



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**EFECTO DE LA APLICACIÓN DE
MICORRIZAS *Glomus intraradices*, EN EL
RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ
DE GRANO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

P R E S E N T A:

ESCOBAR FLORES NAYELI SARAIB

ASESOR: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA

COASESOR: Dr. JESÚS NAVEJAS JIMÉNEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2017



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES - CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautilán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Efecto de la aplicación de Glomus Intraradices, en el rendimiento del cultivo de maíz de grano.

Que presenta la pasante: NAYELI SARAIB ESCOBAR FLORES

Con número de cuenta: 41109944-2 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Agrícola

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautilán Izcalli, Méx. a 13 de marzo de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Rosa Navarrete Maya	
VOCAL	Dr. Alejandro Espinoza Calderón	
SECRETARIO	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
1er. SUPLENTE	M.C. Ana María Martínez García	
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/ntm*

DEDICATORIA

A mi mamá, compañera de vida, ejemplo de lucha:

Gracias a ti, a tu apoyo y a tu fuerza soy la mujer que hoy soy.

A mis abuelitos, los grandes pilares de mi vida.

A Oscar V., desde la inmensidad y la eternidad del hoy.

AGRADECIMIENTOS

*A la familia Escobar, que cada uno de ellos, a su manera y con todo lo que han tenido, a lo largo de mi vida han puesto un granito de arena para permitirme llegar hasta aquí.
Mis éxitos siempre serán los de ellos.*

*A mi asesor Gustavo Mercado Mancera por su guía, por su apoyo incondicional y el aprendizaje adquirido a partir de las experiencias que ha traído consigo este proyecto.
Gracias por hacerlo posible.*

A mi coasesor Jesús Navejas Jiménez, por su ayuda y paciencia; Al Campo experimental Valle de Santo Domingo. B. C. S., por su recibimiento y por el conocimiento generado a partir de la colaboración en su equipo de trabajo; Al apoyo de cada uno de los compañeros involucrados en la realización del presente proyecto.

A la Universidad Autónoma de México por abrirme sus puertas.

A Ingeniería Agrícola y a todos los que para bien o para mal, han hecho de la carrera lo que es ahora, ya que con su formación y su fraternidad han encendido en mí la motivación para dejar su nombre en alto, buscando el mejor de los caminos profesionales, siempre en la búsqueda del bien común.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>ii</i>
RESUMEN	<i>iv</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	3
1.1.1. Objetivos particulares	3
1.2. Hipótesis	3
II. ANTECEDENTES	4
2.1. Generalidades de las zonas bajo condiciones de aridez	4
2.1.1. Desertificación	5
2.1.2. Características del suelo en las zonas áridas	7
2.2. Microorganismos benéficos en el suelo	7
2.2.1. La rizósfera y los microorganismos benéficos del suelo	9
2.2.2. La actividad metabólica microbiana en la nutrición de las plantas	10
2.2.3. Microorganismos benéficos y la sustentabilidad en los sistemas agrícolas	11
2.2.4. Actividad microbiológica en condiciones de aridez	13
2.3. Biofertilizantes	16
2.3.1. Panorama actual de la tecnología de la biofertilización	18
2.3.1.1. Problemática actual de los biofertilizantes	19
2.3.1.2. Utilización mundial y nacional	21
2.4. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)	22
2.4.1. Actividad fisiológica en las plantas	27
2.4.2. Efecto de la presencia micorrízica en los suelos	27
2.4.3. Efecto de la presencia micorrízica en la asimilación de nutrientes	29
2.4.3.1. Fósforo	29
2.4.3.2. Nitrógeno	31
2.4.3.3. Otros	31
2.4.4. Micorriza <i>Glomus intraradices</i> Cepa INIFAP	32

	Página
2.4.4.1. Forma de aplicación	32
2.4.4.2. Efecto de <i>Glomus intraradices</i> en cultivos	35
2.4.5. Hongos micorrízicos arbusculares en zonas áridas	36
2.5 Descripción del Valle de Santo Domingo, B.C.S.	39
2.5.1. Características climáticas	40
2.5.2. Características hídricas	41
2.5.3. Características edáficas	43
2.6. Producción de maíz en el Valle de Santo Domingo, B.C.S.	46
2.6.1. Importancia económica del cultivo de maíz en la región de estudio	51
2.6.2. Sistema de producción de maíz recomendado por el INIFAP para la zona de estudio	53
2.6.3. Costos de producción de maíz en la zona de estudio	58
III. MATERIALES Y MÉTODO	61
3.1. Localización del área experimental	61
3.2. Metodología	61
3.2.1. Variables a evaluar	64
3.2.2. Análisis estadístico	65
3.3. Materiales	66
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
4.1. Variables fitométricas	67
4.2. Variables de rendimiento	70
4.3. Relación Costo/Beneficio	73
4.4. Análisis del efecto de la utilización de micorrizas como técnica de biofertilización bajo las condiciones climáticas y edáficas de la zona del Valle de Santo Domingo, B.C.S.	77
V. CONCLUSIONES	80
VI. RECOMENDACIONES	81
VII. LITERATURA CITADA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Producción de auxinas y su efecto en el crecimiento de las raíces.	11
Figura 2. Formación de islas de recursos en el desierto y estabilización del suelo (Bethlenfalvay <i>et al.</i> , 2007).	14
Figura 3. Principales biofertilizantes y mecanismos generales en las raíces (Martínez <i>et al.</i> , 2013).	16
Figura 4. Clasificación de los hongos micorrízicos arbusculares (Brundrett (2004) citado por Montaña (2007)).	23
Figura 5. Estructura de la simbiosis HMA y las raíces (García <i>et al.</i> , 2007).	25
Figura 6. Formas de aplicación de micorrizas (Martínez <i>et al.</i> , 2013).	33
Figura 7. Mapa general del Valle de Santo Domingo, Comondú, B.C.S. (Tomado de: Mercado, 2011).	40
Figura 8. Climograma del municipio de Comondú. Estación meteorológica Ciudad Constitución. Realizado a partir de INEGI (2014).	41
Figura 9. Distribución de la precipitación, 1984-2014. Ciudad Constitución, Comondú (INEGI, 2014).	42
Figura 10. Tendencia anual de la precipitación en la cuenca de Comondú (Mercado, 2011).	42
Figura 11. Suelos dominantes del municipio de Comondú (INEGI, 2014).	44
Figura 12. Distribución de la superficie del Estado de Baja California Sur.	46
Figura 13. Producción agrícola de Baja California Sur (SAGARPA, 2011).	47
Figura 14. Principales cultivos en Baja California Sur (SIAP, 2014).	48
Figura 15. Distribución de la vegetación del Municipio de Comondú (INEGI, 2009).	49
Figura 16. Principales cultivos en el municipio de Comondú (SIAP, 2014).	50
Figura 17. Rendimiento y volumen de producción de maíz en Comondú. (Realizado a partir de información de SIAP, 2014).	52
Figura 18 Precios internacionales de urea y fosfato diamónico (DAP) con respecto al precio del petróleo (FIRA (2010), citado por Aguado <i>et al.</i> , 2012).	60
Figura 19 Peso seco y peso fresco de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	69
Figura 20 Rendimiento obtenido en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	73
Figura 21 Costos de producción de acuerdo a cada aspecto agronómico de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	75
Figura 22 Relación C/B y rendimiento de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	77

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Causas de degradación antropogénica en México (UNCCD, 2006).	6
Tabla 2.	Efecto de la aplicación de pesticidas en la infección micorrízica (Aguado <i>et al.</i> , 2012).	21
Tabla 3.	Principales suelos del municipio de Comondú. (Realizado a partir de INEGI, 2009).	43
Tabla 4.	Análisis químico de suelos de la cuenca de Comondú (Mercado, 2011).	45
Tabla 5.	Superficie sembrada de maíz en el estado de Baja California Sur. (Realizado a partir de SIAP, 2014).	52
Tabla 6.	Características agronómicas de genotipos de maíz con riego por goteo en el Valle de Santo Domingo, B.C.S. (Navejas y Gutiérrez, 2008).	54
Tabla 7.	Calendarización de riegos para maíz en el Valle de Santo Domingo (Navejas y Gutiérrez, 2008).	56
Tabla 8.	Precio medio rural del maíz, en el municipio de Comondú, B.C.S. (Realizado a partir de información del SIAP, 2014a).	59
Tabla 9.	Precio de los principales fertilizantes a nivel nacional y estatal (SNIIM, 2016).	60
Tabla 10.	Características del híbrido INIFAP S-14 para la evaluación de micorrizas como biofertilizante.	61
Tabla 11.	Descripción de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz en Comondú, Baja California Sur, 2015.	62
Tabla 12.	Distribución, tiempos y dosis de aplicación de biofertilizante y fertilizante químico, en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz en Comondú, Baja California Sur, 2015.	63
Tabla 13.	Variables fitométricas en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	68
Tabla 14.	Peso de forraje verde en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	68
Tabla 15.	Peso seco en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	69
Tabla 16.	Nitrato foliar en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	70
Tabla 17.	Variables de rendimiento en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	72
Tabla 18.	Rendimiento de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	72
Tabla 19.	Costos de producción por hectárea del manejo agronómico de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 20. Costo de la fertilización en porcentaje del costo total de producción, de acuerdo al tipo de nutrición utilizada para la producción de maíz para grano, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	75
Tabla 21. Relación Costo/Beneficio en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.	76
Tabla 22. Análisis de suelo correspondiente a parcelas del sitio experimental INIFAP, Valle de Santo Domingo. B.C.S.	78

RESUMEN

El Valle de Santo Domingo en Baja California Sur, es considerado una de las zonas agrícolas más importantes del estado; a pesar de presentar índices de aridez que la catalogan como una región híper árida, el maíz para grano representa el segundo cultivo con mayor superficie sembrada en el valle. En el presente trabajo se evaluaron el rendimiento, sus componentes y la relación Costo-Beneficio (C/B) obtenidos por el efecto de la biofertilización con micorriza, cepa *Glomus intraradices*, como técnica del sistema de producción de maíz para grano en zonas áridas, comparándolas con un tratamiento de fertilización química. La variedad utilizada fue el maíz híbrido INIFAP-S-14, en la cual se tomaron datos fitométricos, de componentes de rendimiento y la relación C/B. Los tratamientos evaluados fueron con aplicación de micorrizas, micorrizas más 50% de la fertilización química y sólo fertilizante químico. Los resultados mostraron que no existió diferencia estadística significativa entre los tratamientos, con un rendimiento de 8.4 ton ha⁻¹ en el tratamiento únicamente inoculado con micorrizas, 10.4 ton ha⁻¹ en el tratamiento de micorrizas combinado con fertilización química y 11 ton ha⁻¹ en el tratamiento de fertilización química convencional, lo cual mostró un efecto por la inoculación de micorrizas en el segundo caso, esto independientemente del ambiente de aridez en el que se desarrolló el estudio. En cuanto a la relación C/B, el tratamiento que únicamente fue inoculado con micorriza obtuvo un valor de 2.63, el cual fue mayor al tratamiento fertilizado químicamente con 1.72. Estos datos permiten recomendar el uso de *Glomus intraradices* como técnica de biofertilización, el cual mantiene el rendimiento en un nivel aceptable, aun así, se incrementa la relación C/B en la producción de maíz de grano bajo condiciones de aridez, en beneficio de los productores del Valle de Santo Domingo.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura de zonas áridas tiene como principal factor limitante la escasez de agua, sin embargo, en áreas como estas, donde más del 40 % del territorio de México está bajo condiciones de aridez, también existen otro tipo de condiciones críticas que influyen negativamente en la eficiencia de los sistemas productivos de las zonas áridas; un claro ejemplo de ello es la pérdida de la capacidad productiva del suelo y su vulnerabilidad a la salinidad por manejo de sistemas intensivos con irrigación excesiva. La presencia de salinidad y sodio en los suelos interfiere en el crecimiento adecuado de la mayoría de los cultivos y por lo tanto constituye un serio problema que enfrenta la agricultura.

A consecuencia del uso excesivo de fertilizantes químicos en los suelos, estos han quedado infértiles e improductivos, sumado a ello, el daño que esto causa al medio ambiente, por lo cual, se buscan tecnologías que permitan mejorar los rendimientos de los cultivos en la agricultura con suelos de estas condiciones pero sin continuar afectándolos. En solución a esta problemática los biofertilizantes son una alternativa agronómica prometedora, puesto que pueden contrarrestar o disminuir el impacto de los problemas anteriormente mencionados, interrumpiendo con ello el daño y baja eficiencia que provoca el uso continuo y desmedido de tales fertilizantes.

El maíz (*Zea mays* L.) es el principal cultivo en México, participó con el 18 % del valor de producción del sector agrícola (88 mil millones de pesos –mdp- en 2012 y 78 mil mdp en 2013) y concentró el 33 % de la superficie sembrada en el territorio nacional (7.5 millones de hectáreas). A pesar de ser un país maicero, México enfrenta un grave problema de autosuficiencia de este grano, importando hasta el año 2015, 11 millones de toneladas de maíz amarillo; con esto México ocupa el segundo lugar dentro de los países con mayor volumen de importaciones de grano, lo cual lo vuelve vulnerable ante cualquier alteración de la oferta mundial (FIRA, 2015).

Desde el punto de vista técnico, los rendimientos de maíz son bajos con respecto a los potenciales: los mayores rendimientos con sistemas bajo riego son de 9 t ha⁻¹ en Sinaloa, y en temporal 5.0 t ha⁻¹ en Jalisco; a pesar de estas posibilidades, el rendimiento promedio nacional sigue siendo muy bajo para el caso de sistemas bajo riego con 5.2 t ha⁻¹ y tan solo 2.0 t ha⁻¹ para temporal (Muñoz y Hernández, 2004).

Por lo tanto, el rendimiento de maíz, es completamente dependiente de las diferencias tecnológicas, edáficas y ambientales de las distintas zonas maiceras, lo que representa un reto para comenzar a aplicar técnicas de producción al alcance de todos los niveles económicos de producción, que sean sustentables y; además, que logren adaptarse a las diversas condiciones productivas del país. La utilización de biofertilizantes en los sistemas productivos de maíz podría ser una alternativa para el 40 % del territorio nacional que es considerado con aridez o semiaridez, condición que tenderá a incrementarse en el territorio nacional a consecuencia del cambio climático y deterioro constante de los recursos (Toledo y Ordoñez, 1996).

En el presente trabajo se comparó la aplicación de biofertilizantes con respecto a la utilización de fertilizantes químicos, mediante el análisis de la respuesta en los componentes de rendimiento del cultivo de maíz, producido bajo condiciones de aridez; además, se evaluó la relación costo/beneficio de cada uno de tratamientos de nutrición aplicados al cultivo.

Por último se analizó la capacidad de adaptación de la micorriza cepa *Glomus intraradices*, a las características climáticas y edáficas de una zona árida como lo es el Valle de Santo Domingo, Baja California Sur, lugar donde fue desarrollado el presente trabajo, bajo los siguientes objetivos.

1.1. Objetivo general

- ❖ Evaluar la utilización de micorrizas (cepa de *Glomus intraradices*) como biofertilizante en el sistema de producción de maíz para grano en suelos de zonas áridas, en el Valle de Santo Domingo, Baja California Sur.

1.1.1 Objetivos particulares

- ❖ Comparar el rendimiento y sus componentes del cultivo de maíz para grano, bajo la utilización de micorrizas vs fertilización química inorgánica, en condiciones de riego.
- ❖ Analizar el efecto de la utilización de micorrizas como técnica de biofertilización bajo las condiciones climáticas y edáficas de la zona del Valle de Santo Domingo, B.C.S.
- ❖ Evaluar la relación Costo/Beneficio en el sistema de producción de maíz con la utilización de micorrizas con respecto a la producción convencional de fertilización inorgánica de la zona.

1.2. Hipótesis

- ❖ Ht: La utilización de micorrizas como biofertilizantes permite el incremento del rendimiento de grano en el cultivo de maíz, así como, la disminución de costos de producción.

II. ANTECEDENTES

2.1. Generalidades de las zonas bajo condiciones de aridez

La condición de aridez es una condición natural en el planeta. Consiste en una falta sustancial de precipitaciones en una determinada zona, de tal forma que la humedad en el suelo es siempre menor que la capacidad de retención del líquido. Cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) señalan que cuatro de cada diez hectáreas de terreno en el planeta se encuentran en climas áridos y es en las cuales se cultiva la tercera parte de los alimentos y se cría a la mitad del ganado mundial (SIAP, 2014).

Se consideran zonas áridas, a aquellas áreas que reciben una precipitación pluvial media anual menor a 350 mm, y semiáridas a las que reciben entre 350-600 mm anuales. En ambos casos, la precipitación promedio anual es menor a la evaporación potencial anual, evidenciando un déficit hídrico. Estas regiones se caracterizan por vientos fuertes, suelos con bajo contenido orgánico y alto contenido de sales minerales, alta erosión hídrica y eólica, una escasez de agua, con una distribución de la precipitación altamente errática, que ocurre en pocos eventos y de manera torrencial (Arámbula, 2010). Su distribución a través del mundo está regulada por la interacción de los patrones de la circulación atmosférica global, la distribución de tierra y mar, y la topografía local.

Las regiones áridas y semiáridas cubren aproximadamente el 54.3 % de la superficie total del territorio mexicano. A causa de las condiciones climáticas locales, existen pequeñas zonas áridas repartidas por todo el país, pero la mayor extensión de zonas áridas en México se ubica en el cinturón o faja mundial de aridez, correspondiendo a los desiertos Chihuahuense y Sonorense. De los 32 estados que integran el territorio nacional, 25 presentan porciones áridas en mayor o menor proporción, cubriendo casi la totalidad de algunos estados, entre ellos se encuentra Baja California Sur (Mercado, 2011).

Las zonas áridas presentan fuertes contrastes en cuanto a sistemas de producción, los cuales van de una agricultura comercial altamente tecnificada hasta actividades de subsistencia, y están expuestos a constantes siniestros -sequías y heladas-.

Los altos índices de erosión de suelo y la aplicación de prácticas agrícolas inadecuadas, así como la alta necesidad de riego -donde la extracción es superior a la infiltración- provocan la salinización y la degradación de superficies considerables de suelo, generando una agricultura con muy bajo potencial productivo. De acuerdo con estas condiciones se estima que ocho de cada diez agricultores en estas zonas, cultivan para el autoconsumo (Cervantes, 2002).

2.1.1. Desertificación

Desde los años 90, México se encuentra adherido a los criterios de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD por sus siglas en inglés. En tal convención, la desertificación fue definida como la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores tales como las variaciones climáticas y actividades humanas (Mercado, 2011). La desertificación es otro término común utilizado para: a) la degradación de la tierra en zonas de tierras áridas; b) el cambio irreversible de la tierra a tal estado que ya no puede ser recuperado a su uso originario (FAO, 2015). En México de acuerdo con la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001), el proceso de desertificación no necesariamente ocurre en ecosistemas secos.

La desertificación ocurre y se manifiesta a través de los procesos siguientes:

- Degradación de la cubierta vegetal.
- Erosión hídrica.
- Erosión eólica.
- Salinización y sodificación.
- Degradación física.
- Degradación biológica.
- Degradación química.

De los anteriores procesos, la FAO considera a los cuatro primeros como los de mayor impacto en las características de los ecosistemas y la productividad.

Las consecuencias más importantes de la desertificación van desde la disminución en la producción alimentaria, infertilidad y salinización del suelo, reducción de la capacidad de la recuperación natural de la tierra, incremento de las inundaciones en las partes bajas de las cuencas, escasez de agua, sedimentación de cuerpos de agua, agravamiento de problemas de salud debido al polvo transportado por el viento y alteración de los ciclos biológicos, hasta la pérdida de los medios de subsistencia de las sociedades lo cual puede contribuir a la migración (Mercado, 2011).

En México, aproximadamente el 72 % de la tierra es vulnerable a la desertificación, a consecuencia de que el territorio es predominantemente árido o semiárido. El 64 % del suelo del país se encuentra ya en un proceso avanzado de degradación, lo que asciende a cerca de 935,700.79 km² (Mercado, 2011). Como es posible ver en la Tabla 1, el principal proceso natural que ocasiona la desertificación en México es la erosión hídrica, que afecta al 37 % de los suelos, particularmente aquellos de las zonas montañosas, le sigue el proceso de erosión eólica, que afecta al 14.9 % de los suelos. El 47 % de la desertificación es debido a causas antropogénicas, entre las que destacan: la labranza, la sobreexplotación de cultivos intensivos anuales, el inadecuado manejo del agua, la sobreexplotación de la vegetación para consumo doméstico, desechos industriales, entre otros (UNCCD, 2006).

Tabla 1. Causas de degradación antropogénica en México (UNCCD, 2006).

Proceso de degradación	Km ²	%
Degradación natural en terrenos sin uso (dunas costeras, desiertos, regiones áridas montañosas, afloramientos rocosos y planicies salinas)	466.79	23.8
Terrenos degradados por influencia humana	935 234	47.7
• Química (pérdida de fertilidad de suelos, salinización)	320.44	16.4
• Física (compactación, encostramiento, aridificación)	85.14	4.3
• Erosión eólica (superficial y en dunas)	293.64	15
• Erosión hídrica	235 95	12
Total degradado por el hombre y de forma natural	935 700	71.5

Se han generado una serie de normas y prácticas que intentan conservar más de tres y medio millones de hectáreas en nuestro país y que han incluido obras como la construcción de estanques, cultivo en franja, surcado en contorno, cultivos de invierno, abonos verdes y

orgánicos, cultivos de cobertura, construcción de terrazas de drenaje y absorción de agua, rotación de cultivos y rehabilitación y mejoramiento de pastizales (SIAP, 2014).

2.1.2. Características del suelo en las zonas áridas

Los suelos de las zonas áridas son por lo regular bajos en contenido nutrimental y en materia orgánica, en su mayoría presentan cierto grado de erosión hídrica y eólica. La salinidad y la sodicidad son amenazas para la fertilidad de este tipo de suelos, debido a la intrusión salina, la acumulación excesiva de sodio es común. Esto provoca numerosos fenómenos adversos para las propiedades físicas y químicas, tales como desestabilización de la estructura, decremento de la porosidad e incremento de la densidad aparente, deterioro de las propiedades hidráulicas del suelo, aumento de la susceptibilidad a la formación de costras y efectos tóxicos en las plantas (Mercado, 2011).

La mayoría de los suelos afectados por elevadas concentraciones de sales presentan una conductividad eléctrica superior a 4 dSm^{-1} . La salinización que ocurre debido a la manutención de sistemas de irrigación inadecuados se asocia en algunos casos con grados de toxicidad de cadmio, relacionado a aplicaciones elevadas de fósforo y el uso excesivo de fertilizantes de nitrógeno, que resulta en la contaminación de las aguas subterráneas afectando la asimilación de nutrimentos por las plantas y la actividad microbiana del suelo (FAO, 2015).

2.2. Microorganismos benéficos en el suelo

Las poblaciones microbianas del suelo están inmersas en un marco de interacción que afecta el desarrollo de las plantas y la calidad del suelo. El factor determinante de la diversidad microbiana del suelo, está relacionado con la complejidad de las interacciones microbianas en el mismo, incluyendo las interacciones microorganismos-suelo, y microorganismos-plantas (Pedraza *et al.*, 2010).

La mayoría de los estudios microbiológicos del suelo, describen interacciones microbianas cooperativas, principalmente en bacterias y hongos. De acuerdo con sus funciones, estos microorganismos se han agrupado en:

- Degradadores de residuos orgánicos.
- Hongos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal.
- Hongos y bacterias antagonistas de patógenos de raíces.

Dentro de la diversidad de microorganismos rizosféricos estos se pueden caracterizar en relación a sus funciones tales como la fijación biológica del nitrógeno atmosférico, solubilización de fosfatos, aporte de nutrimentos, la descomposición de residuos orgánicos, la desintoxicación de plaguicidas y metales pesados, producción de hormonas vegetales y de sustancias capaces de captar hierro (sideróforos). Muchos de ellos son simbioses mutualistas de las plantas y entre los más importantes se incluyen a las bacterias fijadoras de nitrógeno y a los hongos micorrízicos (Pedraza *et al.*, 2010).

Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB por sus siglas en inglés Plant Growth Promoting Bacteria) representan numerosas especies del suelo y al igual que muchas especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se encuentran asociados con la mayoría de las especies de plantas y comúnmente se les encuentra en la mayoría de los ambientes (Caballero, 2006).

En un gramo de suelo hay millones de bacterias y hongos, entre los cuales se encuentra una gran diversidad metabólica para transformar los elementos que forman parte de los nutrimentos necesarios para todos los seres vivos. Su presencia no indica que todos los microorganismos participen activamente en la dinámica de esos elementos, ya que su contribución depende de su estado fisiológico, de su actividad enzimática y de la concentración y disponibilidad de los compuestos a utilizar. Pedraza *et al.* (2010) observaron que diversas transformaciones microbianas como la oxidación aeróbica de metano y de amonio, así como la reducción de sulfatos, están generalmente comandadas por la actividad más que por el número de los microorganismos que intervienen específicamente en dichas transformaciones. Esta actividad metabólica depende a su vez de las condiciones determinadas por las propiedades fisicoquímicas del suelo y por los otros organismos que comparten el hábitat.

Los microorganismos benéficos están presentes en el suelo, pero junto con las condicionantes del entorno anteriormente mencionadas. Martínez *et al.* (2013) también señalaron que tales microorganismos no siempre son los adecuados para la planta que se

quiere sembrar o son muy escasos para poder tener un impacto positivo. Por ello aplicaciones de biofertilizantes sirven para potenciar su actividad benéfica y asegurar el éxito del uso de estos microorganismos.

2.2.1. La rizósfera y los microorganismos benéficos del suelo

Ha sido ampliamente demostrado que los microorganismos del suelo interactúan con las raíces de las plantas y constituyentes del suelo en la interfase raíz-suelo. Este gran conjunto de interacciones entre suelo, raíces y microorganismos da lugar al desarrollo de un ambiente dinámico conocido como rizósfera, donde una variedad de formas microbianas pueden desarrollarse activamente y en equilibrio (Pedraza *et al.*, 2010).

La rizósfera constituye uno de los puntos más sensibles a la respuesta del cultivo porque concentra una gran actividad metabólica con intercambio de nutrientes entre la atmósfera y el suelo, la cual es mediada por la acción e interacción de plantas y microorganismos del suelo (Gray y Smith, 2005). Entonces se conoce que la adquisición de nutrientes del suelo está gobernada por el crecimiento radical y su interacción con los componentes bióticos y abióticos del mismo. Esta interacción se manifiesta en gran medida por las propiedades físicas, químicas y biológicas de la rizósfera.

De acuerdo con López *et al.* (2015), en la rizósfera, zona de varios milímetros alrededor de las raíces, se aloja una gran diversidad de microorganismos; además, se secreta o libera continuamente una variedad de sustancias orgánicas llamadas exudados radicales, que sirven de alimento a los microorganismos, y pueden repelerlos o atraerlos hacia la raíz (fenómeno conocido como quimiotaxis) estimulando así el crecimiento de las plantas. Los exudados de la raíz pueden modificar las propiedades físicas y químicas del suelo, y en consecuencia regular la estructura de las comunidades microbianas del suelo en las inmediaciones de las superficies de la raíz, provocando un efecto consecuente en la planta. La composición de los exudados depende del estado de salud de la planta, así como de su edad y de la planta de que se trate. Pedraza *et al.* (2010), documentaron tales interacciones, donde los microorganismos de la rizósfera contribuyen al crecimiento vegetal aumentando la disponibilidad de nutrientes limitantes como el fósforo y el nitrógeno, y a su vez, la composición y actividad de la comunidad microbiana está fuertemente influenciada por el

tipo de vegetación presente en el suelo. Tales interacciones han demostrado así, su contribución al crecimiento de las plantas y a la calidad de los suelos. A partir de un mejor conocimiento de las interacciones de la rizósfera y de cómo se asocian las raíces con los microorganismos del suelo habrá oportunidad para mejorar la eficiencia de la captación de nutrimentos por las plantas siendo así que tales interacciones den como resultado un efecto benéfico para la calidad del mismo suelo.

2.2.2. La actividad metabólica microbiana en la nutrición de las plantas

La principal fuente de carbono lábil en el suelo son las plantas, cuyos constituyentes principalmente son polímeros como la celulosa, hemicelulosa, lignina y proteínas. Estos compuestos vegetales constituyen la principal fuente de energía y carbono para los microorganismos del suelo. Los hongos, los actinomicetos y muchas bacterias son capaces de producir enzimas extracelulares que hidrolizan dichos polímeros. Así, dan lugar a compuestos más sencillos que pueden ser utilizados por ellos y por otros que no poseen capacidad celulolítica o proteolítica (Horwath, 2007). Gran parte del ciclado de nutrimentos depende de la actividad metabólica de los microorganismos. Varias etapas del ciclado de nutrimentos en el suelo son exclusivamente microbianas. Así, la degradación de la mayoría de los polímeros carbonados constituyentes de los tejidos vegetales, la producción y el consumo de metano, la fijación de nitrógeno o la oxidación de amonio a nitrito y posteriormente a nitrato, son procesos biológicos llevados a cabo sólo por microorganismos (Pedraza *et al.*, 2010).

Los microorganismos estimulan el crecimiento de las plantas con la producción o inhibición hormonal. Cuando las plantas sufren algún tipo de estrés liberan etileno, Martínez *et al.* (2013), mencionaron que hay algunos microorganismos que producen sustancias capaces de disminuir la producción de etileno en las plantas, lo que disminuye el estrés y por lo tanto mejora el crecimiento. Otra forma en la que los microorganismos pueden favorecer el crecimiento de las plantas es mediante la producción de hormonas vegetales, como las auxinas. Estas sustancias promueven el crecimiento de las raíces de las plantas, lo que permite que puedan absorber más agua y nutrientes del suelo. En la Figura 1 se puede ver una representación de cómo las hormonas producidas por los microorganismos aumentan el tamaño de las raíces de las plantas. En el caso de las micorrizas, de acuerdo a

estudios de Aguilera *et al.* (2007), pueden incrementar la formación de raíces laterales, lo que puede elevar indirectamente la producción de citocininas, e incidir a su vez en una mayor tasa de fotosíntesis neta. Contrariamente, plantas sin micorrizas mostraron un severo déficit en la expansión de las hojas y por ende en la fotosíntesis neta.

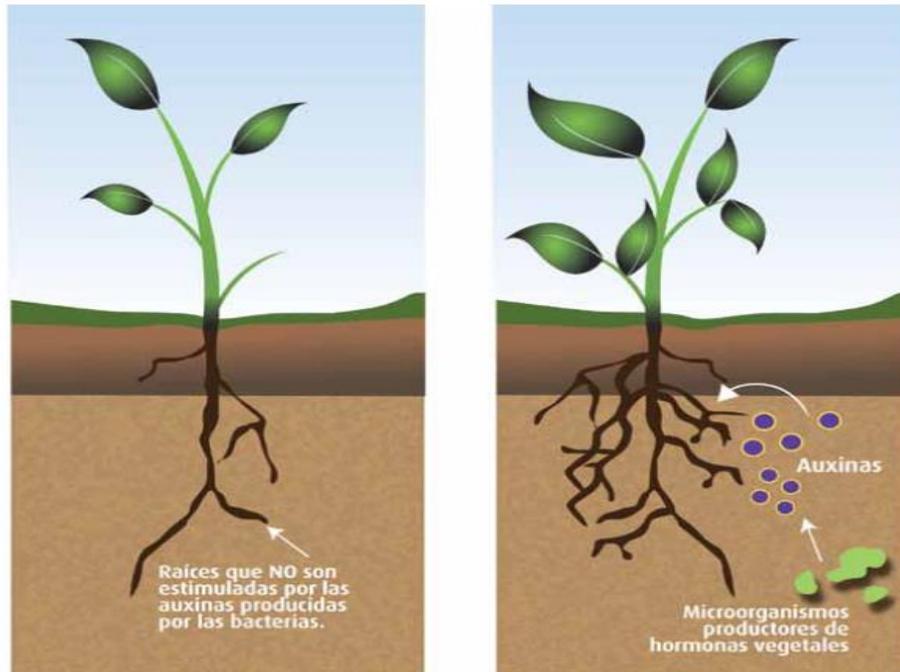


Figura 1. Producción de auxinas y su efecto en el crecimiento de las raíces.

2.2.3. Microorganismos benéficos y la sustentabilidad en los sistemas agrícolas

Los organismos del suelo aportan una serie de servicios fundamentales para la sostenibilidad de todos los ecosistemas. Estos servicios no sólo son decisivos para la función de los ecosistemas naturales, sino que constituyen un recurso fundamental para el manejo sostenible de los sistemas agrícolas. Actúan como agentes primarios para: la conducción del ciclo de los nutrientes; la regulación de la dinámica de la materia orgánica del suelo; el secuestro del carbono en el suelo y las emisiones de gases invernadero; modifican la estructura física del suelo y el almacenamiento de agua; aumentan la cantidad y disponibilidad de nutrientes para la vegetación y aumentan la salud de la planta. Estos servicios no sólo son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas naturales, sino que, constituyen un recurso importante para la gestión sostenible de los sistemas agrícolas (FAO, 2015).

El manejo en la agricultura intensiva que actualmente cubre las necesidades alimentarias de la población, altera la biodiversidad de las comunidades microbiológicas del suelo, acciones tales como el laboreo y la adición de fertilizantes y pesticidas han reemplazado las funciones biológicas del suelo y a consecuencia incrementado la dependencia de insumos externos para mantener la productividad del suelo. Este modelo se ha constatado de tornarse insostenible a largo plazo. El 33 % de la tierra está moderada o altamente degradada debido a la erosión, la salinización, la compactación, la acidificación y la contaminación de los suelos por productos químicos orgánicos e inorgánicos (López *et al.*, 2015).

Por ello la implementación de técnicas de manejo agrícola que permitan un aporte de nutrimentos, disminuyan la degradación de la materia orgánica y garanticen el uso eficiente de los recursos en el sistema suelo-planta, resultan ser una fuente de desarrollo para los sistemas de producción sustentables. En este sentido, uno de los factores que permiten alcanzar mayor competitividad en el mercado mundial de los productos agrícolas es la reducción del uso de agroquímicos, cuyo costo depende en gran medida del precio del petróleo (especialmente el fertilizante nitrogenado) y cuyo efecto puede tener impactos nocivos sobre el ambiente. La sustitución parcial o total de agroquímicos por microorganismos, manteniendo altos rendimientos del cultivo, es una alternativa valiosa para lograr una producción sostenible y para conquistar mercados exigentes (Pedraza *et al.*, 2010).

Dado que la agricultura de conservación está basada en aprovechar al máximo los recursos biológicos, la biofertilización es un elemento indispensable que apoya la sustentabilidad. Los microorganismos son un recurso renovable y se pueden reproducir fácilmente en el laboratorio de manera controlada y a bajo costo. Es así que, los biofertilizantes son una opción para reducir los costos de producción, es importante explorar alternativas que detengan el deterioro del suelo, siendo los biofertilizantes una opción para el agricultor que le permite enfrentar los altos costos de la fertilización química y disminuir los efectos contaminantes al ambiente que éstos tienen y a su vez mejorar las condiciones del suelo (Martínez *et al.*, 2013).

2.2.4. Actividad microbiológica en condiciones de aridez

La relación suelo-planta-microorganismo es muy estrecha y es dependiente del ambiente del que forma parte. Por ello, el análisis de las reacciones en la actividad microbiana bajo condiciones de aridez es muy importante ya que genera una visión de cómo el suelo y las plantas se ven influenciadas bajo la actividad microbiana bajo el entorno extremo, característico de las zonas áridas.

Algunas plantas no pueden establecerse en sistemas degradados, característicos de las zonas áridas, y aun en el caso en que lo logren, generalmente se ven afectadas por alguna de las condiciones ambientales adversas, presentes en este entorno; en las comunidades microbianas, cuando no se dan las condiciones óptimas como disponibilidad de agua, oxígeno -dependiendo de si son aerobios obligados o anaerobios facultativos-, pH y temperatura, así como la disponibilidad de fuentes energéticas, también se ven comprometidas sus funciones para metabolizar sustratos (Terry *et al.*, 2005).

Bajo los árboles leguminosos característicos de las zonas semiáridas, existen las condiciones especiales que ayudan a otras plantas a nutrirse y protegerse del calor y la radiación bajo la sombra del follaje, razón por la que se les da el nombre de “plantas nodrizas” o al conjunto de estas plantas también se les da el nombre de “islas de recursos”. Entre los principales problemas que se presentan en estas áreas, están, en que el sistema de árboles nodriza que gobiernan la vegetación natural en el desierto se encuentra destruido y la capa superficial de suelo con sus microorganismos benéficos esta erosionada por acción del viento y el agua, la materia orgánica es muy baja, la estructura del suelo está destruida, hay una limitada disponibilidad de nutrientes y el agua es escasa (Bacilo *et al.*, 2006). Por estas razones, la sucesión natural y restauración de la cubierta vegetal en estas zonas áridas, si ocurre, es muy lenta, por lo que cualquier intento de explotación agrícola o de reforestación en el desierto con plantas nativas, debe considerar primordialmente la restauración de la microflora benéfica asociada con estos árboles y arbustos nodrizas, además de proporcionar una fuente adicional de materia orgánica (De-Bashan *et al.*, 2010). Por otro lado, con estudios realizados en las islas de recursos del desierto de Sonora por Bethlenfalvay *et al.* (2007), se ha descrito que los HMA contribuyen a estabilizar el suelo transportado por el viento bajo las plantas del desierto con dosel denso, favoreciendo el

establecimiento de plantas colonizadoras en suelos sin vegetación, e influye en la asociación de plantas con diferente condición micotrófica y contribuye a la creación de islas de recursos que se forman alrededor de las plantas nodrizas del desierto. El proceso de formación de islas de recursos, descrito anteriormente es mostrado en la Figura 2.

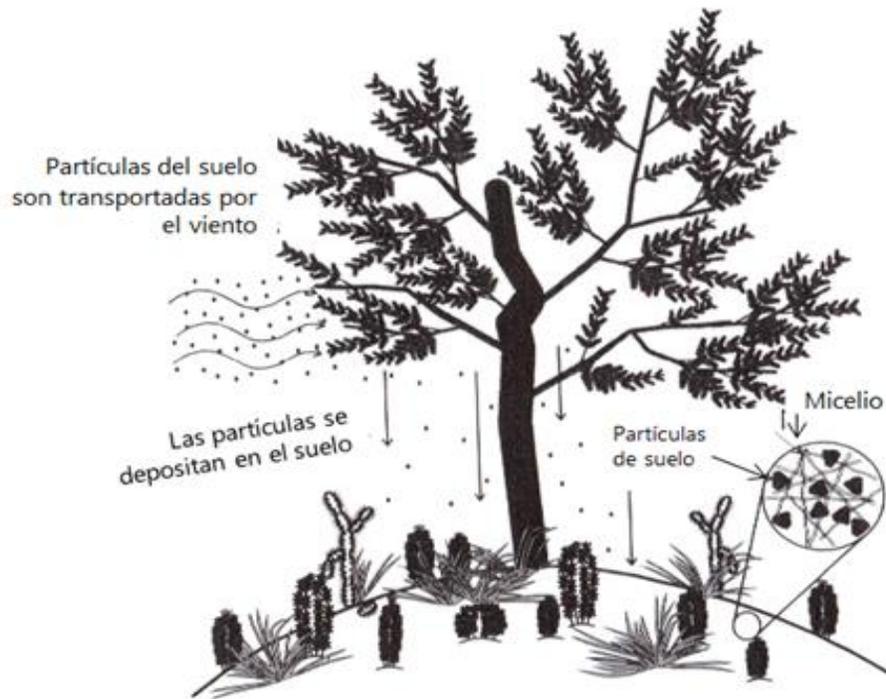


Figura 2. Formación de islas de recursos en el desierto y estabilización del suelo (Bethlenfalvay *et al.*, 2007).

Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB) y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son específicamente benéficos en ambientes limitantes y adversos, debido a su función en la mitigación de estreses ambientales en las plantas (De Bashan *et al.*, 2010).

Se han aislado PGPB nativas del desierto de la superficie de raíces de cactus cardón endófitas de cardones y endófitas del cactus *Mammillaria fraileana*, específicamente estas dos especies de cactus crecen sobre rocas y riscos en ausencia de suelo, y se ha observado que las bacterias intemperizan las rocas sobre las cual crecen las plantas, liberando minerales esenciales y al mismo tiempo, producen pequeñas cantidades de suelo que posteriormente será lavado de las pendientes y acumulado en las tierras bajas, permitiendo

de esta manera el crecimiento de otras plantas del desierto que no son capaces de crecer sobre rocas. Bajo este concepto se hicieron pruebas donde al eliminar las endófitas de las semillas se obtiene un crecimiento y desarrollo más lento en las plántulas de cactus, por el contrario se inocularon semillas de estos cactus con las mismas bacterias y se cultivaron en roca molida por un periodo largo de tiempo, casi todas las bacterias mostraron ser promotoras de crecimiento para estas plantas, permitiéndoles establecerse en ambientes extremadamente adversos (Montaño *et al.*, 2007). Así mismo varias PGPB aisladas de zonas áridas mejoraron el enraizamiento de esquejes de mezquite.

A su vez combinaciones de HMA nativos (*Glomus coronatum*) y no nativos (*G. intraradices*), *Rhizobium* y otras PGPB han sido utilizadas para aumentar el crecimiento de plantas en condiciones de semi aridez. Los HMA nativos fueron más efectivos que los no nativos, sugiriendo que los aislados nativos pueden ser más apropiados para las condiciones específicas de este ecosistema. En un estudio de 5 años, se encontró que la inoculación con HMA y rhizobia mejoró el establecimiento de plantas clave del ecosistema y, adicionalmente, aumentó la fertilidad del suelo (Montaño *et al.*, 2007).

El mundo microbiano que existe en las raíces es esencial para el crecimiento de cualquier planta en condiciones de aridez, haciendo una simbiosis que permite un crecimiento normal donde otras plantas no podrían crecer. En este proceso de combinación planta-organismo se produce suelo a partir de las rocas a un índice acelerado que permite un crecimiento de vegetación (Bashan, *et al.*, 2006).

Debido a las condiciones adversas la regeneración de zonas desérticas severamente degradadas, con arbustos, árboles y cactus es lenta y difícil y en muchos casos solo marginalmente exitosa. Por tales razones actualmente se encuentran bajo experimentación la inoculación con PGPB y con HMA en programas de revegetación y reforestación en suelos erosionados de zonas áridas (De-Bashan *et al.*, 2010).

2.3. Biofertilizantes

Debido a la eficiencia en las relaciones microbianas, dadas de forma simbiótica o saprofita con las raíces de las plantas, los biofertilizantes se han convertido en una oportunidad de ser explotados en los sistemas agrícolas como una biotecnología de bajo costo e impacto ambiental para contribuir con prácticas sustentables. De acuerdo a Martínez *et al.* (2013), existen tres grupos principales de microorganismos benéficos que destacan por su efectividad como biofertilizantes: los rizobios, las micorrizas y los promotores de crecimiento como *Azospirillum* (Figura 3).

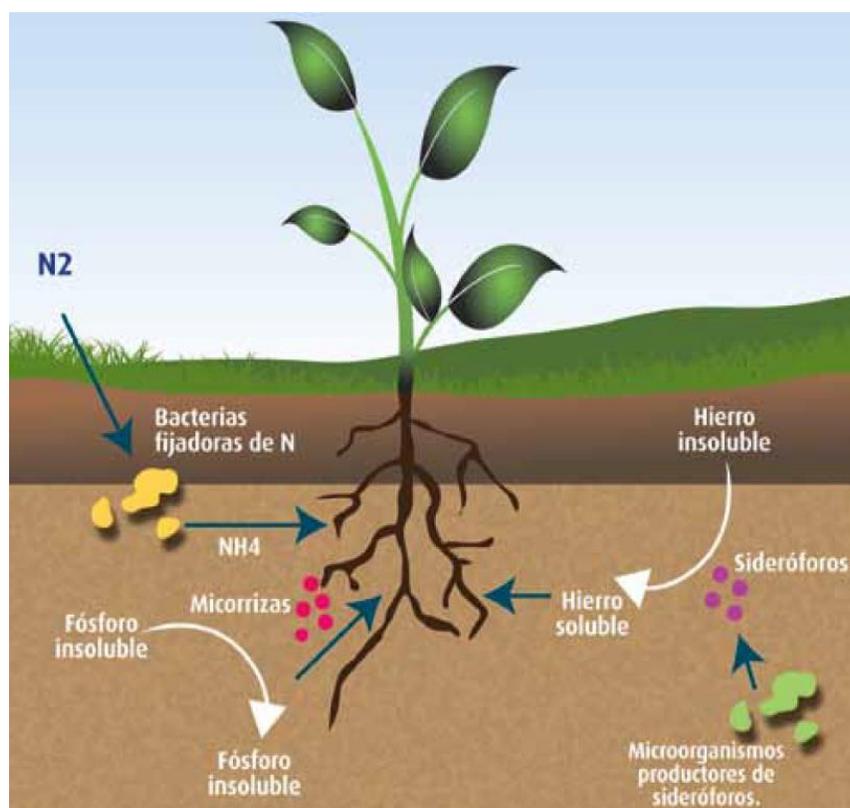


Figura 3. Principales biofertilizantes y mecanismos generales en las raíces (Martínez *et al.*, 2013).

El término “biofertilizante” es ampliamente utilizado (sobre todo en círculos agrícolas), que significa “inoculante bacteriano” (termino común en la literatura científica), el cual de manera general se refiere a preparaciones de microorganismos que pueden ser un sustituto parcial o total para la fertilización química (Díaz *et al.*, 2012).

De acuerdo a Bashan (2008), existe discrepancia entre llamarlo “inoculante microbiano” o “biofertilizante”, ya que como tal, un “inoculante microbiano” se refiere únicamente al medio de transporte microbiano que lo hace asimilable para la planta, convirtiéndose en un acarreador que puede ser orgánico, inorgánico o sintético, y que a su vez, contiene una o más cepas de hongos o bacterias benéficas de fácil uso, que pueden influir en funciones nutrimentales, de biocontrol, intemperizar minerales en el suelo y producir hormonas que mejoren el crecimiento de la planta en general (Figura 3).

Debido a que, en algunos países, los procedimientos para registrar un inoculante bacteriano pueden ser largos y costosos, se utiliza más comúnmente el término “biofertilizante”, facilitando así su registro para uso comercial.

El término “biofertilizante” ha tenido diversas concepciones; de acuerdo a la definición propuesta por la Red Iberoamericana de Fertilizantes Biológicos para la Agricultura y el Medio Ambiente (BIOFAG) se entienden como *“productos que contienen microorganismos vivos no patógenos y que al asociarse en forma natural con las raíces de las plantas o eneolíticamente (por acción del hombre) aportan algún nutrimento o favorecen la absorción de nutrimentos del suelo promoviendo el crecimiento de las plantas y mejorando el rendimiento de los cultivos”* (Aguirre *et al.*, 2012).

Los Biofertilizantes son los únicos productos elaborados con microorganismos vivos y no son lo mismo que otros productos orgánicos como compostas y humus producidos a partir de abonos verdes, excretas de animales, residuos de cosecha, residuos orgánicos, residuos de madera, entre otros. En general, los microorganismos que se usan como biofertilizantes se adhieren fuertemente a las raíces de las plantas y no es fácil que se laven y pierdan debido a que crecen en contacto tan estrecho con las plantas que los nutrimentos que liberan son rápidamente absorbidos por las raíces. Los biofertilizantes pueden utilizarse para aumentar el aprovechamiento de los fertilizantes químicos y para facilitar la disponibilidad de nutrimentos que están en el suelo pero de formas no asimilables, actuando como sideróforos (Martínez *et al.*, 2013). Los biofertilizantes pueden ser clasificados de acuerdo al mecanismo (directo o indirecto) empleado para promover el crecimiento de las plantas (el primero se refiere a los beneficios provocados por la nutrición de la planta y el segundo mecanismo es referido a los beneficios otorgados por la sanidad a la planta), o

bien, conforme al tipo de microorganismos empleados en su formulación, bacterias, hongos o una combinación de ambos (Aguado, 2012).

2.3.1. Panorama actual de la tecnología de la biofertilización

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas a largo plazo debe fomentar el uso y manejo efectivo de los recursos internos de los agroecosistemas. En este sentido, los biofertilizantes constituyen un medio económicamente atractivo y aceptable para reducir los insumos externos y mejorar la cantidad y calidad de los recursos internos, tales como suelo, agua, entre otros (Terry *et al.*, 2005).

La mayoría de los agricultores tienden a practicar métodos tradicionales o a copiar métodos desarrollados en países más avanzados sin estar conscientes de las deficiencias de tales prácticas o sin conocer su costo ambiental. Más aún, en la mayoría de los casos, los fertilizantes son demasiado caros o el valor de la cosecha no justifica su costo. En lugares donde hay disponibilidad de fertilizantes, es común la sobrefertilización, una práctica que puede contaminar los depósitos de agua subterránea, produciendo riesgos para la salud de las poblaciones circundantes y alterando el medio ambiente local. Aun así la contribución de este tipo de agricultura al suministro mundial de alimentos permanece muy por debajo de su potencial agronómico (*Ídem*).

Naturalmente, la agricultura de subsistencia no tiene los recursos económicos para invertir en técnicas agrícolas mejoradas. En países en desarrollo, aun los productores más ricos, carecen del conocimiento suficiente de las técnicas agrícolas modernas o experimentales. El uso de inoculantes microbianos en estas áreas es prácticamente desconocido, cuando se propone a los productores reemplazar los fertilizantes de nitrógeno disponibles por inoculantes, muchos de ellos son renuentes a hacerlo por miedo a reducir la fertilidad del suelo. Finalmente, en muchas áreas rurales en países en desarrollo hay una renuencia básica a usar bacterias y hongos como microorganismos benéficos: en estas culturas rurales los microbios están asociados con enfermedades humanas y de animales. Los agricultores a pequeña escala son clientes potenciales para la tecnología microbiana, ya que los inoculantes microbianos pueden ser producidos y comercializados a bajo costo. Comparado con el suministro de químicos, el impacto de los inoculantes microbianos en el mercado

agrario es muy bajo (Bashan, 2008). Brasil, Argentina, Uruguay y Estados Unidos son los países en los que más se utilizan los Biofertilizantes.

2.3.1.1. Problemática actual de los biofertilizantes

Debido a que el suelo es un ambiente heterogéneo e impredecible, donde en muchos casos las bacterias y hongos inoculados no pueden encontrar un nicho vacío donde puedan sobrevivir, con excepción de suelos esterilizados, condición que no existe en agricultura a gran escala. Estos microorganismos inoculados deben competir con una microflora nativa a menudo mejor adaptada. En este sentido, el inoculante proporciona al hongo o a la bacteria introducida un microambiente más apropiado (aun temporalmente), que evita la rápida disminución de la población microbiana una vez inoculada en el suelo. El primer objetivo a tomar en cuenta cuando se considera la inoculación con microorganismos benéficos, es encontrar la mejor bacteria o el mejor HMA disponible. Como siguiente paso es necesario estudiar la formulación específica del inoculante ya que es la que determina su potencial éxito. Algunos microorganismos que han sido reportados con resultados potencialmente favorables en la literatura científica nunca han aparecido en el mercado comercial, tal vez debido a una formulación inapropiada. Formulaciones avanzadas de hongos micorrízicos son aún más complicadas, debido a la necesidad de mantener no solo al hongo sino también al material vegetal necesario para su supervivencia, en este caso las “formulaciones” usadas en México son simplistas (raíces y suelos de plantas colonizadas por HMA).

En condiciones semiáridas la supervivencia de microorganismos introducidos es difícil, aun en países desarrollados como Israel, Australia, Estados Unidos, o en el noreste de México, donde la inoculación con HMA y *Azospirillum* ha comenzado a tomar fuerza sólo en años recientes. Las condiciones ambientales adversas, incluyendo sequías frecuentes, falta de suficiente irrigación, alta salinidad y erosión del suelo, pueden disminuir rápidamente la población de cualquier especie introducida en el suelo, a menos que se tomen las precauciones necesarias (Bashan, 2008).

La agricultura en zonas semiáridas de países en desarrollo es un desafío mayor para la tecnología de inoculación, y en términos tecnológicos, parece destinada a fracasar. Sin embargo, en este tipo de agricultura las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) y los HMA pueden tener una importante contribución en caso de que puedan desarrollarse inoculantes baratos y de fácil uso. Así, con una instrucción apropiada, el productor de pequeñas parcelas familiares podría aplicar los inoculantes en el tiempo justo y en las dosis exactas. Puesto que en cualquier caso las cosechas son pocas, cualquier mejoramiento tendrá mayor efecto que en la agricultura desarrollada, donde las plantas ya han crecido casi a su máximo potencial genético (*Ídem*).

Las prácticas agrícolas ejercen un impacto fundamental en la biota del suelo, afectando su diversidad. La deforestación y conversión de praderas en cultivos agrícolas afecta de manera drástica el ambiente del suelo llevando a la reducción del número y especies de organismos. Además, la reducción de la cantidad y calidad de residuos vegetales incorporados al suelo y la reducción en número de especies de plantas superiores ocasiona la reducción en el rango de hábitat y fuentes de alimentación para los organismos del suelo. La biota del suelo llega a ser afectada en distintas formas, tanto positivas como negativas, de acuerdo con el manejo y sistemas agrícolas implementados en un campo y dependiendo en la localización de la biota en el suelo. Como ejemplo existen organismos vulnerables a los cambios del pH en el suelo; la relación bacteriana: fúngica será afectada con la adición de fertilizantes y abonos alterando la relación C/N tal como los efectos de laboreo. El laboreo reduce el número de hifas fúngicas, ya que los agregados del suelo que se mantienen unidos por estos se destrozan (FAO 2015).

En el caso de las micorrizas, que trabajan en la raíz de la planta o en la rizósfera y que tienen un efecto acumulativo. Una vez que las micorrizas se establecen interactúan con la planta de forma continua durante todo su ciclo de crecimiento, por lo que el efecto es mayor a medida que el cultivo avanza, sin embargo, de acuerdo con estudios de Aguado *et al.* (2012), se ha probado que las aplicaciones de pesticidas afectan la inoculación de las micorrizas en distintos cultivos básicos, disminuyen el porcentaje de infección radical, y son las aplicaciones de insecticidas, las que más lo disminuyen tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Efecto de la aplicación de pesticidas en la infección micorrízica (Aguado *et al.*, 2012).

Cultivo	% de infección radical								
	Sin pesticidas			Con fungicidas			Con insecticida		
	1° Dosis	2° Dosis	3° Dosis	1° Dosis	2° Dosis	3° Dosis	1° Dosis	2° Dosis	3° Dosis
Maíz	67a	75 a	83 a	15 cd	33 bc	48 b	8 d	25 cd	33 bc
Frijol	25 b	42 a	50 a	9 bc	18 bc	25 b	8 c	17 bc	17 bc
Sorgo	33 abc	50 a	50 a	18 cd	30 bc	35 abc	8 d	17 cd	42 ab
Trigo	42 bcd	58 ab	67 a	29 de	39 bcd	48 abc	17 e	33 cde	50 abc
Soya	42 ab	50 a	58 a	11 cde	20 cd	27 bc	0 e	8 de	17 cde
Avena	17 cd	33 ab	42 a	12 cd	23 bcd	35 ab	8 d	25 bc	33 ab

Nota: letras iguales tienen igualdad estadística significativa.

2.3.1.2. Utilización mundial y nacional

En la mayoría de países en desarrollo de Asia, África, Centroamérica y Suramérica, y en México, la tecnología de los inoculantes no ha tenido mayor impacto en la productividad de las granjas familiares, debido en gran parte a que no se utilizan inoculantes o los que se usan son de baja calidad. Solo en años muy recientes se ha iniciado la inoculación semicomercial a gran escala con Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y PGPB del género *Azospirillum*, principalmente en el noreste mexicano y en Argentina (Bashan, 2008).

Las fábricas productoras de inoculantes están localizadas en la mayoría de los casos en países desarrollados donde ya existe el mercado para éstos; por tal razón, a menudo no son tomados en consideración los problemas de aplicar estos inoculantes en países en desarrollo, ya que éstos representan sólo una pequeña porción del mercado. En la actualidad, ha habido una producción nacional de biofertilizantes (INIFAP) apoyada inicialmente por el gobierno mexicano. A pesar de esto, la aplicación a gran escala de inoculantes microbianos encara serias dificultades en la mayoría de países en desarrollo, incluido México. Desde una perspectiva realista, se debe aceptar que los fertilizantes químicos continuarán dominando el mercado. Debe esperarse sólo un modesto y gradual aumento en el uso de biofertilizantes. El mercado para la inoculación de cereales y leguminosas en México debe poner especial atención a las necesidades y restricciones de los pequeños agricultores que necesitan formulaciones económicas y de fácil uso (Bashan, 2008).

2.4. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

La asociación mutualista que se lleva a cabo entre las raíces de las plantas superiores y los hongos es lo que se conoce como micorriza y posibilita mediante mecanismos bioquímicos, una mayor absorción de nutrimentos y tolerancia al estrés hídrico (Holguin *et al.*, 1996). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) o también conocidos como micorrizas arbusculares (MA) establecen una asociación mutualista con las raíces de las plantas formando las micorrizas arbusculares (gr. mykes, hongo y rhiza, raíz). En esta asociación el hongo ofrece un beneficio a su huésped a cambio de recibir otro, es decir, hay un beneficio mutuo, producto de un intercambio bidireccional “hongo-planta”: la planta suministra al hongo protección, glucosa, fructosa (Rivera, 2006) y fuentes de carbono procedentes de la fotosíntesis (proceso que el hongo no puede realizar); mientras que el hongo mejora la estructura del suelo a través de la formación de microagregados facilitando a la planta la absorción de agua y nutrimentos como fósforo y nitrógeno, recursos del suelo que en condiciones extremas la planta difícilmente obtendría eficientemente sin la ayuda del hongo (Bethlenfalvay *et al.*, 2005; Montaña *et al.*, 2007).

Las micorrizas contribuyen al ciclado de nutrimentos (poniéndolos a disposición de la planta de forma asimilable) en el sistema suelo-planta, particularmente en la absorción de fósforo, tanto en ecosistemas agrícolas como naturales. Esta relación simbiótica también mejora la captación de agua, la sanidad vegetal a través de una protección incrementada contra el estrés, ya sean biótico (patógenos), o abiótico (sequía, salinidad, metales pesados, contaminantes orgánicos, entre otros) (Rivera, 2006).

Las micorrizas se dividen en ectomicorriza (micorriza en vaina: se caracteriza por tener un manto compacto de hifas que cubre las raíces cortas con una red micelial) y endomicorrizas cuyo tipo más común es la vesículo-arbuscular la cual forma sus estructuras dentro de las células corticales de la raíz (Holguin *et al.*, 1996). De los siete tipos existentes de micorriza, la arbuscular es el más común, pues se encuentra en el 80 % de las especies vegetales y en un amplio intervalo ecológico. Los HMA coevolucionaron con las plantas desde la colonización de los ecosistemas terrestres, por lo cual se cree que jugaron un papel clave en este proceso y son determinantes cruciales de la biodiversidad vegetal, de la variabilidad de los ecosistemas y de la productividad de las comunidades vegetales (Rivera, 2006).

El hecho de que más del 80 % de las plantas terrestres tengan uno o más de estos hongos asociados, muestra la eficiencia de esta asociación mutualista, su globalidad y la estrecha coevolución planta-hongo micorrízico, así como su relevancia en el reino vegetal (Montaño *et al.*, 2007).

Con aportes de las secuencias genómicas mitocondriales y las secuencias del gen que codifica la subunidad pequeña del RNAr, se han agrupado a los HMA en un nuevo Phylum: Glomeromycota, separado de su anterior clasificación como parte del Phylum Zygomycota. En la Figura 4 se presenta una sinopsis reciente de la clasificación de los HMA. No obstante actualmente, sólo se han descrito cerca de 200 especies de HMA. Asimismo, se considera que la diversificación de las casi 300 mil especies vegetales existentes hoy en día, fue de manera simultánea con sus asociados fúngicos respectivos (Aguilera *et al.*, 2007).

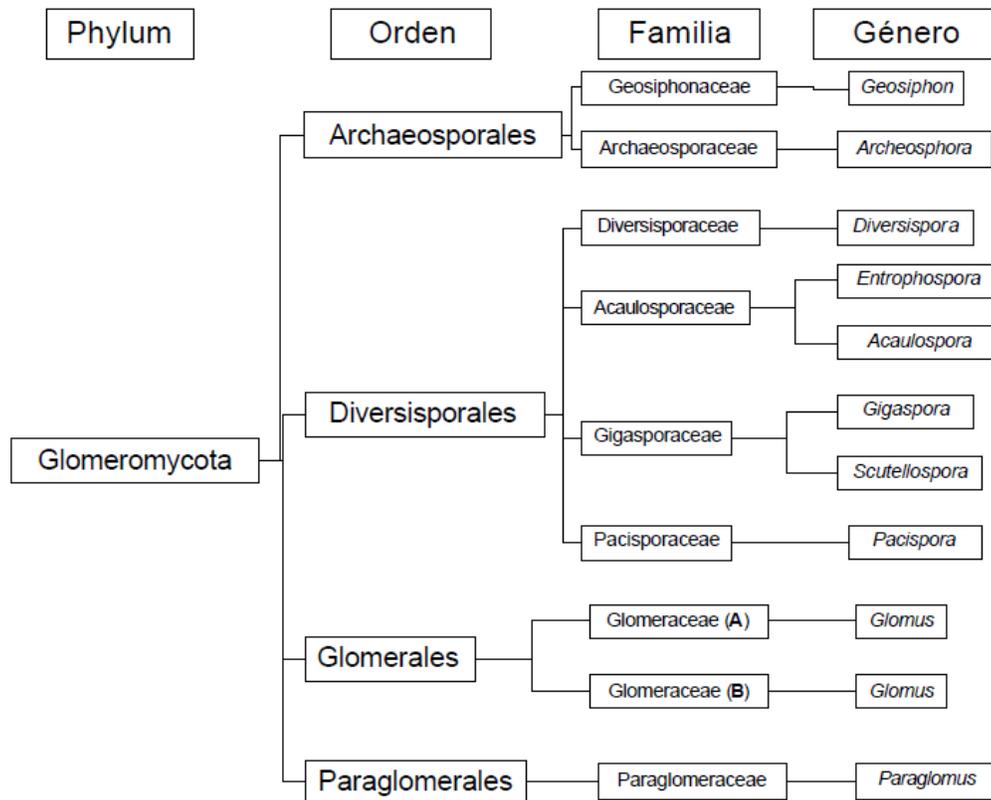


Figura 4. Clasificación de los hongos micorrízicos arbusculares (Brundrett (2004) citado por Montaño (2007)).

Como ya se mencionó antes, la simbiosis mutualista del tipo micorrízico arbuscular que los hongos del orden Glomerales forman con las raíces de un 80 a 90 % de las especies de plantas sobre la tierra, es una asociación basada en el movimiento bidireccional de nutrimentos, en el cual el hongo recibe fotosintatos de la planta y transloca nutrimentos hacia ella (Aguilera *et al.*, 2007).

Entender las características de las micorrizas ayuda a comprender de qué manera se lleva la interrelación del sistema raíz-hongo. A continuación, se describe el modo de vida de las micorrizas.

Los HMA infectan las células de la corteza radicular y forman una red interna y un crecimiento exterior de hifas. Poseen estructuras especiales conocidas como vesículas y arbuscúlos. Los arbuscúlos son altamente ramificados y ayudan en la transferencia de los nutrimentos del hongo hacia las células de la raíz de la planta, mientras que las vesículas son estructuras en forma de bolsas que almacenan el fósforo como fosfolípidos (FAO, 2007).

La micorriza arbuscular, se caracteriza por que el hongo que coloniza la raíz desarrolla una estructura en forma de un diminuto arbolillo en las células del parénquima radical, estructura llamada “arbuscúlo” que es el sitio de intercambio entre la planta y el hongo. Además, el sistema micorrízico está formado por un conjunto de hifas (micelio) que están conectadas con el tejido de la raíz y que salen de ella ramificándose en el suelo (Figura 5). El micelio que se encuentra en el suelo forma una red de hifas capaces de interconectar a las raíces de plantas y de permitir el flujo de agua y nutrimentos entre las raíces de éstas (Montaño *et al.*, 2007).

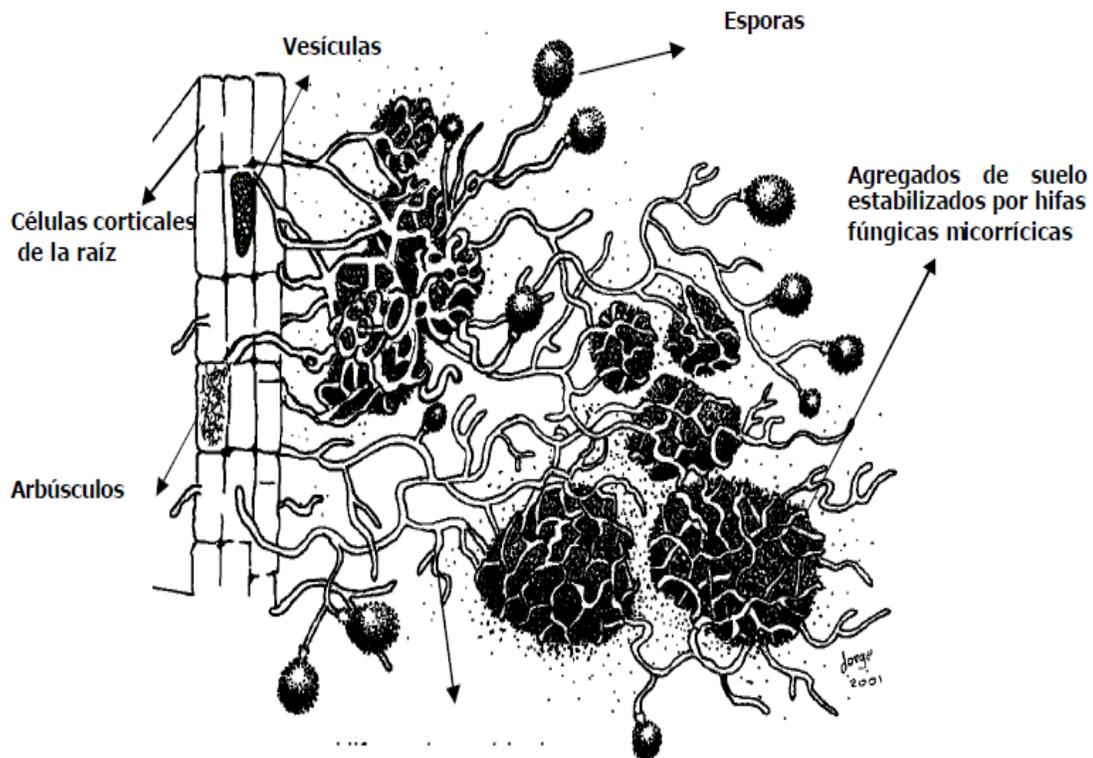


Figura 5. Estructura de la simbiosis HMA y las raíces (García *et al.*, 2007).

El ciclo de vida de los hongos micorrízicos de acuerdo a Aguirre *et al.* (2012), inicia con la germinación en el suelo de sus propágulos o esporas que crecen al azar en busca de una raíz susceptible a ser colonizada. Durante la germinación de la espora, el costo energético del crecimiento fúngico es sustentado por las reservas del hongo. En ausencia de la planta huésped, el crecimiento del hongo es relativamente corto (20-30 días) y se generan diversas modificaciones en su morfología fúngica. La presencia de la raíz, en cambio, permite el desarrollo de un micelio vegetativo que puede colonizar del 60 al 90 % del sistema radical en condiciones favorables. Se conocen con cierta precisión los servicios que brindan los HMA en los ecosistemas y en la agricultura durante el desarrollo extensivo del micelio extrarradical al explorar regiones inaccesibles a la raíz, puesto que proporcionan:

- Fertilización del sustrato: absorben nutrimentos del suelo y los transportan a la parte aérea de la planta (Crowley *et al.*, 1991; Montañaño *et al.*, 2007; Aguirre *et al.*, 2012).
- Cierta protección contra patógenos de la raíz (Borowicz, 2001).

- Modificación de contaminantes edáficos. En suelos con contaminación por metales pesados en la simbiosis micorrízica incrementa la tolerancia a la misma (Rivera, 2006; Montaña *et al.*, 2007).
- Formación de suelo por la disolución de rocas y enlace de partículas de suelo (Montaña *et al.*, 2007).
- Mejoran la estructura del suelo contribuyendo al control de la erosión (Rillig y Mummey 2006).
- Favorece a un mejor aprovechamiento del agua en especies anuales mediante la generación de una menor resistencia al transporte de agua en las plantas (Aguirre, *et al.*, 2012).
- Muestra sinergismos benéficos con otros microorganismos del suelo, como por ejemplo cuando interacciona con *Rhizobium* o *Azospirillum* (Holguin *et al.*, 1996).
- Estructuración de la comunidad vegetal en zonas áridas (interacción planta-planta por medio de raíces) (Montaña *et al.*, 2007).
- Almacenamiento de carbono mediante glomalinas (se ha encontrado que los HMA asociados con las plantas, reciben entre el 60 % y el 90 % del carbono de los árboles del dosel, pudiendo ser un sumidero importante del carbono de la comunidad) (Montaña *et al.*, 2007).

Por lo anterior, los hongos formadores de micorrizas arbusculares son considerados como un recurso biológico multipropósito, ya que además de sus efectos sobre la productividad vegetal por los beneficios nutricionales y de sanidad vegetal, esta asociación también genera beneficios ambientales al mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, disminuir la erosión de los mismos, lo cual propicia el mantenimiento y la regeneración de los suelos a largo plazo (Aguirre, *et al.*, 2012).

Las HMA han incrementado su importancia en diversas ramas de la ciencia y de la tecnología, como es el caso de la comprensión de la dinámica vegetal y de la sucesión ecológica con fines ecológicos y de restauración ambiental, y en la obtención de biofertilizantes no contaminantes. 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 (Montaña *et al.*, 2007).

2.4.1. Actividad fisiológica en las plantas

La respuesta positiva de las plantas a la micorriza se atribuye al crecimiento externo del micelio, el cual actúa como una extensión de la superficie de absorción de la raíz y le facilita a la planta el transporte de nutrimentos y agua. Se aumenta el desarrollo del sistema radical y de los pelos radicales, lo cual contribuye a reducir el impacto del estrés hídrico en las plantas (Aguirre *et al.*, 2012). Se ha descubierto y probado que la superficie de absorción de las raíces colonizadas con micorrizas se incrementa hasta en 1,000 veces (Amado *et al.*, 2012).

La simbiosis micorrízica arbuscular promueve a la tolerancia a la sequía, ya que las plantas micorrizadas tienen mayores recursos para afrontar las condiciones de sequía debido a que adquieren modificaciones nutricionales, fisiológicas, bioquímicas y morfológicas. A pesar de que los mecanismos involucrados en la orquestación micorrízica para la tolerancia a la sequía son muy complejos, la mayoría de los efectos pueden estar relacionados con el mejoramiento del estatus nutricional, especialmente de fósforo y de nitrógeno. Este mejor estatus nutricional incrementa la habilidad de las plantas con MA para extraer agua del suelo de manera más efectiva y así mantener una alta hidratación foliar bajo condiciones extremas y recuperarse rápidamente cuando se establece irrigación. En consecuencia estas plantas tienen un menor estrés hídrico y pueden mantener los estomas parcialmente abiertos durante más tiempo y realizar funciones fotosintéticas; tal estatus hídrico superior y la mejora fotosintética, favorecen el desarrollo de mayor área foliar, la cual permite una removilización de nutrimentos frente a las plantas no micorrizadas en condiciones de sequía. Estos cambios favorecen que las plantas generen una mayor producción, aun bajo condiciones de déficit hídrico (Subramanian y Charest, 2007).

2.4.2. Efecto de la presencia micorrízica en los suelos

La fertilidad del suelo no sólo depende de su composición química, sino también de la naturaleza cuantitativa y cualitativa de los microorganismos que en él habitan. Por este motivo se considera que la diversidad y las funciones de las comunidades microbianas existentes en el suelo son esenciales para la agricultura sustentable.

El efecto de las micorrizas sobre el suelo es dado por el micelio de los hongos que intervienen en la agregación de las partículas mediante la participación de la glomalina, una glicoproteína insoluble producida y excretada en forma abundante por las hifas externas de los hongos y que debido a su naturaleza funcionan como pegamento participando en la iniciación y estabilización del suelo (Pedraza *et al.*, 2010). Las micorrizas sirven como adherente mediante la producción de glomalina que aglutina las partículas del suelo para formar agregados más estables, mejorando la capacidad de retención de agua y controlando la erosión del suelo (Rillig y Mummey, 2006). Estos efectos según Pedraza *et al.* (2010), han sido evidenciados en numerosas situaciones ecológicas.

Varias especies de HMA pertenecientes a diferentes géneros han sido aisladas de suelos contaminados con metales pesados (MP) mostrando que una diversidad considerable puede existir en esos ecosistemas. Seis especies del género *Glomus* fueron aisladas de suelos a los que se habían adicionado lodos de tratamiento conteniendo Cd y Pb, en condiciones naturales se ha visto que el desarrollo de la micorriza arbuscular es afectado en algunos suelos contaminados pero en otros no hay un efecto aparente. Se han propuesto diferentes estrategias para explicar el efecto protector de los HMA contra los MP. La primera de ellas se atribuye al mejor estado nutricional favorecido por las redes hifales que proveen nutrimentos del suelo a la planta. Empero, en un estudio desarrollado con plantas de *P. sativum* micorrizadas y no micorrizadas creciendo en presencia de Cd, las concentraciones de fósforo no fueron significativamente diferentes, lo que sugiere que la nutrición fosfatada no explica este efecto de atenuación. Otra de las estrategias se refiere a que los organismos restringen la captación del metal. Reportándose que la glomalina producida por las hifas de los HMA, secuestra elementos tóxicos. Asimismo, las células fúngicas tienen una alta capacidad de adsorción de metales gracias a la presencia de grupos carboxilo, amino, hidroxilo, fosfato y sulfhidrilo, así como a la quitosana y quitina. El secuestro de metales en el citoplasma fúngico y vegetal por metalotioneínas (MT) y fitoquelatinas (FQ) se ha propuesto como otro mecanismo posible de tolerancia en las micorrizas arbusculares (Rivera, 2006).

2.4.3. Efecto de la presencia micorrízica en la asimilación de nutrientes

Las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares permean en grandes volúmenes de suelo (Camel *et al.*, 1991) interconectando los sistemas radicales de las plantas adyacentes, lo cual facilita el intercambio de nutrientes entre ellas, contribuyendo al crecimiento de las plantas debido a su íntima asociación con las células vivas dentro de las raíces y el suelo (Bethlenfalvay *et al.*, 2007). Así, el beneficio en la fisiología de las plantas se debe en gran medida a la influencia que las micorrizas generan en el suelo, donde estos microorganismos contribuyen a la solubilización de minerales para facilitar el aprovechamiento de los fertilizantes químicos sintéticos aplicados, llegando a reducir en algunos casos, hasta el 50% las dosis de fertilización química recomendadas, sin pérdida en los rendimientos potenciales (Aguirre, *et al.*, 2012).

Se ha documentado que las plantas micorrizadas resisten mejor las condiciones adversas en el suelo, como son la falta de agua, de nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno, ya que los HMA proporcionan hasta un 80 % y 25 % del fósforo y nitrógeno requeridos por las plantas (Montaño *et al.*, 2007). A continuación se presenta la forma de asimilación de cada uno de los nutrientes por parte de las micorrizas.

2.4.3.1. Fósforo

El fósforo es el principal elemento que se transporta a la planta mediante las hifas de los hongos micorrízicos. La productividad de las regiones áridas es particularmente pobre debido por la baja disponibilidad de fósforo que presentan, aunque los suelos de las zonas áridas contienen una alta concentración de fósforo, 557-729 kg ha⁻¹; en función del uso del suelo solamente del 2.4 al 3.9 % se encuentra en forma disponible para las plantas. Generalmente, del 15 al 20 % (97 a 110 kg ha⁻¹) del fósforo total está presente en formas inorgánicas; el restante 77-82 % está disponible en formas inorgánicas como fosfato tricálcico y en una menor cantidad como fosfatos de hierro y aluminio. Las formas insolubles del fósforo incluyen los fosfatos de aluminio en suelos ácidos y fosfatos de calcio en suelos alcalinos. Las reacciones de fijación en el suelo ocasionan que solamente una parte (10 al 15 %) del fósforo de los fertilizantes químicos o estiércoles aplicados, pueda ser utilizado por las plantas en el mismo año de su aplicación. Se acepta

generalmente que el principal mecanismo de solubilización de fosfato mineral se asocia con la producción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales quelan los cationes unidos al fosfato a través de sus grupos hidroxilo y carboxilo y favorece de esta forma su conversión en formas solubles. La capacidad de los ácidos orgánicos para aumentar la disponibilidad de fósforo, no sólo se debe a la acidificación en la rizósfera de la planta, sino también a su capacidad de formar complejos estables con él aluminio y hierro (Amado *et al.*, 2012).

El fósforo es un nutrimento de baja movilidad en el suelo, por lo que la biofertilización de los cultivos con hongos micorrízicos resulta en una mejoría del estatus nutricional de las plantas. El incremento en la absorción de fósforo, parece ser de naturaleza física. En comparación con un sistema radical no micorrizado, las hifas externas de la asociación exploran un mayor volumen de suelo e interceptan un mayor número de fuentes puntuales de fósforo con mayor eficiencia, los hongos disuelven los minerales fosfatados de poca solubilidad y las raíces infectadas por las micorrizas mejoran la tasa de absorción del fósforo, mediante el aumento del gradiente de difusión, absorbiendo el fósforo de la solución de suelo mediante un gradiente de potencial químico generado por una mayor concentración de fósforo, que puede llegar a ser de dos a tres veces mayor en la hifa que en la solución del suelo. De esta manera, el fósforo es convertido en gránulos de polifosfatos en las vacuolas y transportado por la corriente citoplasmática hacia las vesículas donde puede ser almacenado temporalmente o ir directamente hacia los arbusculos (FAO, 2007; Aguirre *et al.*, 2012).

Se calcula que las tasas de transporte de fósforo de las raíces micorrizadas son de dos a seis veces las de las raíces no micorrizadas. El efecto de plantas micorrizadas en relación a no micorrizadas sobre la absorción de fósforo varía con la dosis de aplicación de este elemento, siendo la absorción generalmente mejor a los niveles bajos e intermedios de la aplicación de fósforo. Para que las micorrizas sean eficientes es necesario alcanzar una cierta concentración límite de fósforo en la solución suelo la que puede ser tan baja como $0,02 \text{ mg litro}^{-1}$, debido a que altas concentraciones de este elemento en la solución, pueden reducir el nivel de infección de la micorriza (FAO, 2007).

2.4.3.2. Nitrógeno

El nitrógeno puede perderse del suelo por lixiviación de nitratos o a través de emisiones gaseosas hacia la atmósfera en la forma de amoníaco, óxido nítrico o bien nitrógeno molecular, todas las cuales, a excepción de la última, son consideradas como fuentes potenciales de deterioro ambiental. Cuando se aplican fertilizantes químicos nitrogenados, parte de éstos pueden volatilizarse como amoníaco, particularmente en suelos alcalinos (comunes en zonas áridas), y estas pérdidas pueden alcanzar hasta 50 % de las dosis químicas aplicadas en sistemas agrícolas convencionales o hasta 80 % en cultivos de anegamiento como arroz (Aguado *et al.*, 2012).

El nitrógeno puede ser absorbido por las hifas y las raicillas micorrizadas en diferentes formas y posteriormente ser transferido a la planta. Los hongos absorben NH_4^+ a concentraciones más bajas que las raíces y lo asimilan más rápidamente, evitando con esto las pérdidas por lixiviación (Aguirre, *et al.*, 2012).

2.4.3.3. Otros

La solubilización de fosfatos del suelo debido a los ácidos orgánicos producidos por las micorrizas, no solo conlleva a un incremento en la disponibilidad de fósforo, si no que consecuentemente provoca un aumento de la disponibilidad de micronutrientes, como Zn y Mn, en el suelo al disminuir el pH en la rizósfera, o por la quelación de estos micronutrientes (Amado *et al.*, 2012).

Por otro lado, algunas micorrizas producen y liberan unas sustancias llamadas “sideróforos” (Martínez *et al.*, 2013). Los sideróforos son moléculas con una alta afinidad por el hierro que son producidos por diversos microorganismos y gramíneas para aumentar la biodisponibilidad de este elemento. A pH neutro, la disponibilidad de hierro en el suelo es muy limitada para las plantas debido a la baja solubilidad de las fases minerales (como los óxidos de hierro) con las que se asocia este elemento. Los sideróforos disuelven estas fases minerales formando complejos solubles de hierro que pueden ser introducidos en las células vegetales mediante mecanismos de transporte activo. Bajo condiciones anóxicas (con poco oxígeno), el hierro se encuentra por lo general en un estado de oxidación Fe^{+2} (ión ferroso) que es soluble. Sin embargo, bajo condiciones óxicas (con una alta concentración de

oxígeno), el hierro se encuentra como ión férrico (Fe^{+3}) que es capaz de formar diversos minerales insolubles. Para obtener el hierro de estos minerales las células producen sideróforos que se unen al hierro con una alta afinidad y lo transportan hacia el interior de las mismas (Amado *et al.*, 2012).

2.4.4. Micorriza *Glomus intraradices* Cepa INIFAP

Considerado un biofertilizante de acción directa, los HMA, habitan parcialmente o de forma total en los tejidos vegetales y por ello su acción se realiza en el vegetal y no en el medio circundante (Amado *et al.*, 2012). Debido a los beneficios otorgados por los hongos micorrízicos arbusculares, se vio en la necesidad de poder reproducirlo y generar un biofertilizante beneficiando así a las plantas de interés agronómico donde se vea inoculado. A través del Programa Alianza Para el Campo, INIFAP desarrolló un producto biológico denominado “Biofertilizante de Micorriza” o “Micorriza INIFAP”. La micorriza INIFAP contiene principalmente el hongo *Glomus intraradices* Schenk et Smith, es un biofertilizante de grano fino donde sus fuentes de inóculo son esporas, hifas, fragmentos de cuerpos fructíferos y raíces colonizadas; certifica un 95 % de infección en el sistema radical de la planta hospedera y al menos 40 propágulos por gramo de suelo. La Micorriza INIFAP conserva su viabilidad por tres años o más, bajo condiciones de almacenamiento a 25 °C de temperatura (Aguirre *et al.*, 2012).

2.4.4.1. Forma de aplicación

Los HMA actúan en la raíz de la planta, por esta razón su aplicación siempre debe realizarse de forma que no se les dificulte el acceso a la raíz. Existen varias formas de aplicación de acuerdo al tipo de producto, al cultivo y al sistema de cultivo que se está utilizando (Martínez *et al.*, 2013). La Micorriza INIFAP puede aplicarse a la semilla, al material vegetativo o al suelo. La forma más precisa de inoculación es mediante su adhesión a las semillas, por medio de un adherente.

El procedimiento general de inoculación para semillas consiste:

- Dilución del adherente en agua.
- Aplicación del adherente a la semilla: Extendiendo la semilla a utilizar asperjando sobre ella el adherente y se mezcla, verificando que toda la semilla adquiera una consistencia “pegajosa”.
- Incorporar el biofertilizante a la semilla mezclándolas hasta que queden recubiertas homogéneamente.

La Micorriza INIFAP tiene la cantidad de inóculo suficiente en la presentación de 1 kg para aplicarse en una hectárea de un cultivo de semilla de tamaño mediano, como maíz y frijol, cuya recomendación de siembra es de 20 a 25 kg ha⁻¹. En cultivos de semilla pequeña que emplean hasta 50 kg ha⁻¹, como sorgo, trigo, cebada y avena, se recomienda utilizar tres bolsas de 1 kg de la Micorriza INIFAP ha⁻¹. En cultivos anuales los beneficios de la simbiosis se expresan en plazos muy breves (20-30 días después de la biofertilización), mientras que en cultivos perennes los efectos se observan hasta después de tres meses (Aguirre *et al.*, 2012). En regiones de alta productividad o con cultivos de riego, cultivos de ciclo largo o de varios cortes productivos, es conveniente inocular la semilla al momento de la siembra y hacer una segunda aplicación en forma de aspersión a la base de la planta para aumentar el efecto benéfico de los microorganismos pues aumenta el número de éstos en el suelo y por tanto en las raíces (Figura 6). Se han visto incrementos en el rendimiento y en la relación costo/beneficio al realizar esta práctica (Martínez *et al.*, 2013).

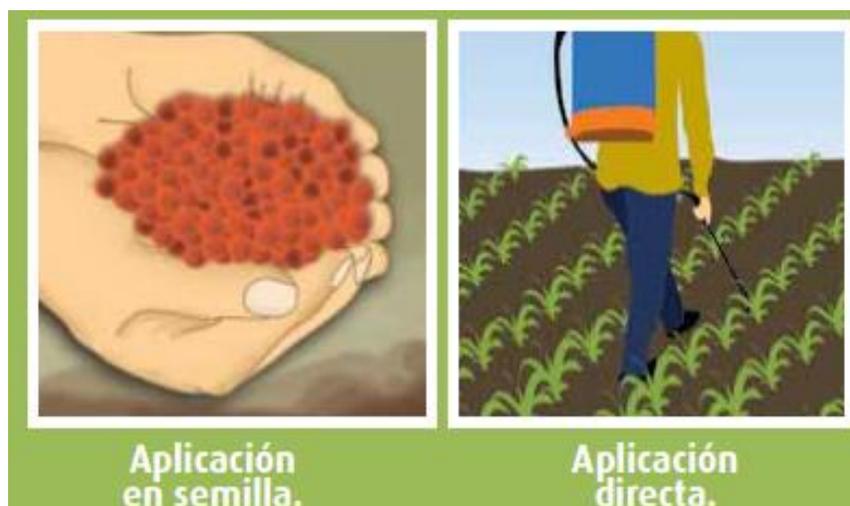


Figura 6. Formas de aplicación de micorrizas (Martínez *et al.*, 2013).

Actualmente se comercializan presentaciones líquidas de micorrizas para su aplicación a plantas adultas ya establecidas. Sin embargo, esta presentación no es funcional, ya que las esporas de los hongos tienden a flotar en agua, dificultando la aspersión uniforme de estos propágulos en el cultivo. Además, es difícil que los propágulos del hongo (esporas o raicillas infectadas) puedan atravesar el suelo para alcanzar el sistema radical de las plantas para establecer la simbiosis. Para solventar este problema se han desarrollado métodos para la aplicación de micorrizas en plantas ya establecidas como el sistema "Terravention", el cual inyecta a presión inoculantes fúngicos en el suelo mediante el impulso de gas de nitrógeno presurizado, aun esta técnica no está al alcance de todos y no es comúnmente utilizada (Amado *et al.*, 2012).

Al realizar la aplicación de cualquier biofertilizante incluyendo a las micorrizas, de acuerdo al Manual de Martínez *et al.* (2013) se recomienda tener presente lo siguiente:

- Los biofertilizantes contienen microorganismos vivos que son sensibles a la luz directa del sol, a altas temperaturas y a ciertos tipos de productos químicos como bactericidas y ciertos tipos de fungicidas, cuidar el lugar de almacenaje.
- En caso de que se requiera usar bactericidas o fungicidas se debe consultar la compatibilidad de los productos (aplicaciones inmediatas no recomendables).
- Aplicar el biofertilizante de forma independiente, después de aplicar los agroquímicos siempre y cuando no sean tóxicos para los microorganismos.
- La cantidad de agua que utilice para diluir el biofertilizante no tiene un efecto sobre el resultado del mismo, no importa si usa 10 o 100 litros.
- Si tiene un sistema de riego por goteo o cualquier otro que tenga conductos delgados se recomienda usar biofertilizantes líquidos y aplicar los sólidos de forma manual o inocularlos en semilla.
- En un sistema de riego con conductos amplios se puede realizar la aplicación de productos sólidos (micorrizas solidas) diluyéndolos en agua, filtrándolos con un colador, malla o tela para retirar las partículas más grandes o retirando boquillas.
- En ningún caso se debe usar la semilla húmeda para sembrar inmediatamente después de la aplicación, ya que el biofertilizante se puede desprender si no está seco y su efecto en el cultivo se verá disminuido.

- No hay efectos inmediatos en ningún caso. Para obtener un máximo efecto la aplicación debe realizarse durante la siembra o lo más pronto posible después de ella.
- La fecha de caducidad indica el momento en que el número de microorganismos vivos son suficientes para obtener los máximos resultados, si el producto se usa después seguirá habiendo buenos resultados pero éstos serán menores conforme pase el tiempo.
- Es importante resaltar que es necesario calibrar la sembradora antes de iniciar la siembra con la semilla ya tratada.

Las HMA colonizan las plantas que pertenecen a las familias de la mayoría de los cultivos agrícolas, prácticamente todas las plantas forman asociaciones simbióticas con las micorrizas, si bien existen algunas familias de plantas que usualmente no lo hacen: Amaranthaceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, Zygophyllaceae, Cyperaceae, Lamiaceae. No obstante, se han encontrado especies de familias típicamente no micótrofas, colonizadas por HMA bajo condiciones limitantes (FAO, 2007; Aguado, 2012).

2.4.4.2. Efecto de *Glomus intraradices* en cultivos

Pruebas de validación realizadas por el INIFAP han mostrado las bondades del uso de micorriza en la agricultura con incrementos de rendimiento en maíz (11.5 %), sorgo (10.8%), cebada (20.7 %) y frijol (22.1 %) (Amado *et al.*, 2012).

En maíz, las plantas inoculadas con HMA aumentan su biomasa total (aérea y radicular), su proteína soluble, la asimilación de N, P, K, Ca, Cu, Mg y Zn, y por tanto, el rendimiento de grano o forraje. También, se ha encontrado un sinergismo con la inoculación combinada entre *A. brasilense* y HMA que induce mayor crecimiento y asimilación de P, Fe y Mn, así como, una mayor producción de biomasa aérea y radical (Díaz *et al.*, 2012).

De acuerdo con los resultados de investigaciones de Amado *et al.* (2010), en parcelas demostrativas inoculadas con Micorriza INIFAP, se logró el aumento de la producción del cultivo de avena durante el ciclo 2000 en el Estado de Chihuahua, en 9,288 ha bajo condiciones de temporal, con un incremento neto promedio en la producción de grano y forraje de 55 %, equivalentes a \$ 1,710.00 ha⁻¹. Por otro, lado los resultados obtenidos de

cinco parcelas piloto estudiadas durante el ciclo 2009 mostraron indicadores de rendimiento (grano-forraje); ingreso e índices de rentabilidad a favor del Biofertilizante; el de mayor índice de rentabilidad (2.29) con mayor impacto sobre la producción de forraje; en grano se registró en los tratamientos que emplearon el biofertilizante Micorriza INIFAP y el Biofertilizante Bacteriano del INIFAP 2709, sin la aplicación de químicos. De igual forma la tecnología evaluada con mayor incremento en la productividad en maíz azul bajo temporal (3.59 t ha⁻¹) se obtuvo a través de la aplicación de la Micorriza INIFAP, el piletteo para la cosecha de agua y la mitad de la dosis recomendada de los nutrientes N, P y K (35-20-00). El índice de rentabilidad más alto (2.83) se alcanzó con el biofertilizante Micorriza INIFAP y el tratamiento testigo (0-0-0 de N-P₂O₅-K₂O).

En otro caso, se inoculó de la semilla de maíz con *G. intraradices* o *A. brasilense*, en condiciones de temporal y riego, y se obtuvo un incremento en la productividad y en la rentabilidad del cultivo en comparación con las parcelas sin biofertilizantes. No se han logrado detectar efectos sinérgicos con la inoculación simultánea de ambos simbiontes, pues la micorriza INIFAP, registró la mayor efectividad cuando fue comparada con biofertilizantes comerciales o cepas de microorganismos benéficos experimentales. Los rendimientos promedio obtenidos durante una evaluación de cinco años en los cultivos de maíz y sorgo de riego superaron de 13 a 15 % a la inoculación con *G. intraradices*. Por el contrario, los rendimientos de ambos cultivos obtenidos bajo condiciones de temporal con fertilización química y HMA fueron semejantes. No obstante, en las dos condiciones de humedad y en los dos cultivos, la relación beneficio-costos fue superada por el HMA ya que fue posible reducir la dosis de fertilización química en maíz (Díaz *et al.*, 2012).

2.4.5. Hongos micorrízicos arbusculares en zonas áridas

Los HMA son los organismos predominantes en la vecindad de las raíces y se encuentran en diferentes ambientes, aun cuando se presenten condiciones desfavorables para las plantas, ellos son altamente adaptables y son intermediarios cruciales entre el suelo y la planta, su simbiosis permite a la planta desarrollarse, sobrevivir en ambientes extremos como lo son los áridos, semiáridos y desérticos y hasta influir en su diversidad vegetal. Los hongos micorrízogenos se encuentran ampliamente distribuidos en zonas áridas y semiáridas, siendo los del tipo arbuscular la forma más abundante (Pezzani *et al.*, 2007).

Debido a extensas investigaciones, se ha determinado que los hábitats sin HMA virtualmente no existen y estos incluyen desde áreas severamente perturbadas y erosionadas, minas, suelos contaminados por diferentes compuestos (metales pesados, hidrocarburos, plaguicidas) hasta ecosistemas no alterados por el hombre. Una alta proporción de plantas creciendo en zonas áridas y semiáridas son micorrízicas. Estas incluyen pastos, cactáceas, leguminosas no maderables, entre otras. El 97 % de las especies vegetales desarrollándose en dunas (móviles ó estabilizadas) de México fueron micorrízicas (Gonzalez *et al.*, 2008).

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 nutrimentos 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 demostrado 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 mostrado el papel funcional de los HMA en la construcción de una red hifal que conecta físicamente a las plantas que conforman una comunidad o un “parche” de vegetación, en donde se aprovechan los recursos disponibles con alta eficiencia (Montaño *et al.*, 2007).

De-Bashan *et al.* (2010) mencionaron que a pesar de que se ha demostrado la existencia de HMA en numerosas especies de árboles y cactus del desierto, la inoculación con estos microorganismos es todavía escasa, y que este inóculo consta relativamente de mayor cantidad de fragmentos hifales que de esporas localizadas en las capas de suelo más superficiales. Por otro lado, Gonzalez *et al.* (2008) comprobaron que en zonas perturbadas por erosión, limitada fertilidad y baja población microbiana, la presencia de HMA en el sistema radical y la proliferación de esporas en el suelo rizosférico, se encuentran en abundante cantidad; y el principal género observado en zonas áridas y dunas ha sido el *Glomus*. En un estudio se muestreó suelo del estado del desierto de Sonora, donde se identificaron seis especies de hongos arbusculares pertenecientes a la familia *Glomaceae* y tres a la *Gigasporaceae*, mientras que en este desierto se identificaron nueve especies, en la selva de la Estación Biológica de los Tuxtlas, en Veracruz, se encontraron solo cinco

especies pertenecientes a dos géneros. Tales resultados presumen que las condiciones, la dinámica del suelo y las plantas hospederas en el desierto favorecen la presencia de estos hongos micorrízicos aunque pareciera que el ambiente es mas restrictivo (Aguilera *et al.*, 2007).

En el caso de estudios hechos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, se encontraron cinco géneros de HMA de los cuales destaca el género *Glomus* que fue común a todas las especies de matorrales estudiados, aunque su abundancia y actividad cambian de acuerdo con la especie vegetal a la que se asocia, es decir, tal acoplamiento entre los ciclos de vida de la planta y del hongo, sugieren que la condicionante de la diversidad de los HMA es la vegetación, observándose mayor diversidad en las familias Cactaceae y Poaceae de la región (García *et al.*, 2007).

Estudios en el desierto Chihuahuense han hecho posible que Pezzani *et al.*, (2007) sostengan que las micorrizas pueden estar influyendo en el proceso sucesional regulando la competencia (inter e intra específica) entre las plantas: las plantas micorrízicas poseen mayores habilidades competitivas y desplazan a las no micorrízicas del desierto.

En las condiciones adversas de estas zonas las hifas de los HMA son fisiológicamente más efectivas para la absorción de agua y nutrimentos que las raíces mismas. Esta característica incrementa la tolerancia de las plantas a la sequía y a la captación de nutrimentos que son relativamente inmóviles como el fósforo y, por lo tanto, son necesarias para el crecimiento y supervivencia de las plantas en el desierto. Por ejemplo, en pastos (*Bouteloua gracillis*), cactus (*Ferocactus acanthodes*) y magueyes (*Agave desertii*) se ha documentado que las MA afectan procesos fisiológicos como relaciones hídricas, comportamiento estomático y la captación de bióxido de carbono (CO₂), los cuales determinan el crecimiento de estas plantas. Por lo anterior, el estudio de las MA de ecosistemas desérticos es crucial ya que ellos albergan importantes bancos de inóculos de HMA que pueden ser usados para incrementar la supervivencia de plantas en suelos de baja fertilidad y con escasez de agua como las áreas secas degradadas y los suelos agrícolas, sobre todo en México, cuyos ecosistemas áridos y semiáridos cubren cerca del 60 % del territorio nacional (Montaño *et al.*, 2007).

2.5. Descripción del Valle de Santo Domingo, B.C.S.

El estado de Baja California Sur representa el 3.8 % de la superficie del país, colinda al norte con Baja California y el Golfo de California, al este; al sur y oeste con el Océano Pacífico (INEGI, 2015). El estado de Baja California Sur cuenta con una superficie de 73,677 km². Está rodeado de agua por tres lados y unido territorialmente con el estado de Baja California en el límite norte (Figura 7). Es el estado de la República Mexicana con la mayor longitud de costa, aproximadamente 2,200 km (700 km por el Golfo de California y 1,500 km por el Océano Pacífico). El estado cuenta con una pobre dotación de recursos hídricos, forestales, pastizales y suelos fértiles, lo que está relacionado con diversos factores, entre los cuales destaca la posición geográfica del territorio que condiciona el predominio de los climas muy secos y cálidos; situación que lleva aparejado un déficit importante de humedad con la consecuente influencia que ha tenido esto en el desarrollo de los suelos y la biota (Mercado, 2011).

En el municipio de Comondú se concentra la mayor parte de la actividad agrícola del estado, está ubicado en la parte central de Baja California Sur, se extiende en una superficie de 17,073.55 km². En el municipio de Comondú las dos zonas agrícolas son el Valle de Santo Domingo y la Purísima. El Valle de Santo Domingo, considerado una micro región de Comondú, conforma el 45.38 % de la extensión municipal. Su cabecera municipal es Ciudad Constitución a 57 msnm, que a su vez ocupa el 23.75 % de la superficie del estado (INEGI, 2009a y PRODUCE, 2011).

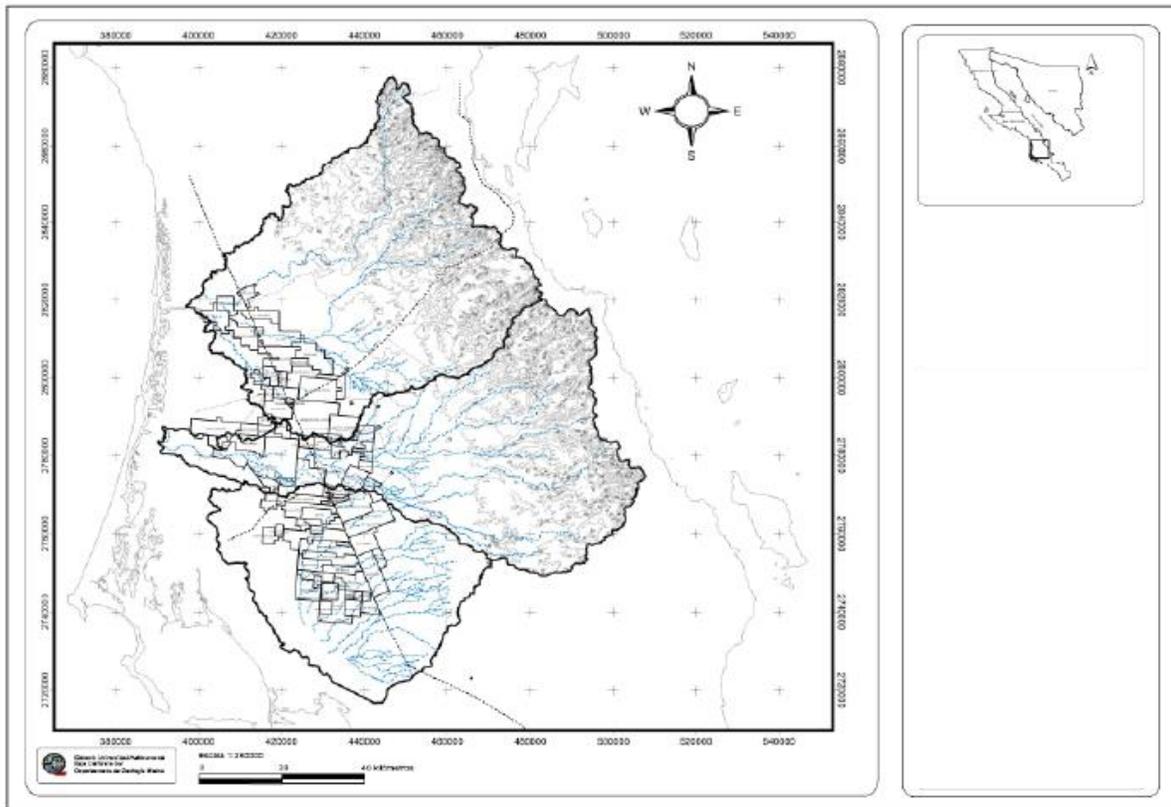


Figura7. Mapa general del Valle de Santo Domingo, Comondú, B.C.S. (Tomado de: Mercado, 2011).

2.5.1. Características climáticas

La zona de estudio se caracteriza por tener una precipitación promedio anual que varía de 150 a 180 mm. La temperatura promedio oscila entre 22-29 °C, por tanto su clima se considera muy seco semicálido en un 61.73 % de la superficie del municipio, siguiéndole el clima muy seco muy cálido en un 38.13 %, y con una pequeña proporción de clima seco templado con tan solo 0.14 % de Comondú (INEGI, 2009; Mercado, 2011).

La distribución de las temperaturas y precipitaciones de Ciudad Constitución se pueden observar en la Figura 8.

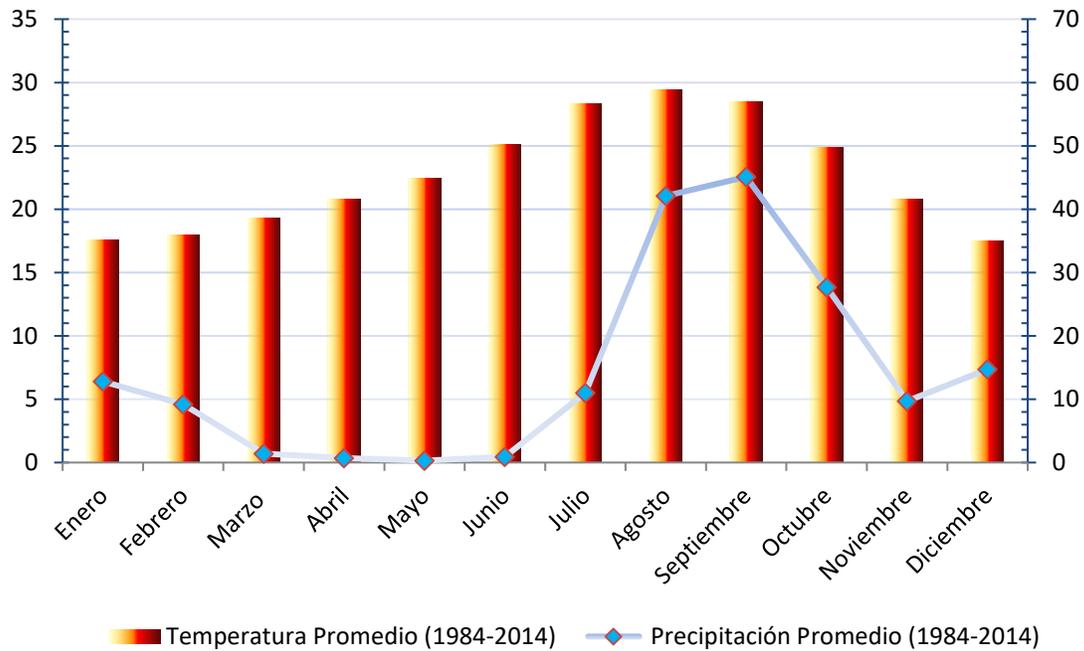


Figura 8. Climograma del municipio de Comondú. Estación meteorológica Ciudad Constitución. Realizado a partir de INEGI (2014).

Mediante la aplicación del modelo original de De Martonne, Mercado (2011) clasificó la aridez de la cuenca de Comondú, con un valor de 5.1, por lo que se le considera a la zona como una localidad híper-árida, lo que indica la severa limitación hidroclimática restringiendo el desarrollo de las actividades agropecuarias, a la disponibilidad de agua de riego.

2.5.2. Características hídricas

Conforme a INEGI la precipitación promedio anual registrada en la estación meteorológica de Ciudad Constitución es de 175.5 mm, la precipitación del año más seco registrada es de 15.4 mm y la del año más lluvioso fue de 350.7 mm. La distribución de lluvia registrada desde 1984 hasta 2014 está reflejada en la Figura 9.

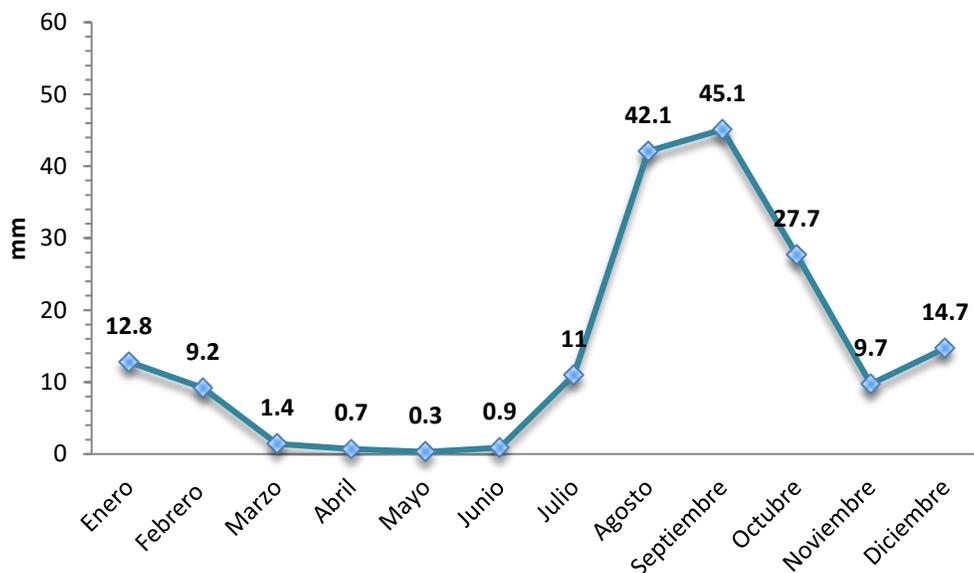


Figura 9. Distribución de la precipitación, 1984-2014. Ciudad Constitución, Comondú. (INEGI, 2014).

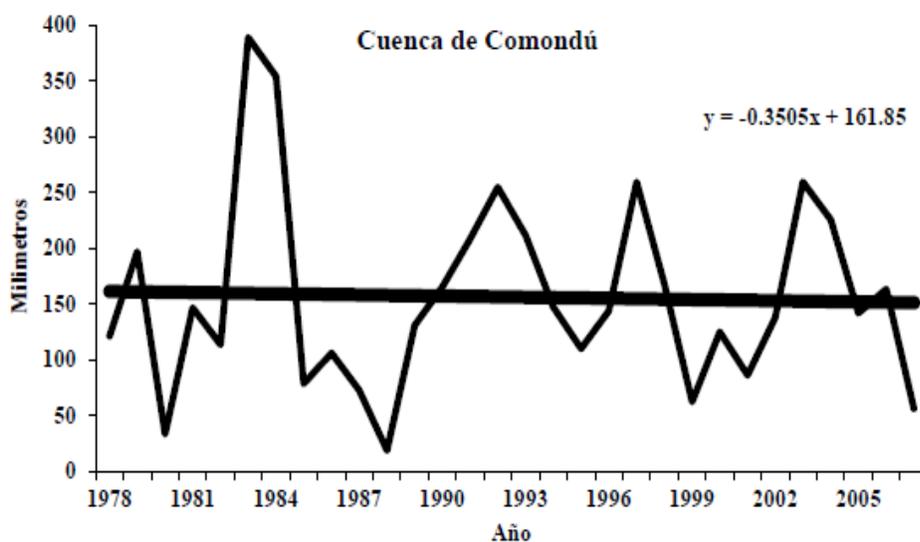


Figura 10. Tendencia anual de la precipitación en la cuenca de Comondú (Mercado, 2011).

De acuerdo a Mercado (2011) ha existido una disminución de la precipitación a través del tiempo, desde 1978, lo que significa una baja disponibilidad de agua que ha fomentado una mayor extracción de agua de los acuíferos (Figura 10).

El Valle de Santo Domingo se encuentra definido por tres cuencas hidrológicas: al Norte la cuenca Santo Domingo, en la parte medio la cuenca Las Bramonas, y al Sur la cuenca Santa Cruz. La cuenca Santo Domingo tiene un área de 4,119 km², su principal arroyo es Santo Domingo. La cuenca Las Bramonas ubicada en la parte media del Valle de Santo Domingo tiene un área de 3,466 km². Finalmente, al Sur se encuentra la cuenca Santa Cruz la cual tiene un área de 2,339 km² (Mercado, 2011). El agua de riego que se utiliza en la cuenca de Comondú, presenta mayor riesgo de perder calidad agrícola, tuvo en operación 543 pozos de irrigación en 1970, aumentando a 631 en 1977, y en 1985 existían 720 pozos, aunque en el año 2000 disminuyeron a 713, existiendo además 30 pozos para el uso del agua potable y 69 para uso ganadero; lo anterior sigue demostrando la gran presión que ha sufrido la cuenca con el consecuente incremento en el deterioro ambiental (PRODUCE, 2011).

2.5.3. Características edáficas

El espacio geográfico que ocupa el Municipio de Comondú y el Estado de Baja California Sur tiene una historia geológica en común, la única geoforma presente, es de origen aluvial formada por deposiciones de antiguos ríos y escurrimientos provenientes de sierras, que a través del tiempo han acarreado a su paso materiales finos y gruesos proporcionando la formación y origen de estos suelos, siendo el predominante en el Valle de Santo Domingo los suelos de clase textural franco arenosa de color claro, con baja cantidad de materia orgánica, haciendo que estos suelos tengan una baja retención de agua y gran infiltración, lo que motiva a incrementar el número de riegos por ciclo agrícola (PRODUCE, 2011). Los suelos predominantes en el municipio se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales suelos del municipio de Comondú. (Realizado a partir de INEGI, 2009).

Suelo	Leptosol	Calcisol	Arenosol	Regosol	Vertisol	Cambisol	Solonchak	Luvisol
Superficie municipal	19.72 %	16.95 %	16.61 %	16.17 %	12.38 %	6.66 %	3.10 %	2.85 %

Asimismo, la distribución de los suelos alrededor del municipio pueden observarse en la Figura 11, los tipos arenosol y calcisol son los suelos predominantes en las regiones de uso agrícola.

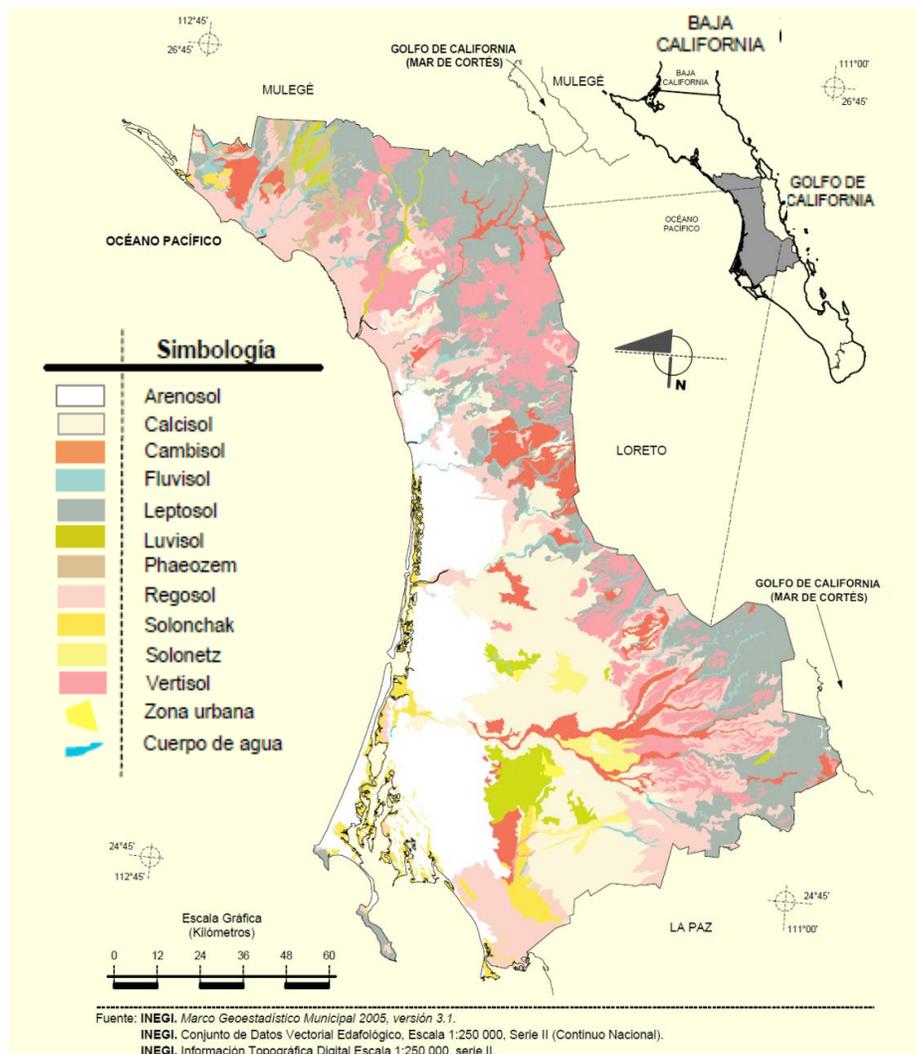


Figura 11. Suelos dominantes del municipio de Comondú (INEGI, 2014).

Con estudios de Mercado (2011), la desertificación en la cuenca de Comondú fue clasificada con un grado C, considerándose severa, lo cual afecta las propiedades del suelo, favoreciendo la pérdida de partículas finas de arcilla y limo, que propicia una textura más arenosa; el mayor porcentaje determinado fue el de textura franco arenosa con un 41 %. Así mismo, en tal investigación se realizó el análisis de suelos en tres tipos de condiciones diferentes en la zona: suelos agrícolas, inalterados y abandonados por aparente daño.

En la Tabla 4 es posible apreciar que las tierras agrícolas de Comondú presentan un contenido mayor en macro elementos esenciales, producto de la fertilización química que se aplica en cada ciclo agrícola. Por otro lado el pH de los suelos inalterados y agrícolas de

la región es superior al de los suelos abandonados, con valores de 7.6 a 7.7 en promedio clasificándose como ligeramente alcalinos.

Tabla 4. Análisis químico de suelos de la cuenca de Comondú (Mercado, 2011).

Suelo	pH	%		$\mu\text{S cm}^{-1}$		Mg kg^{-1}					
		M.O.	C.E.	HCO_3	Ca	N	P	K	Fe	S	Na
Agrícola ⁺	7.7	0.5	641.4	62.7	42.2	0.5	6.2	24.0	0.3	36.5	147
Abandonado ⁺⁺	7.6	0.4	1039.6	61.0	71.1	0.5	0.9	19.9	2.1	29.9	281
Inalterado	7.7	0.3	598	53.2	17.2	0.4	3.9	16.4	20.2	19.7	169

Nota: ⁺En aparente estabilidad. ⁺⁺Presumiblemente afectado.

Es sabido que la concentración de sodio es una de las razones primordiales para el abandono de las tierras y siendo que los productores de la zona solo aprovechan 58.7 % de la superficie de sus predios, se puede observar en este caso, como el sodio casi duplica sus concentraciones en suelos abandonados en comparación con los suelos agrícolas y con los inalterados, presumiendo entonces que la causa de su abandono son las altas concentraciones de sodio, pasando lo mismo con la alta conductividad eléctrica presente. En el caso de la materia orgánica el aporte es mayor en los suelos agrícolas que en los abandonados e inalterados, esto producto de la incorporación de residuos de cosecha al suelo y por la acumulación de materia orgánica, que a pesar de esto sigue resultando baja en porcentaje, debido a la rápida degradación de hojarasca por las altas temperaturas presentes; causa por la cual aumenta la necesidad de adición de fertilizantes inorgánicos al suelo para obtener mayores rendimientos.

Con el análisis anterior de los suelos de Comondú, se muestra el panorama general de las condiciones de la región de estudio hasta el año 2011, al tomar como referencia suelos inalterados y compararlos con los suelos ya abandonados y los que están en producción, se puede adjudicar a la sobreexplotación de los pozos, al incremento en la utilización de fertilizantes, a la aplicación de agroquímicos como factores agravantes de las ya de por sí críticas condiciones de tales suelos en condiciones de aridez. Lo que ha originado dejar sin vegetación y expuestos al resto del territorio que no es utilizado (aproximadamente el 40%) haciéndolos más vulnerables a los efectos nocivos de la erosión eólica e hídrica y generando todas las condiciones para que el proceso de desertificación avance.

2.6. Producción agrícola en el Valle de Santo Domingo, B.C.S.

La Superficie total del estado es de 7,367,700 ha, de las cuales 183,611 ha (2.4 %) tienen potencial agrícola (Figura 12). Sin embargo, sólo se encuentran en uso 61,725 ha, esto es, el 0.8 % de la extensión total de Baja California Sur. La falta de agua representa la principal limitante para la producción y para el desenvolvimiento económico y social de la entidad (SAGARPA, 2011; INEGI, 2015).

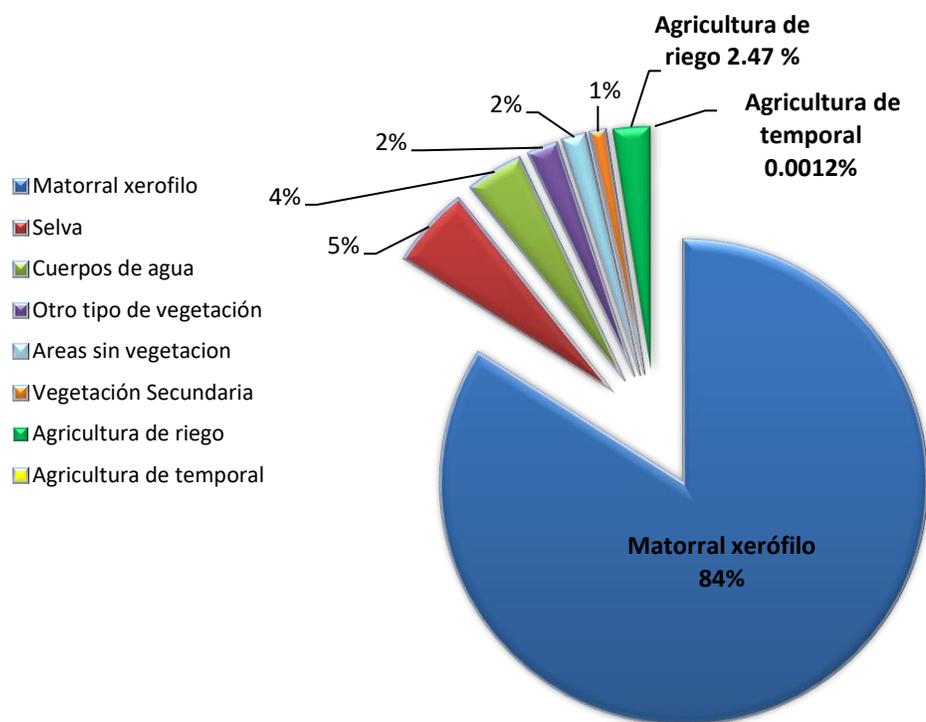
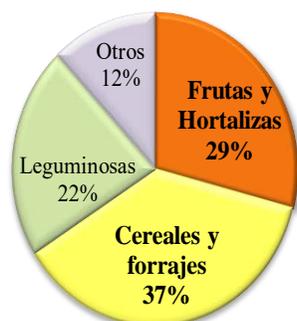


Figura 12. Distribución de la superficie del Estado de Baja California Sur.

La producción agrícola se sustenta bajo sistemas de riego, principalmente se producen hortalizas: chile, tomate, melón, pepino; granos y forrajes. A nivel estatal la mayor superficie agrícola es destinada a la producción de cereales y forrajes ocupando el 37 %, mientras que las hortalizas ocupan el segundo lugar en superficie con el 29 %. A pesar de que la utilización de suelo destinada a cereales es mayor, el aporte económico es mucho más fuerte en las hortalizas ya que representan un 74 % del valor total de la producción agrícola de Baja California Sur, dejando el aporte económico de los cereales en tan solo 10 % del mismo (Figura 13). Ello muestra la baja rentabilidad de producción de cereales.

Superficie cosechada



Valor de la Producción

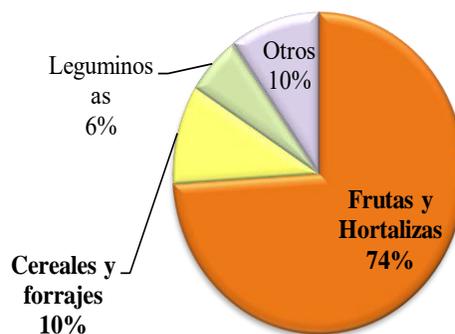


Figura 13. Producción agrícola de Baja California Sur (SAGARPA, 2011).

En la Figura 14 se presentan más detalles de esta situación; se observa como los cultivos de maíz, alfalfa y garbanzo ocupan grandes extensiones de superficie sembrada y son los que menores rendimientos y valor de producción aportan, todo lo contrario, sucede en el caso de espárrago, papa y tomate orgánico donde su valor de producción es claramente superior, pudiendo ser esta una de las razones por las cuales se vea en la necesidad de dejar de sembrar cereales y forrajes.

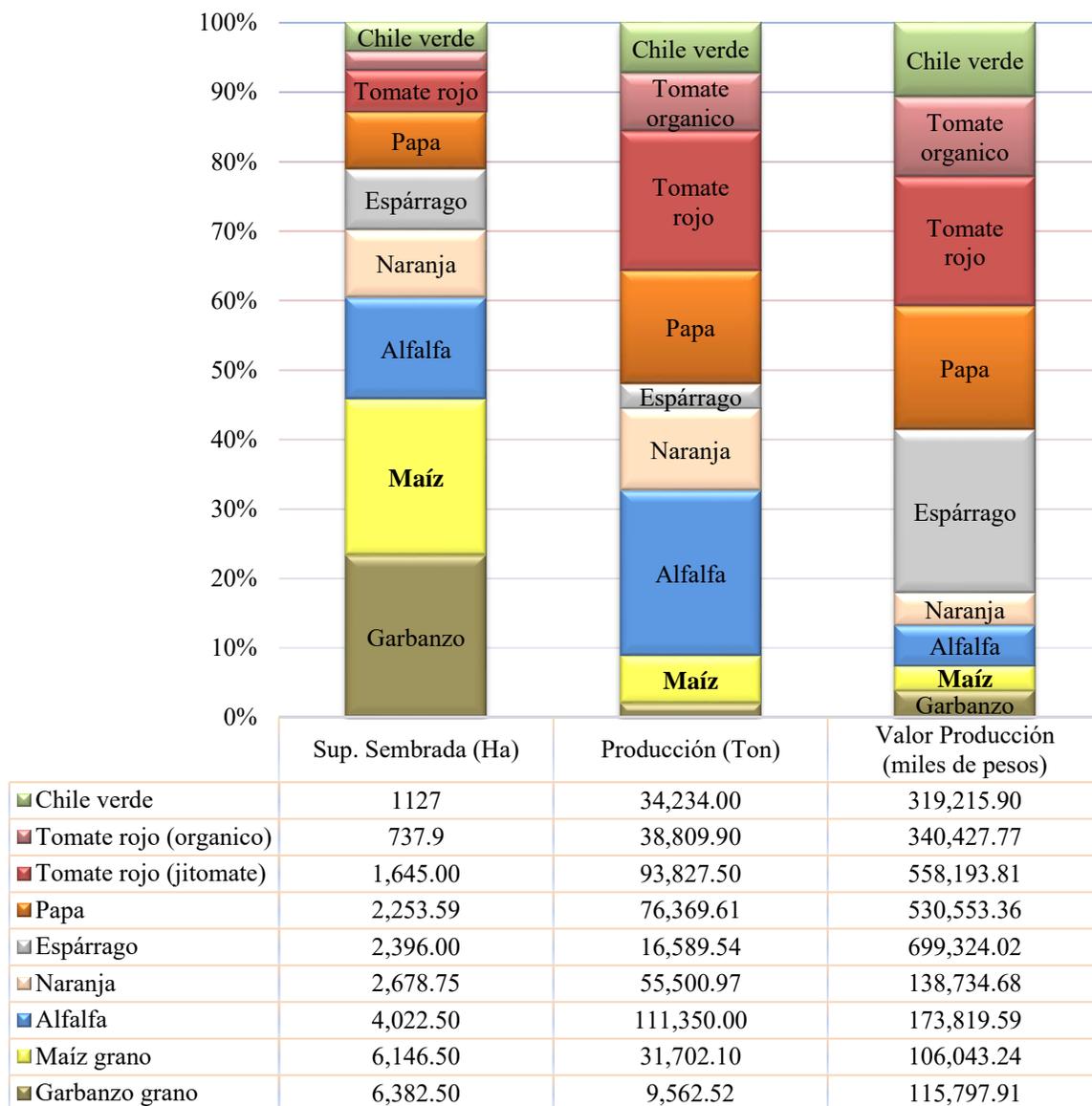


Figura 14. Principales cultivos en Baja California Sur (SIAP, 2014).

De acuerdo a INEGI (2009) el 49 % de la superficie de Comondú tiene potencial para la agricultura mecanizada continua y el 47 % restante no es apto para ella. En la Figura 15 es posible ver la distribución de uso de suelo en el municipio, siendo la región agrícola la perteneciente al Valle de Santo Domingo.

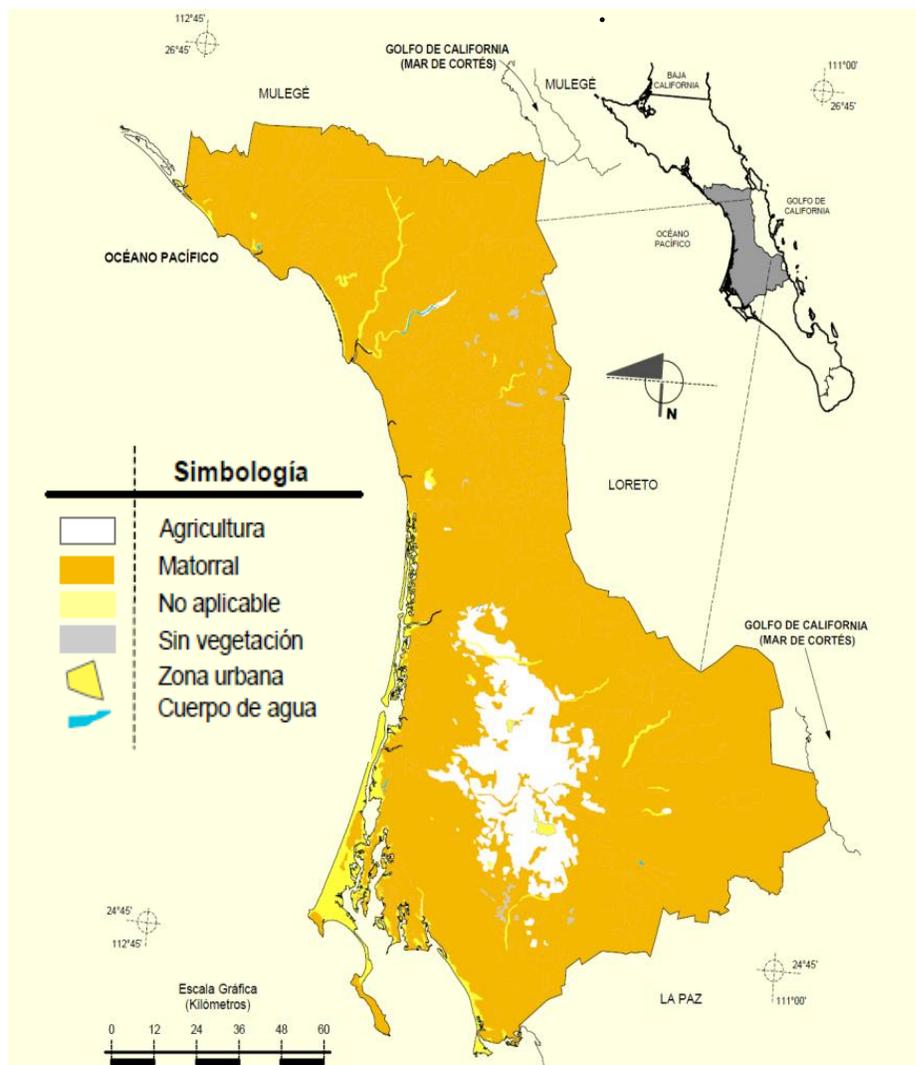


Figura 15. Distribución de la vegetación del Municipio de Comondú (INEGI, 2009).

El Valle de Santo Domingo o Distrito de Riego No. 066 abarca una superficie de 72,409 ha, de las cuales 62,986 (87 %) pertenecen a pequeños propietarios y 9,423 ha (13 %) corresponden con el sector ejidal. En este valle agrícola se concentra el 73.6 % (31,698 ha por ciclo) de la superficie sembrada en el estado, en promedio. En el acuífero de dicho valle, el número de usuarios se eleva a 1,363, de los cuales 727 son pequeños propietarios y 636 ejidatarios. La superficie promedio por unidad de producción rural que depende totalmente del riego es de 29 ha. La dotación anual de agua para uso agrícola asciende a la cantidad de 170 millones de metros cúbicos que representa el 61 % de la dotación total de

la entidad; donde se han venido registrando sobreexplotaciones superiores al 90 % (PRODUCE, 2011; Mercado, 2011).

Los cultivos más importantes en cuanto a superficie ocupada en el municipio de Comondú son el garbanzo, maíz y trigo; mientras que los de mayor importancia en cuanto al valor de la producción son la papa, el tomate rojo y el garbanzo. Por otro, lado los cultivos con mayor producción en toneladas registrados para el año 2014 son la papa, el maíz de grano y el trigo (Figura 16).

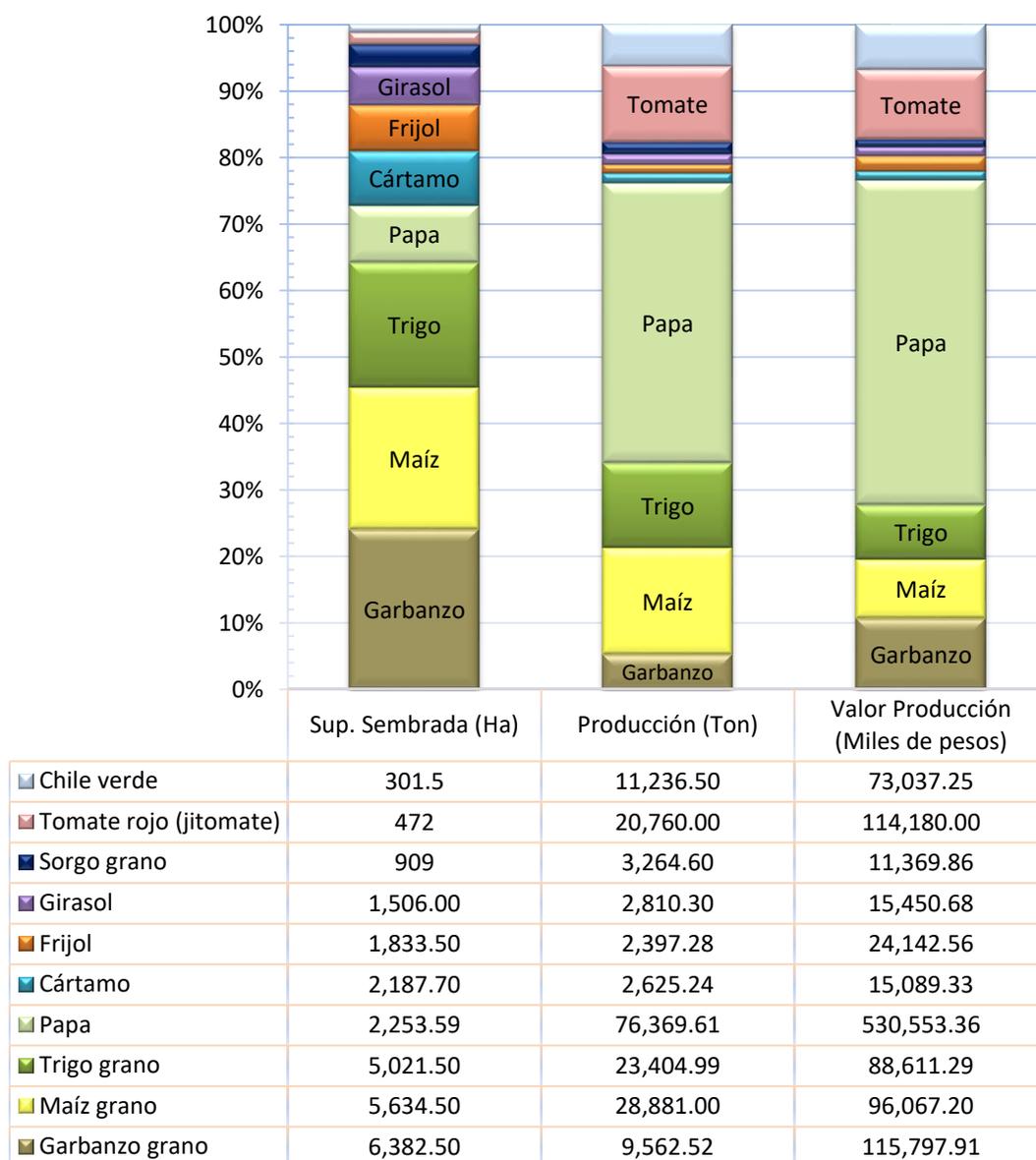


Figura 16. Principales cultivos en el municipio de Comondú (SIAP, 2014).

2.6.1. Importancia económica del cultivo de maíz en la región de estudio

El maíz es considerado el cultivo más importante del país, es un grano primordialmente para consumo animal en el mundo. En México, el maíz es el cultivo que presenta mayor número de productores con 3.2 millones en su mayoría ejidales, ocupa la mayor superficie cultivada anualmente: 7 a 8.5 millones de hectáreas cultivadas mayoritariamente en temporal (85 %), y el 15 % restante con riego en el ciclo otoño-invierno. Sinaloa es el principal estado productor de maíz con riego (65 % de la producción nacional) durante el ciclo otoño-invierno. A pesar de ser un país maicero, México enfrenta un grave problema de autosuficiencia de maíz, importando anualmente 3 a 7 millones toneladas de las 20 a 26 millones que consume. Los rendimientos de maíz son bajos con respecto a los potenciales: los mayores rendimientos con riego son 9 t ha⁻¹ en Sinaloa, y en temporal 5 t ha⁻¹ en Jalisco; el rendimiento promedio nacional para riego es 5.2 t ha⁻¹ y 2 t ha⁻¹ para temporal. Esto muestra las diferencias tecnológicas, edáficas y ambientales de las zonas maiceras de México (Muñoz y Hernández, 2004).

El cultivo de maíz es una de las actividades primordiales en el estado de Baja California Sur. Los niveles de siembra han venido en descenso a partir del año 2005 manteniéndose en un promedio de 4,314 hectáreas de maíz para grano hasta el 2011, donde se comenzó a aumentar la superficie sembrada llegando en 2014 a 6,146 hectáreas sembradas en todo el estado (Tabla 5).

El municipio con mayor producción de maíz es Comondú con 5,634 ha de las 6,146 ha sembradas en el estado; en el año 2014 en esta superficie se obtuvo un volumen de 28,881 toneladas de producto. En la Figura 17 se puede observar como la baja de rendimientos de maíz, contribuyó en consecuencia, a la baja de producción en el periodo del 2006 al 2009, afectando el volumen de producción de maíz en la zona y por ende al estado, ya que Comondú produce poco más del 90 % del maíz de Baja California Sur. El promedio de rendimiento en el municipio es de 5.87 ton ha⁻¹, este rendimiento ha podido subir hasta 6.5 ton ha⁻¹, y a pesar de aparecer esta fluctuación de rendimiento a través de los años, la producción de Comondú sigue siendo superior al rendimiento nacional bajo condiciones de riego que es de 5.2 ton ha⁻¹.

Tabla 5. Superficie sembrada de maíz en el estado de Baja California Sur. (Realizado a partir de SIAP, 2014).

Municipio	Hectáreas					Total
	Comondú	La Paz	Los Cabos	Loreto	Mulegé	
2014	5 634	257	145	100	10	6 146
2013	5 030	225	140	0	7	5 402
2012	5 092	189	134	0	54	5 470
2011	3 925	165	152	0	22	4 264
2010	2 498	180	82	0	34	2 794
2009	3 996	133	127	0	29	4 285
2008	4 500	158	78	0	36	4 774
2007	4 395	211	63	0	20	4 690
2006	4 545	175	114	0	12	4 847
2005	4 415	104	0	0	26	4 546
2004	7 734	140	165	0	3	8 043

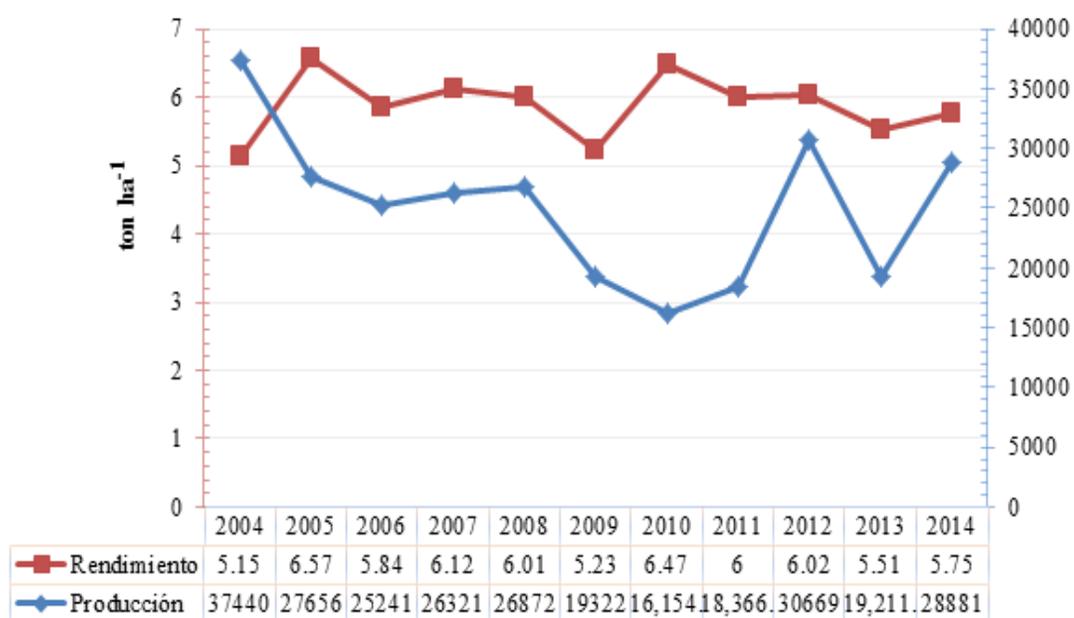


Figura 17. Rendimiento y volumen de producción de maíz en Comondú. (Realizado a partir de información de SIAP, 2014).

La demanda del producto maíz en Baja California Sur no se satisface con los volúmenes de producción de la entidad. Se tiene registro de la compra del producto proveniente de otros lugares de México. El destino del producto es para uso doméstico y una proporción tiene como destino el estado de Baja California Sur (B.C.S., 2012).

Desde el alza de los precios que actualmente se está llevando a cabo debido al boom de los biocombustibles, la perspectiva de la producción de maíz para grano en el estado ha cambiado, de una lenta desaparición a un futuro ligeramente más promisorio; a pesar de la apertura total de las fronteras a la entrada libre de maíz, los precios continúan siendo atractivos por lo que se espera que se incremente la superficie de siembra. Los rendimientos que se han mantenido aún se consideran bajos, por el potencial que se tiene en este cultivo. Otro factor, y quizás el más importante en la productividad es el precio de venta, el cual en los últimos dos años se ha visto favorecido por un incremento de aproximadamente el 50 % con relación al 2006. Sin embargo, el precio sigue siendo vulnerable por las tendencias en el uso del maíz para la producción de biocombustible (PRODUCE 2011).

2.6.2. Sistema de producción de maíz recomendado por el INIFAP para la zona de estudio

El cultivo del maíz en México se hace actualmente en un amplio rango de altitud y variación climática, desde el nivel del mar hasta los 3,400 msnm. Se siembra en zonas tórridas con escasa precipitación, en regiones templadas, en las faldas de las altas montañas, en ambientes muy cálidos y húmedos, en escaso suelo, en pronunciadas laderas o en amplios valles fértiles, en diferentes épocas del año y bajo múltiples sistemas de manejo y desarrollo tecnológico (CONABIO, 2011). A pesar de la amplia adaptabilidad del cultivo, este es afectado por factores locales que condicionan el uso de ciertas prácticas agronómicas, cada parcela requiere de su propio manejo agronómico según las características del suelo y ambiente, de tal forma que pueda reflejarse en los rendimientos de producción.

A continuación, se describe de forma general el sistema de producción de maíz, de acuerdo a la aplicación de la tecnología de costos mínimos recomendada por Navejas y Gutiérrez (2008) por parte del INIFAP en el Valle de Santo Domingo.

a) Preparación del terreno: En el primer año de aplicación de la tecnología y costos mínimos, la preparación del terreno debe ser completa para facilitar la buena distribución de agua y semilla, incluye, subsoleo, barbecho, rastreo doble cruzado y nivelación, pero en

un segundo año se debe continuar con labranza de conservación y laboreo mínimo. La labranza mínima incluye la trituración de los residuos del cultivo anterior.

b) Variedades: Con base al número de días en que la planta alcanza la etapa de floración, los híbridos y variedades de maíz se clasifican en: precoces con menos de 85 días, intermedios entre 86 y 95 días y tardíos con más de 96 días. Algunos materiales precoces tienen rendimientos aceptables y escapan las restricciones climáticas con ventajas para la cosecha y el programa de riego. En contraste los tardíos requieren de un periodo prolongado. Es necesario evitar el acame y contar con características morfológicas y ciclo vegetativo favorables a la productividad Tabla 6.

Tabla 6. Características agronómicas de genotipos de maíz con riego por goteo en el Valle de Santo Domingo, B.C.S. (Navejas y Gutiérrez, 2008).

Variedad	Etapa fenológica (días)			Altura (cm)	Tolerancia Roya
	Flor	Madurez fisiológica	Altura a 1ª mazorca		
H-431	78	132	80	185	R
A7573	88	132	73	179	T
TIGRE	88	130	100	170	T
DK-2003	85	112	110	130	T
DK-2010	88	110	126	197	T
PANTERA	84	138	79	201	T
TIBURON	88	130	100	200	T
P 3028 W	82	108	102	190	T
P 30G40	98	140	115	200	T
P 30G54	88	115	85	190	T
P 30G59	98	138	128	235	T

Nota: T=Tolerante R=Resistente

c) Época de siembra: La época de siembra sugerida para el Valle de Santo Domingo es el 5 de febrero al 20 de marzo procurando establecer variedades de ciclo precoz a intermedio. En siembras tempranas antes del 5 de febrero el maíz está expuesto a daño por últimas heladas, alargamiento del ciclo vegetativo en todos los materiales y daño por roya o chahuixtle.

En siembras tardías después del 20 de marzo, el cultivo puede ser afectado por altas temperaturas en la etapa de floración, mayor incidencia de plagas y enfermedades.

d) Método de siembra: Es necesario depositar de cinco a siete semillas por metro lineal para a producción de grano, las siembras a doble hilera en riego por goteo con regantes a 1.60 m permiten manejar poblaciones hasta de 75 mil plantas por hectárea. En riego de gravedad de preferencia se siembra en húmedo, con ventajas en el tapado de humedad depositando la semilla a la profundidad de 6 a 7 cm en surco separado a 80 cm, para facilitar las labores de cultivo y manejo del agua de riego. En riego de aspersión puede sembrarse en plano con la misma separación. En riego por goteo se sugiere establecer en seco, con camas de 1.60 m con dos líneas separadas a 40 cm entre sí, lo cual equivale a dejar regantes a 1.6 m, mojando dos hileras de plantas. La siembra se hace en terreno plano o camas formadas al inicio cuando se usa labranza cero.

e) Labores culturales: Actividades como la escarda y aporcado se realizan en la siembra de sistema tradicional con riego de gravedad. En labranza cero y riego por goteo se suprimen estas labores por lo que se puede ahorrar hasta el 5 % en costos por este concepto.

f) Riegos: La evapotranspiración del maíz varía desde los 500 a 550 mm. La demanda de agua diaria del maíz varía desde 2 mm día⁻¹ durante las etapas iniciales hasta 6.5 mm día⁻¹ en los días de reproducción, etapa de jiloteo, luego disminuye hasta 3 mm día⁻¹ en los días antes de la maduración completa. El suelo de textura franca a franca arcillosa retiene alrededor de 200 mm de agua por metro de profundidad; de esta, alrededor de 100 a 120 mm se pueden agotar sin afectar el rendimiento.

Con el manejo del maíz con sistema de riego por goteo y labranza mínima, se deben cuidar algunas etapas de desarrollo de cultivo como la floración, polinización, formación de grano y llenado de grano. Generalmente en el riego de germinación se requieren 16 horas para formar el bulbo de mojado y los riegos de auxilio alrededor de 25, son entre 5 a 7 horas. En general se estima una lámina de 36 cm en el ciclo. La cual se puede suministrar con frecuencia de dos riegos por semana con líneas regantes.

En este sistema de costos mínimos el riego de gravedad requiere de un riego de presembrado con una lámina de 20 cm y según el desarrollo de la planta se pueden aplicar de 3 a 4 riegos de auxilio. En el primer caso se recomienda cuidar las etapas de desarrollo, espigamiento, y grano lechoso-masoso, y en el segundo caso, con cuatro riegos de auxilio se propone el calendario de la Tabla 7. Se sugiere utilizar surcos de 100 metros de longitud. Se aplica riego de pre siembra con 16 cm y auxilios de 8 cm, por lo que la lámina total del cultivo en este sistema es alrededor de 50 cm.

Tabla 7. Calendarización de riegos para maíz en el Valle de Santo Domingo (Navejas y Gutiérrez, 2008).

Riegos	Intervalo (días)	Etapas del cultivo	Lámina (cm)
Pre siembra	0	-	20
1° de auxilio	35-40	Desarrollo	12
2° de auxilio	55-60	Encañe	12
3° de auxilio	70-75	Espigamiento	12
4° de auxilio	105-110	Lechoso-masoso	12

En aspersión se debe asperjar solo el tiempo necesario para proporcionar al terreno la lámina de agua adecuada. Se aplica riego de presembrado con 16 cm y auxilios de 8 cm por lo que la lámina total del cultivo en este sistema es alrededor de 50 cm.

g) Fertilización: La dosis de fertilización por hectárea sugerida para el maíz es hasta de 200 unidades de nitrógeno, 80 de fósforo y 100 de potasio, sin embargo, se ha encontrado respuesta adecuada a 180 unidades de nitrógeno y 40 a 60 unidades de fósforo, sin aplicación de potasio. Es importante realizar la aplicación de nitrógeno cuando el cultivo logre la realización de la hoja verdadera hasta floración; el fósforo desde la formación de la tercera hoja verdadera en la etapa de desarrollo; en el caso del potasio desde la etapa de la tercera hoja verdadera hasta el grano acuoso.

Se sugiere aplicar fertilizaciones fraccionadas de nitrógeno, se puede aprovechar la coincidencia con el primer riego de auxilio. En condiciones de fertirriego se recomienda aplicar el fósforo en los primeros riegos después de la nacencia en la primera etapa de desarrollo y el nitrógeno distribuirlo en las etapas fenológicas máximo hasta floración.

El maíz requiere alrededor de 20 a 25 kg ha⁻¹ de nitrógeno por cada tonelada de grano producida. Las posibles pérdidas de nitrógeno son contempladas en la eficiencia de uso, normalmente oscila alrededor del 50 %, con máximos de 70 %, si se aplica durante los momentos de máxima capacidad de absorción, dosis no excesivas, proporcionales a su utilización y con fuentes de bajo potencial de volatilización como amoníaco. El maíz comienza su mayor consumo de nitrógeno alrededor de seis hojas completamente expandidas (V-6 a V-7), por lo que antes de iniciada esta etapa fenológica, el cultivo debería de disponer de una oferta de nitrógeno adecuada para satisfacer su demanda para el crecimiento. A diferencia de lo que ocurre con el nitrógeno, al abordar la fertilización fosfatada en maíz hay que considerar que el funcionamiento del fósforo en el sistema suelo-planta es totalmente diferente al del nitrógeno. Desde el punto de vista del manejo nutricional, el principal aspecto a considerar es su baja movilidad en el suelo, lo hace principalmente por difusión, y la presencia de retención específica de los fosfatos en las arcillas, cuya magnitud depende de la cantidad y mineralogía de esta fracción. Por otro lado, el pH es un factor que impacta considerablemente sobre la disponibilidad de fósforo. La mayor disponibilidad ocurre con pH's entre 5.5 y 6.5, mientras que valores fuera de este rango su concertación en la solución del suelo se reduce significativamente (Limón, 2013).

h) Combate de malezas: El control químico es importante utilizando para ello herbicidas ya sea de acción preemergente o post emergente al cultivo. Se sugiere aplicar glifosato 6 días después de la siembra y antes de que emerja de malezas aplicar 2-3 D amina a los 30 días después de la siembra en dosis de 2.5 l ha⁻¹.

i) Plagas: Como medida de control biológico se recomienda realizar liberaciones de *Trichograma* con 4 pulgadas por hectárea al detectar oviposturas de gusano bellotero y evitar las posteriores aplicaciones de insecticidas para evitarles daño a tales organismos benéficos. Se sugiere controlar oportunamente los gusanos trozadores que se presentan en etapas tempranas del cultivo cuando se riega por goteo. Para el control de gusanos, se sugiere tratar la semilla con insecticidas sistémicos, como Carbofuran o Thiodicarb a dosis de 3.0 L 100 kg de semilla⁻¹ y 3.2 L 100 kg de semilla⁻¹, respectivamente. Estos además controlan la pulga saltona, trips, diabroticas y chicharritas; en los primeros días de

desarrollo para aplicaciones de insecticidas en pos emergencia se utilizan Clorpirifos 1.5 L ha⁻¹, *Bacillus thuringiensis* 500 gr ha⁻¹, Malatión 1L ha⁻¹.

j) Enfermedades: En el Valle de Santo Domingo las enfermedades que se presentan carecen de importancia económica, solo se recomienda usar genotipos con características de tolerancia a la roya común (*Puccinia sp*), usar semilla certificada, sembrar dentro de la fecha sugerida y utilizar insumos y dosis recomendadas.

k) Cosecha: La cosecha se realiza entre 159 a 180 días después de la siembra. En cosecha mecánica el grano tiene que tener 14 a 16 % de humedad y en cosecha manual de 20 a 24%. La cosecha oportuna evita mermas por invasión de malezas, roedores y acame de plantas.

2.6.3. Costos de producción de maíz en la zona de estudio

En el país se pueden identificar claramente dos sistemas de producción del maíz: el sistema comercial y el de autoconsumo. El primero se caracteriza por la producción orientada al mercado. Su competitividad se basa en la producción de maíz a bajos costos, por lo que su eficiencia se fundamenta en el uso intensivo de capital. Las entidades en las que predomina este sistema de producción son Sinaloa, Sonora, Jalisco, Tamaulipas y la región del Bajío.

La producción de autoconsumo, por su parte, se relaciona con el minifundio. Se basa en el uso intensivo de la mano de obra familiar. Los estados con este sistema son Chiapas, Guerrero, Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Oaxaca, Veracruz y Yucatán (INCA Rural, 2005).

Las acciones para generar una mayor rentabilidad del maíz pueden orientarse al incremento del rendimiento o a producir a costos mínimos. La rentabilidad actual del maíz en Baja California Sur es baja, tiene un beneficio/costo de 0.80 y puede aumentarse a 1.70 al disminuir los costos de producción incrementando los índices de productividad (Navejas y Gutiérrez, 2008).

En estricto sentido el criterio de rentabilidad está determinado por la diferencia entre el precio que el mercado o en otras palabras el consumidor inmediato está dispuesto a pagar y los costos en los que el agente económico incurrió para generarlo y llevarlo al mercado. No obstante el aumento experimentado en la década de los noventa, los rendimientos del maíz

continúan siendo relativamente bajos, lo que se traduce en bajos niveles de producción, a pesar de destinarse grandes extensiones de tierra y de mano de obra a este cultivo. México enfrenta problemas de rendimiento en el sector maicero, aun cuando por varias décadas se han hecho esfuerzos por aumentar su producción y rendimiento (INCA Rural, 2005).

La relación costo/beneficio (C/B) permite que se relacionen dos factores muy importantes en la producción agrícola. En primer lugar, el capital que invierte el productor denominado costo. En segundo lugar, está la ganancia que obtiene el productor y se denomina beneficio. Esta relación C/B indica cuál fue la ganancia final respecto a la inversión, y además permite concluir cuantos pesos se han ganado por cada peso invertido (Martínez *et al.*, 2013). Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Relación costo/beneficio} = \frac{\text{Ingreso obtenido por la venta}}{\text{Inversión o costo de producción}}$$

La variación del precio medio rural del maíz de los últimos veinte años, en el municipio de Comondú se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Precio medio rural del maíz, en el municipio de Comondú, B. C. S. (Realizado a partir de información del SIAP, 2014a).

Año	1995	2000	2005	2007	2010	2011	2012
PMR (\$ Ton ⁻¹)	772	1,385	1,572	2,363	2,549	3,922	4,475

El alto costo de los fertilizantes sintéticos provoca, por ejemplo, para el caso del cultivo de maíz, la aplicación de fertilizantes químicos represente el 30 % de los costos de producción en sistemas de riego y hasta el 60 % en los sistemas de temporal. Es importante decir que el aumento registrado en el año de 2008 en los precios de los fertilizantes sintéticos marcó un parteaguas muy importante en las tendencias históricas globales en la cotización de estos productos (Figura 18).

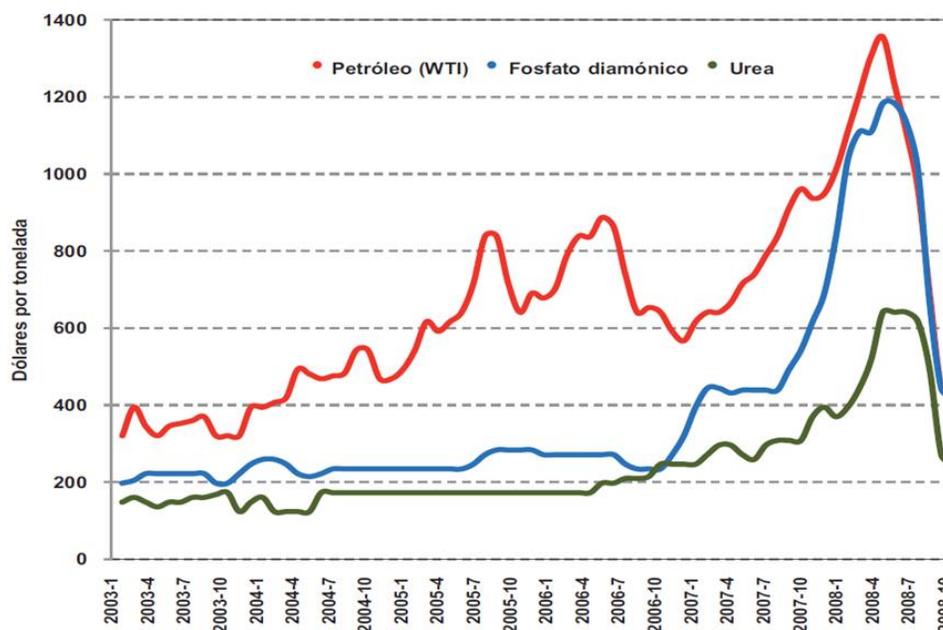


Figura 18. Precios internacionales de urea y fosfato diamónico (DAP) con respecto al precio del petróleo (FIRA (2010), citado por Aguado *et al.*, 2012).

Cabe mencionar que desde el año 2001 México importa el 100 % de urea y DAP que consume, y siempre ha importado el total del consumo de los fertilizantes potásicos (Aguado *et al.*, 2012). En México, los precios pico por tonelada alcanzados por fertilizante hasta el año 2008 y comparándolos con los actuales, se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Precio de los principales fertilizantes a nivel nacional y estatal (SNIIM, 2016).

Fertilizante	Precio Nacional 2008 (\$)	Precio Nacional 2015 (\$)	Precio Baja California Sur 2015 (\$)
Fosfato diamónico	14,000	10,457	-
Superfosfato triple	11,000	8,511	-
Urea	10,000	7,733	10,600
Cloruro de potasio	9,200	8,497	-
Sulfato de amonio	5,800	4,504	8,000

Los beneficios económicos del uso de los biofertilizantes en la agricultura radican en la disminución de costos de producción, al reducir las cantidades utilizadas de fertilizantes, acortar en algunos casos los tiempos de cosecha e incrementar los rendimientos (Aguado, 2012).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área experimental

El presente trabajo se desarrolló en el Sitio Experimental Valle de Santo Domingo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Ciudad Constitución, municipio de Comondú, en el estado de Baja California Sur; mismo que se localiza en las coordenadas 25°00'50'' N y 111°39'35'' W, a 47 msnm. El experimento se realizó en el año 2015 bajo las condiciones de aridez características de la zona de estudio.

3.2. Metodología

A continuación, se describe el proceso de trabajo de la presente investigación.

a) Descripción del sistema de cultivo: Como parte de las líneas de investigación del cultivo de maíz, desarrolladas durante el ciclo 2015 en el Sitio Experimental del Valle de Santo Domingo, se utilizó el genotipo de maíz híbrido INIFAP-S-14. La siembra mecánica se realizó el 27 de febrero de 2015, con 6 a 7 semillas por metro lineal, teniendo una densidad de siembra equivalente de 75 a 80 mil plantas ha⁻¹. En la Tabla 10, se presentan los datos del comportamiento fisiológico, reportado para el híbrido utilizado durante el estudio.

Tabla 10. Características del híbrido INIFAP S-14 para la evaluación de micorrizas como biofertilizante.

ETAPA FENOLÓGICA	DÍAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA
Emergencia	11
Encañe	40
Floración	81
Grano lechoso masoso	90
Grano masoso	105
Madurez fisiológica	110
Cosecha	140

El manejo agronómico consistió en un rastreo cruzado previo a la siembra. Para la maleza se realizaron: una escarda a los 40 días después de la siembra (DDS), dos deshierbes

manuales a los 31 y 45 DDS, y una aplicación del herbicida 2-4D amina en dosis de 2 l ha⁻¹ a los 31 DDS. Se aplicó el insecticida Dimetoato a los 19 DDS, en dosis de 1.0 l ha⁻¹ para el control del complejo cogollero, trips y chicharrita. Se realizaron 17 riegos frecuentes mediante cinta de goteo 5.0 mil, cuyo gasto fue de un caudal por metro de 5.0 l/h/m ó 0.49 L h⁻¹, con una lámina total de 61.0 cm.

b) Tratamientos: los tratamientos evaluados en el presente trabajo consistieron en lo siguiente (Tabla 11):

- Tratamiento uno (T1): aplicación sólo de micorrizas como biofertilizante, con inoculación a la hora de la siembra.
- Tratamiento dos (T2): aplicación de micorrizas como biofertilizante más el 50 % de la fertilización química convencionalmente utilizada en la zona de estudio para el cultivo de maíz.
- Tratamiento tres (T3): aplicación de fertilización química normalmente utilizada.

Tabla 11. Descripción de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	FERTILIZACIÓN QUÍMICA	BIOFERTILIZACIÓN CON <i>Glomus intraradices</i>
T1: Micorriza	00-00-00	Inoculación a la semilla
T2: Micorriza + 50 % de la fertilización convencional ¹	100-20-00	Inoculación a la semilla
T3: 100 % de la fertilización convencional ¹	200-40-00	Sin inoculación

Nota: ¹ Fertilización convencionalmente utilizada en INIFAP, Valle de Santo Domingo.

La biofertilización se realizó previo a la siembra en los tratamientos 1 y 2, con micorrizas a razón de 1 kg ha⁻¹ de la cepa INIFAP *Glomus intraradices*, la inoculación se llevó a cabo a la sombra con un mezclador rotatorio asperjando una solución de 100 ml de adherente y 400 ml de agua, para continuar con la incorporación del biofertilizante hasta obtener un recubrimiento homogéneo de micorrizas en todas las semillas.

La fertilización química en los tratamientos 2 y 3 consistió en la utilización de urea y ácido fosfórico. La dosis de fertilización química en el tratamiento 2 se efectuó con 218 kg ha⁻¹ de Nitrógeno y 20 kg ha⁻¹ de Fósforo en una sola aplicación, mientras que las dosis de fertilización del tratamiento 3 fue de 436 kg ha⁻¹ de urea y 40 kg ha⁻¹ de ácido fosfórico distribuidas en tres aplicaciones. La descripción de las aplicaciones de fertilización química y biofertilización utilizada en los tratamientos se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Distribución, tiempos y dosis de aplicación de biofertilizante y fertilizante químico, en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	T1	T2		T3	
	Micorriza	Micorriza + 50 % FQ		100 % FQ	
		Momento aplicación	Dosis	Momento aplicación	Dosis
Fertilización química	Sin fertilización química			21 DDS	100-40-00
		21 DDS	100-20-00	28 DDS	50-00-00
				39 DDS	50-00-00
Biofertilización con <i>Glomus intraradices</i>	Inoculación previa a la siembra	Inoculación previa a la siembra		Sin inoculación	

c) Unidad experimental: la parcela experimental por tratamiento constó de dos surcos, cada uno de 20 m de largo y de 80 cm de separación entre ellos, con un total de 16 m² por tratamiento y cuatro repeticiones (192 m² totales). Como parcela útil se consideraron dos metros lineales, al centro de cada unidad experimental, con una superficie total de 1.6 m² por tratamiento.

d) Diseño experimental: el arreglo de los tratamientos utilizado fue un diseño completamente al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones; el total de unidades experimentales fue de 12.

3.2.1. Variables a evaluar

Estas se dividieron en tres grupos: variables fitométricas, variables del rendimiento y relación Costo-Beneficio (C/B).

a) Variables fitométricas, las cuales fueron:

- Altura de planta (cm): medida desde el nivel del suelo hasta la base de la espiga de la planta.

- Diámetro de tallo (cm): en la parte central del segundo entrenudo desde el nivel del suelo.

- Altura a la primera mazorca (cm): desde el nivel del suelo hasta la primera mazorca.

- Peso forraje verde (kg): una vez cosechada la unidad experimental, se pesó en fresco, sin considerar a la mazorca.

- Peso seco (gr): mediante el método de eliminación del agua libre por medio del calor. Se realizó después de pesado en fresco, tomando una muestra de dos plantas por tratamiento, mismas que fueron cortadas en secciones de aproximadamente 15 cm a fin de colocarlas en bolsas de papel, que una vez identificadas fueron sometidas a una temperatura de 100° C durante 24 horas, en un horno Mca. OAKTON. Cumplidas las 24 horas, y una vez absorbida la humedad presente en las plantas, se pesó en seco cada unidad muestral. Con la diferencia entre el peso fresco y peso seco, se determinó el valor de la variable en cuestión.

- Nitrato foliar (ppm): el método utilizado fue mediante un sensor de nitratos Mca. HORIBA, con el uso de dos gotas de savia de maíz por lectura, y en cada tratamiento se hicieron cuatro lecturas. El método consistió en tomar al azar una hoja del estrato medio, de dos plantas por cada tratamiento, las cuales fueron cortadas en secciones de aproximadamente 5 cm; del total de hojas se pesaron 30 gr, que fueron colocados dentro de una jeringa de 10 ml, posteriormente la jeringa fue cerrada a presión impidiendo que los segmentos de hojas dentro de la jeringa guardaran aire entre sí. Este proceso fue repetido para cada uno de los tratamientos; posteriormente se sometieron a congelación durante 12 horas, y descongelación durante 4 horas, con el objetivo de que las células de las hojas dentro de la jeringa se expandieran hasta romperse al congelarse y descongelarse, obteniendo al final savia disponible para colocarla en el sensor y hacer la lectura correspondiente.

b) Variables de rendimiento, las cuales fueron:

- Diámetro de mazorca (cm): medido con un vernier en su parte media.
- Longitud de mazorca (cm): se consideró la distancia desde la punta a la base de la mazorca, con una cinta métrica.
- Hileras por mazorca: se contabilizaron y promediaron el número de hileras de granos por mazorca, para cada uno de los tratamientos.
- Granos por mazorca: de las mazorcas de cada unidad experimental se contabilizaron y promediaron el número de granos por mazorca.
- Peso de mazorca (gr): se determinó el promedio del peso de cuatro mazorcas por tratamiento, con el apoyo de una báscula.
- Rendimiento ($t\ ha^{-1}$): este se obtuvo mediante el peso de mazorca cosechado por unidad de superficie extrapolado a $t\ ha^{-1}$.

c) Relación Costo/Beneficio (C/B): mediante el cálculo de los costos de producción del manejo agronómico dado desde siembra hasta cosecha, por cada tratamiento. Se determinó la relación C/B, mediante el rendimiento por hectárea de maíz, el precio de venta del año 2015 y el costo de producción en el sistema aplicado durante el estudio, mediante la siguiente formula:

$$\text{Relación costo/beneficio} = \frac{\text{Ingreso obtenido por la venta}}{\text{Inversión o costo de producción}}$$

3.2.2. Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza para cada variable evaluada y la prueba de medias mediante el método de Tukey, a una $p=0.05$, con el uso del software SAS (SAS, 2002).

3.3. Materiales

- Cinta métrica.
- Horno Stable Temp de la marca OAKTON 40-180 °C.
- Sensor de nitratos Mca. HORIBA, Modelo CR2025 NO₃.
- Agua destilada.
- Solución estándar 150 ppm NO₃.
- Báscula Romana Mca. OHAUS.
- Regla de metal 30 cm.
- Machete.
- Metro de madera.
- Vernier digital Mca. TITAN.
- Tres Jeringas de 10 ml.
- Bolsas de papel 1 kg.
- Etiquetas colgantes.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se exponen los resultados obtenidos a partir de la evaluación de variables de rendimiento, fitométricas y económicas, de la utilización de micorrizas como biofertilizante en el sistema de producción de maíz de grano bajo condiciones de aridez.

4.1. Variables fitométricas

a) Altura de planta: la altura en las plantas de maíz, dieron como resultado promedios de entre 164.75 a 201.0 cm, donde el valor más bajo, correspondió al tratamiento 1, que solo fue sometido a biofertilización con micorriza; mientras que el tratamiento con plantas de mayor altura fue el tratamiento con fertilización química (T3). Los tratamientos con micorriza más fertilización química y el tratamiento sometido solamente a fertilización química, son estadísticamente similares, perteneciendo al mismo grupo en la prueba de separación de medias, con una altura promedio de 198.25 y 201cm respectivamente (Tabla 13).

b) Diámetro de tallo: en el análisis de la variable diámetro de tallo, no existió diferencia significativa entre los tratamientos con biofertilización, fertilización química y fertilización química más biofertilización (Tabla 13). Tales resultados indican que la inoculación de micorriza *Glomus intraradices*, no influyó en el grosor de tallo. El intervalo de grosor de este fue entre 19 a 20.88mm, siendo el más alto en promedio, el tratamiento 3, seguido del tratamiento sometido solo a inoculación de micorriza, dejando atrás al tratamiento con combinación de fertilización y biofertilización.

c) Altura a la primera mazorca: los resultados del análisis estadístico de la altura a primer mazorca, mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, siendo el tratamiento con fertilización química al 100 % el de mayor altura a primer mazorca, seguido del tratamiento con inoculación de micorriza y fertilización química al 50 %, y con menor altura el tratamiento 1. Lo anterior indica que la variable de altura a primer mazorca, se ve influenciada por el tipo de fertilización utilizada en el sistema de producción. En la Tabla 13 se puede observar que el tratamiento uno inició floración a los 75.17 cm de altura,

mientras que el tratamiento 2 comenzó con floración a los 101.27cm a primer mazorca, el tratamiento con fertilización química (T3) a los 114.97 cm.

Tabla 13. Variables fitométricas en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	ALTURA DE PLANTA (cm)	DIÁMETRO DE TALLO (mm)	ALTURA A 1ª MAZORCA (cm)
T1: Micorriza	164.75 ^b	20.08 ^a	75.175 ^c
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	198.25 ^a	19.00 ^a	101.275 ^b
T3: 100 % F.Q.	201.00 ^a	20.88 ^a	114.975 ^a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

d) Peso forraje verde: los resultados en el análisis del peso de forraje verde muestran que a pesar de no haber diferencia significativa entre los tratamientos, el tratamiento con mayor peso fresco o de forraje verde resultó ser el tratamiento 3, mismo que obtuvo un promedio en peso de 1.86 kg, a diferencia de los tratamientos con biofertilización con 1.56 y 1.57 kg en promedio por planta. A pesar de lo anterior, el tipo de fertilización no influyó estadísticamente el peso de materia fresca en las plantas de maíz evaluadas en este trabajo; teniendo en cuenta esto, es posible identificar que los tratamientos con fertilización química convencional e inoculación de micorrizas dan los mismos resultados de producción de materia verde en cultivo de maíz de la zona, lo cual es conveniente para la producción de maíces forrajeros.

Tabla 14. Peso de forraje verde en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	MEDIA (kg)	AGRUPAMIENTO TUKEY
T1: Micorriza	1.575	a
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	1.562	a
T3: 100 % F.Q.	1.862	a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

e) Peso seco: los resultados obtenidos de la evaluación de la variable de peso seco, (Tabla 15), muestran que los tratamientos 1 y 2, inoculados con *Glomus intraradices*, presentaron

menor peso seco con 256.30 y 254.03 gr, respectivamente, a diferencia del tratamiento sin inoculación de micorrizas que obtuvo 325.50 gr de peso seco por planta, a pesar de esto, los tratamientos no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, esto es, el peso de materia seca es similar en los tratamientos en los que se utilizó biofertilización y fertilización química.

Tabla 15. Peso seco en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	MEDIA (gr)	AGRUPAMIENTO TUKEY
T1: Micorriza	256.30	a
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	254.03	a
T3: 100 % F.Q.	325.50	a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

En la Figura 19, se muestra la tendencia de los tratamientos en cuanto a producción de materia seca y materia fresca, donde a pesar de no existir diferencia estadística significativa entre ellos, la aplicación de la fertilización química sobresale de los inoculados con *Glomus intraradices*.

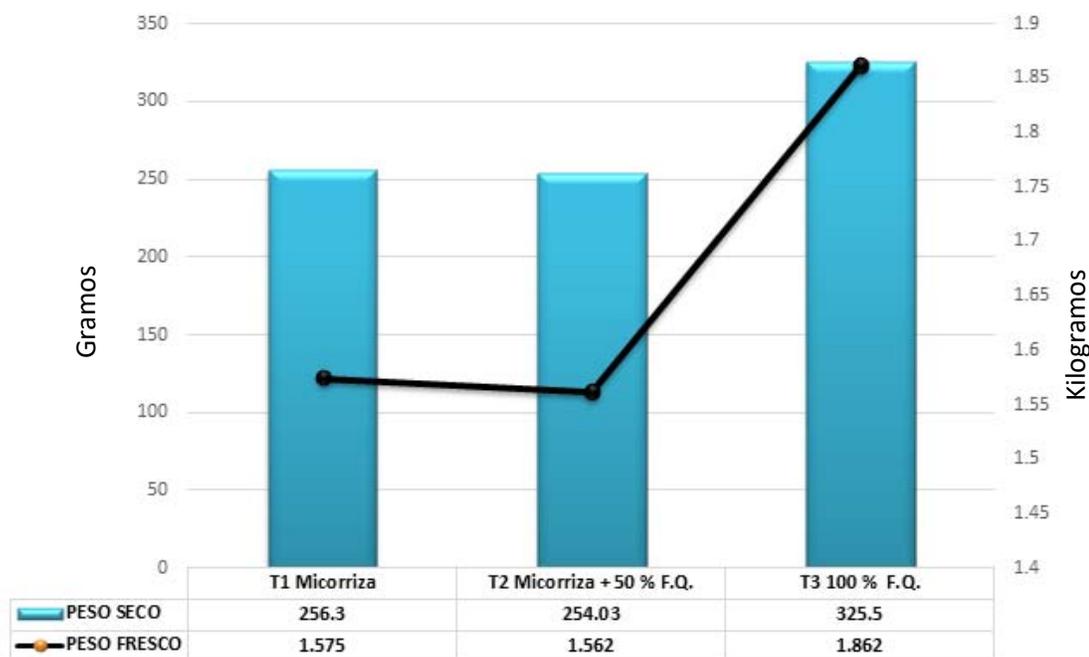


Figura 19. Peso seco y peso fresco de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

f) Nitrato foliar: con la finalidad de analizar la influencia de las micorrizas en la absorción de nitrógeno se realizaron mediciones de nitrato foliar presente en la savia de las plantas en los sistemas de fertilización estudiados. Los tratamientos no mostraron diferencia estadística significativa entre sí, a pesar de esto, el que presentó mayor nitrógeno foliar fue el sometido únicamente a biofertilización, con 257.5 ppm de NO₃, seguido del tratamiento 2 con 146 ppm de NO₃, mismo que fue inoculado con micorrizas, el tratamiento fertilizado químicamente solo reportó 137.50 ppm, lo que representó la menor cantidad de nitrógeno foliar encontrada durante el estudio (Tabla 16).

Tabla 16. Nitrato foliar en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	MEDIA (ppm)	AGRUPAMIENTO TUKEY
T1: Micorriza	257.50	a
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	146.25	a
T3: 100 % F.Q.	137.50	a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

4.2. Variables de rendimiento

a) Diámetro de mazorca: con respecto a la variable diámetro de mazorca los resultados arrojaron un promedio de 4.47 y 4.62 cm en mazorcas correspondientes a los tratamientos 1 y 2, respectivamente, que fueron los tratamientos inoculados con micorrizas, siendo estos, los de mayor diámetro con respecto al que fue sometido a fertilización química, que obtuvo un diámetro promedio de 4.30 cm. A pesar de lo anterior, entre los tratamientos no hubo diferencia estadísticamente significativa (Tabla 17).

b) Longitud de mazorca: los mayores valores obtenidos al medir la longitud de mazorca fueron los tratamientos con biofertilizante y el fertilizado únicamente de manera química, estos obtuvieron un promedio de 18.87 y 18.68 cm de longitud, respectivamente, a

diferencia del tratamiento que fue inoculado con *Glomus intraradices* mas fertilización química al 50%.

Esto muestra que la combinación de biofertilizante y fertilizante químico no beneficia el largo de la mazorca, variable que es importante contemplar para la producción de maíz para grano. En esta variable tampoco existió diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados (Tabla 17).

c) Hileras por mazorca: los promedios de la variable hileras por mazorca no resultaron con diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos; el mayor número de hileras fue de 14.75 en el T3, mientras que el menor número de hileras en promedio, fue en el T1, mismo que solo fue inoculado con micorrizas (Tabla 17).

d) Granos por mazorca: de acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que estadísticamente no hubo diferencia significativa para el número de granos por mazorca de los tratamientos evaluados. Sin embargo, los tratamientos con mayores resultados en granos por mazorca fueron los T1 y T3, con 499.25 y 536 granos en promedio, respectivamente, lo cual indica que la combinación del tipo de fertilización al que fue sometido el T2, no influyó en la producción de granos por mazorca, ya que, en el presente estudio este tratamiento obtuvo el menor valor promedio; mientras que en el tratamiento inoculado únicamente con *Glomus intraradices* se obtuvieron valores muy cercanos al tratamiento con promedio más alto que fue fertilizado de manera convencional (Tabla 17).

e) Peso de mazorca: al analizar los datos obtenidos de peso por mazorca, los resultados muestran que al igual que las variables de rendimiento anteriores, esta no presenta diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

De acuerdo a los promedios de peso de mazorca obtenidos, se puede señalar que entre los tratamientos con inoculación de micorrizas, el de mayor peso resulta ser el tratamiento que no está combinado con fertilización química (T1) con un promedio de 162.50 gr por mazorca, valor muy cercano al que obtuvo el T3 con 171.88 gr. Tales resultados señalan que las micorrizas muestran mejores resultados cuando son aplicadas sin fertilizantes químicos, pero que estadísticamente es lo mismo utilizar fertilizantes químicos a utilizar biofertilización con *Glomus intraradices*.

Tabla 17. Variables de rendimiento en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	DIÁMETRO MAZORCA (cm)	LONGITUD MAZORCA (cm)	HILERAS POR MAZORCA	GRANOS POR MAZORCA	PESO MAZORCA (gr)
T1: Micorriza	4.625 ^a	18.875 ^a	14.37 ^a	499.25 ^a	162.50 ^a
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	4.475 ^a	17.625 ^a	14.50 ^a	435.00 ^a	131.25 ^a
T3: 100 % F.Q.	4.300 ^a	18.688 ^a	14.75 ^a	536.00 ^a	171.88 ^a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

f) Rendimiento: los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18. No existió diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, por lo que se puede utilizar cualquiera de los tratamientos considerados en este estudio, sin embargo, si influirán en la relación C/B, como más adelante se enuncia.

Tabla 18. Rendimiento de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	MEDIA (Ton)	AGRUPAMIENTO TUKEY
T1: Micorriza	10.4	a
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	8.4	a
T3: 100 % F.Q.	11.0	a

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

A pesar de lo anteriormente mencionado, el promedio en toneladas por hectárea señalan al tratamiento 2 como el de menor rendimiento, por lo tanto, la combinación de fertilizantes químicos y micorrizas no favorece al rendimiento que en este caso fue de tan solo 8.4 ton ha⁻¹, a diferencia del rendimiento presente en el tratamiento sometido únicamente a inoculación de *Glomus intraradices*, con 10.4 ton ha⁻¹, seguido del tratamiento con fertilización química que fue el que obtuvo el mayor de los resultados, con 11.0 ton ha⁻¹ el cual fue el que obtuvo mayor rendimiento de los tres tipos de fertilización evaluada (Figura 20).

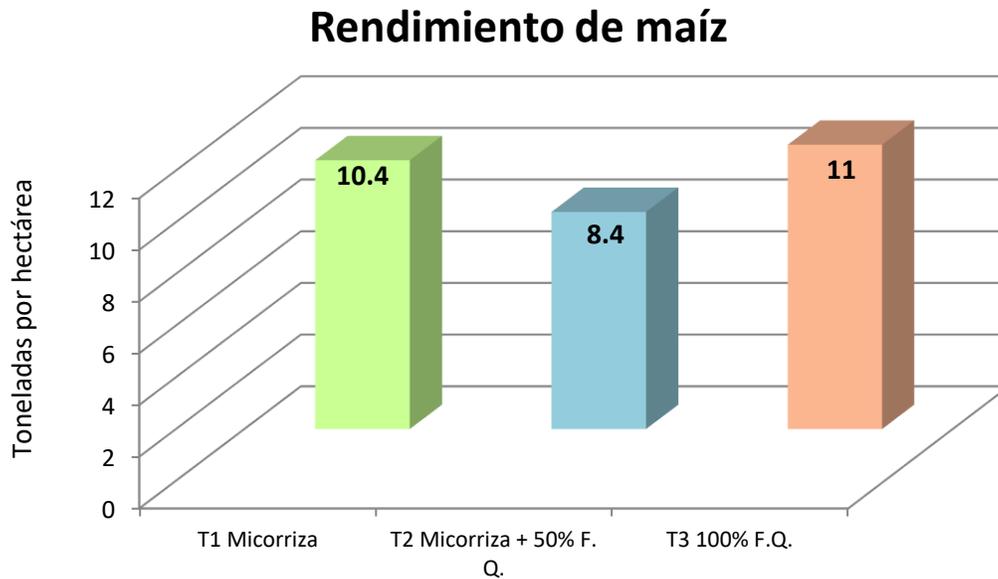


Figura 20. Rendimiento obtenido en los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz en Comondú, Baja California Sur, 2015.

Por lo anterior, se puede establecer que al igual que en las variables de granos por mazorca, longitud y diámetro de mazorca, en este caso, la combinación de fertilización química y biofertilización con micorrizas no favorece al rendimiento de la producción de maíz para grano en la zona de estudio, puesto que es más efectiva la biofertilización sin aplicación de insumos químicos de nutrición, demostrado lo anterior por el rendimiento del tratamiento 2 que se mostró tan solo 600 kg por debajo del tratamiento con mayor rendimiento (fertilizado de manera convencional).

4.3. Relación Costo/Beneficio

Con la finalidad de analizar la relación C/B de los sistemas de producción de maíz bajo las condiciones de fertilización y biofertilización evaluadas en el presente estudio y con ello determinar cuál de los sistemas de fertilización favorecen económicamente al productor, en la Tabla 19 se presentan los costos de acuerdo al tipo de fertilización aplicada en este trabajo.

Tabla 19. Costos de producción por hectárea del manejo agronómico de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

ASPECTO AGRONÓMICO	COSTO POR HECTÁREA (\$)		
	T1 Micorriza	T2 Micorriza + 50 % F.Q.	T3 100 % F.Q.
Preparación del terreno	\$500.0	\$500.0	\$500.0
Sistema de riego	\$4,600.0	\$4,600.0	\$4,600.0
Siembra	\$400.0	\$400.0	\$400.0
Fertilización química	\$0.0	\$3,042.0	\$5,004.0
Biofertilización	\$75.0	\$75.0	\$0.0
Control de plagas	\$155.0	\$155.0	\$155.0
Control de malezas	\$1,300.0	\$1,300.0	\$1,300.0
Riegos	\$5,000.0	\$5,000.0	\$5,000.0
Cosecha	\$985.0	\$985.0	\$985.0
TOTAL	\$13,015	\$16, 057	\$17, 944

Se observa que los tratamientos con menores costos de producción por hectárea fueron los tratamientos 1 y 2 mismos que fueron los inoculados con la micorriza *Glomus intraradices*, y el tratamiento más caro fue con la fertilización química convencionalmente utilizada en la zona de estudio (Figura 21).

En la Tabla 20, se presenta el costo de producción que arrojó el aspecto nutricional (fertilizantes químicos y biofertilización con micorrizas cepa *Glomus intraradices*), en cada uno de los tratamientos evaluados durante este estudio, estos valores fueron calculados y plasmados gráficamente con el porcentaje de cada concepto o costo de cada insumo con respecto al costo total de producción de cada uno de los tratamientos (Figura 21).

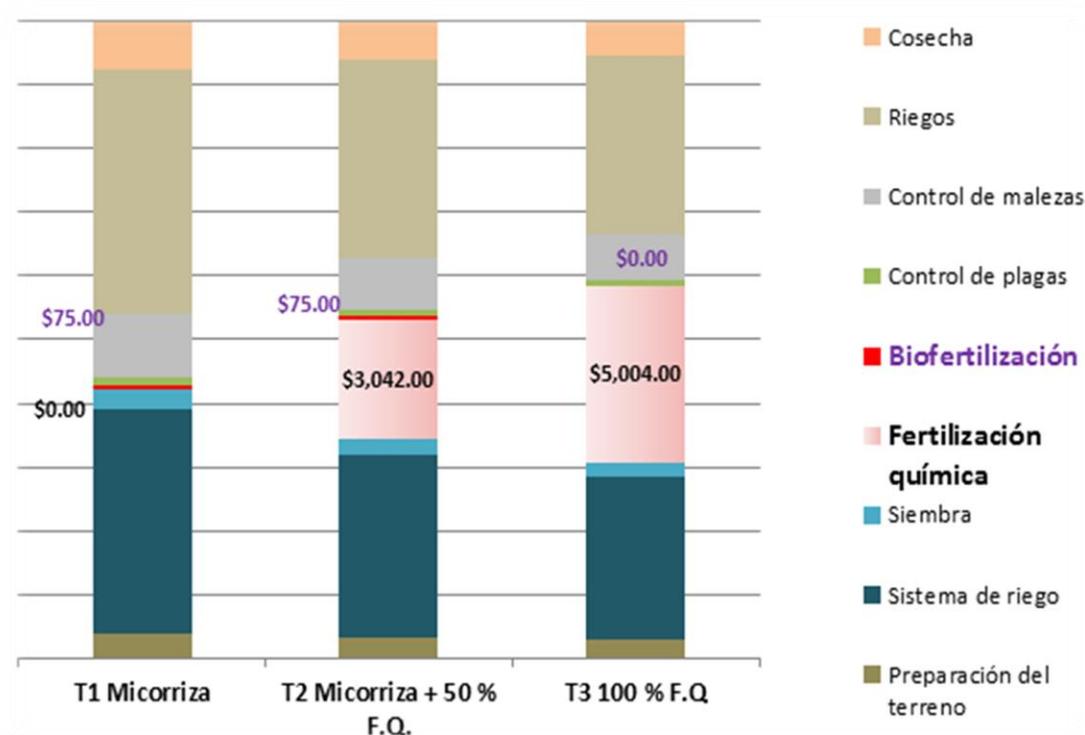


Figura 21. Costos de producción de acuerdo a cada aspecto agronómico de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

Se observa que el tratamiento en el que la nutrición significó el menor costo fue donde únicamente se utilizaron micorrizas con un 0.58 % del costo total; el tratamiento con la combinación de fertilización química y micorrizas implicó el 19.41 % mientras que el tratamiento con fertilización química convencionalmente utilizada fue el que tuvo el mayor costo con el 27.89 % del costo total de producción.

Tabla 20. Costo de la fertilización en porcentaje del costo total de producción, de acuerdo al tipo de nutrición utilizada para la producción de maíz para grano, en Comondú, Baja California Sur. 2015.

MANEJO DE FERTILIZACIÓN	COSTO EN PORCENTAJE		
	T1	T2	T3
Fertilización química	0	18.94	27.89
Biofertilización	0.58	0.46	0
Porcentaje total	0.58 %	19.41 %	27.89 %

Tales resultados evidencian que la utilización de micorrizas reduce considerablemente el costo de producción de maíz en el aspecto nutricional, mismo que suele ser el que implica mayores gastos cuando se habla de fertilización convencional, donde los fertilizantes químicos representan los gastos más altos con respecto al resto de los conceptos del manejo agronómico en un sistema de producción.

De acuerdo a lo anteriormente planteado y con la finalidad de evaluar la relación costo beneficio (C/B) en el sistema de producción de maíz bajo la utilización de micorrizas con respecto a la producción convencional de fertilización inorgánica de la zona de estudio, se utilizó la información de rendimiento, así como el costo de producción y el precio medio rural de maíz de grano correspondiente al mes de julio del año 2015 (Tabla 21).

Tabla 21. Relación Costo/Beneficio en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

TRATAMIENTO	COSTO DE PRODUCCIÓN	RENDIMIENTO (T ha ⁻¹)	PRECIO MEDIO RURAL (ha ⁻¹)	RELACIÓN C/B
T1: Micorriza	\$13,015	10.4a	\$3,290	2.63
T2: Micorriza + 50 % F.Q.	\$16,057	8.4a	\$3,290	1.72
T3: 100 % F.Q.	\$17,944	11.0a	\$3,290	2.02

Nota: letras iguales son estadísticamente iguales

Como puede observarse en la Tabla 21, el tratamiento 2 en el que se combinó 50 % de fertilización química más la utilización de micorrizas resultó ser el menos redituable económicamente, ya que, como lo indica el valor calculado de 1.72, se puede decir que por cada peso invertido se ganan solamente 72 centavos, a diferencia del tratamiento con fertilización química donde el C/B fue de 2.02, ganando 1.02 pesos por cada peso invertido.

El tratamiento que resulta ser más redituable con respecto al rendimiento obtenido y la inversión realizada para la producción de maíz de grano en la zona de estudio, fue donde únicamente se utilizó *Glomus intraradices*, teniendo una relación costo beneficio mayor que los demás tratamientos, al presentar un valor de 2.63 con una ganancia de 1.63 pesos por cada peso invertido para este sistema de producción (Figura 22).

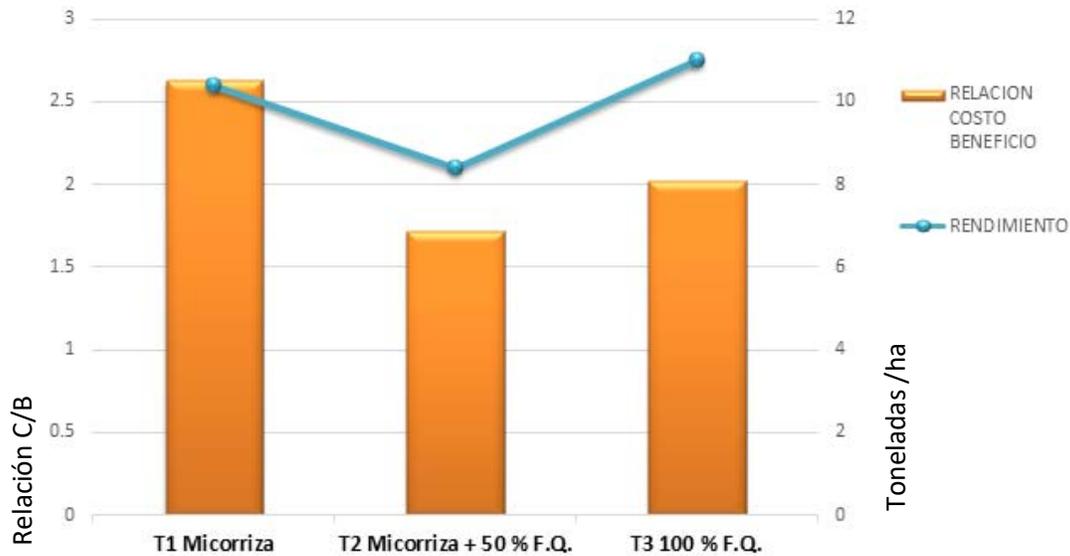


Figura 22. Relación C/B y rendimiento de los tratamientos evaluados en el cultivo de maíz, en Comondú, Baja California Sur, 2015.

Con los resultados analizados se acepta la hipótesis planteada en este trabajo, misma que contempla que la utilización de micorrizas permite el incremento del rendimiento de grano y disminuye los costos de producción de maíz en la zona de estudio.

4.4 Análisis del efecto de la utilización de micorrizas como técnica de biofertilización bajo las condiciones climáticas y edáficas de la zona del Valle de Santo Domingo, B.C.S.

Los resultados de las variables fitométricas y de rendimiento, así como el análisis económico de las técnicas de biofertilización evaluadas durante el presente estudio, permiten hacer un análisis más detenido al efecto de la utilización de micorrizas bajo las condiciones de aridez características del valle de Santo Domingo, ya que, a pesar de sus condiciones climáticas y edáficas, es posible decir que el efecto de las micorrizas resultó ser eficaz puesto que en la mayoría de las variables de rendimiento evaluadas se comportan estadísticamente similares al manejo de fertilización convencionalmente utilizado en la zona, aún en el tratamiento que no fue fertilizado de forma química y que solo fue inoculado por *Glomus intraradices*, sin dejar de lado que este último es económicamente más redituable que el resto de las evaluaciones.

Por ello, la utilización de micorrizas eficientiza la disponibilidad de nutrimentos del suelo pues al llevar a cabo la inoculación de la cepa *Glomus intraradices* en la semilla de maíz es posible disminuir las aplicaciones de fertilizantes químicos hasta minimizarlas del sistema de producción y aun así mantener el rendimiento que se obtiene bajo una fertilización química comúnmente utilizada en la región.

De esta manera tal como citaron Ferrera y Alarcón (2001), la biofertilización constituye un componente tecnológico importante que incrementa la sostenibilidad de la producción agrícola, promueve la sanidad y la nutrición de los cultivos y reduce el uso de fertilizantes inorgánicos.

Posteriormente al resultado obtenido en las variables evaluadas durante el desarrollo del presente trabajo, queda como factor a estudiar el del suelo y su influencia en el comportamiento de las micorrizas como biofertilizante. En la Tabla 22 se presentan características edáficas de las parcelas donde fue llevado a cabo el presente trabajo, denotando que de acuerdo a los rangos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), la concentración de nitrógeno inorgánico en el suelo se encuentra determinado dentro del rango de alto, al igual que el Potasio.

En cuanto al grado de alcalinidad de estos suelos se observa que el pH se clasifica de medianamente alcalino y en conductividad eléctrica se puede determinar al suelo como muy ligeramente salino.

Tabla 22. Análisis de suelo correspondiente a parcelas del sitio experimental INIFAP, Valle de Santo Domingo. B.C.S.

N (mg L⁻¹)	K (mg L⁻¹)	pH	CE (dS·m⁻¹)
42	150	8.26	1.25

Tales características de ligera alcalinidad y salinidad no resultaron ser perjudiciales para la población de la micorriza *Glomus intraradices* empleada en la inoculación de la semilla de maíz, y para otras investigaciones bajo otras condiciones deberá tomarse en cuenta la observación de Moreno (2002) quien señaló que hay que considerar la compatibilidad de la

especie de micorriza a utilizar, así como tomar en cuenta que ciertos microorganismos que actúan bien en un ambiente y cultivos específicos, no necesariamente funcionarán adecuadamente para el mismo cultivo en otro contexto ambiental.

Con base en los resultados obtenidos durante este estudio se puede corroborar lo enunciado por Aguado (2012), donde se asume que las micorrizas funcionan mejor en suelos con bajas concentraciones de nutrimentos y que la fertilización química particularmente la fosfatada reduce su eficiencia. Este último argumento permite entender cómo fue que el tratamiento 2 donde se inoculó con micorriza y se agregó la mitad de la fertilización química normalmente usada (100-20-00) no respondió favorablemente en cuanto al rendimiento, comparado con el sistema inoculado con micorrizas y el sistema convencional.

Por lo tanto, la inoculación de micorrizas en el cultivo de maíz representa una alternativa viable y eficiente para la fertilización del maíz en zonas áridas, donde la productividad del recurso suelo se ve limitada y donde el uso excesivo de fertilizantes químicos permite obtener los rendimientos deseados. Este trabajo puso a prueba la aplicación de micorrizas a fin de saber si la inoculación y su combinación con fertilización química influyen positivamente la interacción planta-suelo en parcelas experimentales de maíz del Valle de Santo Domingo en Baja California Sur.

V. CONCLUSIONES

a) El rendimiento y sus componentes, no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización evaluados durante el presente trabajo, por lo cual se recomienda la técnica de biofertilización con micorrizas, ya que, estadísticamente arroja resultados agronómicos muy similares a los de utilización de fertilización inorgánica.

b) La eficiencia de la cepa *Glomus intraradices* no se vio afectada por el ambiente y las condiciones edáficas del área de estudio, ya que, a pesar de las condiciones de aridez, las micorrizas favorecieron el rendimiento del cultivo de maíz y no comprometió su uso como un biofertilizante eficiente.

c) La inoculación de micorrizas como biofertilizante para la producción de maíz de grano reveló una relación costo/beneficio mayor con respecto a la producción convencional de fertilización química de la zona de estudio.

d) En la producción de maíz para grano, la utilización de micorrizas no generó un rendimiento (kg ha^{-1}) superior al que se obtuvo a partir de la fertilización química, sin embargo, si existió similitud estadística entre los tratamientos evaluados, lo cual permitió que la inoculación de *Glomus intraradices* incrementara la relación C/B con base en la producción de grano obtenida.

e) La inoculación de micorrizas permite optimizar el aprovechamiento de los nutrientes del suelo y disminuir el uso de fertilización inorgánica, reduciendo así, los costos de producción de maíz, al arrojar rendimientos estadísticamente similares al sistema fertilizado químicamente; su uso a largo plazo, favorecerá la mitigación de la degradación química de los suelos en zonas áridas.

VI. RECOMENDACIONES

Estudios posteriores permitirían determinar cuál de los tres sistemas propuestos permiten eficientizar el aprovechamiento de nutrimentos en suelos en condiciones de aridez a largo plazo, siendo el factor tiempo una herramienta concreta para analizar la interacción planta-suelo-biofertilizante y a su vez, reconocer y poder predecir cuál sería el efecto futuro que provocaría el continuar con la utilización de biofertilizantes y ver como influiría la disminución gradual del uso de fertilizantes químicos en el rendimiento de maíz de grano.

Por otro lado, el seguimiento de este estudio podrá permitir comprobar si las plantas cuyas raíces han sido colonizadas por micorrizas *Glomus intraradices* presentan una mayor tolerancia frente a la sequía, a las altas temperaturas y a la salinidad de suelo, a lo largo del tiempo; además del incremento en los rendimientos y el hecho de economizar el sistema de producción, la utilización de micorrizas como biofertilizante resulta una gran oportunidad para equilibrar los sistemas productivos en zonas áridas como las presentes en Baja California Sur.

Por lo anteriormente mencionado y de acuerdo a los resultados del presente estudio se recomienda lo siguiente:

- Difundir localmente la utilización de micorrizas a través del establecimiento de parcelas demostrativas, dirigidas a productores de maíz.
- Capacitar al productor en la inoculación con micorrizas, así como concientizar de los múltiples beneficios técnicos, económicos, de salud y cuidado al suelo que su empleo representa.
- Evaluar el efecto de los biofertilizantes en el suelo, darle seguimiento durante varios años, para establecer los beneficios no solo a la planta, sino también, al suelo, que en estas condiciones de aridez lo hacen muy vulnerable a la degradación química.
- Procurar una mayor disponibilidad comercial de la cepa de micorriza de INIFAP; que pueda estar disponible para cualquier productor que así lo desee.
- Probar otro tipo de biofertilizantes que no solo sean hongos, además de evaluar su efecto agronómico y económico en otros cultivos de la zona, para impulsar su utilización en diversos sistemas de producción en la zona del Valle de Santo Domingo, B.C.S.

VII. LITERATURA CITADA

1. Aguirre, M.F., Durán, P.A., Peña, R.A., Grageda, C.O., Martha B.G., y Garza, I. 2012. Micorriza INIFAP: Biofertilizante para el Campo Mexicano. Capítulo 9. En: Aguado S. G.A. (ed). Introducción al uso y manejo de los biofertilizantes en la agricultura. México. 236-251 p.
2. Aguilera, G.L., Rivas, M.I., Ocampo, J.O. y Oalde, P.V. 2007. Los glomales de las planicies del desierto de Sonora. Capítulo 6. En: Montaña Arias N. M., Camargo Ricalde L. S., García Sánchez R. y Monroy Ata A. (eds.). Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos. Edit. Mundi Prensa S.A. de C.V. México, D.F. 87-95 p.
3. Aguado, S.G.A., Rascon, C.Q. y Luna, B.A. 2012. Impacto Económico y Ambiental del Empleo de Fertilizantes. Capítulo 1. En: Aguado, S.G.A. (ed). Introducción al uso y manejo de biofertilizantes en la agricultura. INIFP/SAGARPA. México. 1-23 p.
4. Aguado, S.G.A. 2012. Uso de microorganismos como biofertilizantes. Capítulo 3. En Introducción al uso y manejo de los biofertilizantes en la agricultura. Aguado, S.G.A. (ed). INIFP/SAGARPA. México. 35-55 p.
5. Amado, A.J.P., Avila, M.M.R. y Ramírez, V.O. 2012. Micorriza INIFAP y el incremento de la productividad de avena y maíz en el estado de Chihuahua. Capítulo 11. En: Aguado Santacruz G. A.(ed). Introducción al uso y manejo de biofertilizantes en la agricultura. INIFP/SAGARPA. México.
6. Arámbula, L.A.T. 2010. Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. Reunión Nacional de Investigación en Recursos Bióticos de Zonas Áridas (CREZAS).
7. B.C.S. 2012. Plan Rector del Sistema Producto Maíz. Baja California Sur.
8. Bacilio , M., J. P. Hernandez y Y Bashan . «Restoration of giant cardon cacti in barren desert soil amended with common compost and inoculated with *Azospirillum brasilense*.» Biol Fert Soils. 43, 2006: 112-119.
9. Bashan, Y., Puente, M.E. y Salazar, B. 2006. Uso de los microorganismos del desierto como recurso para recuperar suelos erosionados. Revista Latinoamericana de Microbiología. Grupo de Microbiología Ambiental. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). 48(2): 154-161.
10. Bashan, Y. 2008. El uso de inoculantes microbianos como una importante contribución al futuro de la agricultura mexicana. En: La fertilización como tecnología sostenible. Díaz Franco A., Mayek Pérez N. (ed). Edit. Plaza y Valdés. México. 17-23 p.

11. Barea, J.M., Azcón, R. y Azcón, A.C. 2005. Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. En: *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*. Varma, B.F. (ed). 195-212 p.
12. Bethlenfalvay, G.J., Bashan, Y. y Carrillo, G.A. 2007. Mycorrhizae as biological components of resource islands in the Sonoran desert. Capítulo 7. En: *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Montaña, A.N.M., Camargo R.L.S., García, S.R., Monroy, A.A. (eds.). Edit. Mundi Prensa. Ciudad de México. 98-108 p.
13. Borowicz, V.A. 2001. Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations?. *Ecology*. 82 (11): 3057-3068.
14. Caballero, M.J. 2006. Microbiología agrícola e interacciones microbianas con plantas. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. 48(2): 154-161.
15. Camel, S.B., Reyes, S.M. G., Ferrera, C.R, Franson, R.L., Brown, M.S. y Bethlenfalvay G.J. 1991. Growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal mycelium through bulk soil. *Soil Science Society of America Journal*. 55: 389-393.
16. Cervantes, R.M.C. 2002. Las Zonas Áridas y Semiáridas de México. Capítulo 1. En: *Plantas de Importancia Económica en las Zonas Áridas y Semiáridas de México*. Cervantes, R.M.C. (ed). Edit. Instituto de Geografía. UNAM. D.F., México. 1-24 p.
17. CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2011. Razas de maíz de México. En: <http://www.biodiversidad.gob.mx/usuarios/maices/razas2012.html>. Fecha de consulta el 9 de abril del 2016.
18. Crowley, D.E., Wang, Y.C., Reid, C.P. y Szaniszlo, P.J. 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. *Plant Soil* 130: 179-198.
19. De-Bashan, L.E., Hernandez, J.P., Bashan, Y. 2010. Bacterias promotoras de crecimiento vegetal como componentes en el mejoramiento ambiental. Capítulo 14. En: *Rizosfera, biodiversidad y agricultura sustentable*. Garcia, S.I.E., Vazquez, S., Penna, C., Cassán, F. (edit). Asociación Argentina de Microbiología. Buenos Aires. 261-273 p.
20. Díaz, F.A., Catarina, L.O., García, O.J., Cortinas, E.H.M. y Peña, R.M.A. 2012. Inoculantes microbianos como promotores de la producción sostenible de maíz en condiciones semiáridas. Capítulo 10. En: *Introducción al Uso y Manejo de los Biofertilizantes en la Agricultura*. Aguado, S.G.A. (ed). México. 241-267 p.
21. FAO. 2007. Técnica para mejorar la eficiencia agrómica de las rocas fosfóricas. En: *Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible*. Roma, Italia. 91-96 p.

22. FAO. 2015. Portal de Suelos de la FAO. En <http://www.fao.org/soils-portal/es>. Fecha de consulta el 15 de febrero de 2016.
23. Ferrera, C.R., Alarcon, A. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*. 8(2): 175-183.
24. FIRA. 2015. Panorama Agroalimentario, Maíz 2015. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.
25. García, S.R., Monroy A.A., y Chimal, S.E. 2007. Hongos micorrizógenos arbusculares asociados a diferentes plantas y matorrales del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Capítulo 9. En: *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Montaña, A.N.M., Camargo, R.L.S., García, S.R., Monroy, A.A. (eds). Edit. Mundi- Prenda S.A. de C.V. D.F, México. 57-71 p.
26. Gonzalez, C.M.C., Alarcon, A. y Ferrera, C.D. 2008. Biodiversidad funcional de los hongos micorrícicos arbusculares en zonas áridas y semiáridas. Capítulo 1. En: *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Montaña, A.N.M., Camargo, R.L.S., García, S.R., Monroy, A.A. (eds.). Edit. Mundi Prensa. México. 13-21 p.
27. Gray, E.J., Smith, D.L. 2005. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 395-412 p.
28. Holguin, G., Bashan, Y. y Ferrera, C.R. 1996. Interacciones entre plantas y microorganismos beneficios: Procedimientos para el aislamiento y caracterización de hongos micorrizicos y rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas. *Terra*. 14(2): 159-194.
29. Horwath, W. 2007. Carbon cycling and formation of soil organic matter. En *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. Paul, E.A. (ed). Edit. Academic Press. New York, USA. 303-339 p.
30. INCA Rural. 2005. Plan Rector Sistema Producto Nacional Maíz. En: http://www.funprover.org/formatos/normatividad/Planes%20Rectores/Maiz/prn_maiz.pdf. Fecha de consulta el 17 de diciembre 2016.
31. INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de Comondú. Comondú, Baja California Sur. En: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/03/03001.pdf>. Fecha de consulta el 18 de julio de 2015.

32. INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). 2014. Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur. En: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/BCS_ANUARIO_PDF.pdf. Fecha de consulta el 3 de febrero de 2016.
33. INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). 2015. Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur. En: <http://sdemarn.bcs.gob.mx/docs/anuario2015.pdf>. Fecha de consulta el 21 de julio de 2016.
34. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. 2001. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. En: Artículo 3º, inciso XV. Ciudad de México. México. 2 p.
35. Limón, C.R.B. 2013. Evaluación de bacterias promotoras de crecimiento en plantulas de maíz y sorgo aisladas de diferentes regiones de México. Tesis de Licenciatura de Ingeniero en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 19-31 p.
36. López, C. A., De-Bashan, L.E., Bacilio, J.M. y Bashan, Y. 2015. La investigación en microbiología ambiental en Baja California: Importancia y Usos. Recursos Naturales y Sociedad 1(1): 83-98.
37. Martínez, R.E., López, G.M., Ormeño y O.E., Moles, C. 2013. Los microorganismos utilizados como biofertilizantes. En: Manual teórico-práctico. Los biofertilizantes y su uso en la agricultura. SAGARPA- COFUPRO- UNAM. Edit. Prado. D.F., México. 22-30 p.
38. Mercado, M.G. 2011. Desertificación de cuencas agrícolas en Baja California Sur. Tesis Doctoral. CIBNOR. La Paz, Baja California Sur. 3-63 p.
39. Moreno, G.B. 2012. La rizosfera y las Relaciones entre las Plantas y los microorganismos. Capítulo 2. En: Introducción al uso y manejo de los biofertilizantes en la agricultura. Aguado, S.G.A. (ed). INIFP/SAGARPA. México. 23-35 p.
40. Montaña , N.M.A., Camargo, R.S.L., García y S.R., Monroy, A.A. 2007. Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos. Edit. Mundi- Prensa S.A. de CV. D.F., México. 3-6 p.
41. Muñoz, P.D., Hernández, R.G. 2004. Situación actual y perspectiva del maíz. Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). SAGARPA. México, D. F. 136 p.
42. Navejas, J.J., Gutiérrez, P.E. Tecnología para producir maíz con costos mínimos en B.C.S. 2008. En:

<http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1667/Tecnologia%20para%20producir%20maiz%20con%20costos%20minimos%20en%20B.C.S..pdf?sequence=1>. Fecha de consulta el 3 marzo de 2015.

43. Pedraza, R.O., Teixeira, K.R.S., Fernandez, S.A., García, S.I., Baldani, L.D.V. y Bonilla, R. 2010. Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. Corporacion Colombiana de Investigación Agropecuaria. 155-164 p.

44. Pezzani, G.F., Hernandez, R., Cuevas, L. y Montaña, C. 2007. Interacciones micorrízicas en la reserva de la biosfera de Mapimí: hongos micorrizogenos arbusculares y su asociación con gramíneas del desierto Chihuahuense. Capítulo 8. En: Micorrizas arbusculares en cosistemas áridos y semiáridos. Montaña, A.N.M., Camargo, R.L.S., García, S.R., Monroy, A.A. (eds.). Edit. Mundi- Prenda S.A. de C.V. D.F, México. 111-119 p.

45. PRODUCE. 2011. Agenda de innovacion tecnologica para el estado de Baja California Sur. Componente de validacion y transferencia de tecnologia. En: http://www.cofupro.org.mx/cofupro/agendas/agenda_bcs.pdf . Fecha de consulta el 18 de septiembre del 2016. 8-41 p.

46. Rivera, B.F. 2006. Tolerancia de la micorriza arbuscular contra los metales pesados. Revista Latinoamericana de Microbiología. 48 (2): 158-160.

47. Rillig, M. C., Mummey, D.L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. New Phytologist 171: 41-53.

48. SAGARPA. 2011. Secretaría de Fomento a los Agronegocios. Indicadores Estatales Agroeconómicos. En: www.sagarpa.gob.mx. Fecha de consulta 15 de julio de 2015.

49. SAS. 2002. Versión 9.00. (Software). Sas Institute Inc. Cary, Carolina del Norte. USA.

50. SEMARNAT. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad. Salinidad y clasificación de suelos, estudio muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. En: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>. Fecha de consulta el 18 de septiembre 2016. 16-48 p.

51. SIAP. 2014. Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera: Atlas de Zonas Áridas de México. Primera Edición. ISBN: 978-607-9350-04-8. D.F., México. 14-94 p.

52. SIAP. 2014a. Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. Cierre de la producción agrícola por estado. En:

<http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. Fecha de consulta el 20 de marzo de 2016.

53. Subramanian, S.K., Charest, C. 2007. Micorriza arbuscular y manejo bajo sequía. Capítulo 4. En: Micorrizas arbusculares en cosistemas áridos y semiáridos. Montaña, A.N.M., Camargo, R.L.S., García, S.R., Monroy, A.A. (eds.). Edit. Mundi- Prenda S.A. de C.V. D.F., México. 57-71 p.

54. SNIIM. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. 2016. En: [http://www.economia-sniim.gob.mx/2010prueba/InsumosQuinc.asp?Cons=Q&prod=T&dest=3&dqQuinc=T&dqMesQuinc=12&dqAnioQuinc=2015&ord=D&PrePor=Pres&Formato=Nor&submit=Ver+C](http://www.economia-sniim.gob.mx/2010prueba/InsumosQuinc.asp?Cons=Q&prod=T&dest=3&dqQuinc=T&dqMesQuinc=12&dqAnioQuinc=2015&ord=D&PrePor=Pres&Formato=Nor&submit=Ver+Consulta)onsulta. Fecha de consulta el 12 de febrero de 2016.

55. Terry, A., Leyva, A., Hernández, A. 2005. Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). Revista Colombiana de Biotecnología VII(2): 47-54.

56. Toledo, V.M., Ordóñez, M. 1996. Mapa: zonas ecológicas, obtenido del proyecto “Diagnóstico de los escenarios de la biodiversidad de México a través de un sistema de información eco-geográfico” INE/UNAM/CONABIO. México. En: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/zecol1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no. Fecha de consulta el 19 de enero de 2016.

57. UNCCD. 2006. Tercer Informe Nacional en Materia de Implementación de la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha Contra la Desertificación, en países afectados por sequía o desertificación. CONAFOR, SEMARNAT, SAGARPA; FIRCO, INEGI, CONAZA y COLPOS. México.