilla contiene componentes que son de interés para la industria, mientras que las hojas y el tronco son una importante fuente de fibra natural.

Por ser una especie resistente a la sequía es usada en plantaciones en zonas áridas con fines de conservación del suelo. De la misma manera, es común verla formando corrales y cercas naturales en casas de campesinos, debido a su bajo costo. Otro uso que se les da es como plantas de ornato, observándoseles frecuentemente en avenidas de ciudades, carreteras y zonas recreativas (Nava *et al.*, 1980).

Y. filifera pertenece a la familia Agavaceae la cual representa una de la pocas fuentes de supervivencia para numerosas comunidades de regiones que sufren escasez de lluvia y suelos pocos fértiles en los estados de Nuevo León, Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas e Hidalgo (García, 1992).

Desde el punto de vista biológico, el género *Yucca* reviste gran interés científico, debido a que todas sus especies son polinizadas de manera exclusiva por hembras de palomillas de la subfamilia Prodoxinae (Mckelvey, 1935).

4. Justificación

Los suelos erosionados presentes en zonas áridas y semiáridas no favorecen el establecimiento de especies nativas vegetales por la baja disponibilidad hídrica y de nutrientes. Asimismo, la variabilidad de la lluvia es un factor más que no permite un óptimo crecimiento vegetal. Por ello, en este estudio se propone el empleo de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) como una herramienta que favorezca el establecimiento de plantas, debido a que los HMA facilitan la captación de recursos hídricos y nutrimentales a sus hospederos, para asegurar la supervivencia de las especies vegetales. Adicionalmente, el inducir el establecimiento vegetal en micrositos en forma de microcuenca promoverá la concentración de agua pluvial en la base de la planta, lo que permitirá que ésta realice una absorción más eficaz del agua.

Asimismo, *Y. filifera* es una especie útil para la restauración ecológica porque retiene suelo y permite una sucesión ecológica de las especies nativas de la zona, además de ser dominante en algunos agostaderos (izotales) del Valle del

Mezquital, Hidalgo. Además no existen estudios relacionados con el establecimiento de plantas de *Y. filifera* en condiciones de campo inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares. La finalidad del estudio es encontrar una ecotecnia de establecimiento eficiente para *Y. filifera* que incluya una microcuenca y micorrización en condiciones de campo.

5. Hipótesis

Si las hifas de los HMA en plantas micorrizadas exploran mayor volumen de suelo que las raíces no inoculadas lo que favorece una mayor captación de agua para plantas de *Y. filifera*, la cual es determinante para el éxito del establecimiento; entonces la implementación de una microcuenca permitirá la mejor captación de agua proveniente de la precipitación y por lo tanto las plantas inoculadas de *Y. filifera* presentarán mayores porcentajes de establecimiento que las de plantas no inoculadas o inoculadas sin el empleo de la microcuenca.

6. Objetivo general

Evaluar el establecimiento de plantas de *Y. filifera* inoculada con hongos micorrizógenos arbusculares empleando una microcuenca de captación pluvial en una parcela del municipio de Tezontepec de Aldama, Hidalgo.

6.1 Objetivos particulares

- Caracterizar el desarrollo de plantas micorrizadas y no micorrizadas durante un ciclo anual en condiciones de campo.
- Determinar el efecto de una microcuenca de 1 m x 1 m y 20 cm de profundidad como técnica que facilite el crecimiento y desarrollo de *Y. filifera* en condiciones de campo.
- Relacionar el desarrollo de *Y. filifera* y los parámetros meteorológicos de la zona de estudio.
- Estimar la tasa de crecimiento relativo de *Y. filifera* micorrizada y no micorrizada y con la presencia de la microcuenca y sin esta última.

7. Zona de estudio

El municipio de Tezontepec de Aldama, Hgo., se localiza a 80 km de la ciudad de Pachuca. Con respecto a su ubicación geográfica, las coordenadas son 20°11'35" lat N y 99°16'24" long W, a 2100 metros de altitud.

Colinda al noroeste con el municipio de Chapantongo; al norte con el municipio de Chilcuautla, al oriente con los municipios de Mixquiahuala y Tlahuelilpan, al sur con Tlaxcoapan y Tula de Allende y al poniente con Tepetitlán.

Presenta generalmente un clima semiseco templado, registra una temperatura media anual de alrededor de los 16.6 °C, una precipitación pluvial de aproximadamente 500 milímetros por año, y el período de lluvias es de mayo a octubre.

La flora es principalmente de matorral espinoso, del tipo crassicaulescente, con elementos introducidos de pino, pirul, casuarina, sabino y aguacate. A la orilla de los ríos y manantiales se encuentran mezquites y árboles exóticos como durazno, higo, capulín, mora y granada. Entre la flora de tipo doméstico se puede encontrar además, árboles de manzano, limoneras, rosales, y algunas otras plantas de ornato.

Su fauna silvestre está compuesta sólo por pequeños animales, como tlacuaches, zorrillos, liebres, conejos, ardillas, serpientes coralillo y de cascabel, pájaros de diferentes especies y algunas otras aves cantoras, lagartijas, camaleones, ratones de campo, insectos y una gran variedad de arácnidos. En cuanto a la doméstica, se compone principalmente de perros, gatos, pollos, cerdos, cabras, borregos y caballos.

El tipo de suelo que existe es de origen Mesozoico, de tipo semidesértico. Su uso es principalmente agrícola en más de un 70%, siguiéndole el de agostadero cercano al 30%. Por lo que respecta a la tenencia de la tierra la mayor parte es pequeña propiedad y sólo una pequeña parte es ejidal. La edafología del lugar es Phaeozem 49.36%, Leptosol 24% y Vertisol 12% (INAFED, 2010)

De acuerdo al Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos del INEGI en 2005, el uso de suelo del municipio se clasificaba de la siguiente manera:

Tabla 2. Usos de suelo en el municipio de Tezontepec de Aldama.

Superficie	(km ²)
Árboles plantados, 2009	6400
Superficie continental, 2010	163.22
Superficie de agricultura, 2005	121.23
Superficie de pastizal, 2005	12.83
Superficie de bosque, 2005	2.16
Superficie de matorral xerófilo, 2005	5.75
Superficie de vegetación secundaria, 2005	17.60
Superficie de áreas urbanas, 2005	3.65

Tezontepec de Aldama carece de bosques, y los programas forestales que se han aplicado para el desarrollo de este recurso, no han alcanzado la recuperación de áreas verdes y mejoramiento del medio ambiente; esto debido principalmente a la falta de previsión y a la nula participación de la población en los trabajos de mantenimiento y cuidado de las plantas sembradas. Esta problemática se incrementa debido a problemas existentes respecto a la titularidad de la tenencia de la tierra, que dificulta el aprovechamiento de áreas susceptibles de cultivar, aunado a la falta de un Vivero Municipal que genere la autosuficiencia en la generación de plántulas para fortalecer los programas de forestación y reforestación municipal.

Por su parte el crecimiento de la población, ha generado entre otras cosas un importante desequilibrio ecológico, ya que se concentra en un marcado déficit hidrológico, contaminación de cuencas, aire y suelo; erosión y cambio de suelo, así como la insuficiencia de infraestructura y servicios urbanos adecuados a las características del municipio.

La parcela de estudio (mostrada en la Figura 5) se ubica en las coordenadas 20°12'4.8" latitud norte y 99°16'54.2" longitud oeste, a una altitud aproximada de 2140 metros sobre el nivel del mar; dentro del Valle de Mixquiahuala, un componente del Valle del Mezquital, en la Granja Integral de Policultivo de Tezontepec de Aldama. Dentro de la Granja se llevan a cabo la crianza y reproducción de diferentes especies de peces; así como la siembra de frutas y hortalizas como durazno, fresa, limón, melón, tomate, lechuga, espinaca, calabaza, granada y ciruelos, etc. con fines productivos y económicos.

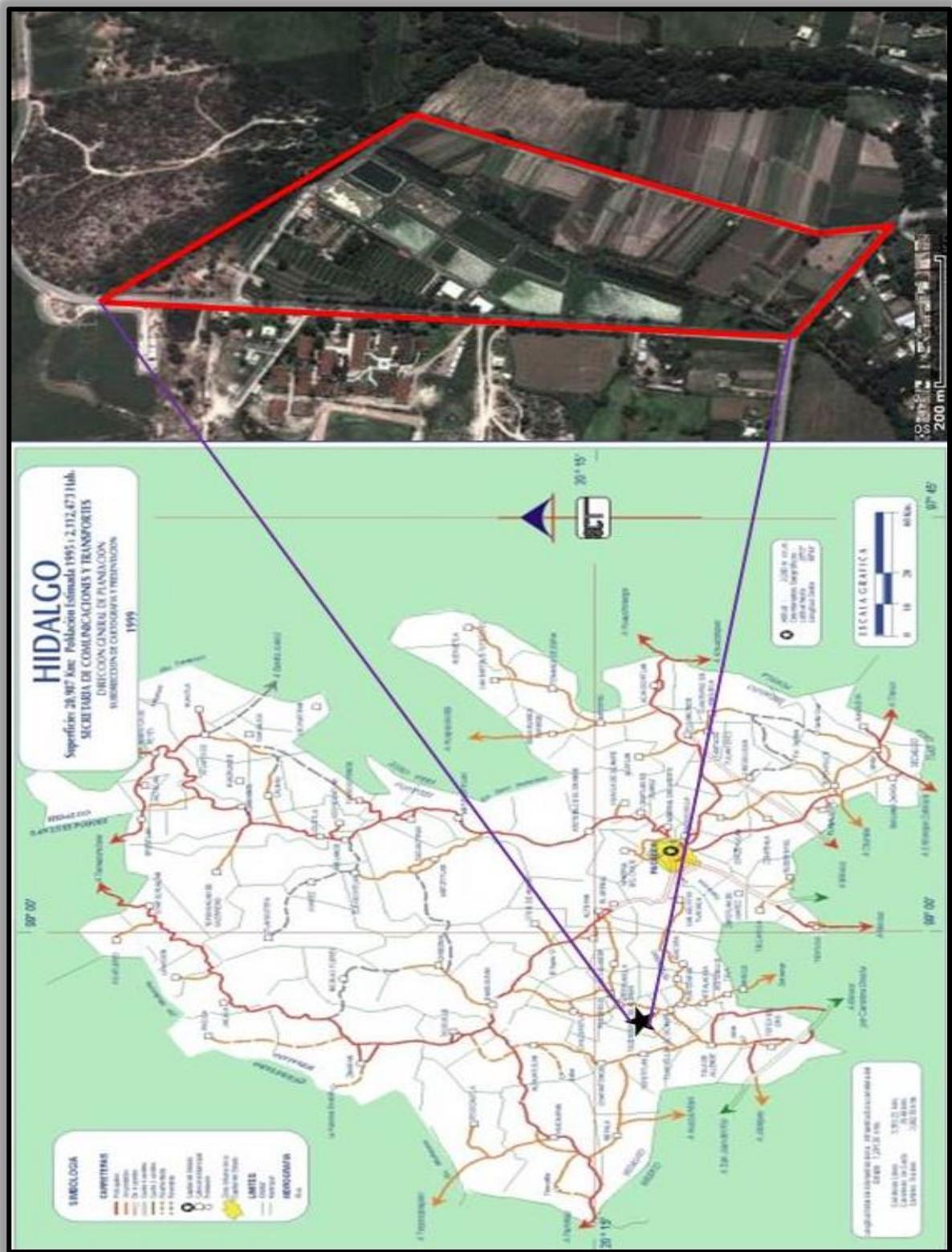


Figura 5. Mapa de la zona de estudio. Graja Integral de Policultivo de Tezontepec de Aldama, Hgo.Fuente: Google maps¹ (2014).

Las semillas de *Y. filifera* se recolectaron en el Valle de Actopan, Hgo, en octubre de 2009. Éstas se almacenaron en un refrigerador a 5°C y para el estudio se colocaron en una cámara a 25°C en cajas Petri con agar al 2% (p/v) para llevar a cabo su germinación. Ya que la radícula presentó 5 cm de longitud se procedió al trasplante, esto ocurrió una semana y media después de la germinación.

Las especies de *Y. filifera* se inocularon con esporas y suelo que se recolectaron en la rizósfera de *Bouteloua gracilis*, en el Parque “Cubitos”, en Pachuca, Hidalgo. El inóculo micorrizógeno usado para *Y. filifera* se compone por los morfotipos listados en la Tabla 3 (Chimal *et al.*, 2009).

Tabla 3. Diversidad de esporas en el inóculo micorrizógeno utilizado para las plántulas de *Y. filifera*.

Morfotipo	Proporción	Densidad de esporas
<i>Glomus</i> sp1 blanco a amarillo paja aprox. 120µ (aff. <i>Mosseae</i>)	36.7%	105
Esporas sin hifa blanco con tintes amarillentos (quizás <i>Acaulospora</i> p1)	8.04%	23
<i>Glomus</i> sp2 amarillo aprox. 100µ	9.09%	26
<i>Glomus</i> sp3 color naranja brillante aprox. 120µ	13.27%	38
<i>Glomus</i> sp4 color amarillo-naranja	5.24%	15
<i>Acaulospora</i> sp2 naranja aprox. 105µ	5.24%	15
Esporas naranja aprox. 65µ	2.5%	7
<i>Glomus</i> sp5 naranja-rojizos aff. <i>Geosporum</i>	9.44%	27
<i>Glomus</i> sp6 rojo muy pequeño	3.5%	10
<i>Gigaspora</i> amarillo-pálido 350µ (aff. <i>Ramisporephora=margarita</i>)	3.15%	9
<i>Acaulospora</i> sp3	3.85%	11
11 morfotipos en total	100%	286

Para la inoculación de las plántulas de *Y. filifera* se ocuparon 100 g de suelo con esporas por planta y se introdujo en la parte media de las macetas de 7 cm de diámetro y 30 cm de altura; el sustrato fue esterilizado y se conformó con 2 partes en volumen de arena sílica mediana y 1 de suelo del Valle de Actopan, Hgo. En julio del 2010 se inició el cultivo conjunto de *Y. filifera* y hongos micorrizógenos arbusculares, con riego a capacidad de campo cada semana, dicho proceso tuvo un periodo de duración de un año en condiciones de invernadero.

8. Método

8.1 Trabajo en campo

8.1.1 Construcción de microcuencas

En la zona de estudio se construyeron 20 microcuencas de 1 m de largo por 1 m de ancho y aproximadamente 20 cm de profundidad, en las cuales las paredes tenían una ligera inclinación, lo cual permite el escurrimiento de agua para el mejor aprovechamiento de ésta por parte de la planta, justo como la que se muestra en la Figura 6.

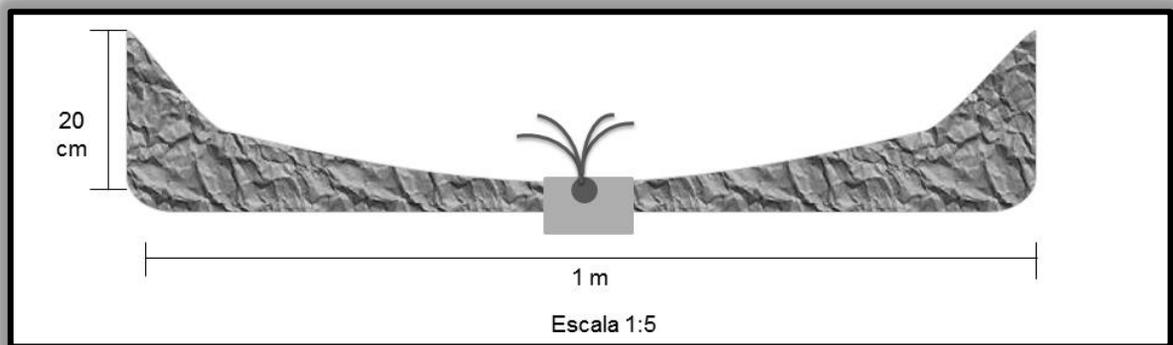


Figura 6. Modelo de microcuenca de captación pluvial.

8.1.2 Trasplante a campo

Se trasplantaron 2 lotes de plantas de *Y. filifera*, uno micorrizado y otro sin micorrización, a la zona de estudio. Se colocaron 10 individuos micorrizados y 10 no micorrizados en los micrositos; mientras que los testigos (parcela sin microcuenca) contaban con 10 individuos micorrizados y 7 sin micorrización.

Las plantas fueron distribuidas de manera homogénea a través de la zona de estudio, se colocaron 20 plantas de *Y. filifera* en las microcuencas (10 micorrizadas y 10 no micorrizadas), mientras que se colocaron 17 plantas a nivel de ras de suelo. La distribución quedó como se observa en la siguiente Figura:

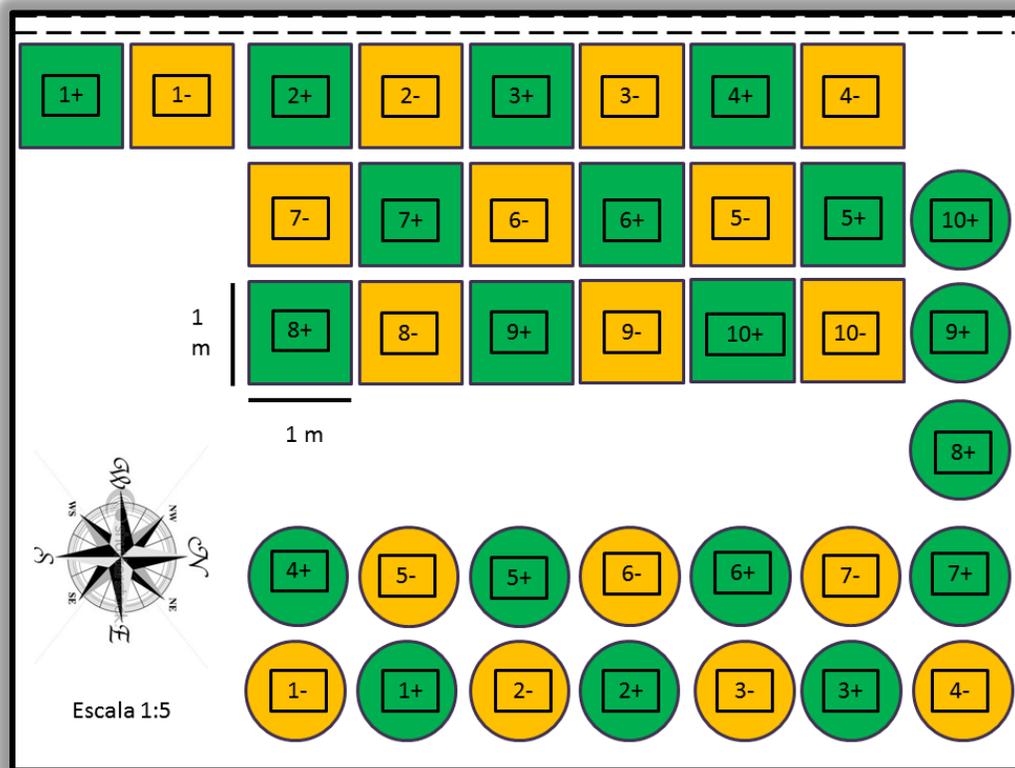


Figura 7. Distribución de las plantas en la zona de estudio. Los signos más (+) indican que es una planta micorrizada; mientras que el signo menos (-) de plantas no micorrizadas. Los cuadros representan las microcuencas y los círculos aquellas plantas sin microcuenca.

8.1.3 Registro de parámetros climáticos

Durante el periodo correspondiente a diciembre de 2011 y hasta noviembre de 2012 se registraron los parámetros de temperatura y precipitación; para esto se utilizó una estación meteorológica Vantage Pro2 Plus Inalámbrica Marca: Davis instruments Modelo: 06162, con sensor de rayos uv y radiación solar.

Los parámetros se registraron mediante el Software "Weatherlink. Data logger & software for Vantage Pro 2" marca: Davis Instruments; modelo: 06510SER.

8.2 Trabajo en laboratorio

8.2.1 Análisis de propiedades físicas y químicas del suelo

En la zona de estudio, se realizó el muestreo en el mes de octubre, que corresponde a la época de lluvias. Fueron tomadas muestras de 1 kg de suelo a una profundidad de aproximadamente 30-40 centímetros al principio y al final de la serie de micrositios construidos en la zona donde se hallaban yucas con microcuencia, yucas con nodriza y mezquites. Este muestreo se realizó en un solo día de octubre y se colectó en cada marca mostrada en la Figura 8.

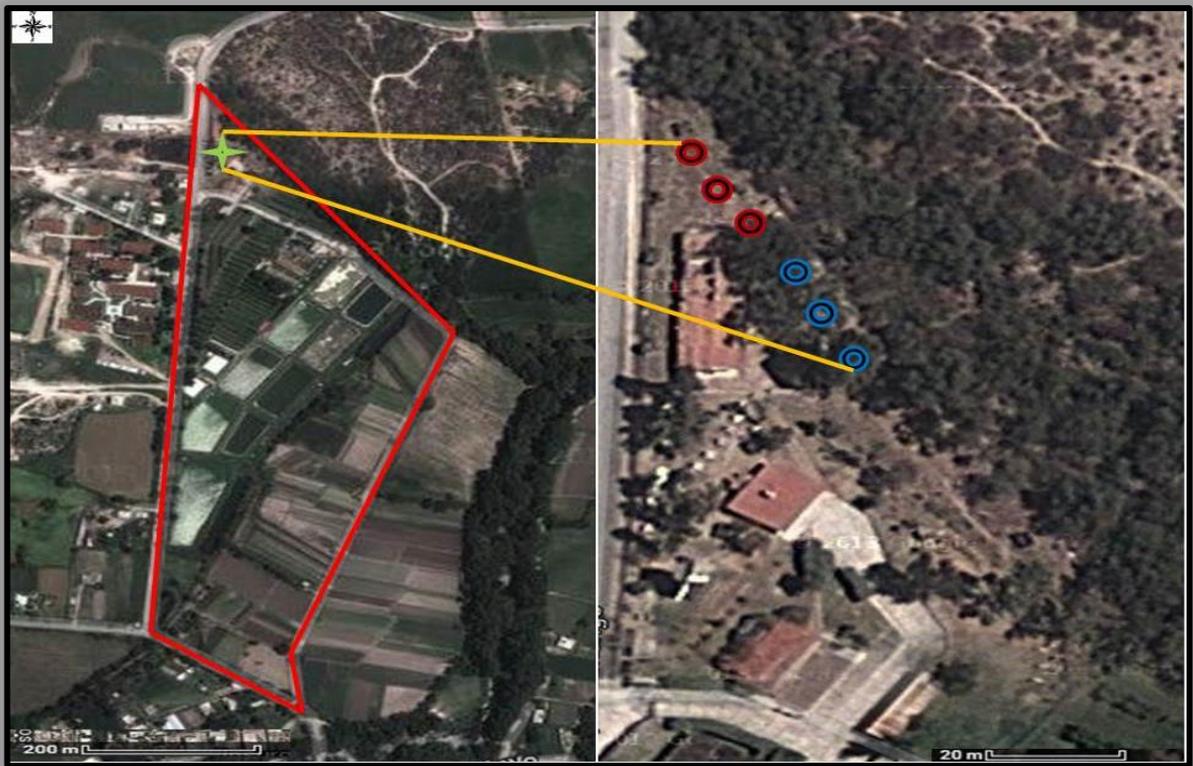


Figura 8. Zonas de muestreo de suelo (marcadas con rojo) para realizar análisis de propiedades físicas y químicas. Fuente: Google maps¹, 2014.

Posteriormente se realizó el análisis de las propiedades físico y químicas (con 3 repeticiones), tales como textura, densidad aparente, densidad real, pH, materia orgánica, fósforo y nitrógeno total, las cuales se relacionan con la presencia de hongos micorrizógenos arbusculares. Las pruebas se realizaron empleando como referencia lo descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. En la siguiente tabla se enlistan los análisis llevados a cabo.

Tabla 4. Pruebas físicas y químicas realizadas a las muestras de suelo.

Parámetro	Metodología
pH	1:2 (suelo:H ₂ O) Potenciómetro
Textura	Procedimiento de Bouyoucos
Densidad aparente g/cm ³	Método de la probeta
Densidad real	Procedimiento de Pícnómetro
CE dSm ⁻¹	Conductivímetro
Nitrógeno total (%)	Método semimicro- Kjeldhal
Materia orgánica (%)	Método Walkley y Black
Fósforo (%)	Olsen

8.2.2 Conteo de esporas

La extracción de las esporas de HMA del suelo es mediante la técnica de tamizado vía húmeda descrita por Gerdemann y Nicolson (1963) con modificaciones.

Se pesaron 100 g de suelo, y se colocó en una probeta de 1000 ml, se adicionó agua de la llave hasta cubrir $\frac{3}{4}$ de la capacidad del recipiente. Mediante un agitador eléctrico se movió la mezcla durante 3 min para romper los agregados y raíces para liberar las esporas. Se detuvo la agitación y se dejó reposar 30 segundos para que sedimenten las partículas de suelo, luego la suspensión se filtró a través de una serie de tamices de distinta apertura de malla acoplados de mayor a menor (1000 μ , 500 μ y 44 μ). Este proceso se repitió dos veces más.

La muestra fue adicionada a tubos de centrifuga, se adicionó agua para llenar el tubo y se taparon. Se realizó una centrifugación durante 7 minutos a 2000 rpm, luego se decantó el contenido del tubo que contiene la muestra a analizar, el suelo que quedo en el tubo fue re suspendido con una solución de sacarosa al 50% y nuevamente centrifugado durante 3 minutos a 1000 rpm, al término cada tubo se decantó en un tamiz de 44 μ . La muestra del tamiz fue lavada al chorro de agua de la llave para eliminar la solución de azúcar de las esporas de los HMA, posteriormente la muestra se recuperó en cajas Petri con cuadrículas de 0.5 cm x 0.5 cm, bajo un microscopio de disección se realizó el conteo de esporas.

8.2.3 Humedad del suelo

Se tomaron al azar cinco muestras de suelo mediante unos tubos de cobre. El tubo de cobre de un solo movimiento se metió en el suelo para que se llenara de sustrato; luego con la ayuda de una navaja se sacó e inmediatamente fueron sellados para evitar la pérdida de humedad y se etiquetaron debidamente.

Los tubos de cobre se pesaron sin las etiquetas ni plásticos y se metieron a la estufa, donde se secaron durante 48 horas a 65° C. Una vez transcurrido el tiempo se pesó el tubo con el sustrato; pasando otras 24 horas se volvió a pesar; esto se repitió hasta que se llegó a un peso constante. Una vez el tubo presentaba esta condición, se pesó el tubo con los plásticos y se determinó el porcentaje de humedad de cada tubo (NOM-021-RECNAT-2000).

8.2.4 Registro de variables de respuesta

Mensualmente se dio seguimiento a su crecimiento tanto en altura y diámetro, así como la supervivencia. Las variables registradas fueron altura máxima, diámetro máximo y mínimo, y número de hojas durante un año. Al término del ciclo anual se calculó el porcentaje de supervivencia y la tasa relativa de crecimiento en relación a la altura.

Para registrar la altura máxima, se tomó como referencia la altura a la que las plantas llegaban sin tener que estirar sus hojas, mientras que para la cobertura se midió el diámetro mayor y el menor de cada planta, pasando el eje por el centro geométrico de la planta y se empleó la siguiente fórmula:

$$Cobertura = \pi \left(\frac{\text{Diámetro máximo} + \text{Diámetro mínimo}}{4} \right)^2$$

Cuando se realizó el registro del número de hojas se tomó en cuenta las hojas que se encontraban con tonalidades de verde a rojizas, aquellas que se veían secas fueran descartadas en el registro.

La supervivencia se registró de manera absoluta, unidades vivas y unidades muertas, sin embargo éstas podían rebrotar, lo cual se registraba mes con mes.

La tasa relativa de crecimiento de las plantas (TCR), se calculó a partir de la altura máxima de las plantas al inicio y al final del ciclo anual en condiciones de campo. Se utilizó el modelo de crecimiento exponencial, el cual describe adecuadamente el desarrollo vegetal (Charles-Edwards *et al.*, 1986). La fórmula empleada fue la siguiente:

$$TCR = [\ln(\text{altura final}) - \ln(\text{altura inicial})] / [\text{tiempo (días)}]$$

Por lo que las unidades de la tasa de crecimiento son: t^{-1} .

8.3 Trabajo de gabinete

Se realizó un promedio de los datos registrados durante todo el experimento. Para obtener este promedio de cada parámetro se emplearon diversas técnicas.

- a. Altura. Promedio aritmético de las alturas registradas mensualmente de las plantas micorrizadas y no micorrizadas.
- b. Número de hojas. Promedio aritmético de la cantidad de hojas por cada individuo micorrizado por mes, del mismo modo el tratamiento no micorrizado.
- c. Cobertura media (Cm). Suma del diámetro mayor más el diámetro menor entre 4, elevado al cuadrado por 3.1416, es decir:

$$Cm = \left(\frac{\text{diámetro mayor} + \text{diámetro menor}}{4} \right)^2 * 3.1416$$

para cada planta micorrizada, después sumar los resultados obtenidos de la fórmula y dividirlo entre el número de individuos que están vivos en ese mes. Esto se aplica para las plantas no micorrizadas y para cada mes.

- d. Supervivencia. Tomar en cuenta solo los datos registrados en el último mes y contar las plantas que estén vivas al final del experimento y esto pasarlo a porcentaje (%).

- e. TCR. Se calculó a partir de la altura máxima de las plantas al inicio y al final del ciclo anual.

8.3.1 Diseño experimental

El diseño experimental del trabajo de campo consistió en un análisis de varianza de dos factores como puede verse en el cuadro 1, micorrización (con y sin inóculo micorrícicos) y cosecha de agua (con y sin microcuenca).

Cuadro 1. Diseño experimental del proyecto.

Cosecha de agua Micorrización	Con microcuenca	Sin microcuenca
Micorrizadas	10 repeticiones	10 repeticiones
Sin micorrizas	10 repeticiones	7 repeticiones

Los datos se procesaron mediante la prueba de ANOVA (paramétrica o no de acuerdo a la distribución de frecuencias de datos) de 2 factores (micorrización y cosecha de agua), empleando al lote no micorrizado sin microcuenca como control.

Finalmente, se hizo un análisis comparativo de las técnicas de establecimiento vegetal inducido por la micorrización contra los testigos no micorrizados, así mismo un análisis de plantas con micrositio contra plantas sin micrositio a fin de determinar un modelo práctico de rehabilitación ecológica de la vegetación en ecosistemas semiáridos deteriorados para *Y. filifera*.

9. Resultados

- Análisis de propiedades físicas y químicas del suelo

Los resultados del análisis físico y químico de la muestra compuesta de suelo de la parcela experimental y las zonas aledañas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del análisis físico y químico del suelo.

Parámetro	Suelo de Parcela de Hidalgo
pH	7.83 (alcalino)
Textura	Franco/ arenoso
Densidad aparente g/cm ³	1.173
Densidad real	2.63
CE dSm ⁻¹	0.19
Nitrógeno total (%)	7.46 (bajo)
Materia orgánica (%)	0.537 (bajo)
Fósforo (%)	10.9 (medio)

- Registro de variables de respuesta

En la Figura 9, se muestra la supervivencia de *Y. filifera* en los tratamientos micorrizado y no micorrizado con presencia y ausencia de microcuenca. Puede observarse que *Y. filifera* inoculada con hongos micorrícicos arbusculares dentro de una microcuenca presentó un mayor porcentaje de supervivencia con un 100%, en comparación de *Y. filifera* sin inocular o sin microcuenca, los cuales presentaron 0% y 70%, respectivamente. Estadísticamente existe diferencia entre el tratamiento no micorrizado sin microcuenca en comparación con los otros tratamientos con un índice de confianza del 95%.

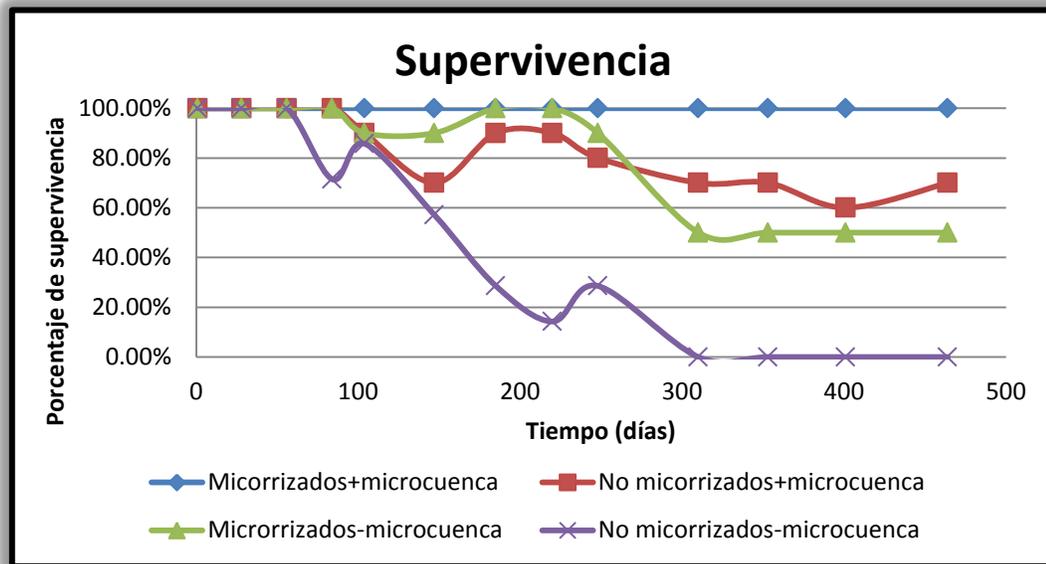


Figura 9. Porcentaje de supervivencia promedio para cada tratamiento evaluado a los 464 días de trasplante de *Y. filifera*.

Como puede observarse en la Figura 10, *Y. filifera* inoculada con HMA dentro de la microcuena de captación pluvial sobrevivió y presenta un aspecto saludable, a diferencia de las no micorrizadas (b), las micorrizadas sin microcuena (c) y las no micorrizadas sin microcuena (d); las cuales en su mayoría no sobrevivieron; o en caso de haberlo hecho mostraban claros signos de estrés hídrico.



Figura 10. Aspecto de *Y. filifera* en sus diferentes tratamientos (a) inoculada en microcuena, (b) sin inocular en microcuena, (c) inoculada sin microcuena y (d) sin inocular sin microcuena.

En la Figura 11, se representa el número de hojas, donde el tratamiento inoculado con hongos micorrícicos arbusculares empleando una microcuenca de captación pluvial obtuvo un promedio de 10 hojas, este dato está muy por encima de los demás tratamientos, donde el máximo se encuentra en el tratamiento micorrizados sin microcuenca con un promedio de 3 hojas. El número de hojas al final del experimento se muestra en la Figura 12.

Estadísticamente existe diferencia significativa entre los tratamientos con microcuenca, en especial el micorrizado con microcuenca y aquellos que no presentan esta última, con un índice de confianza del 95%.

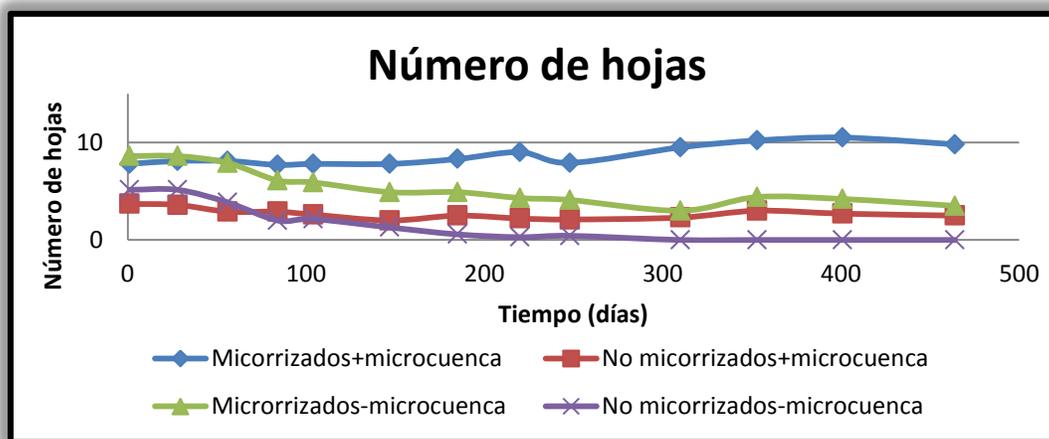


Figura 11. Numero promedio de hojas a los 464 días por cada tratamiento de *Y. filifera*.

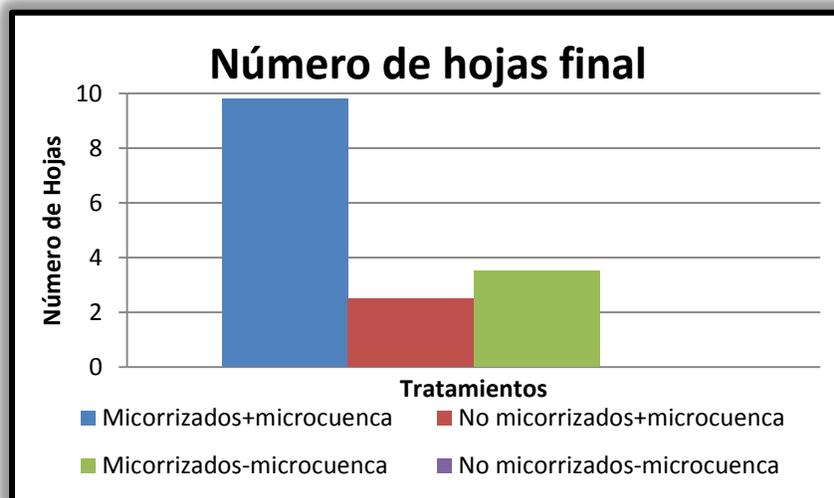


Figura 12. Número de hojas registrado al final del experimento para cada tratamiento de *Y. filifera*.

En la Figura 13 se observa los diferentes tratamientos utilizados y el número de hojas resultante para cada uno. Cabe destacar que las hojas de *Y. filifera* micorrizadas en microcuenca (a) son mayores en número en comparación con los demás tratamientos, muestran un color verde saludable y no se denota estrés hídrico; por otro lado, el tratamiento (b) sin micorrizar en microcuenca presenta un número de hojas muy bajo, con hojas pequeñas.

Contrario a esto las plantas sin inocular y sin microcuenca presentaron un número bajo de hojas, con un color verde pálido o muchas en tonalidades rojizas, lo cual mostraba un claro estrés hídrico.



Figura 13. Número de hojas para las plantas de *Y. filifera*. Incisos (a) y (c) están micorrizadas con y sin microcuenca, respectivamente. Los tratamientos (b) y (d) no están micorrizadas y respectivamente se plantaron en una microcuenca o a suelo plano.

En la Figura 14, se graficó la cobertura de *Y. filifera* M+ y M-, en presencia o ausencia de la microcuenca; este parámetro fue bastante variable a lo largo del ciclo experimental. Aquí se puede considerar que las hifas de los HMA exploraron mayores volúmenes de suelo. En los tratamientos micorrizados se observó que la cobertura es mayor en comparación con los tratamientos no micorrizados. Estadísticamente el tratamiento micorrizado y uso de microcuenca presenta una cobertura mayor comparado con los tratamientos en los cuales no hay uso de la microcuenca, sin importar que las plantas se encuentren micorrizadas o no.

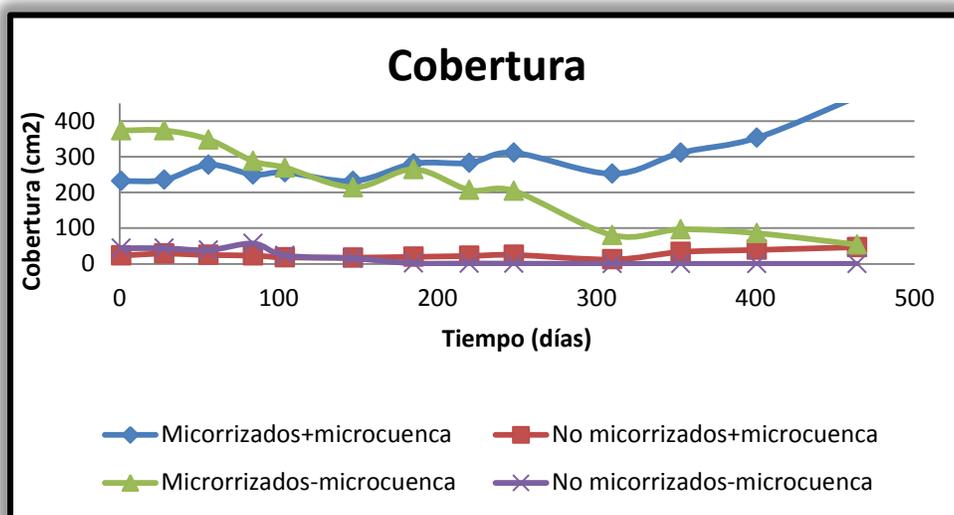


Figura 14. Cobertura promedio presente después de 464 días para cada uno de los tratamientos.

En la Figura 15 se puede observar la cobertura de los distintos tratamientos, siendo el tratamiento inoculado en microcuenca (a) el que presenta una cobertura mayor en comparación con los demás tratamientos (b), (c) y (d). Cabe destacar que este parámetro fue oscilando bastante durante el experimento, debido principalmente a la herbivoría que presentaban la gran mayoría de los individuos de *Y. filifera* por la presencia de conejos o liebres en la zona de estudio.



Figura 15. Cobertura en tratamientos donde se emplean HMA y microcuenca (a), sin microcuenca (b), tratamiento sin HMA en microcuenca (c) y sin esta (d).

En la Figura 16, se muestra la altura promedio de las plantas de *Y. filifera* empleando una microcuenca de captación pluvial en sus dos tratamientos con HMA (M+) y sin HMA (M-), observándose que el tratamiento M+ con microcuenca al inicio de su trasplante presentaba una altura de 11 cm y en el transcurso de su establecimiento fue aumentando hasta 24 cm. Esta altura es mayor que la del tratamiento M- sin microcuenca que tiene un promedio de 0 cm al final. Los tratamientos sin microcuenca son significativamente diferentes, con una confianza del 95%, al tratamiento de organismos micorrizados trasplantados a una microcuenca de captación pluvial, favoreciendo a estos.

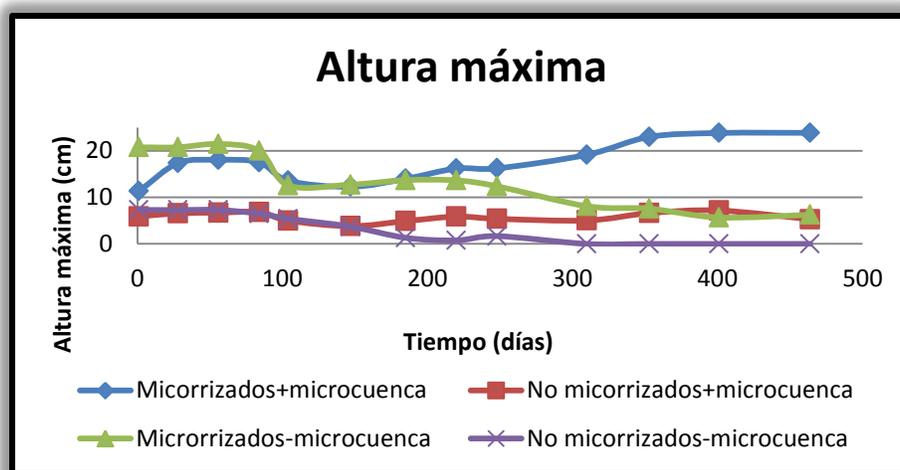


Figura 16. Altura máxima promedio de plantas de *Y. filifera* en cuatro tratamientos al término de 464 días.

En la Figura 17, se muestra la altura que llegaron a tener las plantas de cada tratamiento, siendo aquellas inoculadas en microcuenca las que presentaron una mayor altura (a); por otra parte, el tratamiento (c) también muestra un aumento de la altura, sin embargo, éste es menor en comparación con el primer tratamiento. Para el tratamiento (b) y (d) la altura máxima fue menor en comparación con los otros tratamientos, como puede observarse en la Figura siguiente.



Figura 17. Altura máxima en plantas de *Y. filifera* con cada tratamiento. (a) y (c) tratamientos micorrizados trasplantados a microcuenca y suelo plano, respectivamente; (b) y (d) no micorrizados trasplantados a microcuenca y suelo plano, respectivamente.

En la Figura 18, se observa la TCR para cada tratamiento de *Y. filifera*, donde los tratamientos no micorrizados presentan tasas negativas y un declive en el crecimiento de los organismos. Por el contrario, el tratamiento M+ aunado a la microcuenca permitió que la tasas de crecimiento sea mayor en comparación con el resto de tratamientos. De manera estadística se observa una diferencia significativa al 95% de confianza entre la tasa de crecimiento relativo de los organismos micorrizados y trasplantados a una microcuenca en comparación con aquellos que, a pesar de estar micorrizados no se trasplantaron a una microcuenca.

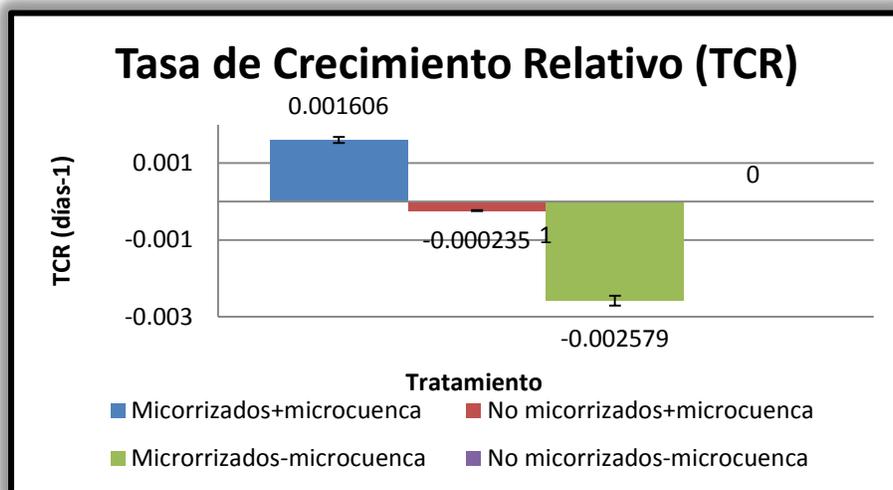


Figura 18. Tasa de crecimiento relativo (TCR) para cada tratamiento evaluado.

En la Figura 19, se puede observar la humedad que presentó el suelo durante el desarrollo del experimento, haciendo un énfasis sobre la época de secas y lluvias.

Cabe destacar que en la época de lluvias, la cual abarca los meses de mayo-agosto, el suelo presenta una mayor humedad, lo cual beneficia a las plántulas a poder establecerse y desarrollarse; no obstante, el número de esporas presente disminuye en esta época, debido a la gran disponibilidad de agua para la vegetación del sitio, incluyendo las plantas de *Y. filifera*.

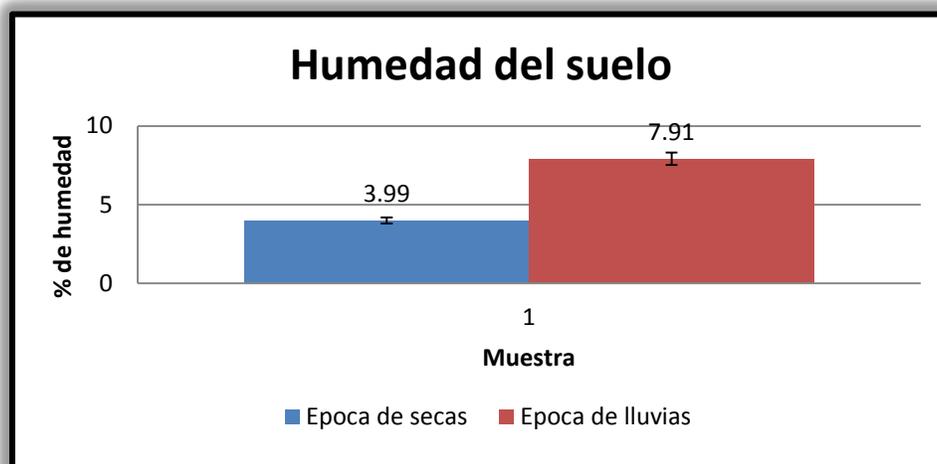


Figura 19. Porcentaje de humedad presente en el suelo de la zona de estudio para cada época del año.

Como muestra la Figura 20, en el número de esporas promedio contabilizado por muestra de suelo, no existe una diferencia significativa en alguna de las muestras, sin importar la época del año; con excepción de la última muestra, donde las desviaciones nos denotan una tendencia a observar un número mayor de esporas en la época seca en comparación con la de lluvias.

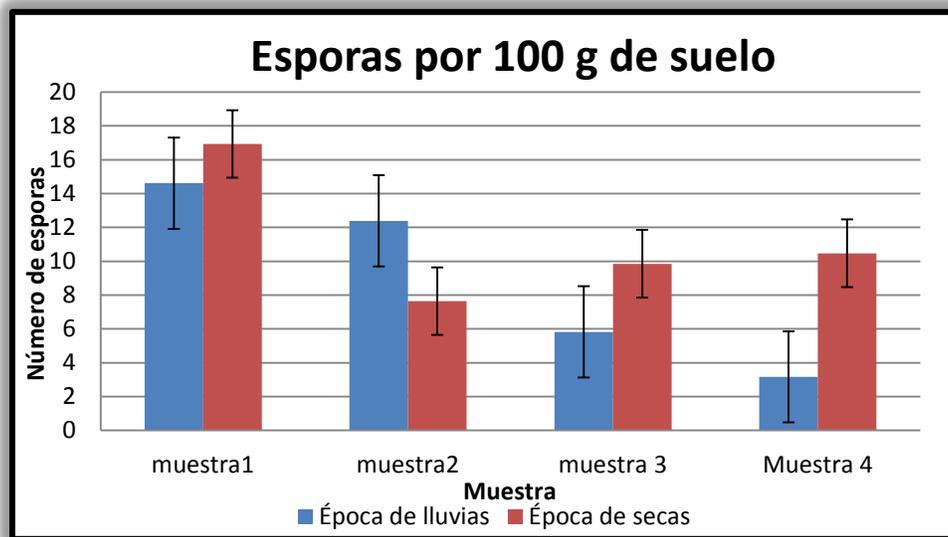


Figura 20. Promedio de esporas contabilizadas para cada época del año en el suelo de la zona de estudio.

En la Figura 21, se observan los resultados del registro de temperatura y precipitación por la estación meteorológica instalada en la zona de estudio. En este grafico la temperatura media mensual más alta fue de 18°C con una mínima de 11°C, la precipitación es escasa, siendo en los meses de mayo-agosto los que presentaron precipitaciones constantes.

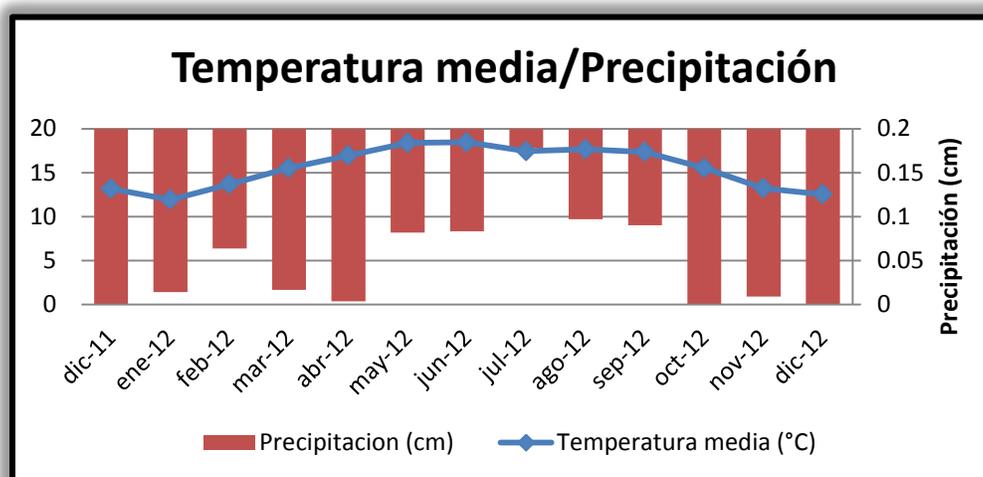


Figura 21. Registro de precipitación y temperatura media de la zona de estudio.

10. Discusión

Como puede observarse en la Tabla 5, el suelo analizado presenta un pH alcalino característico de la zona, un contenido de materia orgánica bajo de acuerdo con la NOM-021, exhibiendo una cantidad reducida de nutrimentos y por lo tanto menor disposición de los mismos para el crecimiento de las plantas; esta característica es constante en la gran mayoría de los suelos de zonas áridas en México. La concentración de nitrógeno, de acuerdo a la NOM-021, también es baja, por lo que se presupone que las plantas inoculadas con micorrizas absorbieron los nutrimentos, debido a que estos microorganismos pueden influir sobre la absorción de minerales para el desarrollo de la planta, directamente por colonización de la raíz y modificar su estructura (longitud de área radical) o bien puede inducir indirectamente, modificando el ambiente del suelo alrededor de la rizósfera (Cruz, 2006). El contenido de fósforo en el suelo presentó una concentración media de acuerdo a la NOM-021, siendo este elemento clave para satisfacer las necesidades de crecimiento y establecimiento de las plantas (Khasawneh, 1980; Singh y Kapoor, 1999) a través de los HMA la raíz absorbe el fósforo de la solución del suelo. Así pues los HMA también participan en la formación de suelo, no solo por solubilizar minerales y aportar nutrientes como el N y P (Smith *et al.*, 2004; Ravson y Jacobsen, 1995), sino por aporte de exudados que forman el complejo órgano-mineral (Gaur y Adholeya, 2004).

En la figura 9, se graficó la supervivencia de *Y. filifera* en los diferentes tratamientos. Donde *Y. filifera* inoculada con HMA y trasplantada a una

microcuenca de captación pluvial fue superior a los demás tratamientos, superando inclusive a los organismos del tratamiento que solo tenían HMA, los cuales presentaron una supervivencia de 50%; a diferencia de esto, el tratamiento sin HMA y sin microcuenca presentó una supervivencia de 0%. Estadísticamente encontramos diferencias significativas para el empleo de HMA en una microcuenca (Tabla 6), orillando a las plantas a incrementar la eficiencia de su sistema radical cuando se encuentran asociadas simbióticamente con los hongos micorrizógenos arbusculares, esto por medio de la extensión de las hifas extra radicales de la micorriza, promoviendo un incremento del área de absorción (nutrimentos y agua) y la exploración de un volumen mayor de suelo en comparación con lo que normalmente podría alcanzar el crecimiento de la raíz por sí mismo (Lynch, 1990; Bonfante *et al.*, 2004). Así pues, el empleo de una microcuenca puede brindar una temperatura y humedad que permiten a las plantas el aumento de su supervivencia.

En la Figura 12, se graficó el número de hojas al final del experimento, siendo el tratamiento de organismos micorrizados y trasplantados a una microcuenca el que estadísticamente es diferente a los demás. Las hojas de *Y. filifera* son comestibles para los animales como conejos, liebres e insectos, todas las plantas presentaban mordidas de algunos herbívoros, no obstante los organismos sin inóculo micorrícico ni microcuenca no lograron reponerse, quedando expuestas a las adversidades del campo. Por otro lado *Y. filifera* con inóculo en una microcuenca reacciono a la pérdida de hojas con un aumento en el crecimiento de la misma y un efecto estimulante en la producción de biomasa, ya que la formación de la simbiosis micorrícica sirve de defensa contra patógenos y herbívoros (Newsham *et al.*, 1995), esto debido a que se elaboran sustancias como alcaloides, flavonoides, rafidios (cristales de oxalato de calcio en forma de aguja), quinonas y terpenos (Braekman *et al.*, 1998; Camargo-Ricalde, 2002).

Aunque el papel de las micorrizas es semejante en diferentes ecosistemas, la asociación entre las plantas y los hongos micorrícicos es particularmente importante en ambientes áridos, ya que las micorrizas de tipo arbuscular contribuyen al suministro hídrico de la vegetación, lo cual es vital para la supervivencia en zonas donde la disponibilidad de agua para las plantas es el factor más limitante de su desarrollo (Varma 1999). Esto puede demostrarse en la tasa de crecimiento de los organismos que están trasplantados en una microcuenca de captación pluvial (Figura 18), pues ambos no presentan diferencia significativa; en cambio, los tratamientos sin microcuenca son estadísticamente distintos y se ven afectados en su crecimiento, siendo estos organismos los que crecieron menos durante el experimento.

El empleo de una microcuenca artificial de captación pluvial se considera como el método más económico y viable para el establecimiento vegetal; la cobertura de las plantas (Figura 14) que se encontraban en microcuencas es estadísticamente distinta en comparación con los organismos trasplantados a ras de suelo; beneficiando a los primeros en la cobertura que presentan.

Tomando en cuenta lo anterior, es necesario considerar otras alternativas como es el caso del sistema de riego con microcuencas de captación pluvial, el cual presenta alta eficiencia y puede ser adaptado a estas zonas; este beneficio se muestra en la altura máxima de las plantas trasplantadas a una microcuenca (Tabla 6), la cual es estadísticamente significativa en comparación con los organismos que no estaban en una microcuenca, como se observa en la Figura 17.

Se recomienda hacer un registro del crecimiento de los individuos utilizados en la recuperación de la cubierta vegetal, así como registrar los daños relacionados con herbivoría que pudieran sufrir los organismos utilizados, pues estos daños se relacionan con un establecimiento tardío de los especímenes y un pobre desarrollo.

Como recomendaciones a considerar en este experimento podemos mencionar:

- a) Captar si existe diferencia significativa en la humedad de las microcuencas y las que se encuentran sin microcuenca; esto para reforzar la hipótesis de que la microcuenca de captación pluvial es un factor determinante en el establecimiento vegetal en programas de restauración ecológica.
- b) Evitar la micorrización azarosa de otros vegetales pertenecientes al grupo control.
- c) Medir la colonización micorrícica al final del experimento, a pesar de que esto puede dañar a las plantas.

Sin embargo, en la actividad científica no se pueden controlar todas las variables de un experimento; más aún cuando se tratan de experimentos que son extrapolados a universos más complejos que un laboratorio con la mayoría de sus condiciones controladas. El distribuir a los organismos de los diferentes tratamientos permite que la heterogeneidad ambiental de tratamientos se reparta en toda la comunidad; en la naturaleza los organismos no se encuentran aislados unos de otros, más bien se relacionan entre ellos y con el ecosistema.

Tabla 6. Sinopsis de resultados en los diferentes tratamientos llevados a cabo en el experimento.

Parámetro	(M+) con microcuenca	(M-) con microcuenca	(M+) sin microcuenca	(M-) sin microcuenca	Observaciones
Altura (cm)	23.85 ^A	7.56 ^{AB}	13.14 ^{BC}	0.00 ^C	La mayor altura de <i>Y. filifera</i> inoculada y trasplantada en microcuenca está muy por encima de la no micorrizada en microcuenca, pues creció 10 cm más que esta.
Cobertura (cm ²)	468.80 ^A	78.02 ^{AB}	124.85 ^{BC}	0.00 ^C	<i>Y. filifera</i> inoculada con HMA y trasplantada a una microcuenca arrojó una cobertura mayor que las plantas testigos.
Supervivencia (%)	100 ^A	70 ^B	50 ^B	0.00 ^B	Las especies vegetales de <i>Y. filifera</i> presentan una supervivencia significativa, ya que las no micorrizadas sin microcuenca no sobrevivieron.
Numero de hojas	9.80 ^A	3.57 ^{AB}	7.00 ^{BC}	0.00 ^C	El número de hojas es significativamente mayor en aquellas inoculadas con HMA que sin estos.
TCR (d ⁻¹)	0.0016 ^A	-0.0012 ^{AB}	-0.002579 ^B	0.00 ^C	Las plantas micorrizadas sobrevivieron y se desarrollaron con estrategias funcionales ante el estrés hídrico y la herbívora.
Color	Verde bandera en las hojas, en el ápice de las mismas un tono amarillo	Verde limón en las hojas y en la base de las mismas un tono rojizo	Verde limón en las hojas, desde la base hasta la mitad de la hoja un color rojo	Hojas secas	El color de las hojas de <i>Y. filifera</i> es de un tono más oscuro cuando están inoculadas y en una microcuenca.
Turgencia	Hojas rígidas, firmes, gruesas y resistentes al manejo	Hojas suaves, susceptibles de ruptura al contacto	Hojas suaves, frágiles, delgadas y susceptibles de ruptura al contacto	Hojas secas	La turgencia de las hojas micorrizadas y trasplantadas a una microcuenca es un indicio de un mejor balance hídrico en comparación con aquellas sin inocular y sin microcuenca.

Distintas letras muestran diferencias significativas entre tratamientos con $p \leq 0.05$

HMA: hongos micorrizógenos arbusculares

11. Conclusiones

- La micorrización influye de manera significativa en la altura, cobertura, supervivencia, crecimiento y número de hojas de *Y. filifera*.
- El empleo de una microcuenca de captación pluvial influye de manera significativa en la altura, supervivencia, crecimiento, cobertura de *Y. filifera*.
- Se logró establecer un conjunto de individuos de *Y. filifera* mediante el uso de micorrizas mediante el empleo de una microcuenca de captación pluvial en una parcela de Tezontepec de Aldama, Hgo, ya que la supervivencia de esta especie con hongos micorrizógenos arbusculares fue del 100%.
- *Y. filifera* sin micorrizas y sin microcuenca no logró sobrevivir a las condiciones de sequía características de los ambientes semiáridos.
- *Y. filifera* mantiene su desarrollo en cuanto al color de las hojas y su turgencia se vio beneficiado por el empleo de hongos micorrizógenos arbusculares en conjunto con la microcuenca.
- El empleo de técnicas para captar agua como las microcuencas de captación pluvial son una opción económica y viable para promover la supervivencia y desarrollo óptimo de especies nativas en ambientes semiáridos.
- Es recomendable que se utilicen especies nativas micorrizadas como modelo general de establecimiento vegetal en programas de recuperación de cubierta vegetal

12. Referencias

- Aguilera, L., Olalde, V., Arriaga, M., Contreras, R. (2008). Micorrizas Arbusculares. México. Ciencia ergo Sum. 14: 300-306.
- Al-Karaki, G. (2000). Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. Mycorrhiza. 10: 51-54.
- Allen, E. (1995). La restauración de las zonas áridas perturbadas con especial referencia a los hongos micorrícicos. Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos. México. CICY. 167-177.
- Allen, E., Allen, M., Egerton, W., Cordiki, L., Gómez-Pompa, A. (2003). Impacts of early and late-seral mycorrhizae during restoration in seasonal tropical forest. México. Ecological Applied. 13: 1701-1717.
- Allen, E., Allen, M., Helm, D., Trappe, J., Molina, R., Rincon, E. (1995). Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity. Plant and Soil. 170: 47-62.
- Allen, M. (1991). The Ecology of mycorrhizae. Cambridge. Cambridge University Press. 184.
- (1995). Las micorrizas y las rehabilitaciones de suelos áridos perturbados: Procesos y prácticas. Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos. México. CICY. 151-166.
- (2007). Mycorrhizal fungi: Highways for water and nutrients in arid soils. Vadose Zone Journal. 6:291-297.
- Augé, R. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza. 11: 3-42.
- Azcón-Aguilar, C., Palenzuela-Roldán, A., Bautista, S., Vallejo, R., Barea, J. (2003). Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. Applied Soil Ecology. 22: 29-37.
- Barea, J. (1998). Biología de la rizósfera. México. Investigación y Ciencia. 74-81.

- Beena, K., Raviraja, N., Arun, A., Sridhar, K. (2000). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi on the coastal sand dunes of the west coast of India. *Current Science*. 79:1459-1466.
- Bonfante, F., Genre, A., Bianciotto, V. (2004). The colonization Strategies of Arbuscular Mycorrhizal Fungi: An Overview of their Cellular Interactions with Plants and Bacteria. *Avance en el conocimiento de la biología de las micorrizas*. México. Universidad de Guanajuato.
- Braekmann, J., Daloz, D., Pasteels, J. (1998). Alkaloids in animals. *Alkaloids: Biochemistry, Ecology and medicinal applications*. New York. Plenum. 349-78.
- Cabello, M. (1997). Hydrocarbon pollution: its effect on native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *FEMS Microbiological Ecology*. 22: 233–236.
- Camargo-Ricalde, S. (2002). Dispersal, distribution and establishment of arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *México. Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 71: 33-44.
- Caravaca, F., Barea, J., Palenzuela, J., Figueroa, D., Alguacil, M., Roldan, A. (2003). Establishment of shrub species in a degraded semiarid site alters inoculation with native or allocthonous arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*. 22: 103-111.
- Carrillo-García, A., León de la Luz, J., Bashan, Y., Bethlenfalvay, G. (1999). Nurse plants, mycorrhizae, and plant establishment in a disturbed area of the Sonoran Desert. *Restoration Ecology*. 7: 321-335.
- Cavazos, D. (1997). Uso múltiple de los matorrales en el norte de México. *México. Ciencia Forestal en México*. 22(81): 3-26.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México y Agrupación Sierra Madre, S. C.
- Charles-Edwards, D., Doley, D., Rimmington, G. (1986). *Modelling plant growth and development*. Australia. Academic Press Marrickville. 10-14.
- Chimal, E., López, L., García, R. (2009). Obtención de inóculos de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) nativos del Valle del Mezquital,

- Hidalgo. Plantas y Hongos Micorrizas Arbusculares: Un mutualismo esencial en zonas semiáridas. México. 96.
- Corkidi L y Rincon, E. (1997). Arbuscular mycorrhizae in tropical sand dune ecosystem on the Gulf of Mexico. Mycorrhizal status and inoculum potential along a successional gradient. *Mycorrhiza* 7:9–15.
- Cruz, F. (2006). Ecología del suelo: Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Laboratorio de edafología y nutrición vegetal. México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 105.
- Cuenca, G. y M. Lovera. (1994). Vesicular-arbuscular mycorrhizae in disturbed and revegetated sites from La Gran Sabana, Venezuela. *Canadá. Canadian Journal of Botany* 70: 73-79.
- De la Rosa Mera, C. y Monroy, A. (2006). Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. México. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 96-100.
- Domínguez, A. (2009). Ollas de agua, jagüeyes, cajas de agua o aljibes. México. SAGARPA.
- Ferrera-Cerrato, R. (1983). La micorriza vesículo-arbuscular en los diferentes agroecosistemas. La sequía y su impacto. Estado de México. Colegio de Postgraduados. 13-17.
- Frank, A. (1885). Ueber die auf Wurzelsymbiose beruhende Emarhrung gewiser Baume durch unterirdische Pilze. Alemania. *Berichte der Deutsch Botanische Gesellschaft*. 3: 128-145.
- García, M. (1992). Con sabor a Maguey. México. Instituto de Biología y Universidad Nacional Autónoma de México. 9.
- García, R. (2011). Diversidad funcional de los hongos micorrizógenos arbusculares de islas de recursos del Valle del Mezquital, Hidalgo. México. Tesis Doctoral en Botánica. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 1-7.
- Gaur, A. y Adholeya, A. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals contaminated soils. *Current Science*. 86(4): 528-534.

- Guadarrama-Chávez, P. (2008). Diversidad y funcionalidad de los hongos micorrizógenos arbusculares en comunidades secundarias de selva baja caducifolia. México. Tesis Doctoral en ciencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gerdemann, J. y Nicolson, T. (1963). Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Mycology Society*. 46:235-244.
- Gobierno municipal Tezontepec de Aldama, Hidalgo. (2012). Plan municipal de desarrollo 2012-2016. México.
- Guillot, D. y Meer, P. (2008). El género *Yucca* L. en España. *Monografías de Bouteloua*. España. 54-57.
- Harley, J., Smith, S. (1983). *Mycorrhizal Symbiosis*. Reino Unido. Academic Press Inc., London.
- Haselwandter, M. (1997). Soil micro-organisms, mycorrhiza and restoration ecology. *Restoration ecology and sustainable development*. Reino Unido. Cambridge University Press. 65-80.
- Hochstätter, F. (2004). *Yucca* III (Agavaceae) México and Baja California. Germany. 24-25.
- INAFED. (2010). Sistema Nacional de Información Municipal, datos generales. Tezontepec de Aldama, Hidalgo. México.
- INEGI. (2005). Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos, usos de suelo y vegetación. México.
- Jasper, D. (1994). Management of mycorrhizas in revegetation. Management of mycorrhizas in agriculture, horticulture and forestry. Holanda. Kluwer Academia Publisher. 211-219.
- Khasawneh, F. (1980). The role of phosphorus in agriculture. EUA. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc.
- Kliromonos, J., Hart, M. (2000). Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza*. 12: 181-184.
- Krüger, M., Krüger, C., Walker, C., Stockinger, H., Schüßler, A. (2012). Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of

- arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist*. 193: 970–984.
- Leigh, J., Hodge, A., Fitter, A. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. *New Phytologist* 181: 199-207.
- Lynch, J. y Whipps, M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*. 129: 1–10.
- Matuda, E. y Piña, L. (1979). Las plantas mexicanas del género *Yucca*. Colección Miscelánea Estado de México, Serie Fernando de Alva Ixtlilóchitl. Mexico. Gobierno del Estado de México y Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial. 145.
- Martínez, L. y Pugnaire, F. (2009). Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. Algunos ejemplos en los ecosistemas semiáridos. *Ecosistemas*. 18(2):44-54.
- Mckelvey, S.D.(1935). Notes on *Yucca*. *Journal of the Arnold Arboretum*. 16:268-271.
- Monroy, A., Estévez, J., García, R., Ríos, R. (2007). Establecimiento vegetal de plantas mediante el uso de micorrizas y de islas de recursos en matorral xerófilo deteriorado. México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 49-57.
- Monroy, A. y García, R. (2009). Los hongos micorrizógenos arbusculares en prácticas de restauración de vegetación semiárida. *Plantas y Hongos. Micorrizas arbusculares: un mutualismo esencial en zonas áridas*. México. Universidad Nacional Autónoma de México. 11-22.
- Montaño, N y Monroy, A. (2000). Alternativas para la conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. México. *Ciencia y desarrollo*. 26(154): 26-37.
- Montaño, N., Camargo-Ricalde, S., García, R., Monroy, A. (2008). Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos (Arbuscular mycorrhizae in arid and semiarid ecosystems). México. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mundi-Prensa SA de CV, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y Universidad Nacional Autónoma de México. 460.

- Nava, R., De Luna, R., Reynaga, R., García, R. (1980). Ecocultivo de *Yucca filifera* en las zonas áridas de México. Serie El Desierto. 3: 145-171.
- Newsham, K., Fitter, H., Watkinson, R. (1995). Multifunctionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. Trends in Ecology and Evolution. 10: 407-411.
- Nobel, P. (1998). Los incomparables agaves y cactus. México. Editorial Trillas. 211.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2000) Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. México.
- Patr, C. (1983). Soil water-plant relations. Irrigation formerly: sprinkler irrigaton. USA. The irrigation association. Marland. 504 pp.
- Pearson, J. y Jakobsen, I. (1993). The relative contribution of hyphae and roots to phosphorus uptake by arbuscular mycorrhizal plants, measured by dual labelling with phosphorus-32 and phosphorus-33. New Phytologist. 124:489–494.
- Powell, J. (1992). Interrelationships of yuccas and yucca moths. UK. Trends in Ecology and Evolution. 7: 10-15.
- Querejeta, J., Egerton-arburton, L., Allen, M. (2003). Direct nocturnal water transfer from oaks to their mycorrhizal symbionts during severe soil drying. Oecologia. 134: 55-64.
- Ramos-Zapata, J., Guadarrama, P., Navarro-Alberto, J., Orellana, R. (2011). Arbuscular mycorrhizal propagules in soils from a tropical forest and an abandoned cornfield in Quintana Roo, Mexico: visual comparison of most-probable-number estimates. Mycorrhiza. 21:139–144.
- Ravson, S. y Jakobsen, I. (1995). Functional compatibility in arbuscular mycorrhizas measured as hypal P transport to the plant. New Phytologist. 129: 611-618.
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S., Morton, J., Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota).
- Renteria, L. y Cantú, C. (2003). El efecto de *Tegeticula yucca sella* Riley (Lepidoptera: Prodoxidae) sobre la fenología reproductiva de *Yucca*

- filifera* Chabaud (Agavaceae) en Linares, N. L. México. México. Acta Zoológica Mexicana. 89: 85-92.
- Requena, N., Perez-Solis, E., Azcón-Aguilar, C., Jeffries, P., Barea, J. (2001). Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. Applied and Environmental Microbiology. 67: 495-498.
- Reyes-Quintanar K., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Rodríguez-Zaragoza, S. (2008). Microorganismos asociados a la rizósfera de una población de *Neobuxbaumia tetetzo* establecida en una zona árida del estado de Puebla, México. Micorrizas Arbusculares en Ecosistemas Áridos y Semiáridos. México. Mundi-Prensa. 219–242.
- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica Mexicana: una apreciación analítica preliminar. México. Acta Botánica Mexicana. 15: 47-64.
- Sánchez, O. (1979). La flora del valle de México. 5a (ed). México. Editorial Herrero. 99, 513.
- Schlesinger, H., Reynolds, F., Cunningham, L., Huenneke, F., Jarell, M., Virginia, A., Whitford, W. (1990). Biological feedbacks in global desertification. Science 127: 1043-1048.
- Singh, S. y Kapoor, K. (1999). Inoculation with phosphate solubilizing microorganisms and a vesicular arbuscular mycorrhizal fungus improves dry matter yield and nutrient uptake by wheat grown in a sandy soil. Biology and Fertility of Soils, 28: 139-44.
- Smith, E. y Read, D. (1997). Mycorrhizal Symbiosis. London. Academic Press. 605.
- Smith, E., Smith, A., Jacobsen, I. (2004). Functional diversity in arbuscular mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with micorrhizal responses in growth or total P uptake. New Phytologist 162(2): 511-424.
- Simard, W. y Durall, M. (2004). Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance. Canadian Journal of Botany. 82: 1140–1165.
- Simon, L., Bousquet, J., Levesque, R., Lalonde, M. (1993). Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. Nature. 363:67-69.

- SER (Society for Ecological Restoration) grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. (2004). Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Society for Ecological Restoration International.
- Stutz, J., Copeman, R., Martin, C., Morton, J. (2000). Patterns of species composition and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in arid regions of southwestern North America and Namibia, Africa. *Canadian Journal of Botany*. 78:237–245.
- Trappe, M. (1987). Phylogenetic and ecologic aspects of mycotrophy in the angiosperms from an evolutionary standpoint. *Ecophysiology of VA Mycorrhizal Plants*. USA. CRC Press. 5-25.
- Trotta, A., Varese, G., Gnani, E., Fusconi, A., Sampo, S., Berta, G. (1996). Interaction between the soilborne root pathogen *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in tomato plants. *Plant and Soil*. 185: 199-206.
- Valetin, C., d'Herbes, M., Poesen, J. (1999). Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena*. 37: 1-24.
- Varma, A. (1999). Functions and application of arbuscular mycorrhizal fungi in arid and semi-arid soils. *Mycorrhiza. Structure, function, molecular biology and biotechnology*. 2a (ed.). Alemania. Springer Verlag. 521-555.
- Wang, G., Stribley, G., Tinker, B., Walker, C. (1985). Soil pH and vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Ecological interactions in soils, plant, microbes and animals*. Blackwell Scientific Publishers. 219-224.
- Whitford, W. (1986). *Decomposition and nutrient cycling in deserts. Pattern and process in desert ecosystems*. USA. University of New Mexico Press. 93-118.
- Zak, J., Sinsabaugh, R., Mackay, W. (1995). Windows of opportunity in desert ecosystems: their implications to fungal development. *Canadian Journal of Botany*. 73 (1): 1407-1414.

1. <http://maps.google.com.mx/>

Anexos

Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)							
Prueba de normalidad							
Shapiro-Wilks (modificado)							
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)		
TCR	25	4,5E-04	1,7E-03	0,90	0,0462		
Prueba de Kruskal Wallis							
Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
TCR	Mic-Cuenca	11	1,6E-03	6,9E-04	1,7E-03	11,09	0,0039
TCR	Mic-Nocuenca	6	-1,2E-03	1,2E-03	-1,3E-03		
TCR	Nomic-Cuenca	8	1,1E-04	2,0E-03	3,1E-0		
Tratamiento	Ranks						
Mic-Nocuenca	5,50	A					
Nomic-Cuenca	12,00	A B					
Mic-Cuenca	17,82	B					
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)</i>							

Altura**Prueba de normalidad****Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Altura	29	12,31	10,79	0,87	0,0020

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Altura	Mic-Cuenca	10	23,85	7,01	24,80	23,01	<0,0001
Altura	Mic-Nocuenca	5	13,14	2,90	15,00		
Altura	Nomic-Cuenca	7	7,56	6,15	6,80		
Altura	Nomic-Nocuenca	7	0,00	0,00	0,00		

Tratamiento	Ranks	
Nomic-Nocuenca	4,00	A
Nomic-Cuenca	12,14	A B
Mic-Nocuenca	17,20	B C
Mic-Cuenca	23,60	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Numero de Hojas**Prueba de normalidad****Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Numero hojas	29	5,45	4,63	0,88	0,0073

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Numero hojas	Mic-Cuenca	10	9,80	3,58	9,00	22,16	<0,0001
Numero hojas	Mic-Nocuenca	5	7,00	2,35	6,00		
Numero hojas	Nomic-Cuenca	7	3,57	2,15	4,00		
Numero hojas	Nomic-Nocuenca	7	0,00	0,00	0,00		

Tratamiento	Ranks	
Nomic-Nocuenca	4,00	A
Nomic-Cuenca	12,00	A B
Mic-Nocuenca	18,80	B C
Mic-Cuenca	22,90	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Supervivencia**Prueba de normalidad****Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Supervivencia	29	0,76	0,44	0,51	<0,0001

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Supervivencia	Mic-Cuenca	10	1,00	0,00	1,00	15,40	<0,0001
Supervivencia	Mic-Nocuenca	5	1,00	0,00	1,00		
Supervivencia	Nomic-Cuenca	7	1,00	0,00	1,00		
Supervivencia	Nomic-Nocuenca	7	0,00	0,00	0,00		

Tratamiento	Ranks
Nomic-Nocuenca	4,00 A
Nomic-Cuenca	18,50 B
Mic-Nocuenca	18,50 B
Mic-Cuenca	18,50 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Cobertura**Prueba de normalidad****Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Cobertura	27	209,47	305,13	0,70	<0,0001

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Cobertura	Mic-Cuenca	10	468,80	371,81	286,48	21,14	0,0001
Cobertura	Mic-Nocuenca	4	124,85	77,52	124,51		
Cobertura	Nomic-Cuenca	6	78,02	96,46	33,22		
Cobertura	Nomic-Nocuenca	7	0,00	0,00	0,00		

Tratamiento	Ranks
Nomic-Nocuenca	4,00 A
Nomic-Cuenca	12,42 A B
Mic-Nocuenca	14,25 B C
Mic-Cuenca	21,85 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)