



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

**DIVERSIDAD EDÁFICA Y RELACIONES PRODUCTIVAS DE LA MILPA
INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES EN LA REGIÓN DE
HUEJOTZINGO, PUEBLA**

TABARÉ TONALLI AQUIMÍN DUCHÉ GARCÍA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTOR EN CIENCIAS

CHOLULA, PUEBLA

2020

La presente tesis, titulada: **Diversidad edáfica y relaciones productivas de la milpa intercalada con árboles frutales en la región de Huejotzingo, Puebla**, realizada por el alumno: **Tabaré Tonalli Aquimín Duché García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. IGNACIO OCAMPO FLETES

ASESOR:



DR. JAVIER CRUZ HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. J. ARAHÓN HERNÁNDEZ GUZMÁN

ASESOR:



DR. ANTONIO MACÍAS LÓPEZ

ASESOR:



DR. DANIEL JIMÉNEZ GARCÍA

Puebla, Puebla, México, 02 de noviembre del 2020

**DIVERSIDAD EDÁFICA Y RELACIONES PRODUCTIVAS DE LA MILPA
INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES EN LA REGIÓN DE HUEJOTZINGO,
PUEBLA**

Tabaré Tonalli Aquimín Duché García, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

En el Valle de Puebla, en la región de Huejotzingo, algunos productores cuentan con sistemas tradicionales de cultivo múltiple, en los que intercalan árboles frutales con cultivos anuales. Derivado de estos sistemas, investigadores del Colpos y el Inifap desarrollaron la propuesta tecnológica milpa intercalada con árboles frutales (MIAF); tecnología multiobjetivo que busca aumentar los rendimientos de maíz y la productividad de la tierra, a la par de reducir la erosión hídrica del suelo, mejorar los ingresos de los productores, y conservar la diversidad de los agroecosistemas. Esta investigación evaluó la diversidad biológica edáfica, la calidad del suelo y su relación con aspectos productivos entre los cultivos componentes en el sistema agroforestal Milpa Intercalada en Árboles Frutales, en la región de Huejotzingo, Puebla. Se determinaron variables productivas de los cultivos en dos ciclos de producción, así como atributos fisicoquímicos y microbiológicos del suelo en 16 sitios contrastantes en cuatro fechas de muestreo dentro del sistema MIAF. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), así como una correlación canónica, análisis de conglomerados, análisis de componentes principales y regresión lineal. Los resultados muestran que el sistema MIAF posee ventajas productivas y ecológicas frente a los sistemas en monocultivo, al obtener una ERT (eficiencia relativa de la tierra) > 1 , y al conseguir un índice de calidad de suelo promedio mayor al monocultivo. La presencia de grupos funcionales microbiológicos, como actinomicetos totales, fijadores de nitrógeno y hongos, se ve favorecida en el MIAF respecto al monocultivo, así como el porcentaje de materia orgánica y el contenido de nutrientes en el suelo. En el presente estudio se establecen y confirman evidencias de que el MIAF genera diversos beneficios, a nivel ecológico y productivo, en comparación con los monocultivos.

Palabras clave: Calidad de suelo, Eficiencia relativa de la tierra, Manzana, Maíz-Frijol, Microorganismos edáficos.

EDAPHIC DIVERSITY AND PRODUCTIVE RELATIONSHIPS OF THE MILPA INTERCLASSED WITH FRUIT TREES IN THE HUEJOTZINGO REGION, PUEBLA

Tabaré Tonalli Aquimín Duché García, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

In the Puebla Valley, in the Huejotzingo region, some producers have traditional multiple cropping systems, in which fruit trees are intercropped with annual crops. Derived from these systems, researchers from Colpos and Inifap developed the technological proposal for milpa intercropped in fruit trees (MIAF), a multi-objective technology that seeks to increase both corn yields and land productivity, while reducing soil water erosion, improving producers' incomes, and conserving the diversity of agroecosystems. This research evaluated the edaphic biological diversity, soil quality and its relationship with productive aspects between the component crops in the Milpa Intercropped in Fruit Trees agroforestry system, in the Huejotzingo region, Puebla. Productive variables of the crops were determined in two production cycles, as well as physicochemical and microbiological attributes of the soil in 16 contrasting sites on four sampling dates within the MIAF system. An analysis of variance and a Tukey mean comparison test ($\alpha=0.05$) were performed, as well as a canonical correlation, cluster analysis, principal component analysis, and linear regression. The results show that the MIAF system has productive and ecological advantages over monoculture systems, by obtaining an ERT (Relative Soil Efficiency) > 1 , and by achieving an average soil quality index higher than the monoculture. The presence of microbiological functional groups, such as total actinomycetes, nitrogen fixers and fungi, is favored in the MIAF with respect to monoculture, as well as the percentage of organic matter and the content of nutrients in the soil. In the present study, evidence is established and confirmed that MIAF generates various benefits, at an ecological and productive level, compared to monocultures.

Key words: Apple, Corn-Bean, Edaphic microorganisms, Relative soil efficiency, Soil quality.

DEDICATORIA

A la diversidad biológica, la cual nos cultiva de incontables maneras, nos protege, brinda alimento y todo lo necesario para disfrutar la vida.

A mi familia, mi pareja, mis hijos, hermanos y padres. Quienes refuerzan mi espíritu para continuar el camino.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado en mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados por brindarme los recursos materiales y el conocimiento que me permitió realizar mi investigación.

A los integrantes del Consejo Particular por impulsarme a continuar y apoyarme en la realización de la tesis al igual que mi formación académica y madurez filosófica:

Dr. Ignacio Ocampo Fletes. Por su valioso apoyo a mi formación profesional y contribución al trabajo de tesis, así como sus consejos y recomendaciones que me ayudaron a desarrollarme como persona.

Dr. Javier Cruz Hernández. Por su entera disposición en el avance de la investigación y el enriquecimiento aportado a ella.

Dr. J. Arahón Hernández Guzmán. Por su conocimiento y asesoría académica que me permitió concluir el presente estudio.

Dr. Antonio Macías López. Por su confianza y amabilidad que me impulsaron a concluir mis estudios.

Dr. Daniel Jiménez García. Por su conocimiento compartido y recomendaciones otorgadas.

Al Dr. Pedro Antonio López. Por sus asesorías y consejos que ayudaron a fortalecer el trabajo.

Al Dr. Andrés María Ramírez. Por su tiempo y apoyo en la revisión de presente trabajo.

En especial agradecimiento al M.C. Ernesto Hernández Romero por su entera disposición y compromiso con el desarrollo del presente trabajo, al igual que a la Ing. Reyna Rojas por apoyarme con las actividades de campo.

A Don Hipólito, que descanse en paz, su esposa María y su hijo Iván, por permitirme ingresar a su parcela y darme las facilidades para realizar mi investigación.

A mis compañeros y camaradas, con quienes aprendí y compartí buenos momentos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteamiento de investigación.....	4
2. Objetivos	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos específicos	6
3. Hipótesis	7
3.1 Hipótesis general.....	7
3.2 Hipótesis específicas.....	7
4. Marco de referencia	7
4.1 Sistemas de cultivo múltiple	7
4.2 Sistemas agroforestales (SAF).....	9
4.3 Antecedentes de la Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF).....	11
4.4 Milpa Intercalada en Árboles Frutales	13
4.5 Cultivos componentes del MIAF	13
4.6 Mesocultivo - Maíz.....	13
4.7 Sotocultivo - Frijol.....	17
4.8 Epicultivo - Árbol frutal (manzano)	21
5. Marco teórico	22
5.1 El paradigma agroecológico	22
5.2 El agroecosistema	25
5.3 La diversidad biológica en los agroecosistemas	26
5.4 Productividad de los agroecosistemas	33
5.5 Calidad de suelo y microorganismos en el agroecosistema.....	34
6. Literatura citada	38
CAPÍTULO I. METODOLOGÍA.....	48
1.1 Localización y características del área de estudio	48
1.2 Método y técnicas de investigación	49
1.3 Unidad de análisis	50
1.3.1 Diseño Experimental.....	50
1.3.2 Tamaño de la muestra	51
1.4 Materiales genéticos.....	52
1.5 Variables ambientales	53
1.6 Variables evaluadas	54
1.7 Índice de Área Foliar (IAF)	55
1.8 Biomasa foliar de maíz	55
1.9 Materia seca de la biomasa aérea total (BAT)	56

1.10 Materia seca de la biomasa de raíces finas	56
1.11 Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT)	57
1.12 Calidad de semilla de maíz y frijol	57
1.13 Determinación de grupos funcionales de microorganismos edáficos	59
1.14 Análisis fisicoquímico del suelo	60
1.14.1 Muestreo de suelo	61
1.14.2 Humedad y Densidad Aparente	63
1.14.3 Granulometría	63
1.14.4 Materia orgánica y Carbono oxidable	63
1.14.5 Cenizas	64
1.14.6 Nitrógeno total	65
1.14.7 Nitrógeno nítrico y amoniacal	65
1.14.8 Textura	66
1.14.9 pH y Conductividad eléctrica	66
1.14.10 Nutrientes (P, N, K, Ca)	67
1.14.11 Bioensayo espontáneo de arvenses	67
1.15 Calculo de índice de calidad de suelo	68
1.16 Literatura citada	69

CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, BIOMASA Y CALIDAD DE SEMILLA DE MAÍZ EN DISTINTAS CONDICIONES DE SIEMBRA DE UN SISTEMA MIAF..... 72

Resumen.....	72
Abstract	72
Introducción	73
Materiales y métodos	76
Resultados y discusión	81
Conclusiones	87
Literatura citada	87

CAPÍTULO III. EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA, ATRIBUTOS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO EN LA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES 93

Resumen.....	93
Abstract	94
Introducción	94
Materiales y métodos	97
Resultados y discusión	104

Conclusiones	122
Literatura citada	123
CAPÍTULO IV. GRUPOS MICROBIANOS EN UN AGROECOSISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES EN VALLES ALTOS DE PUEBLA.	129
Resumen.....	129
Abstract.....	130
Introducción	130
Materiales y métodos	133
Resultados y discusión.....	136
Conclusiones	145
Literatura citada	146
CONCLUSIONES GENERALES.....	152
RECOMENDACIONES GENERALES	153

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie cosechada de maíz en ciclos PV-OI considerando tierras de riego y temporal.	17
Cuadro 2. Tratamientos del subexperimento de manzanos	51
Cuadro 3. Sitios para el primer muestreo de suelo	61
Cuadro 4. Sitios evaluados para cultivos anuales	62
Cuadro 5. Sitios para cultivos simples y manzano	62
Cuadro 6. Sitios evaluados bajo sistema MIAF en la localidad de San Mateo Capultitlán	77
Cuadro 7. Variables de campo evaluadas en los distintos sitios	83
Cuadro 8. Calidad física y fisiológica de maíz	85
Cuadro 9. Sitios de muestreo evaluados en el sistema MIAF.....	98
Cuadro 10. Métodos de laboratorio para determinar propiedades fisicoquímicas del suelo	99
Cuadro 11. Clases de calidad de suelo	102
Cuadro 12. Atributos fisicoquímicos muestreo 1 (hoja bandera de maíz, verano 2018).....	106
Cuadro 13. Atributos fisicoquímicos muestreo 2 (madurez fisiológica de maíz, otoño 2018) ..	107
Cuadro 14. Atributos fisicoquímicos muestreo 3 (previo a la siembra, primavera 2019)	109
Cuadro 15. Atributos fisicoquímicos muestreo 4 (hoja bandera de maíz, verano 2019).....	111
Cuadro 16. Resultados del ACP de los promedios de ICS del ciclo agrícola 2018 y 2019	112
Cuadro 17. Resultados ACP de los promedios de ICS	114
Cuadro 18. Indicadores propuestos para evaluar la calidad de suelos (ICS) a partir del CMD..	116
Cuadro 19. Indicadores ICS para el ciclo agrícola 2018 y 2019	118
Cuadro 20. Rendimientos promedio y ERT en MIAF	119
Cuadro 21. Tabla de correlación para ERT e ICS 2018 y 2019	122
Cuadro 22. Sitios de muestreo de suelo en diferentes condiciones de cultivo. San Mateo Capultitlán, Puebla, 2018.....	134
Cuadro 23. Croquis de la parcela experimental	134
Cuadro 24. Análisis de Varianza de propiedades fisicoquímicas del suelo de los sitios muestreados en San Mateo Capultitlán.....	139
Cuadro 25. Correlación para cultivos en asociación.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación e ilustración del maíz (<i>Zea mays</i> L.)	14
Figura 2. Estados fenológicos de maíz de acuerdo con la Escala de Ritchie y Hanway (1982, citado en Garay y Cruz, 2015)	15
Figura 3. Clasificación e ilustración del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	18
Figura 4. Etapas de desarrollo del cultivo de frijol (<i>P. vulgaris</i> L.)	19
Figura 5. Superficie cosechada de frijol en México, 2005-2016 (Millones de hectáreas).....	20
Figura 6. Clasificación e ilustración del manzano (<i>Malus domestica</i> Borkh)	21
Figura 7. Ubicación del municipio de Huejotzingo, en el estado de Puebla, y sitio donde se realizó el estudio.	49
Figura 8. Registro de variables ambientales	54
Figura 9. Toma de muestra para la estimación de materia seca de la biomasa de hojas en maíz. 56	
Figura 10. Barrena cilíndrica con muestra de suelo para la estimación de materia seca de la biomasa de raíces finas	57
Figura 11. Grupo de plántulas de prueba de germinación estándar	58
Figura 12. Determinación de grupos microbiológicos.....	60
Figura 13. Determinación de porcentaje de materia orgánica.	64
Figura 14. Bioensayo espontáneo de arvenses.....	68
Figura 15. Clasificación de plántulas de la prueba de germinación estándar	80
Figura 16. Distribución ortogonal del análisis de componentes principales (ACP) de los promedios de ICS para los cuatro muestreos de suelo.....	116
Figura 17. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.	118
Figura 18. Climograma ciclo 2018 parcela MIAF en San Mateo Capultitlán, Puebla.	137
Figura 19. Abundancia de grupos microbianos edáficos en los sitios muestreados	140
Figura 20. Diagrama de correlaciones para las propiedades fisicoquímicas del suelo y la abundancia de microorganismos	142
Figura 21. Análisis de Conglomerados para grupos de microorganismos y atributos fisicoquímicos del suelo.....	143

INTRODUCCIÓN GENERAL

De acuerdo con Lazcano-Ferrat (2000) en el momento en el que el nivel de un factor, el cual está ligado con la producción, influye en la respuesta de otro factor, es cuando se presenta una interacción; esta puede ser positiva si el resultado de aplicar prácticas combinadas es mayor que la suma del efecto individual de las prácticas utilizadas. Desde el enfoque de la agroecología, un cultivo es considerado como una comunidad, la cual está formada por un complejo de poblaciones de distintas especies de arvenses, cultivos, insectos y microorganismos, los cuales interaccionan entre sí. Las interacciones que se presenten entre las poblaciones de un agroecosistema serán las que confieren a la comunidad sus características emergentes. “Estas cualidades emergentes no se explican en términos de las propiedades de individuos o poblaciones, sino que son el resultado de las interacciones”. Las características de la comunidad, sea un ecosistema o un agroecosistema, son fundamentales en la estabilidad, productividad y dinámica funcional del sistema (Gliessman, 2002, pp. 215).

Petersen (2003) argumenta que el enfoque agroecológico se fundamenta en valorar la lógica tradicional, la cual está estrechamente vinculada con el uso intensivo de la biodiversidad dentro de los sistemas agrícolas. La biodiversidad es, directa e indirectamente, el soporte de nuestra propia vida en la Tierra. Si entre las especies que desaparecen hubiese alguna clave en algún proceso, nuestra situación se vería comprometida. Porque con la pérdida de especies no sólo pueden desaparecer formas de vida atractivas, también se pierden nodos de una red que defiende de plagas y parásitos, y que aportan numerosos servicios, desde los más obvios como la producción de alimentos o madera, hasta otros más sutiles como la polinización de las cosechas o la purificación de las aguas (Pugnaire, 2006).

Altieri (1999) comenta que cada vez existen más investigaciones que sugieren que el nivel de regulación interna y de las funciones de los agroecosistemas está estrechamente vinculado con la biodiversidad presente en este. Dentro de los agroecosistemas, la biodiversidad desarrolla una variedad de servicios ecológicos que va más allá de la producción de alimentos; alguno de estos servicios ecológicos son el reciclamiento de nutrientes, la

regulación de microclimas y procesos hidrológicos, control de organismos no deseados, y la desintoxicación de químicos nocivos. Altieri (1999) menciona que debido a que los procesos de renovación y los servicios ecológicos mediados por la biodiversidad son en gran parte biológicos, su persistencia depende del mantenimiento de la integridad biológica y la diversidad en los agroecosistemas; por ello es relevante explorar opciones de manejo y diseño de agroecosistemas que mejoren la biodiversidad.

Si bien el concepto de biodiversidad es reciente, la importancia que ha adquirido es relevante en distintos aspectos de la investigación y campos de la vida humana. Es por ello por lo que se han realizado múltiples estudios al respecto, siendo de los más importantes el cómo medirla y evaluarla. En este sentido la riqueza y abundancia de especies pueden dar una idea sobre la biodiversidad de un sistema, pero resultan insuficientes para análisis más profundos, en los que se ven involucrados varios factores. Ante esta situación se presenta el concepto de biodiversidad funcional como una alternativa a la evaluación de biodiversidad, la cual puede entenderse como la variedad de las interacciones con los procesos ecológicos a diferentes escalas espaciotemporales (Martín *et al.*, 2007).

La agroecología es una vía para conservar y optimizar el uso de la biodiversidad en los agroecosistemas, los cuales son ecosistemas modificados por el hombre para obtener un producto o servicio. En este sentido, los sistemas agroforestales (SAF) pueden ser considerados como un tipo de agroecosistema, en los cuales el manejo de la producción agrícola, ganadera y forestal ha mostrado aportes relevantes como la reducción de la erosión, incremento de la fertilidad del suelo, producción más estable y resiliente a inundaciones y sequías prolongadas, entre otras ventajas, al diversificar los cultivos del sistema (Gómez, 2014). Los SAF, además de proporcionar alimentos, son fuente de forraje, abastecen de energía para cocción de alimentos; aportan material para la construcción y división entre terrenos, aunado a que de ellos se derivan instrumentos de trabajo y recursos medicinales (Navarro *et al.*, 2012).

En México los SAF se siguen practicando por los campesinos, como en el valle de Puebla, zona de importancia agrícola, donde destaca la producción de maíz como la principal

actividad de los campesinos del territorio (Osorio-García *et al.*, 2015). En la región de Huejotzingo, Puebla, los productores tienen una superficie de labor promedio de 1.5 hectáreas, siendo el maíz el principal cultivo (Ascencio-López *et al.*, 2018) destacando el establecimiento de sistemas de cultivo múltiple, en los cuales se intercalan árboles frutales con cultivos anuales, principalmente maíz (Regalado-López *et al.*, 2020). Estos sistemas de manejo tradicional son los precursores de la propuesta tecnológica de la Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF), al retomar los componentes del manejo tradicional de maíz con árboles frutales de los productores del área del Plan Puebla e incorporar la tecnología de la terraza de muro vivo (Turrent *et al.*, 2017).

El sistema de cultivo MIAF es un tipo de manejo agroforestal, parecido a otras técnicas de cultivos intercalados, llamadas cultivos en callejones, que ha sido rediseñado y tecnificado, en el cual se incluyen algunas prácticas de origen prehispánico, como el manejo de la milpa histórica (Juárez-Ramón y Fragoso, 2014). Por la importancia de estos sistemas, el objetivo fue evaluar la diversidad microbiológica en el suelo y su relación con aspectos productivos entre los cultivos componentes en el sistema agroforestal Milpa Intercalada en Árboles Frutales, establecido en la región de Huejotzingo, Puebla

1. Planteamiento de investigación

La producción de alimentos es uno de los mayores retos para la especie humana, debido a que es una actividad esencial para su supervivencia; además de los efectos que tiene dicha práctica sobre el medio y la salud humana. La creciente población humana, a la par de la profunda degradación de las bases ecológicas, demandan la generación de nuevas prácticas tecnológicas que puedan asegurar la alimentación de los pueblos y preservar los ecosistemas (Parra, 2016).

En México, de las 197.3 millones de hectáreas de superficie continental, 31.57 millones son destinadas a la producción agrícola; de estas, 79% se encuentra en condiciones de temporal, siendo el maíz de grano blanco el cultivo más importante al considerar la superficie anual cultivada, de 6.95 millones de hectáreas (INEGI, 2017). El estado de Puebla se encuentra entre los 11 con mayor superficie destinada a la agricultura, unas 917.3 mil hectáreas para el año 2018, destacando el maíz de grano (515.5 mil ha) y el frijol (48.6 mil ha) (SIAP, 2019). Aunado a ello, en 2016 se registró una producción de 716.93 mil toneladas de manzana, destacando el estado de Puebla como el tercero, después de Chihuahua y Durango, con mayor producción en México (SIAP, 2017).

La región de Huejotzingo, en el estado de Puebla, tiene alta relevancia agrícola pese a la explosión del crecimiento urbano e industrial. Si bien existen factores condicionantes para el cambio de cobertura agropecuaria a urbana-industrial debido al incremento poblacional de la comunidad y una escasa contribución de las nuevas generaciones en las dinámicas de producción agrícola, existe una valoración económica y socio-cultural de la tierra (Ascencio López *et al.*, 2018).

El maíz constituye la base de la alimentación de las familias en el municipio de Huejotzingo (Osorio-García *et al.*, 2015). Por ello, en la superficie sembrada de este municipio prevalece el cultivo de maíz, del cual en 2018 se sembraron 770 ha de riego y 4,879 ha de temporal, destacando además otros cultivos como son alfalfa verde, frijol, pera, durazno, tejocote, haba verde, ciruela y manzana (SIAP, 2019). El 89.4% de los agricultores cuentan con una

superficie destinada a la agricultura entre 0.25 y 3.0 ha, con promedio de 1.7 ha (Osorio-García *et al.*, 2015). Regalado-López *et al.* (2020) revelaron que la mayor parte de los jefes de familias obtienen sus ingresos practicando la diversificación de cultivos, siendo el maíz y el frijol las principales fuentes de seguridad alimentaria, y otros cultivos como el haba, amaranto, frutales, calabaza, alfalfa, flores, cilantro, alverjón, etc. Les generan ingresos para cubrir otras necesidades de la familia.

En dicha región se pueden encontrar sistemas de cultivo múltiple en los cuales se intercalan árboles frutales, como manzana, pera, durazno, ciruela, capulín, tejocote, entre otros, con maíz, frijol, alfalfa, chile, amaranto, calabaza y otros cultivos. A partir de este manejo tradicional de los agroecosistemas se establece la propuesta, desde la investigación científica, del sistema MIAF, la cual ha mostrado ser una alternativa tecnológica para la producción de maíz en familias campesinas con escasos recursos o condiciones edafoclimáticas adversas (Zambada *et al.*, 2013), al ser un sistema agrícola diseñado para diversificar e incrementar la producción agrícola a través de la combinación entre especies frutales, maíz y frijol, permitiendo conformar una estructura vegetal ordenada en el espacio y tiempo, la cual constituye un refugio potencial para las comunidades edáficas (Juárez-Ramón y Fragoso, 2014). Si bien esta propuesta tecnológica cuenta con sus limitantes, como el costo económico inicial de los árboles y la necesidad de asesoría técnica para el correcto manejo de los frutales (Turrent *et al.*, 2017), tiene el potencial de aportar múltiples beneficios; al tener una producción superior a la de los monocultivos, ser reservorio de carbono atmosférico, satisfacer parte de las necesidades alimentarias de las familias campesinas y brindar mejores ingresos a los productores (Juárez *et al.*, 2008).

Actualmente los investigadores hacen ensayos con una gran diversidad de especies perennes y anuales, para definir otras estrategias y técnicas que permitan, dentro del enfoque MIAF, el mejor aprovechamiento de la radiación solar, la sombra, la humedad y los nutrientes del suelo (Juárez *et al.*, 2008). Sin embargo, dentro del sistema MIAF se ha estudiado poco sobre la calidad e interacciones biofísicas de las especies del sistema (Albino *et al.*, 2014). Teniendo en cuenta la importancia de las interacciones biológicas entre los componentes de un sistema de cultivo múltiple como el MIAF, y la creciente demanda de estudios para el uso

y manejo de la biodiversidad en agroecosistemas, así como la importancia agrícola de la región de Huejotzingo, Puebla, se plantean las interrogantes ¿Cómo influyen las prácticas agrícolas en la diversidad biológica de un sistema MIAF en la región de Huejotzingo, Puebla? y ¿Cuál es la relación de aspectos productivos y ecológicos entre los componentes del sistema MIAF?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la diversidad biológica edáfica, la calidad del suelo y su relación con aspectos productivos entre los cultivos componentes en el sistema agroforestal Milpa Intercalada en Árboles Frutales, en la región de Huejotzingo, Puebla.

2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la influencia de la asociación de cultivos anuales y perennes del sistema MIAF, en distintos arreglos topológicos y dos genotipos de maíz, en el índice de área foliar (IAF), la biomasa aérea total (BAT), la biomasa de raíces finas (BRF) y la calidad de semilla de maíz.
2. Medir atributos fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del suelo y su relación con la eficiencia relativa de la tierra (ERT) en los cultivos componentes del sistema MIAF durante dos ciclos de cultivo.
3. Determinar parámetros de calidad de suelo y la abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos en diferentes sitios contrastantes evaluados en un sistema MIAF y en monocultivos.

3. Hipótesis

3.1 Hipótesis general

La biodiversidad y la calidad de suelo del sistema Milpa Intercalada en Árboles Frutales se relacionan con aspectos productivos de los cultivos componentes, siendo superiores a los encontrados en sistemas de monocultivo.

3.2 Hipótesis específicas

1. La asociación de cultivos anuales y perennes del sistema MIAF, mejora el índice de área foliar (IAF), la biomasa aérea total (BAT), la biomasa de raíces finas (BRF) y la calidad de las semillas de maíz.
2. El sistema MIAF presenta mejoras en parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de calidad de suelo, con una eficiencia relativa de la tierra (ERT) superior a uno en comparación con el monocultivo, en dos ciclos de cultivo estudiados
3. La población de microorganismos de grupos funcionales edáficos estudiados en sitios contrastantes en el sistema MIAF supera a la población de microorganismos edáficos observados en los monocultivos.

4. Marco de referencia

4.1 Sistemas de cultivo múltiple

Desde hace algunos años se han generado equipos de investigación interesados en las dinámicas de los sistemas de cultivos múltiples y sus beneficios, viéndose como una alternativa a la actual crisis que vive la agricultura y el reto de alimentar a una población creciente. Siendo los agricultores tradicionales los que cuentan con un amplio conocimiento empírico respecto a los sistemas de cultivos múltiples (León, 2012).

Para poder adentrarse al mundo de los sistemas de cultivos múltiples es necesario la introducción de conceptos básicos, y es en este punto, al igual que sucede con varios

paradigmas alternativos al paradigma dominante, que surgen diversas posturas y confusiones al respecto, si bien es importante tener una base teórica y conceptual, algunos autores afirman que las discusiones que giran en torno a ello pueden llegar a impedir la operación de estos. En 1975 se llevó a cabo el simposio sobre cultivos múltiples en la reunión anual de la Sociedad Americana de Agronomía (ASA) en Knoxville, Tennessee, en el cual se intentó por primera ocasión plasmar las directrices basadas en las opiniones de un intervalo amplio de especialistas respecto a los sistemas de cultivos múltiples.

El concepto de cultivo múltiple puede entenderse como la intensificación de cosechas a escala temporal y espacial. Algunos de los conceptos básicos entorno a los sistemas de cultivos múltiples son: el de cultivo en secuencia, haciendo referencia a la producción de dos o más cultivos en secuencia en un mismo terreno por año, y el de cultivo intercalado, en el cual se tiene dos o más cultivos de manera simultánea en el mismo terreno (Morales-Rosales *et al.*, 2006). Otros conceptos clave para el estudio y entendimiento de los sistemas de cultivos múltiples son el de eficiencia relativa de los ingresos, eficiencia relativa de la tierra, Índice de cultivo, patrón de cultivo, rotación, índice calórico, efecto de competencia, efecto complementario, cultivos componentes, entre otros (Turrent *et al.*, 1995a).

Las líneas de investigación que ven en los sistemas de cultivos múltiples el potencial de enfrentar los grandes desafíos que se presentan para la agricultura en el siglo XXI han prestado atención a las interacciones biológicas que se dan en los sistemas de cultivos, ya que se ha evidenciado que mientras los agroecosistemas sean más similares a los ecosistemas naturales, se tendrán los atributos deseados, tales como resiliencia, estabilidad y sustentabilidad. Es necesario entender la complejidad de las interacciones que se dan entre los componentes del agroecosistema, tales como cultivos, insectos, patógenos, arvenses, además del mismo hombre, ya que de ello dependerá el manejo que se le dé a la agrobiodiversidad y la biodiversidad de los agroecosistemas. La escala temporal juega un papel crítico en el estudio de las interacciones entre los distintos componentes de los sistemas de cultivos múltiples, ya que muchos de los efectos que estas tengan se podrán visualizar a través de los años, y no en un solo ciclo agrícola (Charles, 1986).

El uso de cultivos múltiples tiene claros beneficios a nivel biológico y agronómico; sin embargo, dichos beneficios no se limitan a estas dimensiones, ya que también pueden reflejarse en aspectos económicos y sociales. Para ello es necesario comprender la dinámica de la agricultura a pequeña escala, la cual en muchas ocasiones favorece aspectos como la alimentación familiar, la disminución del riesgo, el suministro de alimentos, prácticas culturales, entre otros, sobre los rendimientos y las ganancias monetarias. En este sentido cabe aclarar que, si bien el factor económico juega un papel importante en la dinámica de la agricultura de baja escala, este no siempre es el más importante (Gliessman *et al.*, 2007).

A diferencia del axioma expresado por el modelo de agricultura convencional, en el cual se planteaba una solución reduccionista, basada en un pensamiento atomístico, lineal y de mono-causalidad, donde los hechos cuantificables, que pueden ser transformados a un lenguaje matemático, se consideran los únicos hechos relevantes. Si bien, este enfoque reduccionista permitió grandes avances científicos y tecnológicos, presentó conflictos al intentar aplicarse a sistemas complejos, como son los agroecosistemas, situación que se agudiza aún más en sistemas campesinos, en los que los componentes del sistema están interrelacionados, creando complejas dinámicas entre ellos (Machado *et al.*, 2009). En el enfoque de cultivos múltiples queda claro que no existen respuestas simples para problemas complejos. Y dado que los problemas que enfrenta actualmente la agricultura son sumamente complejos, por ende, las respuestas deben ser complejas, entendiendo estas no como complicadas, sino como situaciones en las que intervienen factores de distinta naturaleza.

4.2 Sistemas agroforestales (SAF)

Para los fines de esta investigación se considera a los sistemas agroforestales (SAF) como un tipo de agroecosistema, los cuales pueden ser definidos como una forma de uso de la tierra, en la cual plantas leñosas perennes interactúan biológicamente en un área con distintos cultivos, siendo el propósito fundamental el diversificar y optimizar la producción (Mendieta y Rocha, 2007). Los SAF se muestran como una de las alternativas para reducir la degradación de suelos además de poseer distintas bondades para el agricultor y el ambiente,

existiendo interacciones ecológicas y económicas entre los árboles y los otros componentes, las cuales son compatibles con las condiciones socioculturales (Murgueitio, 2006).

La agroforestería se presenta como una opción ante la necesidad de implementar un manejo de los agroecosistemas que mejoren la producción y evite la degradación de la tierra (Montiel-Aguirre *et al.*, 2006). Esta puede ser aplicada a agroecosistemas tanto frágiles como estables; además de que pueden implicar distintos niveles, tales como parcela, finca o región. Los SAF son tan diversos y versátiles que pueden aplicarse con fines de autoconsumo o comercial. Cualesquiera sean las condiciones en las que se aplique este enfoque, el objetivo de este tipo de sistemas es diversificar la producción, controlar la agricultura migratoria, aumentar la cantidad de materia orgánica en el suelo, fijar una mayor cantidad de nitrógeno atmosférico, promover el reciclaje de nutrientes, crear un microclima propicio para la presencia de una abundante y rica fauna edáfica que favorezca las dinámicas del suelo, al igual que optimizar la producción del sistema (Suárez *et al.*, 2015).

En México se registró, para julio de 2012, el establecimiento de 227 mil ha de plantaciones forestales comerciales (Fierros-González, 2012). De manera conservadora, se estima que por cada hectárea plantada con apoyos, se establecerá una hectárea adicional sin apoyo (CONAFOR, 2011). En México existen alrededor de cuatro millones de hectáreas con un alto potencial para el establecimiento de diversos SAF (CONAFOR, 2013). El patrón nacional de uso de suelo y sus reservorios de carbono reportó, en 1990, que 900 mil ha son dedicadas a la agroforestería (Casanova-Lugo *et al.*, 2011).

Los SAF se pueden clasificar de acuerdo con los componentes que los conforman y la distribución que tienen esos componentes en una escala temporal y espacial. Considerando las combinaciones de los componentes los sistemas se pueden clasificar como sistemas agroforestales o silvoagrícolas, sistemas agrosilvopastoriles y sistemas silvopastoriles. Por otro lado, considerando la escala temporal y espacial se pueden clasificar como sistemas agroforestales secuenciales, cuando existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos, es decir, los cultivos anuales y las plantaciones se suceden en el tiempo, o como sistemas agroforestales simultáneos, cuando se siembran los cultivos,

árboles y/o ganadería de forma simultánea y continua, incluyendo asociaciones de árboles con cultivos perennes, árboles en franjas en asociación con cultivos anuales, huertos caseros y sistemas agrosilvopastoriles. Por último, cercas vivas y cortinas rompe viento, las cuales consisten en plantaciones de árboles y arbustos en los límites de las parcelas; estas impiden el paso de animales o de la gente, delimitan un territorio y permiten la obtención de productos adicionales como forrajes, leña, madera, flores para polinizadores, frutos, postes, plantas medicinales, y plantas con importancia cultural (Mendieta y Rocha, 2007), además de proteger a los cultivos contra el acame ante la eventual ocurrencia de vientos intensos.

4.3 Antecedentes de la Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF)

La milpa es considerada como un sistema agrícola tradicional, siendo un policultivo que constituye un espacio dinámico de recursos genéticos, cuyo componente principal es el maíz, el cual se acompaña con distintas especies de otros cultivos, como el frijol el cual es el principal, pero pudiendo encontrar otros como calabazas, chiles, tomates, entre otras especies de acuerdo con la región donde se establezca dicho sistema. Una de las combinaciones más utilizadas es la de maíz-frijol-calabaza, conocida como “la triada mesoamericana” (CONABIO, 2018). Este tipo de sistema agrícola busca aprovechar las sinergias que se dan al establecer de manera conjunta diferentes cultivos, a la par de aprovechar plantas que crecen sin intervención humana directa como los quelites, encontrando una amplia variedad de especies como verdolagas, quintoniles, huauzontles, nabos, romeritos, etc. Dentro del sistema también se pueden encontrar diferentes especies no vegetales como algunos artrópodos y hongos, tal como el gusano del elote o el huitlacoche, los cuales pueden ser de interés alimenticio y económico (Granados *et al.*, 2000).

Son estas interacciones entre distintos y diversos grupos de especies las que permiten considerar al sistema milpa como un ecosistema, en el cual se hace un aprovechamiento de los distintos recursos como luz, agua y suelo, favoreciendo interacciones ecológicas benéficas, lo cual se refleja en una serie de beneficios y bondades, no solo para las especies que coexisten en el sistema, sino también para los grupos humanos que manejan la milpa, favoreciendo una dieta equilibrada, la cual sigue siendo la base de la alimentación de varios

grupos campesinos. La milpa es un reflejo del conjunto de conocimientos, tecnologías y prácticas agrícolas milenarias que han conservado grupos prehispánicos y campesinos, que les han permitido obtener de la tierra y del trabajo humano los productos necesarios para satisfacer las necesidades básicas de las familias (Buenrostro, 2008).

Generar sistemas alternativos para la explotación de la tierra en las actuales condiciones de la agricultura mexicana a baja escala demanda considerar cinco aspectos clave: el aumentar la productividad de la tierra sin disminuir su uso intenso tradicional, el incrementar la productividad de la mano de obra, conservar suelo y agua, desarrollar la integración agropecuaria y forestal, y por último mejorar el manejo postcosecha tradicional. Si bien, el sistema de cultivos en callejones (SCC) ha mostrado tener virtudes, su transferencia a los productores se ha visto limitada. La Terraza de Muro Vivo (TMV) se presenta como una tecnología con atributos para enfrentar parte de la actual problemática del campo mexicano. Se ha evidenciado que la tecnología de TMV cuenta con varios atributos que evitan la erosión hídrica del suelo y permiten la retención de nutrientes (Turrent y Cortés, 2005; Turrent *et al.*, 1995b).

Sin embargo, la aceptación de los productores y éxito de esta tecnología puede verse comprometida por aspectos como la demanda de mano de obra, el manejo de la parcela, la especie que ocupara el seto y el costo de su implementación, por mencionar algunos. En búsqueda de mejorar esta tecnología, o encontrar una más eficiente y adecuada para las condiciones de los productores de baja escala, se retomaron algunos de los principios de los sistemas de cultivo múltiple de la región de Huejotzingo Puebla, en los cuales es común la presencia de árboles frutales a la par de milpa o algunos otros cultivos anuales. Es aquí donde se propone a la Milpa Intercalada en Árboles Frutales como una tecnología alternativa para los productores de baja escala con condiciones edafoclimáticas adversas y que busca atender fenómenos sociales, económicos y ambientales, mostrándose como una estrategia multiobjetivo (Turrent *et al.*, 1995a). Esta tecnología propone mejoras a los sistemas de cultivo múltiple tradicionales, los cuales pueden ser considerados como un sistema MIAF tradicional.

4.4 Milpa Intercalada en Árboles Frutales

Los productores de la región del valle de Puebla suelen intercalar cultivos anuales, principalmente maíz, con especies de árboles frutales, es este tipo de sistemas, junto con la terraza de muro vivo. Esta estrategia constituye el origen del sistema MIAF propuesto por investigadores del Colegio de Postgraduados en conjunto con otras instituciones de interés agrícola, siendo impulsado dentro del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL), el cual inició en la región mazateca en el año 1999. Entre sus objetivos se encontraba la evaluación socioeconómica en comunidades indígenas y generar tecnologías alternativas de producción agrícola sustentable (Ruíz *et al.*, 2012).

En los últimos años el Colegio de Posgraduados, en conjunto con otras instituciones, ha llevado la implementación del sistema MIAF a familias rurales en zonas marginadas por medio de la metodología "Escuela de Campo" (López *et al.*, 2008). De acuerdo con Juárez y Fragoso (2014) el sistema de cultivo MIAF posee atributos que favorecen la conservación de la biota del suelo. Por su parte López *et al.* (2008) explican que el sistema MIAF protege los recursos naturales, compite favorablemente con especies forestales en la captura y almacenamiento de carbono, captura agua, retiene el suelo e incrementa el rendimiento. El sistema MIAF se presenta como una alternativa sostenible a nivel ecológico, social y económico (Cortés *et al.*, 2006).

4.5 Cultivos componentes del MIAF

El sistema MIAF se compone de tres cultivos principales, el frijol como sotocultivo, el maíz como mesocultivo y el árbol frutal como epicultivo. Cada uno de estos juega un papel definido en el sistema, el cual puede incluir aspectos de la dimensión ambiental, económica o social.

4.6 Mesocultivo - Maíz

4.6.1 Descripción del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) se ha convertido en el grano más prominente a nivel mundial, este cultivo fue el sustento de la alimentación de un gran número de pueblos prehispánicos, y fue después del contacto europeo con América que este cultivo se distribuyó ampliamente en distintos continentes. Aunque aún no existe consenso respecto al origen del maíz, gran parte de los estudios botánicos, moleculares y arqueológicos concluyen que esta planta derivó de una especie anual llamada teocintle (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) nativa del Valle del río Balsas en las laderas del Pacífico de los estados de Michoacán, Guerrero, México en elevaciones entre los 400 y 1,200 m.s.n.m. Por otro lado, un modelo de competencia sitúa al municipio de Tehuacán en el estado de Puebla, México como el sitio de origen de maíz en altitudes de 1,000 a 1,500 m.s.n.m. (Piperno y Flannery, 2001).

4.6.2 Taxonomía del maíz

El género *Zea* es originario de México y Centroamérica, contando con cinco especies de las cuales la más común es *Zea mays* L (Figura 1), la cuál ha sido domesticada con fines productivos y teniendo a su pariente silvestre más cercano en el teocintle (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) (Wayne *et al.*, 2004).

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Cyperales

Familia: Poaceae

Género: *Zea* L., 1753

Especie: *Z. mays* L., 1753

Subespecie: *mays* NA



Figura 1. Clasificación e ilustración del maíz (*Zea mays* L.)

Fuente: (Tangerini, 2009)

4.6.3 Fisiología y fenología del maíz

El maíz es considerado una planta C₄, ya que presenta un ciclo adicional al ciclo de Calvin, el denominado ciclo de Hatch y Slack o de los ácidos dicarboxílicos, siendo capaz de reducir la fotorrespiración. Las plantas C₄ son capaces de tener mejores tasas fotosintéticas netas, lo cual se refleja directamente en su productividad y permitiéndoles a las plantas crecer en temperaturas entre 28 y 35°C (Polonia *et al.*, 1982).

La escala más empleada para representar el ciclo del cultivo de maíz es la propuesta por Ritchie y Hanway en 1982, la cual considera caracteres morfológicos externos. En ella se aprecian dos grandes periodos, el vegetativo y el reproductivo (Figura 2), el primero identificado con la letra V y un subíndice correspondiente al orden de la última hoja completamente extendida, es decir con la lígula visible. El periodo reproductivo es representado con la letra R, comenzando con la emergencia de los estigmas (Garay y Cruz, 2015).

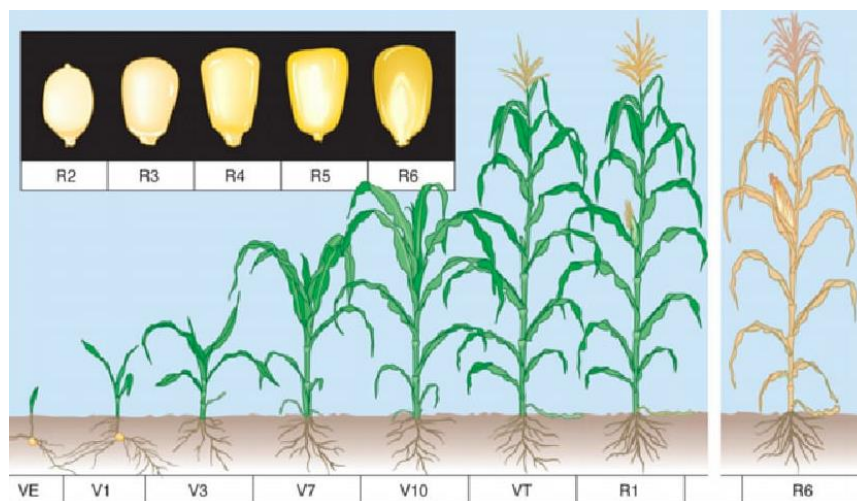


Figura 2. Estados fenológicos de maíz de acuerdo con la Escala de Ritchie y Hanway (1982, citado en Garay y Cruz, 2015)

V_E: Emergencia, V₁: 1° Hoja, V₂: 2° Hoja, V_n: N° Hoja, V_T: Panojamiento, R₁: Emergencia de estigmas, R₂: Cuaje, R₃: Grano lechoso, R₄: Grano pastoso, R₅: Grano dentado, R₆: Madurez fisiológica.

Fuente: (Garay y Cruz, 2015; Intagri, 2018).

4.6.4 Condiciones para el cultivo de maíz

Una de las cualidades que ha derivado en el éxito del maíz, como uno de los principales cultivos a nivel mundial, es la capacidad de este para poder adaptarse a una gran variedad de regiones agroecológicas y condiciones edafoclimáticas muy variables. A pesar de que el maíz tiene un amplio espectro de condiciones a las que se adapta, se desarrolla mejor con temperaturas medias entre 21 y 27°C en los meses calurosos, con un periodo libre de heladas en el ciclo agrícola variable de 120 a 180 días, siendo demandante de agua durante distintas etapas fenológicas de la planta, exigiendo la mayor cantidad de agua durante el crecimiento vegetativo y en especial en la floración, etapa crítica por procesos como la polinización y el llenado de grano, lo cual se refleja directamente en el rendimiento del cultivo.

4.6.5 Aspectos socioeconómicos del maíz

El maíz es uno de los cultivos con mayor importancia a nivel mundial. A diferencia de muchos países en el cual solo se usa para consumo animal, en México el maíz ha tenido un papel importante desde las épocas precolombinas, no solo en aspectos productivos y de alimentación, sino también culinarios, sociales, culturales e incluso en la cosmovisión del pueblo mexicano (Barkin, 2002). El maíz encarna un principio vital y un elemento fundamental para la cosmovisión de los pueblos indígenas. A pesar de que parte de esta visión se ha perdido en el colectivo mexicano, el maíz sigue siendo un dador de vida y un elemento fundamental de identidad (Perales, 2009). En los últimos años 30 años, posterior a la implementación del tratado de libre comercio de norte américa, se ha presenciado un proceso de marginalización del maíz y de sus productores, siendo el Estado uno de sus principales promotores, aun sabiendo de la relevancia de este grano en la alimentación de la población mexicana. En lugar de impulsar la producción maicera, el Estado ha preferido optar por la importación de masivas cantidades para suplir la amplia demanda de maíz (Carrillo, 2009).

El cultivo de maíz posee un valor económico especial en México, abarcando cerca de 50% de toda la superficie de cultivo del país (Cuadro 1). De acuerdo con el Atlas Nacional de México (UNAM, 2007), alrededor de tres millones de personas se dedican al cultivo de maíz,

es decir, cerca de un ocho por ciento del total de la fuerza laboral de México (CONABIO, 2018). En las últimas décadas, tras la implementación del TLC, estados que tradicionalmente no destacaban en la siembra de este cultivo han ascendido a los primeros lugares, en cuanto a producción, desplazando a estados como Oaxaca, Guerrero, Yucatán, Michoacán, Chiapas y San Luís Potosí, tradicionalmente maiceros (SAGARPA, 2008).

Cuadro 1. Superficie cosechada de maíz en ciclos PV-OI considerando tierras de riego y temporal.

Destino de producción	2004 (ha)	2005 (ha)	2006 (ha)
Grano semilla	66	10	64
Grano blanco	7,393,743	6,214,094	6,821,776
Grano amarillo	258,627	364,075	425,685
Grano de color	445	20,524	37,355
Grano pozolero	4,995	6,247	10,026
Palomero	NR	788	425
Forraje achicalado	21,500	2,610	65,522
Forraje en verde	279,395	286,824	267,086
Forraje seco	10,067	24,439	18,624
Subtotal	7,968,836	6,919,361	7,646,562
Superficie total cosechada con otros cultivos	14,806,134	13,132,248	14,471,579

Fuente: SAGARPA, 2008. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola

4.7 Sotocultivo - Frijol

4.7.1 Descripción del frijol

Los frijoles fueron domesticados en Mesoamérica y la región Andina hace alrededor de 8,000 años, representan uno de los principales alimentos en la dieta de los mexicanos, contienen carbohidratos, grasa, fibra, minerales como el hierro y el calcio, algunas vitaminas del complejo B, además de un alto contenido proteico. Se han descrito alrededor de 150 especies de frijoles, de las cuales 50 se encuentra en México con gran variedad de tamaños, colores y requerimientos ecológicos, siendo una de las más comunes *Phaseolus vulgaris* L (Figura 3).

4.7.2 Taxonomía del frijol

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Género: *Phaseolus*

Especie: *P. vulgaris* L.



Figura 3. Clasificación e ilustración del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

1, Inflorescencia; 2, Rama fructífera; 3, Semillas

Fuente: (Faeridah, 1997)

4.7.3 Fisiología y fenología del frijol

De acuerdo con la fijación de CO₂ del frijol, esta es una planta del grupo C3. Estas plantas se desarrollan adecuadamente en un rango de temperaturas entre los 15 y 25°C, ya que debido a su proceso de fijación de CO₂ no son capaces de aprovechar eficientemente la energía lumínica y la humedad, por lo que se oxidan parcialmente los primeros productos de la fotosíntesis, liberando CO₂, reflejándose en una disminución de la tasa fotosintética neta (Polonia *et al.*, 1982).

En el desarrollo de la planta de frijol se pueden apreciar dos fases, la vegetativa y la reproductiva (Figura 4), las cuales son sucesivas. La primera comienza una vez que la semilla cuenta con las condiciones adecuadas para germinar. La fase reproductiva comienza con la aparición de los primeros botones o racimos florales, y finaliza en el momento en el que el grano se encuentra maduro para su cosecha. Esta fase es preferentemente reproductiva; no obstante, la planta puede continuar desarrollando estructuras vegetativas, lo cual dependerá del tipo de hábito de crecimiento que tenga la planta (Fernández *et al.*, 1986).

El frijol puede presentar cuatro tipos de crecimientos, conocidos como tipo I, II, III y IV. El primero hace referencia a frijoles arbustivos con un crecimiento determinado, en los cuales se presenta un tallo principal con ramas laterales que dejan de crecer una vez se presenta la inflorescencia en la parte terminal de la rama, la altura de las plantas tipo I varía entre los 30 y 50 cm, la floración se presenta de manera temprana y la madurez de las vainas es concentrada. Los frijoles tipo II, III y IV tienen un hábito de crecimiento indeterminado, por lo que los tallos de las plantas continúan creciendo después de la floración (Morales-Rosales *et al.*, 2008).

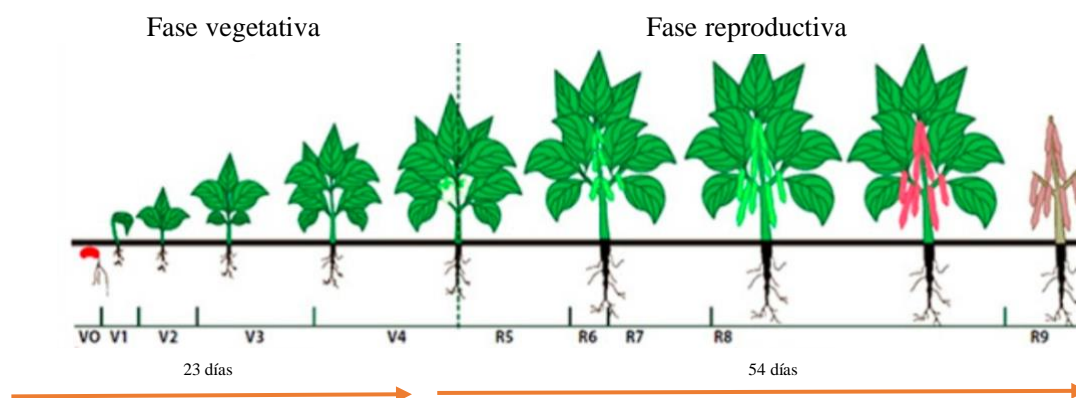


Figura 4. Etapas de desarrollo del cultivo de frijol (*P. vulgaris* L.)

V₀: Germinación, V₁: Emergencia, V₂: Hojas primarias, V₃: Primera hoja trifoliada, V₄: Tercera hoja trifoliada, R₅: Prefloración, R₆: Floración, R₇: Formación de las vainas, R₈: Llenado de las vainas, R₉: Maduración.

Fuente: (Arismendi, 2018)

4.7.4 Condiciones para el cultivo de frijol

El cultivo de frijol requiere entre 300 a 400 mm de lluvia, la presencia de agua durante las etapas de floración, formación y llenado de vainas es crítica, ya que se refleja significativamente en los rendimientos; por otro lado, el exceso de humedad es capaz de afectar el desarrollo de las plantas debido a la posible presencia de distintas enfermedades. Los suelos deben ser preferentemente profundos, con no menos de 1.5% de materia orgánica dentro de la capa arable, con una textura liviana y no más del 40% de arcilla, es decir franco, franco limoso y franco arcilloso, esto favorece un adecuado drenaje y circulación de aire. El cultivo de esta leguminosa es de un mínimo de 60 días posteriores a la siembra en condiciones

de humedad adecuada, requiriendo un periodo seco o de poca precipitación en la última parte del ciclo con la finalidad de que las semillas maduren para su cosecha (InfoAgro, 2018).

4.7.5 Aspectos socioeconómicos del frijol

Durante 2012, en México, este cultivo se posicionó en el tercer lugar de acuerdo con la superficie sembrada, representando 1,700,513 hectáreas con una producción de 1,080,856 toneladas (Figura 5). A nivel mundial México se posiciona en el cuarto lugar en producción de frijol (FIRA, 2016)

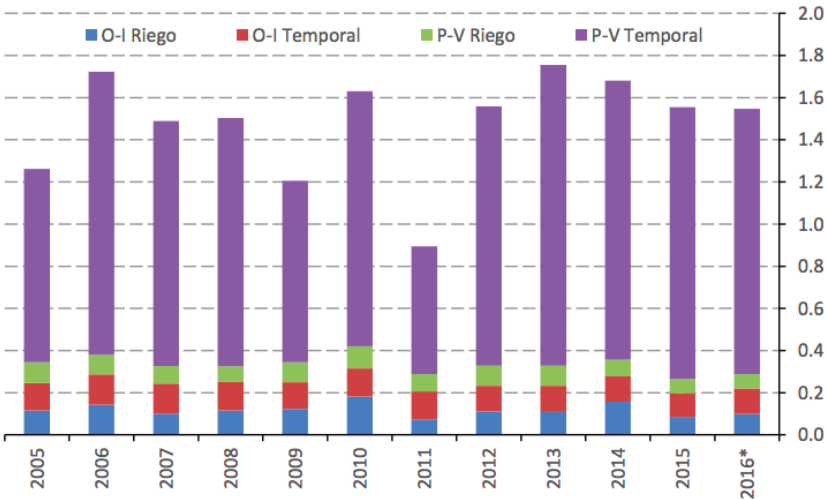


Figura 5. Superficie cosechada de frijol en México, 2005-2016 (Millones de hectáreas)

Nota: *Estimado con base en el avance de siembras y cosechas a septiembre de 2016.
 Fuente: (SIAP, 2016)

El frijol, en complemento con el maíz y el chile, conformó la base de la alimentación de la época prehispánica. El consumo en la dieta básica de los mexicanos aporta altos contenidos de proteínas y minerales, representado el segundo cultivo más importante para esta población, solo por detrás del maíz, estando presente en más de 60% de los platillos de la gastronomía mexicana (FIRCO, 2018). A pesar de ello el consumo de frijol per cápita en México ha mostrado una tendencia a la baja en los últimos 30 años, pasando de 16 kg/año/persona en la década de los ochenta, a casi la mitad, 8.4 kg/año/persona. Este fenómeno puede deberse a distintos factores, como pueden ser la migración, cambios en el poder adquisitivo, la dinámica de las urbes, entre otros (FIRA, 2016).

4.8 Epicultivo - Árbol frutal (manzano)

4.8.1 Descripción del manzano

El manzano es un árbol caducifolio de la familia Rosaceae (Figura 6), ampliamente cultivado por su fruto, requiere frío invernal que le permita acumular suficientes unidades frío (UF) para lograr una brotación de yemas florales que se traduzca en buenos rendimientos y cosecha uniforme, las cuales pueden variar entre 500 y 1300 UF, las cuales dependen de las interacciones entre el cultivar y los factores ambientales (Zermeño-González *et al.*, 2009).

4.8.2 Taxonomía del manzano

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Rosales

Familia: Rosaceae

Género: *Malus*

Especie: *M. domestica* B.



Figura 6. Clasificación e ilustración del manzano (*Malus domestica* Borkh)

4.8.3 Fisiología y fenología del manzano

El manzano, se ha adaptado a territorios fríos gracias a procesos bioquímicos y fisiológicos, altamente especializados que permiten el crecimiento y desarrollo de sus brotes y frutos en inviernos. La fenología del manzano favorece la sincronización de las fases de crecimiento que determinan su ciclo de desarrollo anual, con las situaciones ambientales que prevalecen; caracterizándose por dos fases fenológicas: En la primera se presenta un crecimiento vegetativo vigoroso y el desarrollo de frutos, iniciando con la brotación de las yemas florales y vegetativas, finalizando con la generación de las yemas apicales de los brotes, estadio conocido como “madurez vegetativa”. La segunda etapa fenológica, conocida como

“dormancia”, se identifica por la interrupción temporal del crecimiento de los tejidos meristemáticos aéreos, producto de la disminución del fotoperiodo y la temperatura ambiental (Casierra-Posada *et al.*, 2008).

4.8.4 Aspectos socioeconómicos del manzano

De acuerdo con el Atlas agroalimentario 2016, el consumo per cápita de manzana en México fue de 8.8 kg; entrado el otoño es cuando mayor disponibilidad de frutos maduros se encuentran en el mercado. De las 717 mil toneladas producidas durante 2016 se tuvo un valor de 4.7 mil millones de pesos, esto en una superficie cosechada de 54.3 mil ha (SIAP, 2017).

5. Marco teórico

5.1 El paradigma agroecológico

Superar la crisis en el mundo rural, en general, y de la agricultura familiar, en particular, supone como condición fundamental la promoción de un nuevo paradigma científico-tecnológico (Petersen, 2003). Aunque no existe un consenso sobre una definición particular de agricultura sostenible, la urgencia para promover un paradigma nuevo de producción agrícola que asegure la disponibilidad de alimentos saludables y a precios asequibles para una creciente población humana es una tarea urgente e inevitable (Altieri *et al.*, 2012). La presente investigación se abordará bajo el paradigma agroecológico, el cual comienza a tomar un papel importante con la aportación de los fundamentos metodológicos y científicos además de técnicos para una nueva “revolución agraria” a nivel mundial (Altieri y Toledo, 2011). La agroecología emerge como una alternativa dentro de un contexto de crisis socioambiental, lo cual pone en cuestionamiento la racionalidad económica y tecnológica del actual modelo agrícola convencional (Serra y Simões do Carmo, 2012).

Petersen (2003) argumenta que el enfoque agroecológico se fundamenta en valorar la lógica tradicional, la cual está estrechamente vinculada con el uso intensivo de la biodiversidad

dentro de los sistemas agrícolas. “Al fin y al cabo, la moderna ciencia de la agroecología tiene como fundamento la racionalidad técnica de los sistemas agrícolas tradicionales, elevándola a otro nivel en la espiral del conocimiento”. Dentro de la agroecología, comentan Gliessman *et al.* (2007, pp. 13) que “el concepto clave, que guía el razonamiento metodológico y epistemológico en este análisis, es el de sustentabilidad”. El conocimiento agroecológico ha de ser generado a través de la orquestación de las aportaciones de diferentes disciplinas para, mediante el análisis de todo tipo de procesos de la actividad agraria, en su sentido más amplio, comprender el funcionamiento de los ciclos minerales, las transformaciones de energía, los procesos biológicos y las reacciones socioeconómicas como un todo (Sevilla, 2006).

Es cierto que la agroecología se base en buena medida en el conocimiento campesino milenario, sin embargo, fue hacia finales de los sesentas del siglo pasado que se establecieron las bases de la disciplina agroecológica en un conjunto de publicaciones científicas de distintas revistas respectivas a los sistemas agrícolas, el manejo de los recursos naturales, además de la dimensión social. Terminando la década de los ochenta se extendieron estas y se fueron transfigurando en un cuerpo teórico, respaldado en un acumulado de libros que incorporan la médula del pensamiento agroecológico expresado en tesis, hipótesis, principios o reflexiones procedentes de diversos autores comprometidos con la construcción de una nueva ciencia (Gliessman *et al.*, 2007).

La agroecología busca incorporar en su cúmulo de conocimientos “el estado de la cuestión”, es decir el conocimiento calificado como científico de cada una de las temáticas que afronta en su amplia concepción, lo hace de manera selectiva. Es por ello, que el conocimiento derivado del enfoque de la agricultura basada en agroquímicos y la sustitución de insumos de naturaleza industrial bajo la lógica de lucro dependiente del funcionamiento del mercado no es incluida dentro del conocimiento agroecológico. De forma que la agroecología, desde el anterior punto de vista, critica el pensamiento científico, pretendiendo modificar la forma en la que este se genera al considerar la “práctica campesina” como un cimiento del conocimiento, la cual ha demostrado su sustentabilidad histórica, adoptando una naturaleza dual, desde una perspectiva pluriepistemológica (Sevilla, 2006).

Dentro de la agroecología el conocimiento campesino cobra un valor relevante, al ser este el fundamento de aquella. De acuerdo con Gómez y Gómez (2006), un conocimiento campesino se puede considerar como aquel que se ha transmitido oralmente de una generación a otra, enriqueciéndose con el paso del tiempo, pero que en pocas ocasiones ha sido consignado de forma escrita ni considerado de interés en el ámbito científico. Sin embargo, desde la perspectiva agroecológica, este conocimiento es esencial para el diseño de sistemas agrarios sustentables a escala local.

Hay que señalar que los campesinos y familias rurales juegan un papel trascendental en la alimentación de América Latina, y fueron esos productores los que sostuvieron y mantuvieron una diversidad productiva que aseguró por siglos, y, de hecho, aún lo siguen haciendo, la soberanía alimentaria regional de varias zonas (Pengue, 2005). Esta importancia radica no solo en el papel que cumplen en la producción de alimentos, sino también en las interacciones entre el componente humano y los recursos naturales inherentes a las comunidades rurales (Lanza-Valdivia y Rojas-Meza, 2010).

La agroecología utiliza un enfoque integral en el que las variables sociales ocupan un papel relevante, ya que si bien parte de la dimensión técnica, y su primer nivel de análisis es el agroecosistema, es a partir de este que se aspira comprender las variadas formas de dependencia que el funcionamiento actual de la política, la economía y la sociedad genera sobre los agricultores. Pero además la agroecología considera como central la matriz comunitaria en que se inserta el agricultor, es decir la matriz sociocultural que dota de una praxis intelectual y política a su identidad local y a su red de relaciones sociales (Sevilla, 2006). Es por esa razón que la integralidad del enfoque agroecológico requiere de la articulación de la “ciencia” y de la “praxis”, con el fin de poder hacer compatibles las distintas dimensiones que pretende abarcar como son ecológica, social, económica y política.

5.2 El agroecosistema

Un concepto fundamental dentro de la agroecología es el agroecosistema, ya que este no solo es su objeto de estudio y análisis, sino también su razón de ser. El concepto de agroecosistema retoma la teoría general de sistemas planteada por el austro-húngaro Ludwig von Bertalanffy, rechazando el enfoque reduccionista, típico del modelo convencional de la agricultura (Platas-Rosado *et al.*, 2016). Los agroecosistemas, de manera restrictiva, fueron definidos como ecosistemas intervenidos para fines de producción agrícola. Igualmente se hace referencia a este concepto para los sistemas agrarios estudiados desde el campo de la ecología. Sin embargo, dada la complejidad con la que la agroecología, ciencia que estudia los agroecosistemas, estudia estos espacios, al abordarlos desde el punto de vista de sus interacciones culturales y ecosistémicas, es evidente que el término debe apelar una definición más amplia.

Cabe señalar que existen diversas concepciones del término agroecosistema, las cuales han variado en el tiempo y en función de los distintos autores. Uno de los primeros en introducir este concepto en México fue el profesor Hernández Xolocotzi (1988) quien lo definió como un ecosistema modificado en menor o mayor grado por el hombre, para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola. Altieri (2009) afirma que existen muchas maneras de definir un agroecosistema y que también resulta difícil establecer los límites de este; idea compartida por otros autores como León (2012). Queda claro que los límites del agroecosistema no se encuentran en el campo de cultivo o la parcela, dado que ellos influyen en y son influenciados por diversos factores culturales, sociales, económicos, políticos y ambientales, es por esto por lo que los límites de un agroecosistema pueden ser difusos y difícil de definir, ya que están mediados por intereses de distinta índole y procesos intangibles decididos por el propio agricultor y otros actores individuales e institucionales.

Dentro de esta investigación se retomará la definición de agroecosistema planteado por León (2009) siendo “el conjunto de relaciones e interacciones que suceden entre suelos, climas, plantas cultivadas, organismos de distintos niveles tróficos, plantas adventicias y grupos humanos en determinados espacios geográficos, cuando son enfocadas desde el punto de

vista de sus flujos energéticos y de información, de sus ciclos materiales y de sus relaciones simbólicas, sociales, económicas y políticas, que se expresan en distintas formas tecnológicas de manejo dentro de contextos culturales específicos...”

5.3 La diversidad biológica en los agroecosistemas

La diversidad biológica actual se deriva de un complejo e irrepetible proceso evolutivo que trasciende el marco de estudio general de la Ecología. El conjunto de los seres vivos que habita un país constituye un patrimonio insustituible porque cada especie, e incluso cada población, alberga en su genoma la información de millones de años de adaptaciones evolutivas. La función de estas especies brinda servicios que aún no son conocidos a profundidad, al igual que potenciales e inesperados beneficios futuros de este vasto origen de información. Actualmente es conocido que grupos enteros de especies y poblaciones se encuentran en riesgo de extinción a causa de la fuerte perturbación ejercida por la población humana sobre el ambiente, siendo posiblemente el mayor desafío ambiental al que se ha de afrontar la humanidad en los consiguientes años (Moreno, 2001).

Si bien el concepto de biodiversidad es demasiado amplio, y puede ser difícil de definir de una manera simple y operativa (Noss, 1990), de manera general se puede decir que la biodiversidad hace referencia a todas las especies animales, vegetales, microorganismos, o cualquier otra forma de vida, a la par que incluye a los ecosistemas y los procesos ecológicos que tienen lugar en ellos (McNeely *et al.*, 1990). El concepto de biodiversidad fue acuñado en 1985, en el Foro Nacional sobre la Diversidad Biológica de Estados Unidos por el entomólogo Edward O. Wilson, escritor sobre el tema de conservación, quien tituló la publicación de los resultados del foro en 1988 como Biodiversidad (CONABIO, 2017). Si bien el término planteado por Wilson sigue siendo referencia, el concepto de biodiversidad ha evolucionado en las últimas décadas, considerando no solo la variedad de formas de vida, sino también la frecuencia y número de ecosistemas, especies y genes en un conjunto dado (McNeely *et al.*, 1990). La biodiversidad es un concepto relativamente nuevo que considera distintos niveles de la organización biológica, conteniendo la diversidad de especies de plantas, animales, hongos y microorganismos que habitan en un sitio específico, a su

variabilidad genética, a los ecosistemas que integran y a los paisajes o regiones en donde se hallan los ecosistemas. De igual manera incluye los procesos ecológicos y evolutivos que se dan a nivel de genes, especies, ecosistemas y paisajes (CONABIO, 2017).

La especie humana ha aprovechado la variabilidad genética y domesticado por medio de la selección artificial a varias especies; al hacerlo ha dado origen a una multitud de razas de granos, leguminosas, bovinos, aves, y de muchas otras especies. Las variedades de especies domésticas, los procesos empleados para crearlas y las tradiciones orales que las mantienen son consideradas como parte de la biodiversidad cultural (CONABIO, 2017). La humanidad mantiene una interrelación con la biodiversidad, al depender de ella para sus actividades elementales y alterando la dinámica de los ecosistemas naturales, a través del cambio de uso de suelo, la fragmentación o destrucción de hábitats, la alteración de ciclos biogeoquímicos, alteración de las condiciones ambientales y climáticas, al igual que la introducción de especies exóticas que alteran la cadena trófica dentro de los ecosistemas (Andrade *et al.*, 2018).

Todas estas actividades tienen un efecto directo sobre la biodiversidad, la cual es la base para el funcionamiento de los ecosistemas y su capacidad de generar servicios, de manera que es evidente la relevancia que tienen los estudios sobre la biodiversidad, como medirla y entenderla desde una perspectiva que considere además de sus valores intrínsecos, los atributos de los que las sociedades se benefician, esto para poder conservarla y aprovecharla de manera adecuada (Ramírez-Sosa y Chang-Porto, 2017).

Ante esta necesidad surgen algunas preguntas sobre la biodiversidad, como ¿Qué medir? o ¿Cómo medir? No cabe duda de que esta labor es tan descomunal que pareciera ser inaccesible. La biodiversidad, desde su idea, se ha planteado como un concepto impreciso y equívoco para cuyo cálculo no existe unidad de medida universal ni puede considerarse un único atributo, por lo que no existe una manera única e inequívoca de determinar el lugar con mayor biodiversidad (Moreno, 2001).

La mayoría de los biólogos hablan de especies como una unidad básica y natural que se puede estudiar. Se concentran los distintos individuos animales y vegetales que se presentan en la naturaleza en tipos o especies que, generalmente, comparten características fisiológicas y ecológicas y, lo que es más relevante, mecanismos de reconocimiento sexual que impiden la hibridación entre ellas. Dado que las investigaciones al respecto han generado buena parte de la información sobre la variedad de la vida empleando uno u otro concepto de especie, parece razonable utilizar las especies como unidad básica de medida de la biodiversidad (Moreno, 2001). El número de especies es, quizás, el atributo más frecuentemente utilizado en la descripción de taxocenosis, ya que permite obtener información rápida y sencilla de su diversidad. El índice de Shannon abreviado como “H”, también conocido como índice de Shannon-Wiener o índice Shannon-Weaver, es uno de los más comunes y utilizados en la evaluación de la biodiversidad, el cual expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra. Este índice busca calcular el grado promedio de incertidumbre al predecir la especie a la que pertenecerá un individuo elegido de manera azarosa en un conjunto de especies. Asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra. Adquiere valores entre cero, cuando hay una sola especie, y el logaritmo de S, cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (COB, 2017).

Otra opción es la riqueza esperada de Hurlbert abreviado como “E (Sn)”. El cálculo está basado en la ecuación de Hurlbert que estima el número de especies en base a submuestras de individuos seleccionados de manera aleatoria. Un índice más es el de Simpson abreviado como “ λ ”, el cual es de los más utilizados. Este manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie y está fuertemente influido por la importancia de las especies más dominantes. Como su valor es inverso a la equidad, la diversidad puede calcularse como $1 - \lambda$. Otro más es la riqueza de especies, abreviado como “S”. Siendo el cálculo más simple de diversidad, el cual representa el número total de especies obtenido por un censo de la comunidad (COB, 2017).

Otra de las preguntas que surgen al momento de tener una aproximación al estudio de la biodiversidad es la escala a la que se debe evaluar. Como se mencionó, la diversidad

biológica puede encontrarse a nivel genético, pasando por especies, hasta complejas comunidades dentro de ecosistemas. Ante esta situación se presenta la idea de separar a la diversidad en los componentes alfa, beta y gamma, la cual fue acuñada por Whittaker y todavía es considerada como una forma de esquematizar jerárquicamente la diversidad e incorporar el factor escala. Esto es, son niveles que definen aspectos diferentes de la diversidad y cuyas variables asociadas también difieren. La diversidad alfa se define como el número de especies a nivel local y la diversidad beta es, en su definición más general, la diferencia en composición de especies entre comunidades, mientras que la diversidad gamma es el número de especies a nivel regional. Los componentes alfa y beta pueden combinarse de muchas maneras para dar como resultado la diversidad gamma. Por ejemplo, dos regiones pueden contener el mismo número de especies, pero diferir en la importancia relativa de la diversidad local y el recambio de especies. En una de las regiones una alta diversidad gamma puede explicarse por una también elevada riqueza de especies (alfa) en todas sus localidades. En la otra región, en contraste, la elevada riqueza regional puede deberse a un fuerte recambio de especies (beta), aunque las localidades no sean particularmente diversas. La diversidad beta fue un concepto originalmente planteado para escalas locales, pero dada su utilidad para entender la forma en que se relacionan la diversidad alfa y gamma, su aplicación se ha extendido a diferentes escalas espaciales y se ha identificado, además, como un factor de escalamiento de la diversidad (Rodríguez y Vázquez-Domínguez, 2017).

Algunos investigadores consideran que el principal reto de la ciencia de la biodiversidad no es medir lo que se conoce. No se requiere de nuevos índices y herramientas para contar los datos biológicos que ya se tienen. El reto será predecir lo que se desconoce. Es apremiante la necesidad de alternativas rápidas y fiables capaces de ofrecer una descripción aproximada de la distribución geográfica de la diversidad biológica en ausencia de datos exhaustivos, pero, para que los rápidos avances en esta nueva disciplina puedan ser utilizados, será necesario incrementar el debate social y el intercambio de comunicación entre gestores, sociedad y científicos (Moreno, 2001).

La pérdida de la biodiversidad es una amenaza contra los recursos que sostienen la vida humana, viéndose reflejada en cuestiones tan relevantes como la seguridad alimentaria, la

investigación médica, el equilibrio ambiental global o la base de nuestra cultura. En este sentido es que se presenta el concepto de biodiversidad funcional, el cual cobra importancia en la búsqueda de estudiar la agrobiodiversidad, la cual obtiene cada vez más protagonismo en el ámbito de la conservación de los agroecosistemas.

5.3.1 Biodiversidad funcional

Algunos autores como Noss, Steneck, Nicholson y Possingham comentan que el estudio de los sistemas naturales se muestra realmente complejo a causa del gran número de variables a considerar de manera simultánea con el fin de tener un entendimiento global de la diversidad de sus elementos o biodiversidad (Isasi, 2011). No obstante, debido a la rapidez con que las actividades humanas se encuentran generando alteraciones en los ecosistemas, se requiere de un esfuerzo adicional en el diseño de estudios de calidad, útiles y pertinentes que puedan generar la información necesaria para proponer soluciones a corto plazo (Isasi, 2011).

Comúnmente al hacer referencia a la biodiversidad se recurre a índices de abundancia y riqueza, que, si bien son útiles, no suelen ser suficientes para definir la biodiversidad de un agroecosistema. Hooper *et al.* (2005) comentan que la biodiversidad puede ser descrita en términos de número, abundancia, composición y distribución espacial de sus entidades, desde genotipos, pasando por especies y hasta comunidades dentro de los ecosistemas, así como por caracteres funcionales, al igual que las interacciones entre sus componentes. Por su parte Altieri y Nicholls (2009) mencionan que el aspecto relevante y necesario es identificar el tipo de biodiversidad que se desea mantener y estimular para prestar servicios ecológicos claves para la producción y definir así las mejores prácticas agroecológicas que fomentan los componentes deseados de la biodiversidad. Agregan que la biodiversidad no es sólo esencial para la regulación de plagas, sino que provee la base biológica para la sustentabilidad del agroecosistema, y que en Latinoamérica, los agricultores tradicionales han utilizado por siglos esa biodiversidad, como componente clave en el diseño y manejo de sus sistemas integrados de producción. Si bien los diferentes componentes de la biodiversidad pueden verse afectados por algunas actividades humanas con consecuencias negativas sobre el funcionamiento de los agroecosistemas y la provisión de servicios a los seres humanos, hay

que notar que la intervención antrópica también puede tener efectos positivos sobre el funcionamiento de los agroecosistemas y la conservación de la biodiversidad (Martín *et al.*, 2007).

Dos preguntas clave dentro de la teoría ecológica son: ¿qué relación guarda la diversidad con la estructura de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas?, y ¿cómo es que esta se presenta? La respuesta a dichos cuestionamientos cobra aún más importancia en el actual contexto, debido a la gran pérdida de especies o la introducción de estas a ecosistemas diferentes y cuál es el efecto de estos hechos en la dinámica de las comunidades y los ecosistemas, dejando de ser únicamente de interés académico y tomando relevancia en las decisiones políticas económicas y sociales (Córdova-Tapia y Zambrano, 2015). Si bien existen algunos estudios que han buscado establecer una relación entre la riqueza de especies y el funcionamiento de los ecosistemas, estos han sido limitados, produciendo en muchos casos, resultados poco claros y en ocasiones contradictorios. Las aproximaciones clásicas para entender los cambios en la diversidad analizan la abundancia, la riqueza de especies y los índices de diversidad y equidad. De manera que las investigaciones relacionadas al estudio de las comunidades se han establecido en el análisis de la diversidad taxonómica de sus componentes. Cabe mencionar que dicha aproximación supone una equivalencia ecológica entre las especies, lo que significa que todas las especies de la comunidad cuentan con la misma probabilidad de sobrevivir y reproducirse (Córdova-Tapia y Zambrano, 2015). A causa de este supuesto, el cual ha limitado los estudios de la diversidad, en los últimos años se propuso el concepto de diversidad funcional, con el objetivo de incorporar las características funcionales de cada una de las especies dentro de la dinámica de los ecosistemas. Actualmente la diversidad funcional ha sido propuesta como la clave para entender la relación entre la diversidad, la estructura de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas (Córdova-Tapia y Zambrano, 2015).

La variedad de especies que habitan los diferentes ecosistemas poseen distintos atributos fisiológicos, morfológicos, conductuales y de historia de vida, y con ello influyen de manera distinta en la estructura, dinámica o funcionamiento de las comunidades bióticas y de los ecosistemas. Asimismo, las especies difieren en sus respuestas a cambios ambientales, tales

como alteraciones naturales o antrópicas. Las especies que son semejantes en sus atributos, como respuesta a disturbios, o que juegan un papel ecológico semejante forman lo que se conoce como grupo funcional (Martínez, 2008), es decir, un grupo funcional es aquel conjunto de especies las cuales poseen un papel similar en el funcionamiento de los ecosistemas o respuestas similares a factores ambientales, mientras que una especie clave es aquella con mayor dominancia dentro de un grupo funcional. El concepto de especie clave fue propuesto por Paine en 1995, el cual consideraba en un inicio a una especie clave como aquella con una actividad que generara un efecto sobre otras especies de la comunidad, la cual excede notoriamente el esperado según su biomasa o abundancia. Este concepto se basa primordialmente “*en las relaciones tróficas y en la regulación que algunos componentes ejercen sobre otros, como el efecto de la estrella de mar (P. ochraceus) en la regulación de la abundancia y riqueza de sus presas en hábitat intermareales*” (Isasi, 2011, pp. 34).

Se considera como carácter funcional a un rasgo morfológico, fisiológico o fenológico, el cual es factible medir en un organismo; además de que está relacionado con un efecto sobre uno o más procesos ecológicos, o con una respuesta a uno o más factores ambientales (Martín *et al.*, 2007). El valor obtenido para un determinado carácter funcional en un determinado lugar y momento es denominado atributo (Lavorel *et al.*, 1997). Dentro de la misma especie el carácter funcional puede mostrar diferentes atributos a lo largo de diferentes gradientes ambientales o en diferentes momentos (Martín *et al.*, 2007). Los rasgos funcionales son aquellos atributos morfológicos, fisiológicos o fenológicos propios de los organismos que determinan su eficacia biológica y, por tanto, su éxito bajo determinadas condiciones ambientales.

La biodiversidad funcional puede ser definida de diversas formas, como el número de grupos funcionales representados por las especies en una comunidad (Naeem y Li, 1997), o el rango y valor de los caracteres de los organismos que influyen sobre el funcionamiento ecológico (Tilman, 2001). Algunos autores incorporan la abundancia relativa de los caracteres como componente clave, definiendo así la diversidad funcional como “el tipo, rango y abundancia relativa de los caracteres funcionales presentes en una comunidad”. Para la presente investigación se retomará el concepto de biodiversidad funcional como la variedad de las

interacciones con los procesos ecológicos a diferentes escalas espaciotemporales (Martín *et al.*, 2007).

Buena parte de los estudios de los sistemas de cultivo se han centrado en ver las poblaciones de cultivos como parte fundamental del sistema de producción y no en la comunidad a la cual permanece el cultivo. Debido a este enfoque reduccionista, no se han entendido los sistemas de cultivo como comunidades y, por lo tanto, se ha perdido la oportunidad de utilizar las características emergentes de las comunidades, o de manejar las interacciones interespecíficas para mejorar los sistemas de cultivo” (Gliessman, 2002).

5.4 Productividad de los agroecosistemas

Diversos autores convergen en la idea de que el agroecosistema se crea en el momento en el que el *Homo sapiens* modifica un ecosistema natural para fines de producción agropecuaria (Platas-Rosado *et al.*, 2016). De acuerdo con Odum (1985), al momento de alterar un ecosistema natural para generar productos y servicios, se habla de un agroecosistema. Por su parte, Conway (1987), define un agroecosistema como un ecosistema que ha sido convertido por el humano y cuyo objetivo es la obtención de productos. Mientras que Hernández (1988) lo conceptualiza como la actividad humana que busca manejar los recursos naturales, energéticos y de información, todo ello con el objetivo de producir alimentos. De manera que la productividad juega un papel clave dentro del agroecosistema, ya que esta es una de sus principales razones de existir.

La cantidad de materia orgánica acumulada por las plantas en un periodo determinado de tiempo, por arriba de los requerimientos energéticos propios de las plantas, es lo que se considera productividad vegetal, también llamada productividad biológica primaria neta (Oliva *et al.*, 2019). De acuerdo con Purroy-Vásquez *et al.* (2016), la productividad se puede definir como “La relación entre la producción obtenida de un sistema de producción o servicios y los recursos utilizados para obtenerla”, la cual puede ser abordada con distintos indicadores, siendo los económicos o energéticos los más comunes. De forma que la producción dentro de los agroecosistemas demanda un grado de manejo de los recursos

disponibles, siendo el manejo del suelo la práctica más común para la producción de alimentos.

El modelo de la Revolución Verde, sustentado en el enfoque reduccionista, buscó incrementar la productividad de los cultivos, esto por medio de insumo externos, como fertilizantes, plaguicidas, semillas mejoradas y mecanización. La implementación de dicho modelo tuvo un notorio incremento en la productividad agrícola, pero con efectos colaterales profundos, como el desplazamiento de productores con superficies pequeñas que no pudieron ser competitivos, contaminación ambiental y reducción de biodiversidad (Bonilla y Singaña, 2019). Murgai (2001) llama a este fenómeno la paradoja de la productividad, en la que el incremento de esta se encuentra ligada al uso intensivo de agroquímicos, altos costos de producción y pérdida de biodiversidad nativa. Sarandón (2002a) menciona el efecto negativo del aumento de la productividad, derivado del uso de variedades de alto rendimiento, sobre la capacidad productiva edáfica a mediano y largo plazo, ya que dichas tecnologías perjudican la biodiversidad, erosionan y contaminan el suelo, además de que reducen la disponibilidad de nutrientes.

El enfoque agroecológico, al igual que el modelo de la Revolución Verde, busca aumentar la productividad, pero a diferencia de este último, se fundamenta en un enfoque de sistemas, buscando entender la complejas interacciones entre los distintos componentes del agroecosistema, para poder asemejar los variados procesos, así como la estructura y función que se presentan en los sistemas naturales (Alfonzo-López *et al.*, 2018), un ejemplo de ello es el uso y valoración de plantas arvenses, no solo en su contexto sociocultural, sino también ecológico, siendo de gran ayuda al prevenir la erosión del suelo, reciclar los nutrientes y minerales, además de ser reservorio de organismos benéficos (Blanco y Leyva, 2007).

5.5 Calidad de suelo y microorganismos en el agroecosistema

La evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo, así como de la microbiota edáfica en agroecosistemas, cobra cada vez más importancia, esto por el creciente interés del impacto de las prácticas de manejo agrícola en la sustentabilidad del suelo y el propio

agroecosistema (Gutiérrez *et al.*, 2018). Los procesos biogeoquímicos son transformaciones químicas que se presentan en la materia en su flujo a través el suelo, agua y aire, con injerencia de factores abióticos y bióticos, siendo los microorganismos de una importancia especial. Dichos procesos son esenciales en los ecosistemas, al igual que en los agroecosistemas (Sarandón, 2002b).

El suelo es uno de los ecosistemas más complejos de la naturaleza, ya que gran parte de los procesos biogeoquímicos se llevan en este medio; en él habitan innumerables especies que establecen distintas relaciones, y contribuyen a los ciclos globales fundamentales para la vida. El papel y las funciones que tienen los microorganismos en el suelo son tan amplios y variados como los son ellos mismos, la ausencia de estas comunidades representaría el colapso de los agroecosistemas. Los microorganismos del suelo brindan una serie de servicios ecosistémicos vitales para la sustentabilidad de los agroecosistemas, siendo los principales agentes en procesos ecológicos tan importantes como el ciclo de los nutrientes, regulan la dinámica de la materia orgánica, retención de carbono e incluso la emisión de gases de efecto invernadero, modifican la estructura física del suelo y los regímenes del agua, siendo capaces de mejorar la cantidad y disponibilidad de nutrientes para los cultivos y la salud de estos (FAO, 2019). Los microorganismos también cumplen funciones importantes en la transformación de productos agrícolas primarios en productos de mayor valor agregado, y algunos otros participan en procesos de deterioro postcosecha (Soria, 2016). Si bien han quedado evidenciado los beneficios de los grupos microbianos del suelo en los agroecosistemas, también se debe mencionar que las relaciones entre la biota microbiana y los cultivos no siempre es positiva, ya que existe una gran cantidad de especies patógenas para las plantas, que pueden provocar daños severos a los cultivos y pérdidas económicas. Por otro lado, también existen microorganismos capaces de regular a los patógenos.

El suelo se puede considerar como un recurso viviente y dinámico, el cual condiciona la producción de alimentos. En un agroecosistema, la presencia y oportuna respuesta de los procesos microbianos y de la estructura de las comunidades a las alteraciones físicas, químicas y biológicas, confirman un factor central en la calidad de suelo, el logro y mantenimiento de agroecosistemas sustentables deben ser objetivos permanentes en pos de

mantener el recurso suelo en niveles de máxima calidad y salud, y para ellos es necesario la preservación de los grupos microbianos, ya que estos participan en prácticamente todos los ciclos biogeoquímicos de suelo, mantienen complejas interacciones con otros grupos de especies, y son parte esencial en las redes tróficas y por lo tanto en el flujo de materia y energía de los agroecosistemas (García de Salamone, 2011).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son uno de los grupos microbianos del suelo más relevantes por las funciones que llevan en los agroecosistemas. Estos hongos establecen una relación simbiótica con las raíces de los cultivos, facilitando la obtención de nutrientes. Los hongos micorrizicos son capaces de envolver a las raíces formando un manto y penetrarlas intercelularmente a través de las células del córtex, en estos casos se les conocen como ectomicorrizas. Se ha reportado que esta particular asociación está presente en cerca del 90% de las plantas del planeta, ubicándose en todos los ecosistemas del mundo, lo cual refleja que tan vital es la presencia de estos microorganismos en los suelos y para las especies vegetales (Camargo-Ricalde *et al.*, 2012). Otra de las relaciones simbióticas entre microorganismos y especies vegetales más estudiadas es la de las bacterias fijadoras de nitrógeno, las cuales cobran aún más importancia en el ámbito agrícola. La fijación biológica del nitrógeno atmosférico por bacterias diazotróficas, es el segundo proceso más importante, después de la fotosíntesis, que se realiza en la naturaleza. En la ausencia de fertilizantes nitrogenados o residuos de animales, la dinámica de los agroecosistemas depende completamente de un grupo de microorganismos que tienen la habilidad para reducir el nitrógeno atmosférico a amonio, a través de la síntesis de un complejo enzimático denominado nitrogenasa, lo cual permite transformar el nitrógeno a formas asimilables para las plantas y por los mismos microorganismos para suplir total o parcialmente sus requerimientos de síntesis de proteínas y otros compuestos orgánicos (Pérez-Cordero *et al.*, 2014).

La microbiota edáfica ha mostrado, además de ser importante en los procesos ecológicos de los agroecosistemas, potencial para ser utilizada en distintos estudios y análisis. Se ha reportado los beneficios en la aplicación de biofertilizantes a base de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, teniendo un efecto positivo sobre el crecimiento y salud

de los cultivos, esto gracias a la actividad metabólica de ciertos organismos, tal como sintetizar índoles, solubilizar fosfatos y producir sideróforos (Parra-Cota *et al.*, 2018). Dado que la pérdida de fertilidad en suelos agrícolas está relacionada con los numerosos procesos biológicos llevados por la biota edáfica, se ha planteado el uso de microorganismos en el suelo como un indicador biológico para realizar diagnósticos sobre el impacto de distintas prácticas humanas, tales como perturbaciones al agroecosistema o para evaluar la estabilidad que este posee, si bien no son muchos los trabajos que consideran a este grupo biológico como indicadores, en buena parte debido a la dificultad para seleccionar los parámetros adecuados que reflejen la dinámica y la heterogeneidad espacial y temporal de las comunidades microbianas, estos han mostrado tener un potencial para poder tener un acercamiento a la condición en la que se encuentran los agroecosistemas (Abril, 2003). Otro uso que se les ha dado a estos grupos es en la búsqueda de técnicas que permitan acelerar los procesos de degradación que conduzcan a un compostaje eficiente. Los microorganismos que se involucran en el compostaje requieren carbono y relativamente poco nitrógeno para su actividad; cuando estos dos elementos se encuentran en la relación adecuada, estos se reproducen rápido y consecuentemente la descomposición de los residuos orgánicos también se acelera (Camacho *et al.*, 2014). En los últimos años, gracias a los avances en técnicas moleculares y genéticas, también se ha profundizado en el conocimiento del mundo de la microbiología, a la par de abrir nuevos cuestionamientos y retos para los investigadores. El campo de la microbiología de los suelos no es ajeno a este fenómeno, y las nuevas herramientas han permitido ampliar el conocimiento que se tiene de estos organismos, además del papel y funcionamiento que tienen para dotar de estabilidad a los agroecosistemas (Soria, 2016).

Como se puede apreciar, la variedad de funciones y procesos ecológicos en los que se involucran los microorganismos muestra la importancia de estudiar y conservar estos grupos, los cuales también se relacionan íntimamente con la diversidad de otros grupos, tal como sucede con microorganismos que establecen relaciones simbióticas con especies vegetales, y de los cuales dependen para llevar a cabo procesos esenciales para su supervivencia. Por otro lado, los microorganismos han mostrado un alto potencial para resolver diversas situaciones, de las cuales están relacionados, tales como baja fertilidad, aporte de materia orgánica,

restauración de ecosistemas, entre otros. Por todo lo anterior queda más que evidenciado que los microorganismos del suelo son la base de la vida en la tierra.

6. Literatura citada

- Abril, A. (2003). ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral*, 13, 195-204.
- Albino, G., Turrent, F. y Cortés, F. (2014). El agroecosistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF): Productividad y fisiología del maíz y frijol. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 1, 65.
- Alfonzo-López, D., Bellon, S. y Tchamitchian, M. (2018). Los sistemas agroforestales hortícolas en tres regiones de Francia: un diseño ecosistémico. *Cuadernos Agroecológicos*, 13(1), 1-7.
- Altieri, M. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 74, 9-31.
- Altieri, M. (2009). Reflexiones sobre el estado de la agricultura a base de transgénicos y agrocombustibles en américa latina. En M. M.I., G. Catacora, M. Cárcamo, E. Bravo y M. Altieri, *América Latina La transgénesis de un continente*. MasGráfica Lida.
- Altieri, M. y Nicholls, C. I. (2009). *Biodiversidad y manejo de plagas en agroecosistemas*. Barcelona, España: Icaria editorial, pp. 248.
- Altieri, M. y Toledo, V. (2011). The agroecological revolution of Latin America: rescuing nature, securing food sovereignty and empowering peasants. *The Journal of Peasant Studies*, 38, 587-612.
- Altieri, M., Koohafkan, P. y Holt, E. (2012). Agricultura verde: Fundamentos agroecológicos para diseñar sistemas agrícolas biodiversos, resilientes y productivos. *Agroecología*, 7, 7-18.
- Andrade, G. I., Chaves, M. E., Corzo, G. y Tapia, C. (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sustentabilidad. Gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio en el territorio continental colombiano. Primera aproximación*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, pp. 220.

- Arismendi, S. (2018). Comportamiento de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sometidos a dos densidades de siembra en la estación experimental Sapecho - Alto Beni. *Apthapi*, 4(1), 978-992.
- Ascencio-López, W. J., Pérez-Ramírez, N., Méndez-Espinoza, J. A., Regalado-López J., Ramírez-Juárez, J. y Cajuste-Bontemps, L. (2018). Permanencia del uso de suelo agrícola ante la presión urbana-industrial en Huejotzingo, Puebla, México. *Acta Universitaria*, 28 (2), 42-52.
- Barkin, D. (2002). El maíz: la persistencia de una cultura en México. *Agricultures et marchés nationaux en Amérique latine*, 40, 19-32.
- Blanco, Y. y Leyva, A. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. *Cultivos Tropicales*, 28(2), 21-28.
- Bonilla, B. A. y Singaña, T. D. (2019). La productividad agrícola más allá del rendimiento por hectárea: análisis de los cultivos de arroz y maíz duro en Ecuador. LA GRANJA. Revista de *Ciencias de la Vida*, 29(1), 70-83.
- Buenrostro, M. (2008). Las bondades de la milpa. *Ciencias*, 92-93.
- Camacho, A. D., Martínez, L., Ramírez, S., Valenzuela, R. y Valdés, M. (2014). Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 291-300.
- Camargo-Ricalde, S. L., Montaña, N. M., De la Rosa-Mera., C. J. y Montaña, S. A. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista digital Universitaria*, 13(7), 3-19.
- Carrillo, T. (2009). El origen del maíz naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias* (92-93), 4-13.
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J. y Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y el ambiente*, 17(1), 5-118.
- Casierra-Posada, F., Sepúlveda, C. A. y Aguilar-Avenidaño, O. E. (2008). Brotación del manzano (*Malus domestica* Borkh. cv. 'Anna') en respuesta a la época de defoliación. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 11(1), 113-122.

- Charles, A. (1986). *Multiple cropping systems*. New York, Estados Unidos: MacMillan publishing Company, pp. 383.
- COB. (2017). *Atlas de biodiversidad marina del mar balear*. Recuperado el 25 de marzo de 2018, de <http://www.ba.ieo.es/bioatlasmarino/indices-de-biodiversidad>.
- CONABIO. (2017). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Recuperado el 15 de octubre de 2019, de http://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/que_es.html
- CONABIO. (2018). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Recuperado el 13 de octubre de 2019, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/proyectoMaices.html>
- CONAFOR. (2011). *Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México*. Estudio realizado en 2008 por el Colegio de Posgraduados. Zapopan, Jalisco:, México, pp. 448.
- CONAFOR. (2013). *Sistemas Agroforestales Maderables en México*, pp. 139.
- Conway, G. (1987). The properties of agroecosystems. *Agric. Systems.*, 24, 95-117.
- Cortes, F., Turrent, F., Hernández, R., Francisco, N., Torres, Z., Zambada, M. y Díaz, V. (2006). *Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF)*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación, pp. 11.
- Córdova-Tapia, F. y Zambrano, L. (2015). La diversidad funcional en la ecología de comunidades. *Ecosistemas*, 24(3), 78-87.
- FAO. (2019). *Suelos y Biodiversidad*. Recuperado el 20 de noviembre de 2019, de <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/285729/>
- Faeridah, H. (1997). *Plant resources of South-East Asia*. No. 11: Auxiliary plants, pp. 389.
- Fernández, C., Gepts, P. y López, M. (1986). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)*. Colombia: CIAT, pp. 33.
- Fierros-González, A. (2012). *Evolución y desempeño del PRODEPLAN. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales: a 15 años de creación*. Zapopan, Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal, pp. 152.
- FIRA. (2016). *Panorama agroalimentario*. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, pp. 1-31.

- FIRCO. (2018). *El frijol, parte de la trilogía de alimento en el México prehispánico*. Recuperado el 16 de mayo de 2019, de <https://www.gob.mx/firco/articulos/el-frijol-parte-de-la-trilogia-de-alimento-en-el-mexico-prehispanico?idiom=es>
- Garay, J. y Cruz, C. (2015). *El cultivo de maíz en San Luis*. San Luis, Argentina: INTA, pp. 161.
- García de Salamone, I. E. (2011). Microorganismos del suelo y sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista Argentina de Microbiología*, 43(1), 1-3.
- Gliessman, S. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turrialba, Costa Rica: LITOCAT, pp. 359.
- Gliessman, S., Rosado-May, F., Guadarrama-Zugasti, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Mendez, V., Jaffe, R. (2007). Agroecología: promoviendo una transición hacia la sustentabilidad. *Ecosistemas*, 16, 13-23.
- Granados, S., López, R. y Trujillo, M. (2000). La milpa en la zona maya de Quintana Roo. *Revista de Geografía Agrícola*, 57-72.
- Gómez, E. y Gómez, G. (2006). Saberes tradicionales agrícolas indígenas y campesinos: Rescate, sistematización e incorporación a las IEAS. *Ra Ximhai*, 2(1), 97-126.
- Gómez, W. (2014). El Sistema Agroforestal Quensungual en El Salvador. Estudio de caso. *Multequina*, 23, 55-63.
- Gutiérrez, D. J., Cardona, W. A. y Monsalve, C. O. (2018). Potencial en el uso de las propiedades químicas como indicadores de calidad de suelo. Una revisión. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 11(2), 450-458.
- Hernández Xolocotzi, E. (1988). La agricultura tradicional en México. *Comercio Exterior*, 38(8), 673-678.
- Hooper, D., Chapin, F., Ewel, J., Héctor, A., Inchausti, P., Lavorel, S., . . . Wardle, D. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3-35.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Agricultura, ganadería y pesca*. Recuperado el 20 de agosto de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>
- InfoAgro. (2018). *Guía del cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L. Leguminosae)*. Recuperado el 08 de mayo de 2019, de <http://www.virtual.chapingo.mx/dona/paginaCBasicos/frijol-infoagro.pdf>

- Intagri. (2018). *La fenología del Maíz y su relación con la incidencia de plagas*. Recuperado el 08 de mayo de 2019, de <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-fenologia-del-maiz-y-su-relacion-con-la-incidencia-de-plagas>
- Isasi, C. (2011). Los conceptos de especies indicadoras, paraguas, banderas y claves: su uso y abuso en la ecología de la conservación. *Interciencia*, 36(1), 31-38.
- Juárez, R., Fragoso, G., Turrent, F., Ocampo, M., Sandoval, C., Ocampo, F., Hernández, R. (2008). Mejoramiento del suelo en la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). *LEISA Revista de Agroecología*, 24(2), 30-31.
- Juárez-Ramón, D. y Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 637-654.
- Lanza-Valdivia, C. y Rojas-Meza, J. (2010). Estrategias de reproducción de las unidades domésticas campesinas de Jucuapa centro, Nicaragua. *Agricultura, Sociedad Y Desarrollo*, 7(2), 169-187.
- Lavorel, S., McIntyre, S., Landsberg, J. y Forbes, T. (1997). Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology y Evolution*, 12, 474-478.
- Lazcano-Ferrat, I. (2000). La interacción del Fósforo y otros nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, 4(1), 2-15.
- León, S. (2012). Agroecología: la ciencia de los agroecosistemas – la perspectiva ambiental. *Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Estudios Ambientales*, pp. 261.
- León, T. (2009). Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. *Agroecología*, 4, 7-17.
- López, G., Jiménez, S., León, M., Figueroa, R., Morales, G. y González, R. (2008). Escuelas de campo, para capacitación y divulgación con tecnologías sustentables en comunidades indígenas. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 33-42.
- Machado, H., Suset, A., Martín, G. J. y Funes-Monzote, F. R. (2009). Del enfoque reduccionista al enfoque de sistema en la agricultura cubana: un necesario cambio de visión. *Pastos y Forrajes*, 32(3), 1-20.
- Martín, L., González, J., Díaz, S., Castro, I. y García, L. M. (2007). Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional. *Ecosistemas*, 16(3), 68-79.

- Martínez, R. (2008). *Grupos funcionales, en Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México: Conabio, pp. 412.
- McNeely, J., Miller, K., Mittermeier, R. y Werner, T. (1990). *Conserving the World's Biological Diversity*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Gland, Suiza and Washington, D.C., pp. 193.
- Mendieta, L. y Rocha, M. (2007). *Sistemas Agroforestales*. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria, pp. 115.
- Montiel-Aguirre, G., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A. y Uribe-Gómez, M. (2006). Opciones agroforestales para productores de mango. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 409-416.
- Morales-Rosales, E., Escalante-Estrada, J. y López-Sandoval, J. (2008). Crecimiento, índice de cosecha y rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en unicultivo y asociado con girasol (*Helianthus annuus* L.). *Universidad y ciencia*, 24(1), 1-10.
- Morales-Rosales, Escalante-Estrada, A., Tijerina-Chávez, L., Volke-Haller, V. y Sosa-Montes, E. (2006). Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y de la radiación solar del agrosistema girasol-frijol. *Terra Latinoamericana*, 4(1), 55-64.
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. *Rev. De Biología Tropical*, 49(3-4), 1300-1302.
- Murgai, R. (2001). The Green Revolution and the productivity paradox: evidence from the Indian Punjab. *Agricultural Economics*, 25(2), 199-209.
- Murgueitio, E., Cuellar, P., Ibrahim, M., Gobbi, J., Cuartas, C., Naranjo, J., . . . Casasola, F. (2006). Adopción de Sistemas Agroforestales Pecuarios. *Pastos y Forrajes*, 29(4), 365-381.
- Naeem, S. y Li, S. (1997). Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 309, 507-509.
- Navarro, G., Santiago, S., Musálem, S., Vibrans, L. y Pérez, O. (2012). La diversidad de especies útiles y sistemas agroforestales. *Revista Chapingo. Series de Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 71-86.
- Noss, R. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology*, 4, 355-364.

- Odum, P. (1985). *Fundamentos de ecología*. México: Nueva Editorial Interamericana, pp. 422.
- Oliva, G., Paredes, P., Ferrante, D., Cepeda, C. y Rabinovich, J. (2019). La productividad primaria evaluada por sensores remotos demuestra que los herbívoros nativos y domésticos combinados están sobrepastoreando la Patagonia. *Journal of Applied Ecology*, 00, 1-10.
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Ramírez-Valverde, B., Gil-Muñoz, A. y GutiérrezRangel, N. (2015). Producción de maíz y pluriactividad de los campesinos en el Valle de Puebla, México. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 14(7), 577-600
- Parra-Cota, F. I., Coronel-Acosta, C. B., Amézquita-Avilés, C. F., Santos-Villalobos, S. y Escalante-Martínez, D. I. (2018). Diversidad metabólica de microorganismos edáficos asociados al cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 431-442.
- Parra, R. J. (2016). La agricultura alternativa una estrategia para la producción de alimentos con enfoques agroecológicos, basado en el modelo de codesarrollo. *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 9(26), 1-5.
- Pengue, W. (2005). *Agricultura industrial y transnacionalización en américa latina, ¿La transgénesis de un continente?* Buenos Aires, Argentina: GEPAMA, pp. 220.
- Perales, R. (2009). Maíz, riqueza de México. *Ciencias*(92-93), 46-55.
- Pérez-Cordero, A., Tuberquia-Sierra, A. y Amell-Jímenez, D. (2014). Actividad in vitro de bacterias endófitas fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfatos. *Agron. Mesoam.*, 25(2), 213-223.
- Petersen, P. (2003). Evaluando la sustentabilidad: estudios de caso sobre impactos de innovaciones agroecológicas en la agricultura familiar de diferentes países latinoamericanos. *LEISA Revista de agroecología*, 64-67.
- Piperno, D. y Flannery, K. (2001). The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: New accelerator mass spectrometry dates and their implications. *PNAS*, 98(4), 2101-2103.
- Platas-Rosado, D. E., Vilaboa-Arroniz, J. y William-Campbell, B. (2016). Una aproximación dialéctica a los agroecosistemas. *Agroproductividad*, 9(12), 82-86.

- Polania, A., Pérez, G. y Camacho, S. (1982). Respuesta fotosintética de algunas variedades de Maíz, Frijol y Café. *Revista Colombiana de Química*, 11(2), 63-82.
- Pugnaire, F. (2006). La crisis global de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 15(2), 1-2.
- Purroy-Vásquez, R., Gallardo-López, F., Ortega-Jiménez, E., Díaz-Rivera, P., López-Ortíz, S. y Torres-Hernández, G. (2016). Eficiencia energética y económica, bienestar familiar y productividad en agroecosistemas tropicales. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 13(4), 513-527.
- Ramírez-Sosa, M. y Chang-Porto, J. A. (2017). Evaluación de la biodiversidad de la finca forestal Charco Mono, Palma Soriano, Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, 3, 29-38.
- Regalado-López, J., Castellanos-Alanis, A., Pérez-Ramírez, N., Méndez-Espinoza, J. A. y Hernández-Romero, E. (2020). Modelo asociativo y de organización para transferir la tecnología milpa intercalada en árboles frutales (MIAF). *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56), 1-33.
- Rodríguez, P. y Vázquez-Domínguez, E. (2017). *Escalas y diversidad de especies*. Recuperado el 24 de junio de 2018, de <http://web.ecologia.unam.mx/laboratorios/evazquez/publications/rodriguezvazquez.pdf>
- Ruíz, M., Jiménez, S., Figueroa, R. y Morales, G. (2012 de 2012). Adopción del sistema milpa intercalada en árboles frutales por cinco municipios mixes del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1605-1621.
- SAGARPA. (2008). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
- Sarandón, S. (2002a). La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la Agricultura intensiva de la Revolución Verde. Ed. S. Sarandón. *Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable* Vol. 1. La Plata: Ediciones Científicas Americanas, pp. 23-47.
- Sarandón, S. (2002b). El agroecosistema: un sistema natural modificado. Ed. S. Sarandón. *Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable* Vol. 1. La Plata: Ediciones Científicas Americanas, pp. 23-47.
- Serra, B. y Simões do Carmo, M. (2012). Agroecología e sua epistemología. *Interciencia*, 37, 711-716.

- Sevilla, G. (2006). Agroecología y agricultura ecológica: Hacia una “re” construcción de la soberanía alimentaria. *Agroecología*, 1, 7-18.
- SIAP. (2016). *Avances de la Producción Agrícola*. SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- SIAP. (2017). *Anuario estadístico de la producción agrícola*, SAGARPA. Recuperado el 14 de julio de 2020, de <https://www.gob.mx/siap/articulos/manzana-mexico-produjo-716-930-toneladas-en-2016?idiom=es>
- SIAP. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*, SAGARPA. Recuperado el 05 de mayo de 2020, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Soria, M. A. (2016). ¿Por qué son importantes los microorganismos del suelo para la agricultura?. *Química Viva*, 15(2), 3-10.
- Suárez, S., Duran, B. y Rosas, P. (2015). Macrofauna edáfica asociada con sistemas agroforestales en la Amazonía Colombiana. *Acta Agronómica*, 64(3), 214-220.
- Tangerini, A. (2009). *Zea mays* L. *Plant Press*, 20(2).
- Tilman, D. (2001). Functional diversity. En S. Levin, *Encyclopedia of Biodiversity* (págs. 109–120). San Diego, California, Estados Unidos: Academic Press, pp. 109-120.
- Turrent, F. y Cortés, F. (2005). Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana: II. Producción de alimentos. *Terra latinoamericana*, 23(2), 273-281.
- Turrent, A., Cortés, J. I., Espinosa, A., Hernández, E., Camas, R., Torres, J. y Zambada, A. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185.
- Turrent, F., Uribe, G., Francisco, N. y Camacho, C. (1995a). La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México: I. Análisis del desarrollo de la terraza durante 6 años. *Terra*, 13(3), 276-298.
- Turrent, F., Uribe, G., Francisco, N. y Camacho, C. (1995b). La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México: III. Desempeño agronómico del cultivo doble del maíz en temporal. *Terra*, 13(3), 317-337.
- UNAM, U. N. (2007). *Atlas Nacional de México 2da. Ed.* Distrito Federal, México: Instituto de Geografía.

- Wayne, S., Betrán, J. y Runge, E. (2004). *Corn: Origin, History, Technology, and Production*. Estados Unidos de América: John Wiley y Sons Inc., pp. 976.
- Zambada, M., Cadena, I., Ayala, S., Sedas, L., Pérez, G., Francisco, N., Rendón, M. (2013). Red de articulación institucional y organizacional para gestionar innovaciones en la región de los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(4), 443-458.
- Zermeño-González, A., Gil-Marín, J. A., Ramírez-Rodríguez, H., Hernández-Herrera, A., Rodríguez-García¹, R., Benavides-Mendoza, A. y Jasso-Cantú, D. (2009). Efecto del encalado total del manzano en la temperatura interna, rendimiento de frutos y su relación con la aplicación de thidiazuron. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(3), 289-296.

CAPÍTULO I. METODOLOGÍA

1.1 Localización y características del área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Huejotzingo, en la localidad de San Mateo Capultitlán, ubicado al Oeste del estado de Puebla (Figura 7). El Colegio de Posgraduados, a través de la Unidad Académica Huejotzingo, ha promovido e investigado el sistema MIAF en colaboración con distintos productores en dicha región. Para la presente investigación se consideró una parcela experimental ya establecida con MIAF.

El municipio de Huejotzingo se localiza en las cercanías del Volcán Popocatepetl ($19^{\circ}14'-19^{\circ}16' N$; $98^{\circ}20'-98^{\circ}38' W$) a una altitud de 2,260 m (INEGI 2010). Las comunidades de vegetación nativa de esta región en su mayoría han sido reemplazadas por cultivos en los valles, sin embargo, en las regiones montañosas aún existen bosques de pino-encino asociados con vegetación arbustiva. En la zona el clima es templado subhúmedo con estación lluviosa en el verano entre abril y octubre, con una temperatura anual promedio de $15.7^{\circ}C$, y una precipitación pluvial anual de 868.2 mm; la temperatura varía de $12.4^{\circ}C$ en enero hasta $18.2^{\circ}C$ en mayo, en tanto que la precipitación mínima es de 4.9 mm en marzo, y la máxima de 195.6 mm durante julio (Hernández-Ortiz *et al.*, 2004). En el municipio de Huejotzingo, la zona del Valle de Puebla presenta en su mayor parte áreas dedicadas a la Agricultura de temporal, mientras que al oriente se localizan extensas zonas de regadío y en la ribera áreas reducidas de bosques de pino, pino-encino y pastizales. El recurso predominante es el forestal, el cual muestra una tendencia a disminuir debido a la deforestación sistemática por el uso de madera o para incorporar nuevas zonas al cultivo (INAFED, 2016).

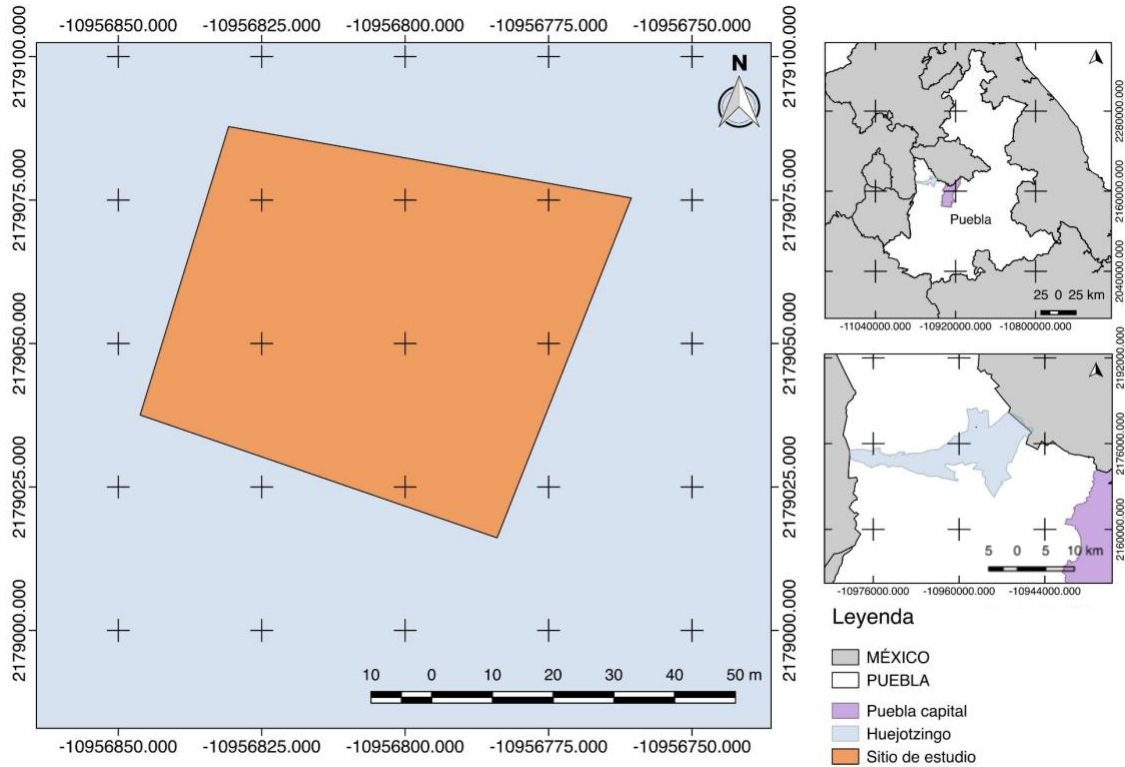


Figura 7. Ubicación del municipio de Huejotzingo, en el estado de Puebla, y sitio donde se realizó el estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, Marco Geoestadístico Municipal 2010.

1.2 Método y técnicas de investigación

Se consideró el método hipotético deductivo (MHD) para la realización de la presente investigación. El MHD es un método bastante adecuado para estudios en el campo de la ecología, ya que permite descartar ideas incorrectas respecto a fenómenos de sistemas naturales. De acuerdo con Sánchez (2019), el MHD busca el planteamiento de una hipótesis al considerar dos premisas, una de ellas parte de las teorías científicas o leyes, es decir, una premisa universal, también conocida como enunciado nomológico, mientras que la otra se plantea a partir de un fenómeno observable del cual se plantea una pregunta o problema, esta premisa es conocida como enunciado entimemático, y es el que motivará a la exploración para poder ser contrastada de manera empírica. Este modelo tiene como fin el estudiar y entender los fenómenos para poder explicar el origen o las causas que la generan. El MHD también es capaz de generar predicciones que permitan controlar diversos entornos, siendo

esta una de sus aplicaciones mas relevantes con sustento, asimismo, en las leyes y teorías científicas.

De manera resumida, el MHD busca definir un fenómeno determinado del cual se tenga algún cuestionamiento para posteriormente plantear una serie de hipótesis y deducir los resultados esperados de estas suponiendo que son ciertas, a continuación, estas predicciones serán contrastadas a partir de la observación para así descartar las hipótesis cuyas predicciones no son confirmadas por los datos (Farji-Brener, 2007).

1.3 Unidad de análisis

Para la presente investigación se considera al agroecosistema como la unidad de análisis. Entendiendo al sistema agroforestal MIAF como un agroecosistema conformado por tres cultivos componentes, siendo el maíz, el frijol y el árbol frutal, además de los distintos componentes no agrícolas y las interacciones que se dan entre estos.

1.3.1 Diseño Experimental

Se retomó uno de los experimentos previamente establecidos por parte del Colegio de Posgraduados, a través de la Unidad Académica Huejotzingo, dicho experimento se ubica en la localidad de San Mateo Capultitlán en el municipio de Huejotzingo. El sistema MIAF del experimento se estableció en el año 2004 con un arreglo Maíz-Frijol asociado intercalado en manzanos.

Dicho experimento cuenta con un diseño central compuesto, en el cual se tiene dos subexperimentos con dos subrepeticiones. Uno de los subexperimentos con los árboles de manzano y otro con los cultivos anuales en asociación maíz-frijol y maíz en cultivo simple. En el subexperimento del cultivo perene se cuenta con un diseño de tratamientos central compuesto rotatable de box, donde se estudian cuatro factores de la producción, dosis de nitrógeno (N), fósforo (P_2O), potasio (K_2O) y densidad de siembra de los árboles, generando 20 tratamientos, estudiados en un diseño experimental de bloques al azar con 2 repeticiones, cada tratamiento se conforma por 5 árboles. A la par se cuenta con un huerto simple de

manzanos al cual se le aplica una dosis de fertilización constante. Para los fines de la presente investigación se retomaron seis sitios (tratamientos) del subexperimento de manzano, los cuales cuentan con una dosis de fertilización igual, variando dos tratamientos en la densidad poblacional de árboles de manzano (Cuadro 2). Para el subexperimento de cultivos anuales se cuenta con 16 tratamientos considerando 2 factores, 2 genotipos de maíz y 3 genotipos de frijol, además de la densidad de plantas. Los tratamientos seleccionados de los cultivos anuales fueron los colindantes a los tratamientos de manzano seleccionados.

Cuadro 2. Tratamientos del subexperimento de manzanos

Rep. II					Rep. II					Rep. I					Rep. I				
Sub 1					Sub 2					Sub 1					Sub2				
T	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP	T	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP	T	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP	T	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP
8	32	15	32	817	17	26	10	26	534	2	18	5	32	817	14	26	20	26	694
3	18	15	18	817	11	10	10	26	694	4	18	15	32	604	20	26	10	26	694
1	18	5	18	604	16	26	10	40	694	10	26	10	26	694	12	40	10	26	694
10	26	10	26	694	14	26	20	26	694	6	32	5	32	604	17	26	10	26	534
2	18	5	32	817	20	26	10	26	694	3	18	15	18	817	19	26	10	26	694
6	32	5	32	604	13	26	0	26	694	7	32	15	18	604	11	10	10	26	694
5	32	5	18	817	12	40	10	26	694	5	32	5	18	817	15	26	10	10	694
9	26	10	26	694	18	26	10	26	992	8	32	15	32	817	18	26	10	26	992
4	18	15	32	604	15	26	10	10	694	9	26	10	26	694	13	26	0	26	694
7	32	15	18	604	19	26	10	26	694	1	18	5	18	604	16	26	10	40	694

Huerto simple de manzano

N: Dosis de nitrógeno en gramos; P₂O₅: Dosis de fósforo en gramos; K₂O: Dosis de potasio en gramos; DP: Densidad de población de los manzanos. Con sombreado gris se muestran los tratamientos seleccionados para la presente investigación.

1.3.2 Tamaño de la muestra

Para los sitios con cultivos anuales en asociación se consideró una muestra de 8 plantas de un total de 88 plantas por sitio. Para el caso de las parcelas con manzano se consideraron un total de 30 árboles. Para los análisis de suelo se consideró una muestra compuesta por tres muestras simples para cada sitio evaluado.

1.4 Materiales genéticos

Maíz. Para las parcelas experimentales con MIAF se utilizó el maíz (*Zea mays* L.) híbrido HS2 y una variedad local de grano blanco. El primero es un híbrido trilineal, desarrollado en el área de mejoramiento y control de la calidad genética de la orientación académica en Producción de Semillas del Colegio de Posgraduados, tiene potencial productivo para grano y forraje, es resistente al acame y hasta el momento no ha presentado el problema de la enfermedad conocida como carbón de la espiga. Su rendimiento promedio bajo condiciones de manejo adecuadas es de 12 t ha⁻¹ de grano, según resultados comerciales de lotes ubicados en los Estados de México (Montecillo y Tecámac), Hidalgo (Acaxochitlán y Pachuca), Puebla (Libres y Quecholac) y Tlaxcala (San Miguel del Milagro, Ixtenco y Tetla); aunque cabe señalar que su potencial es de 15 t ha⁻¹ bajo condiciones óptimas de manejo. El grano posee muy buena calidad de nixtamalización y de tortilla. La producción de forraje verde es de 90 t ha⁻¹ (Colpos, 2018), siendo esta característica importante para el establecimiento de una parcela con MIAF. Dentro de los SAFT se identificarán las variedades que los productores utilicen, pudiendo ser nativos o mejorados.

Frijol. Se utilizaron dos variedades de frijol, uno de ellos fue el frijol mantequilla (*Phaseolus lunatus* L.), y otro el frijol rojo. Las principales características botánicas del frijol mantequilla son que posee un tallo estriado, glabros a escasamente pubescentes, cuenta con folíolos ovados a rómbicos o deltoide-ovados de 3 a 13 cm de largo por 1.5 a 6 cm de ancho, ápice agudo, base redondeada o ampliamente cuneada, membranosos a subcoriáceos, esparcidamente estrigosos, por lo que tiene cubierto por pelos rectos, recostados en la superficie y agudos, con estipelas lineares, ovadas a lanceoladas. Los pecíolos de 1.8 a 12 cm de largo, estípulas triangulares a lanceoladas de 1.5 a 2.5 y hasta 3.5 mm de largo, generalmente. Se caracteriza por tener una inflorescencia de 8 a 36 cm de largo, un raquis a veces con nudos con más de 2 flores, pedicelos hasta 13 mm de largo, y brácteas primarias oblongo-ovadas de 1 a 2 mm de largo, con 3 nervios, además de bractéolas oblongo-ovadas, raramente lanceoladas de 1 a 2 mm de largo, generalmente con 3 nervios (CONABIO, 2018). Por su lado el frijol rojo tiene un hábito de crecimiento indeterminado, con guía larga y planta arbustiva, erecta y compacta tipo II, con hojas pequeñas y una altura de dosel de 50 cm. La

floración se presenta en promedio a 42 días después de la siembra y su madurez fisiológica a 72 días. Sus flores son de color blanco, el tallo es verdoso y sus vainas son blancas en madurez fisiológica y de color blanco cremoso a la cosecha, con granos de color rojo, opaco y pequeño de forma ovoidal (Villar *et al.*, 2010).

Manzana. El cultivar de manzana (*Malus Domestica* Borkh) que se utilizó es una mutante del Colegio de Posgraduados llamada Agua Nueva 2, derivada de la manzana Golden de Chihuahua, la cual se desarrolla de manera óptima a una altitud de 2000 a 2200 msnm, teniendo su época de floración durante los meses de febrero y marzo y la etapa de maduración en el mes de junio. Requiere 500 horas frío y los días de flor a fruto son 130, posee un vigor medio al igual que un tamaño medio, el color de la cáscara es amarillo pudiendo ser chapeado si se encuentra muy expuesto al sol. El contenido de sólidos solubles es de 16.0°Bx y tiene una acidez (g de ácido málico) de 4.6. Se caracteriza por tener una alta jugosidad y crocancia, así como un buen sabor (Fernández-Montes *et al.*, 2010).

1.5 Variables ambientales

Se obtuvo un registro semanal de la temperatura atmosférica y humedad relativa por medio de un higrotermómetro analógico marca Taylor (Figura 8) y la precipitación con un pluviómetro portátil marca Taylor (Figura 8) para elaborar un climograma, de igual manera se registró la temperatura de suelo con geotermómetros al momento de realizar los muestreos de suelo.



Figura 8. Registro de variables ambientales

Del lado izquierdo se muestra el pluviómetro marca Taylor con el que se registró la precipitación. Del lado derecho se muestra el higrotermómetro marca Taylor con el que se registró la temperatura atmosférica y la humedad relativa.

1.6 Variables evaluadas

En el estudio se evaluó un grupo de variables productivas, representado por el índice de área foliar (IAF), la biomasa foliar de maíz (BFm), la materia seca de la biomasa aérea total (BAT), la materia seca de la biomasa de raíces finas (BRF) y los rendimientos de manzano, maíz y frijol, con el fin de calcular la eficiencia relativa de la tierra (ERT). Además de lo anterior se evaluó la calidad física de las semillas de maíz, al calcular el peso hectolítrico (PH) y el peso de mil semillas (PMS), así como la calidad fisiológica de las semillas de maíz por medio de una prueba de germinación estándar y obtener el porcentaje de germinación (PG) y el porcentaje de viabilidad (PV).

Para evaluar la calidad de suelo se consideraron los siguientes atributos fisicoquímicos del suelo: humedad gravimétrica (w), densidad aparente (DA), porcentaje materia orgánica oxidable (MOO), porcentaje materia orgánica total (MOT), porcentaje de carbono orgánico (CO), porcentaje de cenizas a base seca (CBS), nitrógeno total (NT), nitrógeno amoniacal y mineral para calcular el nitrógeno inorgánico (NI), pH, conductividad eléctrica (CE) y la concentración de nutrientes (NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+).

También se determinó la población de seis grupos microbiológicos: actinomicetos totales (AT), actinomicetos fijadores de nitrógeno (ACFN), hongos (H), levaduras (L), bacterias

totales (BT) y esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), además del índice de biodiversidad de Shannon para arvenses.

A partir de los atributos fisicoquímicos del suelo, la abundancia de microorganismos edáficos y la diversidad de arvenses, se calculó un índice de calidad de suelo (ICS).

1.7 Índice de Área Foliar (IAF)

Las mediciones del IAF se realizaron a nivel del suelo y a la altura media de la planta de acuerdo con lo señalado por Tanaka y Yamaguchi (2014), los cuales mencionan que el área foliar de maíz obtiene sus valores máximos cerca de la floración, por lo que las mediciones se realizaron durante la etapa fenológica de hoja bandera del maíz (60 DDS). Para estimar el IAF se realizó un muestreo dirigido a ocho plantas de maíz con competencia completa por parcela, cuatro del primer surco (en competencia con maíz y frutal) y cuatro del tercer surco (en competencia con maíz). El área foliar se calculó al multiplicar el largo y ancho de cada hoja por un factor de corrección (0.75), se suman los valores de todas las hojas por planta y se promedian los resultados de cada planta (Wilhelm *et al.*, 2000). Para calcular el IAF se relaciona el área foliar con el área de siembra.

$$\text{IAF} = (\text{Área foliar} * \text{Densidad de población}) / \text{Área sembrada}$$

1.8 Biomasa foliar de maíz

La biomasa foliar se cuantificó en hoja bandera seleccionando las mismas plantas que para el IAF. Se obtuvo una muestra conformada por tres círculos foliares de 2.5 cm de diámetro por hoja (Figura 9), de tres hojas por planta, de un total de ocho plantas por sitio para los cultivos anuales, registrando el peso de campo para posteriormente colocar las muestras en una estufa de circulación de aire forzado a 70°C hasta obtener el peso constante y registrar el peso seco por medio de una balanza analítica marca Shimadzu modelo AUW220D.



Figura 9. Toma de muestra para la estimación de materia seca de la biomasa de hojas en maíz.

1.9 Materia seca de la biomasa aérea total (BAT)

La estimación de materia seca de la biomasa aérea total (BAT) se realizó al momento que el maíz alcanzó la madurez fisiológica (180 DDS) mediante un método destructivo, en el cual se obtuvo el peso de campo, con una báscula romana, de ocho plantas de maíz por sitio. Se tomó una muestra representada por una sección de una planta por sitio de la cual se registró el peso de campo y posteriormente se registró el peso seco en una balanza analítica marca Shimadzu modelo AUW220D, tras cinco días en estufa de circulación de aire forzado a 70°C con el fin de registrar el contenido de materia seca.

1.10 Materia seca de la biomasa de raíces finas

Para la estimación de materia seca de la biomasa de raíces finas se tomó una muestra compuesta, conformada por tres submuestras, con una barrena cilíndrica con un volumen conocido y continuo en todos los sitios (Figura 10). Una vez obtenidas las muestras se trasladaron al laboratorio donde se registró el peso y el volumen para posteriormente pasar cada muestra por separado a través de una columna de tamices para pruebas físicas, marca MONT INOX, con el fin de separar las raíces del suelo, las cuales se pesaron y se colocaron

en botes de aluminio dentro de una estufa de circulación de aire forzado a 70°C por 72 horas para alcanzar peso constante y registrar el contenido de materia seca.



Figura 10. Barrena cilíndrica con muestra de suelo para la estimación de materia seca de la biomasa de raíces finas

1.11 Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT)

El cálculo de la ERT se obtuvo por medio de la ecuación propuesta por Francis *et al.* (1982):

$$ERT = RMi/RMu + RFi/RFu + RAFi/RAFu$$

Dónde: ERT = Eficiencia relativa de la tierra; RMi, RFi, RAFi = Rendimiento del maíz, frijol y árbol frutal intercalados; RMu, RFu, RAFu = Rendimiento del maíz, frijol y árbol frutal en unicultivo.

1.12 Calidad de semilla de maíz y frijol

Se obtuvo una muestra de grano de ocho plantas por sitio, las semillas se secaron a temperatura ambiente hasta obtener un porcentaje de humedad promedio de 14.5% para maíz y de 12.5% para frijol, el cual se midió con un determinador de humedad electrónico marca Delmhorst modelo G-7. Posteriormente se obtuvo el peso de 1000 semillas al pesar ocho grupos de 100 semillas, de acuerdo con la ISTA (2014), si el coeficiente de variación es

menor a 0.03 se puede obtener el promedio de los ocho grupos y multiplicarlo por diez para obtener el valor de peso de 1000 semillas. El peso hectolitrito se obtuvo de la relación entre peso y volumen de 200 semillas multiplicado por 100.

Para evaluar la calidad fisiológica de las semillas de maíz se realizó una prueba de germinación estándar de acuerdo con lo recomendado por la ISTA (2014). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con seis repeticiones, cada unidad experimental consistió en dos “tacos”, cada uno de ellos conformado por 25 semillas de maíz enrolladas en dos capas de sanitas húmedas. Las unidades experimentales se colocaron en una cámara de germinación, marca Barnstead Lab-Line, con una temperatura controlada de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 7 días, tiempo en el cual se mantuvieron con suficiente humedad para la germinación. Transcurrido dicho periodo se categorizaron las plántulas de acuerdo a sus estructuras (Figura 11) en cuatro grupos: plántulas normales, poseen tres estructuras, parte aérea (epicotilo), raíz principal y raíces adventicias; plántulas normales de bajo vigor, poseen parte aérea, pero con un epicotilo poco desarrollado, raíz principal y raíces adventicias; plántulas anormales, no cuentan con una o más de las tres estructuras y semillas no germinadas, no cuentan con ninguna de las estructuras.

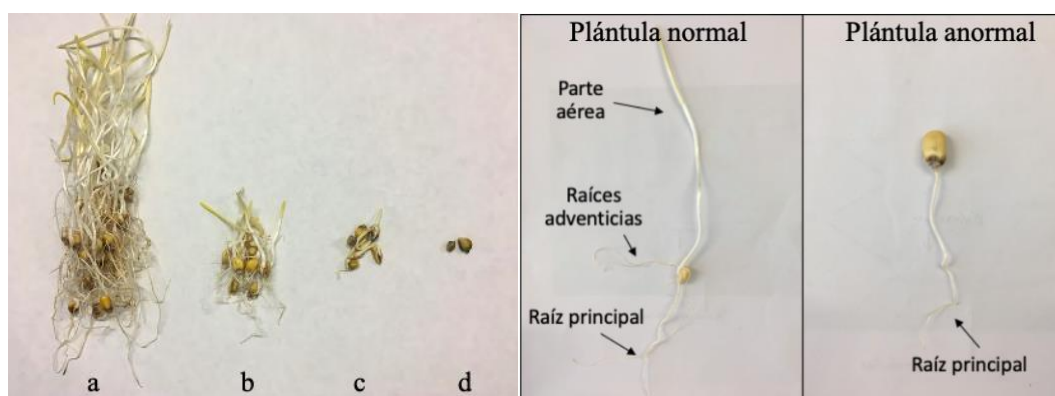


Figura 11. Grupo de plántulas de prueba de germinación estándar

Del lado izquierdo se muestran los distintos grupos de plántulas, a: Plántulas normales, b: Plántulas normales de bajo vigor, c: Plántulas anormales, d: Semillas no germinadas. Del lado derecho se observan las estructuras de las plántulas.

Una vez categorizadas las plántulas se obtuvo el porcentaje de germinación y porcentaje de viabilidad con las siguientes ecuaciones:

$$PG = \text{NPN}/n * 100$$

Dónde: PG = Porcentaje de germinación; NPN = Número de plántulas normales al séptimo día; n = número de semillas por unidad experimental.

$$PV = (\text{NPN} + \text{NPA})/n * 100$$

Dónde: PV = Porcentaje de viabilidad; NPN = Número de plántulas normales al séptimo día; NPA = Número de plántulas anormales al séptimo día; n = número de semillas por unidad experimental.

1.13 Determinación de grupos funcionales de microorganismos edáficos

Se realizaron tres muestreos de suelo para cada ciclo agrícola 2018 y 2019, conformando un total de seis. El primer muestreo de suelo se realizó previo al establecimiento de los cultivos anuales, el segundo durante hoja bandera en el cultivo de maíz, y el tercero en madurez fisiológica del maíz. Dichos muestreos se realizaron de acuerdo con la norma oficial mexicana para muestreo y análisis de suelos (NOM-021-SEMARNAT).

Para cada muestreo de suelo se determinaron los siguientes grupos microbiológicos: Actinomicetos totales, actinomicetos fijadores de nitrógeno, hongos, levaduras, bacterias totales y esporas de hongos micorrízicos arbusculares. Los cinco primeros grupos se contabilizaron por cuenta en placa, para ello se colocaron diez gramos de suelo húmedo de cada muestra en 90 mL de agua peptonada y se realizaron diluciones decimales empleando tubos con 9 mL de agua peptonada, a los cuales se les agrego 1 mL de la dilución anterior. La siembra en placa fue por expansión con 200 µl de la tercera, cuarta, quinta y sexta dilución (Figura 12). Para la determinación de actinomicetos totales se utilizó el medio de cultivo agar nutritivo, para el caso de los actinomicetos fijadores de nitrógeno se utilizó el medio formulado Ashby, y para levaduras y hongos el medio de agar papa dextrosa, todas las determinaciones se realizaron por duplicado. Se incubaron a 28°C durante 72 horas a excepción de los hongos que se incubaron por 120 horas.

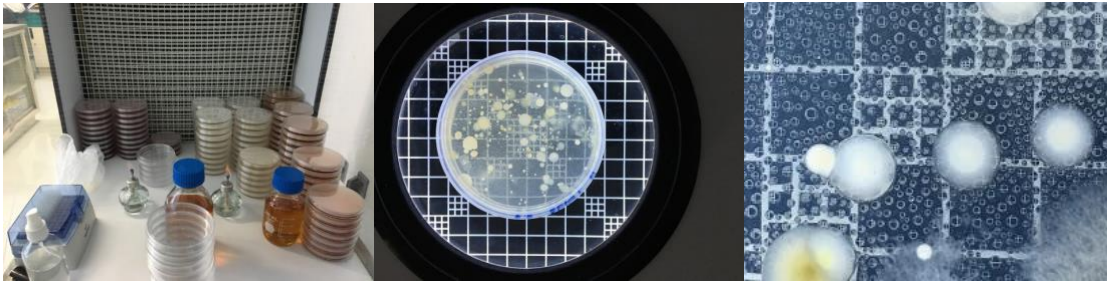


Figura 12. Determinación de grupos microbiológicos

Se muestra la preparación de medio de cultivo y las placas con crecimiento de los grupos funcionales de microorganismos edáficos.

Para la determinación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares, según Ferrera *et al.*, (1993), se preparó una dilución de 20 mL de cada suelo en 250 mL de agua destilada, agitando a 150 rpm en un agitador orbital (Labnet, Orbit 1900), por 20 minutos y dejándolo reposar por 10 minutos. Se utilizó una columna de tamices de pruebas físicas con cinco filtros de aberturas diferentes (0.8407 mm, 0.4191 mm, 0.250 mm, 0.1499 mm, 0.0737 mm) de forma ascendente, el sobrenadante de cada una de las muestras se vertió empezando con el tamiz de mayor apertura al de menor, se enjuagó con una piseta cada tamiz, procurando que el filtrado bajara en un embudo con papel filtro Whatman n°3 dentro de un matraz donde la muestra de cada tamiz se filtrara correctamente. Cada papel filtro se almacenó en refrigeración a 4°C para posteriormente realizar el conteo de esporas con un microscopio estereoscópico.

1.14 Análisis fisicoquímico del suelo

Todas las mediciones se realizaron por triplicado. Se registró el peso de 40 mL de suelo fresco y posteriormente se secó durante 72 horas en una estufa a 105°C. Una vez transcurrido dicho tiempo se registró el peso y volumen de cada muestra para la determinación de humedad gravimétrica y densidad aparente. Una vez procesadas las muestras se realizó una granulometría por medio de una columna de tamices de pruebas físicas, los cuales contaban con aberturas de 4.76 mm, 2 mm, 0.841 mm, 0.250 mm y 0.149 mm El volumen inicial que se colocó en la columna de tamices fue de 250 mL de cada muestra, de la cual se registró el

peso y volumen de las partículas de cada tamiz, dicho procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra de suelo, conservando el suelo de los tamices de 0.841 mm y 0.250 mm para los futuros análisis.

1.14.1 Muestreo de suelo

Los muestreos de suelo se realizaron con la misma metodología que para la determinación de grupos funcionales de microorganismos. Una vez obtenidas las muestras se determinó la textura, humedad, densidad aparente, materia orgánica, cenizas, pH, conductividad eléctrica, contenido de P, N y K extraíbles al igual que el contenido de carbono oxidable, nitrógeno total, nítrico y amoniacal, como indicadores de la calidad de suelo (Bautista *et al.*, 2004).

El primer muestreo se realizó el primero de marzo de 2018, conformado por ocho muestras compuestas de 3,000 mL, cada una conformada por tres submuestras (Cuadro 3). Cada una de las muestras representó uno de los sitios estudiados. Cabe mencionar que para este primer muestreo la superficie de los sitios que incluyen cultivos anuales aún no se encontraba sembrada.

Cuadro 3. Sitios para el primer muestreo de suelo

Clave	Sitio
1	Cultivos anuales en asociación con orientación sur respecto al árbol
2	Cultivos anuales en asociación con orientación norte respecto al árbol
3	Manzanos con orientación sur
4	Manzanos con orientación norte
5	Huerto simple de manzano con orientación sur
6	Huerto simple de manzano con orientación norte
7	Maíz simple dentro de experimento
8	Maíz simple fuera del experimento

Las muestras se colectaron posterior al rastreo de la parcela a una profundidad de 0-20 cm, para lo cual se utilizó una barrena. Posteriormente se procesaron las muestras, separando 500 mL para conservarlos en refrigeración y retener la humedad, mientras que 2500 mL fueron secados al sol durante 72 horas, de los cuales 1000 mL se resguardaron para análisis fisicoquímicos y 1500 mL para un bioensayo espontaneo de arvenses.

Para los siguientes muestreos se tomaron 16 muestras compuestas de 3,000 mL, cada una conformada por tres submuestras. Cada una de las muestras representó uno de los sitios estudiados, los cuales se muestran en el Cuadro 4 para los cultivos anuales en asociación, y en el Cuadro 5 para los cultivos anuales simples y los árboles frutales. Las muestras se procesaron y conservaron siguiendo el mismo procedimiento del primer muestreo de suelo.

Cuadro 4. Sitios evaluados para cultivos anuales

Sitio	OSA	GM	DF	PFM	PFR
A1	Sur	HS2	12,500	0.2	0.8
A2	Norte	HS2	12,500	0.2	0.8
A3	Sur	HS2	25,000	0.2	0.8
A4	Norte	HS2	25,000	0.2	0.8
A5	Sur	NB	12,500	0.2	0.8
A6	Norte	NB	12,500	0.2	0.8
A7	Sur	NB	25,000	0.2	0.8
A8	Norte	NB	25,000	0.2	0.8

OSA: Orientación del surco respecto al árbol frutal; GM: Genotipo de maíz; DF: Densidad de población del frijol ha⁻¹; PFM: Proporción de frijol mantequilla; PFR: Proporción de frijol rojo; NB: Nativo blanco.

Cuadro 5. Sitios para cultivos simples y manzano

Sitio	OSA	Genotipo de maíz	Tipo de huerto	Genotipo de manzano
FM1	Sur	N/A	MIAF	Agua nueva 2
FM2	Norte	N/A	MIAF	Agua nueva 2
FS1	Sur	N/A	Simple	Agua nueva 2
FS2	Norte	N/A	Simple	Agua nueva 2
M1	Sur	HS2	Simple	N/A

M2	Norte	NB	Simple	N/A
M3	Sur	HS2	Simple	N/A
M4	Norte	NB**	Simple	N/A

OSA: Orientación del surco respecto al árbol frutal

1.14.2 Humedad y Densidad Aparente

Se registró el peso de 40 mL de suelo “fresco” y posteriormente se secó durante 72 horas en una estufa a 105°C. Una vez transcurrido dicho tiempo se registró el peso y volumen de cada muestra para la determinación de humedad gravimétrica y densidad aparente, todas las mediciones se realizaron por triplicado.

1.14.3 Granulometría

Una vez procesadas las muestras se realizó una granulometría por medio de una columna de tamices de pruebas físicas, los cuales contaban con aberturas de 4.76 mm, 2 mm, 0.841 mm, 0.250 mm y 0.149 mm. El volumen inicial que se colocó en la columna de tamices fue de 250 mL de cada muestra, de la cual se registró el peso y volumen de las partículas de cada tamiz, dicho procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra de suelo, conservando el suelo de los tamices de 0.841 mm y 0.250 mm para los futuros análisis.

1.14.4 Materia orgánica y Carbono oxidable

Se determinó a través del método Walkley y Black, para ello se pesaron 0.500 g de suelo de cada muestra y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, a ello se le añadió 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ al 1 N y 20 mL de H_2SO_4 concentrado y se agitó por un minuto para después reposar durante 30 minutos, una vez transcurrido este tiempo se añadieron 200 mL de agua destilada, se agitó y se dejó enfriar. Se agregó 10 mL de H_3PO_4 y 20 gotas de difenilamina como indicador. Se utilizó un blanco para los cálculos posteriores. Se tituló con $FeSO_4$ hasta que la muestra virara de coloración (Figura 13). Una vez conocido el volumen de $FeSO_4$

requerido para oxidar la materia orgánica de la muestra se realizaron los cálculos para obtener el porcentaje de materia orgánica con la siguiente ecuación:

$$\%MO = 10(1 - M/B) \times 1.34$$

Dónde: M = mL de FeSO₄ gastado y B = mL de FeSO₄ en el blanco

Para el cálculo del carbono oxidable se dividió la MO obtenida entre un 1.724 como factor.



Figura 13. Determinación de porcentaje de materia orgánica.

Del lado izquierdo se muestra un matraz con la muestra de suelo y dicromato de potasio. En el mismo matraz con la adición del indicador de difenilamina. Del lado derecho el matraz con la muestra titulada mostrando el viraje de coloración obtenido.

1.14.5 Cenizas

La determinación de cenizas se realizó de acuerdo con la norma mexicana para la contaminación del suelo - residuos sólidos - determinación de cenizas (NMX-AA-18-1984). Se utilizaron crisoles, los cuales previamente se secaron hasta peso constante a 60°C por una hora y se dejó enfriar en un desecador. Se colocó 2.5 g de muestra seca en un crisol y se calcinó a 800°C durante 2 horas en una mufla hasta obtener el peso constante, al finalizar se dejó enfriar en desecador y se registró el peso.

1.14.6 Nitrógeno total

Para la determinación de nitrógeno total se utilizó el método Kjeldahl de acuerdo con la norma mexicana de protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - determinación de nitrógeno total (NMX-AA-24-1984). Para ello se pesan 0.5000 g de muestra seca y se colocan en un tubo Kjeldahl con 1.1 gramos de $\text{Se}(\text{OH})_4$ como catalizador y 3 mL de H_2SO_4 concentrado. Se colocan los tubos en un digestor Kjeldahl (Labconco, Rapidstill II) a 350°C durante dos horas hasta obtener un color amarillo paja en la muestra, finalizado este tiempo se deja enfriar y se agregan 10 mL de agua destilada y 10 mL de NaOH al 10 N para posteriormente colocar en un destilador, una vez destilada se le agrega 10 mL de H_3BO_3 y 5 gotas del indicador rojo-verde de bromocresol para titular un volumen de 50 mL con H_2SO_4 al 0.01N registrando el volumen gastado hasta el viraje de la muestra de verde claro a rosa brillante.

El cálculo del porcentaje de nitrógeno total se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$\% N \text{ total} = (\text{Vm} - \text{Vb}) \times N \times 14 / (\text{P} \times 10)$$

Dónde: % *N* total = Porcentaje de Nitrógeno total, *V_m* = Volumen de H_2SO_4 empleado en titular la muestra, *V_b* = Volumen de H_2SO_4 empleado en el blanco, *N* = Normalidad exacta del ácido sulfúrico, 14 = Peso equivalente del nitrógeno, *P* = Peso de la muestra en gramos, 10 = Factor para convertir en porcentaje.

1.14.7 Nitrógeno nítrico y amoniacal

Se utilizó el método micro-Kjeldahl, se pesaron 5 g de muestra húmeda, a los cuales se les agregó 50 mL de solución KCl al 2N y se agitó por 60 minutos en agitador orbital a 180 rpm, posteriormente se filtró y se tomó una alícuota de 10 mL, la cual fue colocada en un tubo de destilación y se le agregó 0.2 g de óxido de magnesio para determinar nitrógeno amoniacal, se destiló colocando un vaso de precipitado, con 10 mL de solución de H_3BO_3 al 2% con verde de bromocresol y rojo de metilo como indicador, en la salida del refrigerante hasta

obtener 50 mL. Finalmente se tituló la muestra y los blancos con ácido sulfúrico al 0.005 N hasta que la solución de verde claro a rosa para registrar el volumen de ácido sulfúrico gastado. Para la determinación de nitrógeno nítrico se agregó 0.2 g de aleación de devarda al tubo de destilación y se repitió el proceso hasta la titulación.

Los valores de nitrógeno amoniacal y nítrico se obtuvieron con la siguiente formula:

$$N(\text{ppm}) = (M-B) * N * 14 * V * 1000 / (a * p)$$

Dónde: M y B = mililitros de ácido sulfúrico gastados en la muestra y en el blanco, N = normalidad del ácido sulfúrico, V = volumen del extractante, a = volumen de la alícuota, p = peso de la muestra

1.14.8 Textura

La determinación de textura se realizó siguiendo la técnica Bouyoucos citada en la norma mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos (NOM-021-RECNAT-2000). Se colocaron 50 gr de muestra de suelo en un vaso de precipitado de 250 mL y se vertió agua destilada hasta cubrir toda la muestra, aumentando 2 cm de la superficie, a continuación, se colocó la mezcla en una batidora durante 5 minutos con el fin de homogenizarla hasta obtener una consistencia adecuada. Se transfirió la mezcla a una probeta volumétrica de 1000 mL vertiendo agua destilada hasta los 700 mL, se colocó un densímetro y se vertió agua destilada hasta completar los 1000 mL. Se realizó una primera lectura a los 40 segundos y una segunda transcurridas dos horas.

1.14.9 pH y Conductividad eléctrica

Para la medición de pH y conductividad eléctrica se consideró la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000, utilizando un potenciómetro CONDUCTRONIC PC18, para ello se preparó una dilución al 20% agregando 40 mL de la muestra de suelo en 200 mL de agua destilada y agitando durante 20 minutos y reposando por 10 minutos, finalmente se filtraron

las muestras obteniendo un extracto en el cual se midió el pH y la conductividad eléctrica. Utilizando el mismo extracto se determinó NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} y K^+ con un kit Laquatwin.

1.14.10 Nutrientes (P, N, K, Ca)

Para cada determinación se realizó como se indica en el manual del aparato HANNA instrument, para ello se prepararon extractos con 100 g de cada suelo y se le agregaron 250 mL de agua destilada, posteriormente se agito en un agitador orbital (Labnet, Orbitl 1900), a 150 rpm por 25 min y se dejó reposar por 10 min. Se procedió a un filtrado de cada frasco con muestra con un papel filtro Whatman del no. 1 una vez finalizada, se agregó ½ cucharada de carbón activado para poder clarificar el extracto se agitó por 10 min a 150 rpm y se realiza un segundo filtrado, finalmente las muestras se conservaron en frascos en refrigeración.

1.14.11 Bioensayo espontáneo de arvenses

Se estableció un bioensayo espontaneo de arvenses de acuerdo con Hosoya y Sugiyama (2017). Para ello se colocaron 400 mL de agrolita como sustrato inerte y 400 mL de suelo de cada muestra en macetas de plástico de 1000 mL, realizando tres repeticiones por cada muestra. Inicialmente cada maceta se irrigó con 200 mL de agua corriente, posteriormente se mantuvieron con 150 mL de agua cada tres días para permitir el crecimiento de arvenses, todas las macetas se colocaron en invernadero (Figura 14). Una vez completados 60 días del establecimiento del bioensayo se procedió a cuantificar la abundancia y riqueza de especies de arvenses, para calcular el índice de biodiversidad de Shannon, de cada muestra (Jiménez-Romero *et al.*, 2020).



Figura 14. Bioensayo espontaneo de arvenses.

1.15 Calculo de índice de calidad de suelo

Se calculó un índice de calidad del suelo de acuerdo con lo propuesto por Andrews *et al.* (2002), para ello se realizaron tres pasos: 1) análisis de componentes principales (ACP) a partir de los atributos de suelo, 2) seleccionar los atributos con mayor varianza con el fin de establecerlos como variables de análisis y formar un conjunto mínimo de datos (CMD), 3) normalizar las variables con el fin de transformarlas en indicadores de los cuales se construye el índice de calidad del suelo. Para la selección del CMD se realizó un ACP con los promedios de las variables de los cuatro muestreos de suelo y se tomaron los componentes principales que explicaran el 70% de la variabilidad y con un valor propio >1 . Posteriormente se seleccionaron los atributos con mayor aporte de cada uno de los componentes al considerar aquellos con vectores propios $\geq |0.3|$.

Una vez definido el CMD, para definir los indicadores de calidad de suelo (ICS) y los valores asociados se utilizó la metodología establecida por Cantú *et al.* (2007), en la cual se establecen límites máximos (I_{max}) y mínimos (I_{min}) para cada uno de los atributos seleccionados del CDM. Dado que existen diversas vías para establecer dichos límites en suelos agrícolas, en el presente estudio se establecieron considerando las condiciones ideales

para el establecimiento de los cultivos y las condiciones edafoclimáticas de la región de estudio.

Los valores de los indicadores fueron normalizados utilizando una escala de 0 a 1, de manera que los ICS con un valor cercano a uno reflejan una alta calidad y aquellos cercanos a cero una baja calidad, el valor máximo del indicador I_{\max} (valor normalizado $V_n = 1$) representa el valor ideal que se busca alcanzar o la situación ideal de calidad de suelo, mientras que el valor mínimo del mismo I_{\min} (valor normalizado $V_n = 0$) refleja la situación de calidad de suelo mínima aceptable (Cantú *et al.*, 2007). Para los datos obtenidos se modificó la escala propuesta por Cantú *et al.* (2007), considerando lo establecido por Estrada-Herrera *et al.* (2017), donde se consideran dos clases adicionales para cada indicador, una clase mayor a la unidad y una menor a cero, esto por el amplio rango de valores que presentaron los indicadores generados para los sitios evaluados en el presente estudio

El valor normalizado de los ICS se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$V_n = (I_m - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

Dónde, V_n : valor normalizado del indicador; I_m : medida experimental del atributo considerado como indicador; I_{\min} : valor mínimo del atributo considerado como indicador; I_{\max} : valor máximo del atributo considerado como indicador. El indicador de calidad de suelo por sitio se obtuvo al promediar los valores normalizados de los ICS del CMD.

1.16 Literatura citada

- Andrews, S., Karlen, D. y Mitchell, J. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25–45.
- Bautista, C.A., Etchevers, B.J., Castillo, R.F., Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 8(2), 90-97.

- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J. y Schiviano, H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*, 25, 173-178.
- Colpos. (2018). *Híbrido de maíz CP-HS-2 (Grano y forraje)*. Recuperado el 22 de junio de 2019, de <http://www.colpos.mx/semillas/hs2.html>
- CONABIO. (2018). *Fabaceae = Leguminosae en parte Phaseolus vulgaris L. Frijol silvestre*. Recuperado el 22 de junio de 2019, de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/phaseolus-vulgaris/fichas/ficha.htm>
- Estrada-Herrera, I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, S., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51, 813-831.
- Farji-Brener, A.G. (2007). Una forma alternativa para la enseñanza del método hipotético-deductivo. *Interciencia*, 32(10), 716-720.
- Fernández-Montes, M.R., Parra-Quezada, R.A., Pérez-González, S., Vera-Morales, J.M., Zacatenco-González, M.G. (2010). Variedades de Manzana recomendadas para las serranías de Hidalgo y Querétaro. *Centro e Investigación Regional Centro. INIFAP. Folleto Técnico No. 1*, 36.
- Ferrera, R., González, M. y Rodríguez, M. (1993). Manual de agromicrobiología. Trillas, México.
- Francis, C.A., Prager, M., y Tejada, G. (1982). Density interactions in tropical intercropping. I. Maize and climbing bean. *Field Crop Res.* 5, 163-176.
- Hernández-Ortiz, V., Morales, I., y Vergara, C. (2004). Detección de la población de *Rhagoletis pomonella* (Díptera: Tephritidae) durante la fructificación de *Crataegus mexicana* (Rosaceae) en Puebla, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 20(1), 119-129.
- Hosoya, K., y Sugiyama, S. (2017). Weed communities and their negative impact on rice yield in no-input paddy fields in the northern part of Japan. *Biological Agriculture y Horticulture*, 33, 215-224.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Información de México Número de habitantes*. Recuperado el 04 de septiembre de 2017, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/poblacion/>

- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2016). *Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla*. Recuperado el 21 de septiembre de 2017, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21074a.html>
- ISTA. (2014). *The germination test. In International Rules for Seed Testing*. International Seed Testing Association (ISTA), Bassersdorf, Switzerland.
- Jiménez-Romero, E. M., Crespo-Gutiérrez, R. S., Cuaquer-Fuel, E. y Chevez-Alejandro, A. P. (2020). Relación de arvenses en plantaciones *Dectona grandis* l.f. (teca) y su banco de semillas en la zona central del litoral ecuatoriano. *Centro Sur*, 1(7), 69-92
- Sánchez, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102-122. doi: <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>
- Tanaka, A. y Yamaguchi, J. (2014). *Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz (4ª edición)*. Texcoco, Estado de México, México : Biblioteca Básica de Agricultura (bba), Serie Hojas Dispersas, Colegio de Postgraduados.
- Villar, S.B., López, S.E., Tosquy, V.O, y Cruz, C.F. (2010). Rojo INIFAP, nueva variedad de frijol de grano rojo para el trópico de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, 1(5), 681-68.
- Wilhelm, W., Ruwe, F., y Schlemmer, M. (2000). Comparison of three leaf area index meters in corn canopy. *Crop Sci.*, 40, 1179-1183.

CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, BIOMASA Y CALIDAD DE SEMILLA DE MAÍZ EN DISTINTAS CONDICIONES DE SIEMBRA DE UN SISTEMA MIAF

Resumen

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel global, y en especial para México. El incremento de los rendimientos de maíz se ve influenciado por distintas prácticas de manejo, como el arreglo topológico, el genotipo cultivado, así como si es manejado en monocultivo o en asociación. El objetivo fue evaluar la influencia de la asociación de cultivos anuales y perennes del sistema MIAF, en distintos arreglos topológicos y dos genotipos de maíz, en el índice de área foliar (IAF), la biomasa aérea total (BAT), la biomasa de raíces finas (BRF) y la calidad de semilla de maíz. El estudio se realizó durante el ciclo agrícola 2018 y 2019, las mediciones de IAF y BRF se realizaron durante la etapa fenología de hoja bandera del maíz (60 DDS), y la BAT y estimación de rendimientos en madurez fisiológica. La calidad física y fisiológica de semilla de maíz se evaluó con el peso hectolítrico (PH), peso de mil semillas (PMS), y la prueba de germinación estándar. Se observó un efecto de las prácticas de manejo en las variables productivas y calidad de semilla de maíz. El IAF y la BAT se mostraron afectadas por la orientación respecto al manzano en la asociación maíz-frijol, pero no existe evidencia para afirmar que el sistema MIAF favorece el PG o el PV de las semillas de maíz.

Palabras clave: Arreglo topológico, Genotipo, Híbrido HS2, Maíz nativo, Peso hectolítrico.

Abstract

Corn is one of the most important crops globally, and especially for Mexico. The increase in corn yields is influenced by different management practices, such as the topological arrangement, the cultivated genotype, as well as whether it is managed in monoculture or in association. The objective was to evaluate the influence of the association of annual and perennial crops of the MIAF system, in different topological arrangements and two maize genotypes, on the leaf area index (IAF), the total aerial biomass (BAT), the root biomass

fines (BRF) and the quality of corn seed. The study was carried out during the 2018 and 2019 agricultural cycle, the IAF and BRF measurements were performed during the phenology stage of corn flag leaf (60 DDS), and the BAT and estimation of yields at physiological maturity. The physical and physiological quality of corn seed was evaluated with the test weight (PH), weight of thousand seeds (PMS), and the standard germination test. An effect of management practices was observed on the productive variables and quality of corn seed. The IAF and the BAT were affected by the orientation with respect to the apple tree in the corn-bean association, but there is no evidence to affirm that the MIAF system favors the PG or the PV of the corn seeds.

Key words: Genotype, HS2 hybrid, Native corn, Test weight, Topological arrangement.

Introducción

México es centro de origen de la diversidad genética del maíz (Acosta, 2009), existiendo 59 razas en el territorio mexicano de las cerca de 300 que se han descrito en el continente americano (Fernández *et al.*, 2013). El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de primer orden para un amplio número de personas en el mundo. En México el consumo per cápita promedio de maíz es de 342 gramos por día (Damián-Huato *et al.*, 2013); en 2019, representó 34% de la superficie agrícola sembrada y 21% del valor de producción agrícola de México, con una tercera parte de la producción obtenida en condiciones de temporal (SIAP, 2019).

El cultivo de maíz juega un papel importante en la alimentación de los pueblos mesoamericanos (D'Alessandro y González, 2017) así como en su cosmovisión (Gómez, 2016). En esta región es común encontrar el maíz como policultivo mixto, a cuya asociación se le conoce como milpa (Rodríguez-Robayo *et al.*, 2020) la cual se caracteriza por generar sinergias entre los cultivos, siendo los más comunes frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabaza (*Cucurbita* spp.) y maíz, aumentando la productividad y favoreciendo resiliencia ante perturbaciones externas (Ebel *et al.*, 2017). A pesar de mostrar estas cualidades, en México la milpa ha perdido atractivo ante los productores debido al presente contexto social, económico y ecológico; además de políticas públicas que estimularon el uso de

mecanización, semillas mejoradas, aplicación de fertilizantes de síntesis y pesticidas en sistemas de monocultivo (Damián *et al.*, 2014). Es por esto por lo que se requiere innovar el sistema milpa para que sea capaz de brindar una alta productividad a la par de responder a los retos ambientales y socioeconómicos, sin perder su esencia y fortaleza: la agrobiodiversidad (Ebel *et al.*, 2013).

En este sentido, la Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF) es una propuesta tecnológica alternativa que busca la seguridad alimentaria de las familias rurales (Rojas, 2019) al incrementar los rendimientos de maíz, mejorar la productividad, evitar la erosión hídrica del suelo, promover la interacción entre los cultivos componentes optimizando el uso de los recursos naturales y reduciendo los insumos externos (Juárez-Ramón y Fragoso, 2014), favorecer la captura del carbono atmosférico y aumentar el ingreso neto y el empleo familiar mediante el manejo adecuado de árboles frutales (Santiago-Mejía *et al.*, 2008). Lo anterior bajo un diseño que busca la intensificación del paradigma de la agricultura tradicional (PAT) en pequeño, al mantener las bondades de la milpa histórica como la resiliencia derivada de la biodiversidad y la eficiencia relativa de la tierra superior a la unidad (Turrent *et al.*, 2017).

Siendo el incremento de los rendimientos de maíz uno de los principales retos de la agricultura familiar en México (Damián *et al.*, 2014), es necesario el estudio de los factores que más influyen en la productividad de dicho cultivo dentro de tecnología alternativas como el MIAF. En este sentido el área foliar acumulada por unidad de superficie (IAF) es útil para estimar la capacidad fotosintética de los cultivos, además de favorecer la comprensión entre la acumulación de biomasa y el rendimiento en distintas condiciones edafoclimáticas y prácticas de manejo (Acosta *et al.*, 2008), mientras que la densidad de población y el arreglo topológico son algunas de las variables técnicas con mayor impacto en el aprovechamiento del rendimiento potencial del maíz, ya sea individualmente o interactuando con las dosis y fechas de fertilización, teniendo una influencia en el IAF (Tinoco *et al.*, 2008).

Otro factor de peso al momento de evaluar rendimientos es la calidad de semilla, la cual se puede expresar como el conjunto de propiedades genéticas, fisiológicas, físicas y sanitarias (Popinigis, 1985). El componente genético se refiere a la pureza del genotipo y la

uniformidad que este pueda tener, su productividad, adaptabilidad y resistencia; el componente fisiológico al desempeño de la semilla en la germinación, su vigor, contenido de humedad, viabilidad y longevidad; el componente sanitario a la capacidad de la semilla para resistir enfermedades, fitófagos y arvenses; y el componente físico se refiere a la integridad de la semilla, la existencia de materias extrañas, la uniformidad de la forma, tamaño, color, brillo y viscosidad (Doria, 2010). En este sentido, la calidad fisiológica envuelve la integridad de las estructuras y procesos fisiológicos por los cuales la semilla puede mantener índices de viabilidad altos, siendo la germinación y el vigor los indicadores más relevantes al momento de evaluar calidad fisiológica en semillas (Moreno *et al.*, 1988).

La germinación es un fenómeno que ocurre bajo determinadas circunstancias, entre las que se encuentran las siguientes: las semillas a germinar deben ser viables, no estar en dormancia y contar con las características de sanidad adecuadas, es decir, sin la presencia de individuos patógenos, así como encontrarse en condiciones ambientales favorables de temperatura, oxígeno, agua y luz. La germinación, desde un enfoque fisiológico, se divide en cuatro etapas: a) imbibición de agua, b) crecimiento celular, c) división celular y d) diferenciación celular y de tejidos. La primera se presenta en semillas vivas al igual que muertas, siendo independiente de la actividad metabólica de la semilla, la segunda etapa es en la que se presenta el metabolismo activo de la semilla, estas dos etapas son reversibles. Es a partir de la tercera etapa que se entra en un proceso fisiológico irreversible, caracterizado por una fuerte actividad metabólica en donde se da el crecimiento de la plántula y la movilización de las reservas energéticas (Doria, 2010).

Es importante la determinación de componentes de la calidad fisiológica en términos de viabilidad y vigor que permitan la predicción del establecimiento y producción de materiales genéticos sobresalientes, con índices de calidad elevados, al igual que un manejo adecuado del cultivo (Antuna *et al.*, 2003). El presente trabajo busca evaluar la influencia de la asociación de cultivos anuales y perennes del sistema MIAF, en distintos arreglos topológicos y dos genotipos de maíz, en el índice de área foliar (IAF), la biomasa aérea total (BAT), la biomasa de raíces finas (BRF) y la calidad de semilla de maíz.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el municipio de Huejotzingo, en la localidad de San Mateo Capultitlán, ubicado al Oeste del estado de Puebla en las cercanías del Volcán Popocatepetl (19°14'-19° 16' N; 98°20'-98E38' W) a una altitud de 2,260 msnm (INEGI, 2010). Las comunidades de vegetación nativa de esta región en su mayoría han sido reemplazadas por cultivos en los valles, sin embargo, en las regiones montañosas aún existen bosques de pino-encino asociados con vegetación arbustiva (CONABIO, 2011). En la zona el clima es templado subhúmedo con estación lluviosa en el verano entre abril y octubre, con una temperatura anual promedio de 15.7°C, y una precipitación pluvial anual de 868.2 mm; la temperatura varía de 12.4°C en enero hasta 18.2°C en mayo, en tanto que la precipitación mínima es de 4.9 mm en marzo, y la máxima de 195.6 mm durante julio (Hernández-Ortiz *et al.*, 2004). En la región predominan los suelos tipo Arenosol (38%), Phaeozem (26%), Cambisol (8%), Andosol (8%), Fluvisol (4%) y Leptosol (3%) (INAFED, 2016).

En el municipio de Huejotzingo, la zona del Valle de Puebla presenta en su mayor parte áreas dedicadas a la Agricultura de temporal, mientras que al oriente se localizan extensas zonas de regadío y en la ribera áreas reducidas de bosques de pino, pino- encino y pastizales. El recurso predominante es el forestal, el cual muestra una tendencia a disminuir debido a la deforestación sistemática por el uso de madera o para incorporar nuevas zonas al cultivo (INAFED, 2016). En la superficie sembrada del municipio de Huejotzingo prevalece el cultivo de maíz con 770 ha bajo riego y 4879 ha en temporal para el año 2018, otros cultivos que destacan son alfalfa verde, frijol, pera, durazno, tejocote, haba verde, ciruela y manzana (SIAP, 2019).

El estudio se realizó durante el ciclo agrícola 2018 y 2019 en una parcela experimental localizada en la localidad de San Mateo Capultitlán (19°12'12.2"N y 98°25'38.6"W), en la cual se estableció un cultivo bajo temporal de maíz en asociación con frijol, intercalado en árboles de manzano (*Malus Domestica* Borkh) cv “agua nueva dos” en plena producción, que fueron sembrados en 2004. La densidad de población del maíz fue de 50 mil plantas por hectárea, mientras que para el frijol se tuvieron las densidades de 12 mil y 25 mil plantas por

hectárea. Se contó con dos genotipos de maíz (*Zea mays* L.): un híbrido trilineal desarrollado en el área de mejoramiento y control de la calidad genética de la orientación académica en Producción de Semillas del Colegio de Posgraduados llamado HS2 y una variedad local de grano blanco. Para el frijol también se contó con dos genotipos, frijol mantequilla (*Phaseolus lunatus* L.) y frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.). El diseño fue de bloques completos al azar, con un arreglo en parcelas divididas, con un total de ocho tratamientos con dos repeticiones (Cuadro 6), y testigos de monocultivo de maíz, de ambos genotipos, bajo las mismas condiciones de siembra, además de un lote de maíz en monocultivo, para ambos genotipos, bajo otras condiciones de manejo, con una densidad de población de 60 mil plantas por hectárea.

Cuadro 6. Sitios evaluados bajo sistema MIAF en la localidad de San Mateo Capultitlán

Sitio	Cultivo	OAF	GM	DF	AT	DM
A1	AMF	Sur	HS2	12,500	2-1	50,000
A2	AMF	Norte	HS2	12,500	2-1	50,000
A3	AMF	Sur	HS2	25,000	2-2	50,000
A4	AMF	Norte	HS2	25,000	2-2	50,000
A5	AMF	Sur	Nativo Blanco	12,500	2-1	50,000
A6	AMF	Norte	Nativo Blanco	12,500	2-1	50,000
A7	AMF	Sur	Nativo Blanco	25,000	2-2	50,000
A8	AMF	Norte	Nativo Blanco	25,000	2-2	50,000
M1*	MM	N/A	HS2	N/A	N/A	50,000
M2*	MM	N/A	Nativo Blanco	N/A	N/A	50,000
M3*	MM	N/A	HS2	N/A	N/A	60,000
M4*	MM	N/A	Nativo Blanco	N/A	N/A	60,000

OAF: Orientación respecto al árbol frutal, GM: Genotipo del maíz, DF: Densidad de población del frijol, AT: Arreglo Topológico. DM: Densidad de población del maíz, AMF: Asociación maíz-frijol, MM: Monocultivo de maíz, *: Testigos.

Las mediciones del IAF se realizaron a nivel del suelo y a la altura media de la planta de acuerdo con lo señalado por Tanaka y Yamaguchi (2014), los cuales mencionan que el área foliar de maíz obtiene sus valores máximos cerca de la floración, por lo que las mediciones se realizaron durante la etapa fenología de hoja bandera del maíz (60 DDS). Para estimar el IAF se realizó un muestreo dirigido a ocho plantas de maíz con competencia completa por parcela, cuatro del primer surco (en competencia con maíz y frutal) y cuatro del tercer surco (en competencia con maíz). El área foliar se calculó al multiplicar el largo y ancho de cada hoja por un factor de corrección (0.75), se suman los valores de todas las hojas por planta y se promedian los resultados de cada planta (Wilhelm *et al.*, 2000). Para calcular el IAF se relaciona el área foliar con el área de siembra, es decir $IAF = (\text{área foliar} \times \text{densidad de población}) / \text{área sembrada}$.

La biomasa foliar se cuantificó en hoja bandera, seleccionando las mismas plantas que para el IAF. Se obtuvo una muestra conformada por tres círculos foliares de 2.5 cm de diámetro por hoja, de tres hojas por planta, de un total de ocho plantas por tratamiento para los cultivos anuales, registrando el peso de campo para posteriormente colocar las muestras en una estufa de circulación de aire forzado a 70°C hasta obtener el peso constante y registrar el peso seco por medio de una balanza analítica marca Shimadzu modelo AUW220D. La estimación de materia seca de la biomasa aérea total (BAT) se realizó al momento que el maíz alcanzó la madurez fisiológica (180 DDS), en el cual se obtuvo el peso de campo, con una báscula romana, de ocho plantas de maíz por tratamiento. Se tomó una muestra representada por una sección de una planta por tratamiento de la cual se registró el peso de campo y posteriormente se registró el peso seco en una balanza analítica marca Shimadzu modelo AUW220D tras cinco días en estufa de circulación de aire forzado a 70°C con el fin de registrar el contenido de materia seca.

Para la estimación de materia seca de la biomasa de raíces finas se tomó una muestra compuesta, conformada por tres submuestras, con una barrena cilíndrica con un volumen conocido y continuo en todos los tratamientos. Una vez obtenidas las muestras se trasladaron al laboratorio donde se registró el peso y el volumen para posteriormente pasar cada muestra por separado a través de una columna de tamices para pruebas físicas, marca MONT INOX,

con el fin de separar las raíces del suelo, las cuales se pesaron y se colocaron en botes de aluminio dentro de una estufa de circulación de aire forzado a 70°C por 72 horas para alcanzar peso constante y registrar el contenido de materia seca.

Se obtuvo una muestra de grano de ocho plantas por tratamiento, las semillas de maíz se secaron a temperatura ambiente hasta obtener un porcentaje de humedad promedio de 14.5%, la cual se midió con un determinador de humedad electrónico marca Delmhorst modelo G-7. Posteriormente se obtuvo el peso de 1000 semillas (PMS) al pesar ocho grupos de 100 semillas con un coeficiente de variación menor a 0.03, obtener su promedio y multiplicarlo por diez. El peso hectolítrito (PH) se obtuvo de la relación entre peso y volumen de 200 semillas multiplicado por 100.

Para evaluar la calidad fisiológica de las semillas de maíz se realizó una prueba de germinación estándar de acuerdo con lo recomendado por la ISTA (2014). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con seis repeticiones, cada unidad experimental consistió en dos “tacos”, cada uno de ellos conformado por 25 semillas de maíz enrolladas en dos capas de sanitas húmedas. Las unidades experimentales se colocaron en una cámara de germinación, marca Barnstead Lab-Line, con una temperatura controlada de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 7 días, tiempo en el cual se mantuvieron con humedad adecuada. Transcurrido dicho periodo se categorizaron las plántulas de acuerdo con sus estructuras (Figura 15) en cuatro grupos. Plántulas normales: aquellas que poseen tres estructuras, parte aérea (epicotilo), raíz principal y raíces adventicias; plántulas normales de bajo vigor: poseen parte aérea, pero con un epicotilo poco desarrollado, raíz principal y raíces adventicias; plántulas anormales: no cuentan con una o más de las tres estructuras; semillas no germinadas: no cuentan con ninguna de las estructuras.

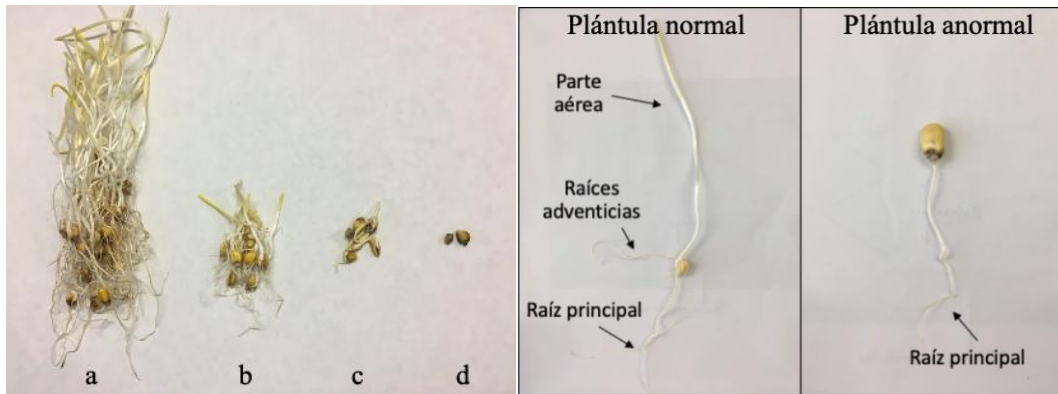


Figura 15. Clasificación de plántulas de la prueba de germinación estándar

Del lado izquierdo se muestran los distintos grupos de plántulas, a: Plántulas normales, b: Plántulas normales de bajo vigor, c: Plántulas anormales, d: Semillas no germinadas. Del lado derecho se observan las estructuras de las plántulas.

Una vez categorizadas las plántulas se obtuvo el porcentaje de germinación y porcentaje de viabilidad con las siguientes ecuaciones:

$$PG = \text{NPN}/n * 100$$

Dónde: PG = Porcentaje de germinación; NPN = Número de plántulas normales al séptimo día; n = número de semillas por unidad experimental.

$$PV = (\text{NPN} + \text{NPA})/n * 100$$

Dónde: PV = Porcentaje de viabilidad; NPN = Número de plántulas normales al séptimo día; NPA = Número de plántulas anormales al séptimo día; n = número de semillas por unidad experimental.

Los datos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey con un $\alpha=0.05$.

Resultados y discusión

En el IAF no observó diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en el ciclo 2018, pero si en el 2019 (Cuadro 7), donde los valores más altos (≥ 3.94) se presentaron en los sitios con asociación con orientación norte así como en los sitios con monocultivo de maíz, exceptuando el monocultivo de maíz convencional (3.86), el valor más bajo se presentó en la asociación con maíz HS2 orientación sur (1.97). De acuerdo con Antonietta *et al.* (2018), quienes estudiaron la variación genotípica en el perfil de intercepción de luz y senescencia foliar frente al aumento de la densidad de plantas de maíz, el IAF alcanzado en la floración aumentó con la densidad de población (IAF=4.17 para 6 plantas m^{-2} y de 7.5 con 14 plantas m^{-2}). Lo anterior contrasta con lo encontrado por Bareiro *et al.* (2019), los cuales al evaluar cinco densidades de plantas por hectárea (80.0 mil, 72.7 mil, 66.7 mil, 61.5 mil y 53.3 mil plantas ha^{-1}), resultó un IAF mayor en la menor densidad de población. Esto puede ser debido a que las plantas de maíz con menor densidad de población cuentan con una mayor exposición a la radiación solar, ya que la luz es capaz de insidir en un mayor número de hojas, reflejándose en una mayor tasa fotosintética y un mayor IAF. Los datos evaluados en el presente estudio no mostraron una diferencia para el IAF entre las distintas densidades evaluadas, esto puede deberse a que las densidades evaluadas no fueron tan contrastantes como en los estudios mencionados. En cuanto a la influencia de los genotipos de maíz, Sánchez-Hernández *et al.* (2011) al evaluar el efecto de dos genotipos en los valores de IAF, indican que los IAF fueron mayores en un genotipo criollo (3.8 y 4.9) y los más bajos se registraron en un híbrido A7573 (2.3 y 2.4), esto difiere para los genotipos estudiados en el presente trabajo, ya que no se encontró diferencia estadística ($p \leq 0.05$) para el IAF.

Camacho *et al.* (1995) comentan que el IAF es un indicador biofísico importante ya que incide en la radiación fotosintéticamente absorbida, además de relacionarse con la producción de biomasa, lo cual se confirmó por Amado y Ortiz *et al.* (1998), al determinar la respuesta del híbrido de maíz 7251 a humedad del suelo (30, 60 y 90% de abatimiento), nitrógeno (100 a 550 $kg\ N\ ha^{-1}$) y densidad de población (45 000 a 125 000 plantas ha^{-1}), con un IAF de 2.2 a 4.8, mostrando que un IAF elevado, se relaciona con un mayor rendimiento de materia seca, mientras que IAF bajos resultan en menores cantidades de

biomasa. Lo anterior se puede observar con la BAT en el ciclo agrícola 2019, al tener valores más altos para las asociaciones de maíz-frijol con orientación norte respecto a la sur, al igual que el IAF, para ambos genotipos y densidades de frijol, lo cual contrasta de manera crítica con el valor más alto, encontrado en la asociación con maíz HS2 orientación norte (2759.89 g m⁻²), y el valor más bajo, en la asociación con maíz HS2 con orientación sur (1488.94 g m⁻²). Golik *et al.* (2011) encontraron valores similares (1719 g m⁻² a 2352 g m⁻²) de BAT para maíz híbrido, durante la madurez fisiológica, en condiciones de temporal. Por su lado los monocultivos de maíz tuvieron valores intermedios de BAT.

La biomasa foliar del maíz (BFm) no mostró diferencias para ninguno de los sitios en los dos ciclos agrícolas. Los rendimientos de maíz mostraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en ambos ciclos agrícolas, donde el maíz HS2 con manejo convencional obtuvo el valor más alto (17.75 t ha⁻¹ para 2018 y 17.77 t ha⁻¹ para 2019), mientras que el valor más bajo se obtuvo en el sitio con maíz HS2 en asociación con frijol en sistema MIAF, (7.91 t ha⁻¹ para 2018 y 7.50 t ha⁻¹ para 2019). De acuerdo con los datos del SIAP (2019) para el año 2018 el rendimiento promedio, en el estado de Puebla, para maíz de grano bajo temporal fue de 1.66 t ha⁻¹, y en condiciones de riego de 5.03 t ha⁻¹; todos los sitios evaluados en este estudio, mostraron rendimientos superiores. Para el frijol no se tuvo diferencias en los rendimientos, en ninguno de los dos años evaluados, con un rendimiento promedio de 1.26 t ha⁻¹ para 2018 y de 1.13 t ha⁻¹ para 2019, siendo ambos valores superiores al promedio, para condiciones de temporal en el estado de Puebla, en 2018 (0.69 t ha⁻¹) de acuerdo a la información del SIAP (2019).

La biomasa de raíces finas (BRF) no mostró diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$). Como es de esperarse, los valores de BRF fueron inferiores a los reportados en bosques pluviales tropicales por Quinto *et al.* (2016), con valores de 591 a 628 g m⁻². Por otro lado, Barrento y León (2005) no encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre el peso de raíces finas al considerar tres coberturas vegetales distintas.

Cuadro 7. Variables de campo evaluadas en los distintos sitios

Ciclo agrícola 2018						
Sitio	IAF	BFm	BAT	BRF	RENm	RENf
A1	4.77 a	371.07 a	1971.34 a	306.61 a	9.22 b	0.89 a
A2	4.02 a	349.75 a	1775.63 a	214.09 a	7.91 b	1.33 a
A3	3.75 a	300.37 a	1673.30 a	196.69 a	11.26 b	2.10 a
A4	4.36 a	357.60 a	1983.27 a	242.30 a	8.96 b	1.73 a
A5	3.47 a	255.09 a	2394.66 a	230.78 a	11.86 ab	1.53 a
A6	4.56 a	281.39 a	1748.62 a	191.40 a	9.12 b	0.42 a
A7	3.26 a	232.92 a	1904.74 a	171.76 a	10.05 b	1.43 a
A8	3.99 a	311.73 a	1387.23 a	223.02 a	8.42 b	0.67 a
M1	3.99 a	318.68 a	1634.85 a	116.86 a	9.55 b	N/A
M2	4.13 a	304.21 a	2262.37 a	285.33 a	9.99 b	N/A
M3	5.34 a	440.16 a	1989.52 a	196.57 a	17.75 a	N/A
M4	3.81 a	297.57 a	2072.42 a	89.82 a	13.37 ab	N/A
CV	13.41	15.65	13.94	54.34	14.92	71.47
MSD	2.195	197.891	1052.02	328.66	6.293	3.578
F	2.157	2.474	2.198	0.913	5.891	0.777
ANOVA	0.101	0.067	0.096	0.544	0.002**	0.624

Ciclo agrícola 2019						
Sitio	IAF	BFm	BAT	BRF	RENm	RENf
A1	3.59 ab	322.44 a	1488.94 d	296.71 a	7.50 c	0.65 a
A2	3.94 a	271.65 a	2759.89 a	205.78 a	7.66 c	0.63 a
A3	3.81 ab	306.57 a	1838.27 cd	187.43 a	11.19 bc	1.14 a
A4	4.31 a	316.96 a	2323.63 b	238.31 a	8.81 c	2.23 a
A5	3.49 ab	409.41 a	1531.00 d	225.36 a	12.03 abc	1.30 a
A6	4.08 a	251.84 a	2367.97 ab	192.37 a	8.76 c	0.43 a
A7	1.97 b	292.64 a	1609.72 d	168.94 a	9.80 c	2.03 a

A8	3.43 ab	311.39 a	1768.75 d	213.92 a	8.18 c	0.63 a
M1	4.28 a	361.30 a	1715.73 d	109.37 a	8.69 c	N/A
M2	4.23 a	344.33 a	1740.66 d	276.49 a	8.64 c	N/A
M3	4.75 a	298.53 a	2176.04 bc	183.67 a	17.77 a	N/A
M4	3.86 ab	358.70 a	2217.49 bc	98.31 a	16.15 ab	N/A
CV	12.88	12.95	5.15	49.67	14.76	68.03
MSD	1.949	164.748	401.305	314.58	6.115	3.045
F	4.003	2.138	30.95	0.906	9.432	1.587
ANOVA	0.012*	0.104	0.000***	0.482	0.000***	0.265

Medias con misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$); IAF: Índice de área foliar en $m^2 m^{-2}$; MFm: Biomasa foliar de maíz en $g m^{-2}$; BAT: Biomasa aérea total en $g m^{-2}$; BRF: Biomasa de raíces finas en $g m^{-2}$; RENm: Rendimientos de maíz en $t ha^{-1}$; RENf: Rendimientos de frijol en $t ha^{-1}$.

El peso de mil semillas tuvo valores superiores en el año 2019, con el mayor valor en el sitio M1 (545.48 g), mientras que el menor valor se registró en el año 2018 para el sitio A4 (318.38 g). Los valores de PMS mostraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre los sitios evaluados (Cuadro 8), donde los sitios con el genotipo nativo blanco presentaron mayores valores que aquellos que cuentan con el genotipo HS2. Hernández *et al.* (2014) registraron valores de hasta 792.2 g para el PMS en maíz Cacahuacintle, en la región de los Valles Altos de Puebla, con un valor mínimo de 122.9 g, y un promedio de 540.6 g.

Se mostraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) para el PH en ambos años evaluados (Cuadro 8). En el ciclo agrícola 2018, el monocultivo de maíz HS2 obtuvo mayor PH (81.21 $kg hL^{-1}$) y en el 2019 fue la asociación con maíz HS2 orientación norte (85.80 $kg hL^{-1}$). El PH es un indicador común para evaluar la calidad física de las semillas, ya que en un solo valor integra información sobre la calidad física del grano (Bautista-Ramírez *et al.*, 2019). Para que los granos de maíz se puedan considerar aptos para la industria de productos nixtamalizados, según la NMX-FF-034/1-SCFI-2002 (SAGARPA, 2002), estos deben contar con un PH superior a 74 $kg hL^{-1}$. En el año 2018, tres de los sitios con asociación maíz-frijol, tienen un PH de maíz ligeramente menor a 75 $kg hL^{-1}$ (A2 = 74.97; A5 = 73.51; A6 = 74.83 $kg hL^{-1}$), los demás sitios registraron valores mayores a 75 $kg hL^{-1}$. Para el año 2019 dos sitios con

asociación (A1 = 74.01 y A7 = 70.39 kg hL⁻¹) y dos sitios en monocultivo (M1 = 74.15 y M2 = 74.39), mostraron un PH con valores menores a 75 kg hL⁻¹.

Se han obtenido valores de PH superiores a 75.0 kg hL⁻¹ para distintas razas de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca, donde la raza “Chiquito” registró el valor más elevado (80.7 kg hL⁻¹) (Salinas *et al.*, 2013). Para Valles Altos de Puebla, Hernández *et al.* (2014), obtuvieron un PH de 60.5 kg hL⁻¹ para la raza Cacahuacintle, lo cual de acuerdo con Wellhausen *et al.* (1951) y Bonifacio *et al.* (2005), es algo común en esta raza de maíz. A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la mayor parte de los sitios evaluados cuentan con un PH mayor, y que si bien existen diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre los sitios, estas no revelan que el sistema MIAF refleje valores superiores del PH de maíz respecto al manejo en monocultivo.

Cuadro 8. Calidad física y fisiológica de maíz

Ciclo agrícola 2018				
Sitio	PMS	PH	PG	PV
A1	367.43 bc	78.23 abc	77.83 a	86.50 abc
A2	341.71 cd	74.97 cd	88.17 a	94.33 ab
A3	374.33 bc	76.76 bcd	86.83 a	92.67 ab
A4	318.38 d	75.71 bcd	93.33 a	96.83 a
A5	479.07 a	73.51 d	91.33 a	95.17 ab
A6	350.68 bcd	74.83 cd	89.17 a	93.33 ab
A7	478.03 a	78.39 abc	80.50 a	87.50 abc
A8	450.55 a	77.30 bcd	84.00 a	89.67 abc
M1	389.15 b	81.21 a	90.33 a	95.67 ab
M2	438.85 a	75.53 bcd	81.67 a	86.00 bc
M3	389.85 b	76.86 bcd	79.00 a	85.67 bc
M4	444.68 a	79.16 ab	78.33 a	81.67 c
CV	5.35	2.54	9.71	5.97
MSD	42.216	3.826	16.226	10.59

F	38.67	7.28	2.658	4.934
ANOVA	0.000***	0.000***	0.008**	0.000***
Ciclo agrícola 2019				
Sitio	PMS	PH	PG	PV
A1	404.05 ef	74.01 ef	91.67 abc	98.33 abc
A2	374.95 g	85.80 a	95.67 ab	98.67 ab
A3	423.79 de	82.94 ab	91.33 abc	99.33 abc
A4	341.63 h	75.71 de	94.00 abc	99.33 abc
A5	410.02 de	78.43 cd	82.33 c	92.00 c
A6	492.21 b	75.45 de	86.00 abc	92.33 abc
A7	505.61 a	70.39 f	98.67 a	100.00 a
A8	487.28 b	80.69 bc	98.00 ab	99.33 ab
M1	545.48 a	74.15 ef	98.67 a	99.67 a
M2	382.14 fg	74.39 ef	92.33 abc	96.67 abc
M3	429.24 cd	77.54 cde	95.33 ab	98.33 ab
M4	450.91 c	77.63 cde	85.33 bc	87.33 bc
CV	2.61	2.64	7.02	7.022
MSD	22.388	4.004	12.742	12.742
F	168.8	26.21	4.216	8.33
ANOVA	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); PMS: Peso de mil semillas en g; PH: Peso hectolítrico en kg hL^{-1} ; PG: Porcentaje de germinación; PV: Porcentaje de viabilidad.

La germinación es uno de los parámetros más importantes al momento de evaluar la calidad fisiológica de las semillas (Moreno *et al.*, 1988), en este sentido, no se mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el PG de las semillas de maíz para el año 2018, mientras que para 2019 si se observaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en el PG, siendo el valor más alto de 98.67%, en la asociación con maíz nativo blanco orientación sur (A7) y el monocultivo de maíz HS2 (M1), seguido de la asociación con maíz nativo blanco orientación norte (A8) con un 98%. Espinosa-Paz *et al.* (2016) registraron valores de 17 a 72% para el PG al evaluar y seleccionar variedades criollas de maíz colectadas en 2015 en áreas con sequía intraestival

recurrente en la Depresión Central de Chiapas. Por su lado, Mancera-Rico *et al.* (2019), obtuvieron un PG para el genotipo HS2 de 95.56% y para Cacahuacintle de 94.52%, esto al determinar el efecto de la compresión de ruptura sobre la calidad fisiológica de la semilla. Todos los sitios evaluados en el año 2019 obtuvieron un PG de por lo menos un 80%, al igual que para el año 2018, excepto por tres sitios, A1 = 77.83%; M3 = 79.00% y M4 = 78.33% (Cuadro 8). El porcentaje de viabilidad expuso valores superiores al 85%, a excepción del sitio M4 (81.67%) en el año 2018.

Conclusiones

El IAF y la BAT se mostraron afectadas por la orientación respecto al manzano en la asociación maíz-frijol, siendo en la orientación norte donde se obtuvieron valores más elevados.

La calidad física de las semillas de maíz fue más alta en los monocultivos y las asociaciones de maíz-frijol con el genotipo de maíz nativo blanco, mientras que la calidad fisiológica de las semillas varía entre el ciclo agrícola 2018 y 2019.

No existe evidencia para afirmar que el sistema MIAF favorece el PG o el PV de las semillas de maíz.

Literatura citada

Acosta, D., Acosta, G., Amador, R. y Padilla, R. (2008). Relación entre índice de área foliar y rendimiento en frijol bajo condiciones de secano. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 13-20.

Acosta, R. (2009). El cultivo de maíz, su origen y clasificación. El maíz en cuba. *Cultivos Tropicales*, 30(2), 113-120.

Amado, A. J. y Ortíz, F. P. (1998). Respuesta del maíz de riego a humedad del suelo, nitrógeno y densidad de población en Cuauhtémoc, Chihuahua. *Terra Latinoamericana*, 16, 239-245.

- Antonietta, M., Girón, P. y Guiamet, J. J. (2018). Respuesta a alta densidad en híbridos de maíz con senescencia foliar contrastante. Memoria técnica. (pp 1-3) Buenos Aires, Argentina. INTA EEA General Villegas.
- Antuna, O., Rincón, F., Gutiérrez, E., Ruiz, N. y Bustamante, L. (2003). Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(1), 11-17.
- Bareiro, C. L., Aguilera, L. A., Vega, S. A. y Velazquez, F. D. (2019). Productividad de maíz (*Zea mays* L.) en función de diferentes densidades de siembra. Eventos Científicos UNICAN, Bienal Científica Internacional UNICAN 2019. pp. 1-6.
- Barrento, S. L. y León, P. J. (2005). Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de ecosistemas forestales (*Pinus patula* Schldl y *Cham Cupressus lusitanica* Mill y *Quercus humboldtii* Bonpl.) de piedras blancas, Antioquia-Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín.*, 58(2), 2907-2929.
- Bautista-Ramírez, E., Salinas-Moreno, Y., Santracruz-Varela, A., Córdova-Téllez, L. y López-Sánchez, H. (2019). Toluqueño, Características físicas y químicas de la raza de maíz Palomero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(2), 441-446.
- Bonifacio, V. E. I., Salinas-Moreno, Y., Ramos, R. A. y Carrillo, O. A. (2005). Calidad pozolera en colectas de maíz Cacahuacintle. *Rev. Fitotec. Mex.*, 28, 253-260.
- Camacho, R., Garrido, O. y Lima, M. (1995). Caracterización de nueve genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz. *Scientia Agrícola*, 52(2), 294-298.
- CONABIO. (2011). *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Puebla: Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. pp. 438.
- D'Alessandro, R. y González, A. (2017). La práctica de la milpa, el ch'ulel y el maíz como elementos articuladores de la cosmovisión sobre la naturaleza entre los tzeltales de Tenejapa en los Altos de Chiapas. *Estudios de la cultura maya*, 50, 271-297.
- Damián, H., Romero, A., Ramírez, V., López, R., Parraguirre, L. y Cruz, L. (2014). Agricultura familiar y seguridad alimentaria entre productores de maíz de temporal en México. *Agroecología*, 9(1y2), 89-99.

- Damián-Huato, M., Cruz-León, A., Ramírez-Valverde, B., Romero-Arenas, O., Moreno-Limón, S. y Reyes-Muro, L. (2013). Maíz, alimentación y productividad: Modelo tecnológico para productores de temporal de México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 10, 157-176.
- Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1), 74-85.
- Ebel, R., Méndez, M., Brito, E. y Calix, D. (2013). Producción agroecológica de chile habanero en su asociación con la pitahaya. En R. Ebel, *Producción extensiva de chile habanero*. Saarbrücken, Alemania: Académica Española, pp. 35-58.
- Ebel, R., Pozas, C., Soria, M. y Cruz, G. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 149-160.
- Espinosa-Paz, N., Martínez-Sánchez, J., Ariza-Flores, R. y Cadena-Iñiguez, P. (2016). Germinación de semillas de variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) bajo déficit hídrico. En F. Gallardo-López. *Innovando el Agro Veracruzano 2016. Frente a los retos de la relación Sociedad-Naturaleza*. Veracruz, México: Colegio de Postgraduados, pp. 97-120.
- Fernández, S., Morales, C. y Gálvez, M. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Rev. Fitotecnia Mexicana*, 36, 275-283.
- Golik, S. I., Pardi, H. M. y Acciaresi, H. A. (2011). Biomasa aérea y radical en híbridos de maíz con senescencia retardada con dos arreglos espaciales y riego. *Agro-Ciencia, Rev. Chil. Cs. Agropec*, 27(2), 77-86.
- Gómez, B. (2016). Cosmovisión y ciencia del maíz mixe. *Ciencias*, 119, 50-57.
- Hernández, G. C., Salinas, M. Y., Antonio, L. P., Santacruz, V. A., Castillo, G. F. y Corona, T. T. (2014). Calidad pozolera en poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 703-716.
- Hernández-Ortiz, V., Morales, I. y Vergara, C. (2004). Detección de la población de *Rhagoletis pomonella* (Diptera: Tephritidae) durante la fructificación de *Crataegus mexicana* (Rosaceae) en Puebla, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 20(1), 119-129.

- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2016). *Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla*. Recuperado el 13 de agosto de 2017, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21074a.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Información de México, número de habitantes*. Recuperado el 24 de agosto de 2017, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/poblacion/>
- ISTA. (2014). *The germination test*. In *International Rules for Seed Testing*. International Seed Testing Association (ISTA), Bassersdorf, Switzerland. pp. 52.
- Juárez-Ramón, D. y Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 637-654.
- Mancera-Rico, A., Ramírez-Jaspeado, A., Venegas-Ordoñez, M., Vásquez-Siller, L. M. y Villaseñor-Perea, C. A. (2019). Daño tisular y calidad fisiológica en semillas de maíz sometidas a compresiones equivalentes a ruptura. *Rev. Fitotec. Mex.*, Vol. 42(4), 393-403.
- Moreno, M., Vázquez, M., Rivera, A., Navarrete, R. y Esquivel, F. (1988). Effect of seed shape and size on germination of corn (*Zea mays* L.) stored under adverse conditions. *Seed Sci. Technol*, 26, 439-448.
- Popinigis, F. (1985). *Fisiología da Semente*. 2ª Ed. Brasilia, Brasil: Agiplan.
- Quinto, M. H., Morenor, H. F., Caicedo, M. H. y Perez, L. M. (2016). Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del pacífico colombiano. *Colombia Forestal*, 19(1), 53-66.
- Rodríguez-Robayo, K., Méndez-López, M., Molina-Villegas, A. y Juárez, L. (2020). What do we talk about when we talk about milpa? A conceptual approach to the significance, topics of research and impact of the mayan milpa system. *Journal of rural Studies*, 77, 47-54.
- Rojas, M. (2019). Milpa intercalada con árboles frutales para la resiliencia al cambio climático, la sustentabilidad ambiental y la seguridad alimentaria en Nicaragua. *La Calera*, 19(32), 48-54.

- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2002). Norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados- para consumo humano - cereales - maíz blanco para proceso alcalino para tortilla de maíz y productos de maíz nixtamalizado- Especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas. SAGARPA. México, D.F., 18 p.
- Salinas, M. Y., Aragón, C. F., Ybarra, M. C., Aguilar, V. J., Altunar, L. B. y Sosa, M. E. (2013). Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(1), 23-31.
- Sánchez-Hernández, M. A., Aguilar-Martínez, C. U., Valenzuela-Jiménez, N., Sánchez-Hernández, C., Jiménez-Rojas, M. C. y Villanueva-Verduzco, C. (2011). Densidad de siembra y crecimiento de maíces forrajeros *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 281-295.
- Santiago-Mejía, E., Cortés-Flores, J., Turrent-Fernández, A., Hernández-Romero, E. y Jean-Contreras, D. (2008). Calidad de fruto del duraznero en el sistema milpa intercalada con árboles frutales en ladera. *Agricultura técnica en México*, 34(2), 159-166.
- SIAP. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*, SAGARPA. Recuperado el 05 de mayo de 2020, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Tanaka, A. y Yamaguchi, J. (2014). *Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz (4ª edición)*. Texcoco, Estado de México, México : Biblioteca Básica de Agricultura (bba), Serie Hojas Dispersas, Colegio de Postgraduados.
- Tinoco, A., Ramírez, F., Villarreal, F. y Ruíz, C. (2008). Arreglo espacial de híbridos de maíz, índice de área foliar y rendimiento. *Agricultura Técnica en México*, 33(3), 271-278.
- Turrent, F., Cortés, F., Espinosa, C., Hernández, R., Camas, G., Torres, Z. y Zambada, M. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185.

- Wellhausen, E. J., Roberts, L. M. y Hernández, X. E. (1951). Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Folleto Técnico Núm. 5. Oficina de Estudios Especiales. México. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F., 237 p
- Wilhelm, W., Ruwe, F. y Schlemer, M. (2000). Comparison of three leaf area index meters in corn canopy. *Crop Sci.*, 40, 1179-1183.

CAPÍTULO III. EFICIENCIA RELATIVA DE LA TIERRA, ATRIBUTOS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL SUELO EN LA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES

Resumen

El MIAF se considera como un tipo de sistema agroforestal (SAF) que busca aumentar los rendimientos de maíz y la productividad bajo temporal en pequeñas unidades de producción (< 5 ha). El objetivo del presente estudio fue medir atributos fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del suelo y su relación con la eficiencia relativa de la tierra (ERT) en los cultivos componentes del sistema MIAF durante dos ciclos de cultivo. Se definieron 12 sitios en sistema MIAF y cuatro en monocultivo, con dos genotipos de maíz, en cuatro fechas de muestreo durante dos ciclos de cultivo, para evaluar la calidad del suelo al determinar la densidad aparente, humedad gravimétrica, materia orgánica, carbono oxidable, cenizas base seca, materia orgánica total, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, pH, conductividad eléctrica, nutrientes, índice de calidad de suelo y la eficiencia relativa de la tierra (ERT). Se realizó un ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) así como un análisis de componentes principales (ACP) para generar un índice de calidad de suelo (ICS) a partir de un conjunto mínimo de datos (CMD). Los sitios evaluados bajo distintas condiciones de manejo mostraron diferencias en variables del suelo como densidad aparente, humedad gravimétrica, materia orgánica oxidable y total, así como en los nutrientes, conductividad eléctrica y pH, con los mejores valores en los sitios con MIAF, respecto a los monocultivos. El ICS presentó valores mas elevados para el ciclo 2018, en especial en los sitios con asociación maíz-frjol en sistema MIAF, siendo la densidad aparente, humedad gravimétrica, materia orgánica total, calcio y actinomicetos fijadores de nutrógeno los atributos con mayor importancia en el ACP. La ERT mostró valores superiores a la unidad para ambos genotipos de maíz en sistema MIAF, y ésta no se correlacionó con el ICS o algún atributo del suelo en el presente estudio.

Palabras clave: Calidad de suelo, Manzano, Microorganismos edáficos, Rendimientos, Sistema Agroforestal.

Abstract

The MIAF is considered as a type of agroforestry system (SAF) that seeks to increase corn yields and productivity under seasonal in small production units (<5Ha). The objective of this study was to measure physicochemical and microbiological attributes to determine the quality of the soil and its relationship with the relative efficiency of the soil (ERT) in the component crops of the MIAF system during two cultivation cycles. Twelve sites were defined in the MIAF system and four in monoculture, with two maize genotypes, on four sampling dates during two cultivation cycles, to evaluate the quality of the soil by determining the apparent density, gravimetric moisture, organic matter, oxidizable carbon, dry base ash, total organic matter, total nitrogen, inorganic nitrogen, pH, electrical conductivity, nutrients, soil quality index and relative soil efficiency (ERT). An ANOVA and Tukey test ($\alpha = 0.05$) as well as a principal component analysis (PCA) were performed to generate a soil quality index (ICS) from a minimum data set (CMD). The sites evaluated under different management conditions showed differences in soil variables such as bulk density, gravimetric moisture, oxidizable and total organic matter, as well as in nutrients, electrical conductivity and pH, with the best values in the sites with MIAF, with respect to monocultures. The ICS presented higher values for the 2018 cycle, especially in the sites with maize-bean association in the MIAF system, being the apparent density, gravimetric moisture, total organic matter, calcium and nitrogen-fixing actinomycetes the attributes with greater importance in the ACP. The ERT showed values higher than the unit for both maize genotypes in the MIAF system, and it was not correlated with the ICS or any soil attribute in the present study.

Key words: Apple tree, Agroforestry System, Edaphic microorganisms, Soil quality, Yields.

Introducción

La Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF) se plantea como una alternativa viable para la producción de maíz de manera sustentable bajo el paradigma de la agricultura tradicional (Turrent *et al.*, 2017). El MIAF es una propuesta tecnológica derivada de un sistema de

cultivo agroforestal originado por agricultores de raíz náhuatl de los valles altos de Puebla (Cadena-Iñiguez *et al.*, 2018).

El MIAF se considera como un tipo de sistema agroforestal, al estar intercaladas tres especies: maíz (mesocultivo), frijol (sotocultivo) y árboles frutales (epicultivo), siendo posible agregar o intercambiar algunas especies agrícolas, en una aguda interacción agronómica, jugando cada cultivo un papel específico en el agroecosistema (Ocampo y Urbina, 2017). Este sistema busca aumentar los rendimientos de maíz y productividad bajo temporal en superficies pequeñas (< 5Ha), además de mejorar los ingresos económicos de las familias campesinas y efectuar un manejo eficaz y conservación de la diversidad del agroecosistema (Juárez *et al.*, 2018). Algunos otros atributos del MIAF son la captura de carbono, la reducción de la erosión hídrica, aumentar la productividad y la materia orgánica, así como la estructura del suelo (Arriaga-Vázquez *et al.*, 2020).

En sistemas de cultivo múltiple la forma más frecuente de evaluar la productividad es mediante la eficiencia relativa de la tierra (ERT), siendo ésta la superficie de monocultivo necesaria para conseguir el rendimiento del cultivo múltiple al mismo nivel de insumos (Albino *et al.*, 2016). Si el resultado del cálculo de la ERT es mayor a 1.0 significa que el sistema de cultivo múltiple posee ventajas frente al monocultivo (Muñoz-Ruiz *et al.*, 2018). Dado que las propiedades físicas, químicas y biológicas tienen un impacto directo o indirecto en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, así como en sus rendimientos, la calidad de suelo se relaciona con la ERT, ya que ésta es una medición de la productividad de los cultivos en asociación respecto a los monocultivos en términos de superficie ocupada (Navarro *et al.*, 2008).

En México los suelos agrícolas se caracterizan por un bajo contenido de materia orgánica (<1%), menores al 0.07% para la zona del Plan Puebla, México, lo cual se refleja en una baja aportación de nitrógeno (Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016), es decir, la materia orgánica tiene una importancia desde el punto de vista nutrimental. Su importancia no se reduce solo al aspecto nutrimental, ya que un alto contenido de materia orgánica puede

mejorar las características físicas y químicas del suelo, además de ser fuente energética para la biota microbiana del suelo (Marañón y Madejón, 2017).

Los microorganismos tienen una función variada e importante en las cualidades del suelo de los agroecosistemas. Las comunidades microbianas brindan una serie de servicios ecosistémicos vitales para establecer agroecosistemas sustentables y resilientes (FAO, 2019). Algunos hongos y bacterias son capaces de transformar la materia orgánica en un aporte de nutrientes por medio de la mineralización, estos son conocidos como microorganismos solubilizadores (Cisneros *et al.*, 2016), mientras que otros, como las micorrizas, las cuales están asociadas a cerca del 90% de las plantas vasculares del planeta (Camargo-Ricalde *et al.*, 2012), o las bacterias diazotróficas, establecen relaciones simbióticas con las raíces de las plantas aportando agua, nutrientes y nutrimentos a éstas, siendo este proceso uno de los más importante en las plantas, solo después de la fotosíntesis (Pérez-Cordero *et al.*, 2014). La relación entre planta y microorganismos se puede traducir en la degradación de los nutrientes del suelo para que estos estén disponibles para las plantas, y así mejorar el retorno de energía a los agroecosistemas (Velázquez-Gurrola y Ramos-Alegría, 2015).

Otro grupo relevante de la población microbiana del suelo son los actinomicetos, los cuales son considerados como los microorganismos con mayor importancia como productores de metabolitos secundarios con actividad biológica (Mendoza-Herrera *et al.*, 2020), conformando entre el 20 y 60% de comunidad de microorganismos edáficos, pudiéndose encontrar en medios acuáticos dulces y marinos (Parada *et al.*, 2017), son organismos saprófitos que desempeñan un rol importante en el reciclaje de materia orgánica así como en el flujo de carbono (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016). La biota microbiana se adapta a las heterogéneas condiciones edafoclimáticas, la abundancia, función, diversidad y actividad de los microorganismos repercute en la mayor parte de los ciclos biogeoquímicos del suelo y por ende en su productividad (Gałązka y Furtak, 2019).

El concepto de calidad del suelo es funcional, incluye variables por las cuales se puede evaluar el estado del suelo, o indicadores de calidad de suelo (ICS), con los que se brinda información de los atributos, procesos y características del suelo (Bremer y Ellert, 2004).

Pueden ser medibles, reflejando la productividad o funcionalidad del suelo al ambiente, así mismo, son indicadores para determinar si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Ghaemi *et al.*, 2014). De igual manera, son fuente de información respecto al efecto de las prácticas agrícolas en la degradación o funcionamiento del suelo (Astier *et al.*, 2002). Dado que la cantidad de ICS que pueden evaluarse son bastante amplios, se suele usar una cantidad pequeña de indicadores representativos que conformen un conjunto mínimo de datos (CMD) (Govaerts *et al.*, 2006). Otro elemento para considerar es que los atributos del suelo no son permanentes y varían en tiempo y espacio, por lo que es importante evaluarlos en una dimensión temporal y espacial (Bautista-Cruz y Etchevers, 2014).

La evaluación del impacto de las tecnologías alternativas para lograr una agricultura sustentable puede proporcionar información sobre la efectividad de las prácticas agrícolas en la calidad del suelo, al igual que permitir la aplicación de medidas correctoras para optimizar la productividad de los cultivos (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2020). El objetivo del presente estudio fue medir atributos fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del suelo y su relación con la eficiencia relativa de la tierra (ERT) en los cultivos componentes del sistema MIAF durante dos ciclos de cultivo.

Materiales y métodos

El presente trabajo se llevó a cabo en una parcela establecida en el terreno de un productor cooperante en la localidad de San Mateo Capultitlán perteneciente al municipio de Huejotzingo, Puebla, en las coordenadas 19°12'12.2" N y 98°25'38.6" O. La parcela se encuentra en un suelo tipo fluvisol, bajo condiciones de temporal, a una altitud 2260 m., el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano [C(w)] con una precipitación anual que varía entre 900 y 1100 mm (INAFED, 2016).

La parcela se estableció bajo sistema MIAF en el año 2004, en un patrón de cultivo maíz-frijol asociado intercalado en manzanos y desde 2010 se implementó un experimento con milpa, en la cual se estudia la asociación maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), intercalada en árboles de manzano (*Malus domestica* Borkh) cv “agua nueva dos” en plena

producción conducidos en sistema Tatura modificado, distribuidos en cuatro hileras de 50 árboles separadas por callejones de 14.5 m destinados a los cultivos anuales, ocupando cada cultivo una tercera parte de la superficie sembrada en sistema MIAF. Dentro de la misma parcela también se estableció un sistema de monocultivo de maíz bajo las mismas condiciones que la asociación, y alledaña a un huerto de manzano en monocultivo. Adicionalmente se consideró un lote de una siembra de maíz en monocultivo con un manejo convencional para compararlo con los demás sitios (Cuadro 9 y Cuadro 23).

En el sistema MIAF se definieron diez sitios de muestreo, ocho para la asociación maíz-frijol y dos para los manzanos, para la huerto de manzano en monocultivo se tomaron dos sitios, en el monocultivo de maíz dos y en el lote de maíz en monocultivo convencional dos más, para un total de 16 sitios (Cuadro 9). En cada sitio se tomaron tres puntos de muestreo para conformar una muestra compuesta de suelo por sitio, teniendo un total de 48 puntos de muestreo y 16 muestras compuestas.

Cuadro 9. Sitios de muestreo evaluados en el sistema MIAF

Sitio	Sistema	Cultivo	Genotipo	OHA	DP
A1	MIAF	Maíz-Frijol	HS2-(R/M)	Sur	50mil-12.5mil
A2	MIAF	Maíz-Frijol	HS2-(R/M)	Norte	50mil-12.5mil
A3	MIAF	Maíz-Frijol	HS2-(R/M)	Sur	50mil-25mil
A4	MIAF	Maíz-Frijol	HS2-(R/M)	Norte	50mil-25mil
A5	MIAF	Maíz-Frijol	Nativo blanco	Sur	50mil-12.5mil
A6	MIAF	Maíz-Frijol	Nativo blanco	Norte	50mil-12.5mil
A7	MIAF	Maíz-Frijol	Nativo blanco	Sur	50mil-25mil
A8	MIAF	Maíz-Frijol	Nativo blanco	Norte	50mil-25mil
FM1	MIAF	Manzano	Agua nueva 2	Sur	694
FM2	MIAF	Manzano	Agua nueva 2	Norte	694
FS1	Monocultivo	Manzano	Agua nueva 2	Sur	694
FS2	Monocultivo	Manzano	Agua nueva 2	Norte	694
M1	Monocultivo	Maíz	HS2	N/A	50mil

M2	Monocultivo	Maíz	Nativo blanco	N/A	50mil
M3	Monocultivo	Maíz	HS2	N/A	60mil
M4	Monocultivo	Maíz	Nativo blanco	N/A	60mil

OHA: Orientación del cultivo respecto a la hilera de árboles; DP: Densidad de población; R/M: Frijol rojo y mantequilla; N/A: No aplica.

Se realizaron dos muestreos de suelo para el ciclo agrícola 2018 y dos para 2019, siendo un total de cuatro fechas de muestreo: 13 de julio de 2018 (en verano, cuando el maíz se encontraba en hoja bandera), 15 de noviembre de 2018 (en otoño, cuando el maíz alcanzó la madurez fisiológica), 21 de marzo de 2019 (en primavera, previo a la siembra) y 08 de julio de 2019 (en verano, cuando el maíz se encontraba en hoja bandera). Los muestreos de suelo se realizaron de acuerdo con la norma oficial mexicana para muestreo y análisis de suelos (NOM-021-RECNAT-2000), la toma de muestra fue mediante una barrena cilíndrica a una profundidad de 15 cm, obteniendo un total de 3 kg por muestra compuesta. De la muestra de suelo inalterada se determinó densidad aparente (DA) y humedad gravimétrica (%w), posteriormente las muestras se codificaron y fueron secadas a temperatura ambiente durante 72 h para luego ser trituradas y tamizadas a través de una columna de tamices para pruebas físicas, marca MONT INOX con cinco filtros de aberturas diferentes (0.8407 mm, 0.4191 mm, 0.250 mm, 0.1499 mm, 0.0737 mm), conservando el suelo de los tamices de 0.841 mm y 0.250 mm para determinar las propiedades fisicoquímicas (Cuadro 10). Cabe mencionar que para la determinación de nitrógeno inorgánico y la abundancia de los grupos microbianos se conservaron las muestras húmedas a una temperatura de 4°C.

Cuadro 10. Métodos de laboratorio para determinar propiedades fisicoquímicas del suelo

Propiedades	Clave	Unidad	Métodos
Densidad aparente	DA	g mL ⁻¹	Método del cilindro de volumen conocido
Humedad gravimétrica	W	%	Por unidad de masa de suelo
Materia orgánica oxidable	MOO	%	Walkley y Black (1934) (NOM-021-RECNAT-2000)
Carbono orgánico	CO	%	A partir del %MOO al dividirlo por el factor 1.724 de Van Benmelen (Jackson, 1964)
Cenizas base seca	CBS	%	(NMX-AA-18-1984)

Materia orgánica total	MOT	%	(NMX-AA-18-1984)
Nitrógeno total	NT	%	Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000)
Nitrógeno inorgánico	NI	mg kg ⁻¹	micro-Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000)
pH	pH	1:2	(NOM-021-RECNAT-2000)
Conductividad eléctrica	CE	mS cm ⁻¹	(NOM-021-RECNAT-2000)
NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	ppm	Kit Laquatwin
Na ⁺	Na ⁺	ppm	Kit Laquatwin
Ca ²⁺	Ca ⁺⁺	meq L ⁻¹	Kit Laquatwin
K ⁺	K ⁺	ppm	Kit Laquatwin

Se determinó la abundancia de seis grupos microbiológicos: actinomicetos totales (ACT), actinomicetos fijadores de nitrógeno (ACFN), hongos (H), levaduras (L), bacterias totales (BT) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Todas las determinaciones se realizaron por duplicado, los primeros cinco grupos se determinaron por cuenta en placa; colocando 10 gramos de suelo húmedo de cada muestra en 90 mL de agua peptonada y se realizaron diluciones decimales (NOM-110-SSA1-1994). La siembra en placa fue por expansión con 200 µL de la dilución 10⁻³ a 10⁻⁶.

Para actinomicetos y bacterias totales se utilizó el medio de cultivo agar nutritivo (Evangelista *et al.*, 2017). En actinomicetos fijadores de nitrógeno se utilizó el medio formulado Ashby (Pérez-Corral *et al.*, 2015), y para levaduras y hongos el medio de agar papa dextrosa (NOM-111-SSA1-1994). Las bacterias se incubaron a 37°C; los demás grupos a 28°C, durante 48 horas, a excepción de los hongos que se incubaron por 120 horas. La determinación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares se realizó según Alarcón y Ferrera (1999) y De la Rosa-Mera *et al.* (2012). Para ello, se diluyó suelo húmedo en agua destilada (12.5:1) para cada muestra, se tamizó y se obtuvo el sobrenadante por filtración con papel filtro Whatman No 3. Cada papel filtro se guardó en refrigeración a 4°C, a continuación, se contabilizaron las esporas con un microscopio estereoscópico. Las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas se realizaron en la unidad de laboratorios del Colegio de Postgraduados, Campus Puebla.

Se estableció un bioensayo espontáneo de arvenses de acuerdo con Hosoya y Sugiyama (2017). Para ello se colocaron 400 mL de agrolita como sustrato inerte y 400 mL de suelo de cada muestra en macetas de plástico de 1000 mL, realizando tres repeticiones por cada muestra. Inicialmente cada maceta se irrigó con 200 mL de agua corriente, posteriormente se mantuvieron con 150 mL de agua cada tres días para permitir el crecimiento de arvenses, todas las macetas se colocaron en invernadero. Una vez completados 60 días del establecimiento del bioensayo se procedió a cuantificar la abundancia y riqueza de especies de arvenses de cada muestra.

Se calculó un índice de calidad del suelo de acuerdo con lo propuesto por Andrews *et al.* (2002), para ello se realizaron tres pasos: 1) análisis de componentes principales (ACP) a partir de los atributos de suelo, 2) seleccionar los atributos con mayor varianza con el fin de establecerlos como variables de análisis y formar un conjunto mínimo de datos (CMD), 3) normalizar las variables con el fin de transformarlas en indicadores de los cuales se construye el índice de calidad del suelo. Para la selección del CMD se realizó un ACP con los promedios de las variables de los cuatro muestreos de suelo y se tomaron los componentes principales que explicaran 70% de la variabilidad y con un valor propio >1 . Posteriormente se seleccionaron los atributos con mayor aporte de cada uno de los componentes al considerar aquellos con vectores propios $\geq |0.3|$.

Una vez definido el CMD, para definir los indicadores de calidad de suelo (ICS) y los valores asociados se utilizó la metodología establecida por Cantú *et al.* (2007), en la cual se establecen límites máximos (I_{\max}) y mínimos (I_{\min}) para cada uno de los atributos seleccionados del CDM. Dado que existen diversas vías para establecer dichos límites en suelos agrícolas, en el presente estudio se establecieron considerando las condiciones ideales para el establecimiento de los cultivos y las condiciones edafoclimáticas de la región de estudio.

Los valores de los indicadores fueron normalizados utilizando una escala de 0 a 1, de manera que los ICS con un valor cercano a uno reflejan una alta calidad y aquellos cercanos a cero una baja calidad (

Cuadro 11), el valor máximo del indicador I_{\max} (valor normalizado $V_n = 1$) representa el valor ideal que se busca alcanzar o la situación ideal de calidad de suelo, mientras que el valor mínimo del mismo I_{\min} (valor normalizado $V_n = 0$) refleja la situación de calidad de suelo mínima aceptable (Cantú *et al.*, 2007). Para los datos obtenidos se modificó la escala propuesta por Cantú *et al.* (2007), considerando lo establecido por Estrada-Herrera *et al.* (2017), donde se consideran dos clases adicionales para cada indicador, una clase mayor a la unidad y una menor a cero, esto por el amplio rango de valores que presentaron los indicadores generados para los sitios evaluados en el presente estudio (Cuadro 11).

Cuadro 11. Clases de calidad de suelo

Clases de calidad	Escala
Exceso	1.00 – 1.30
Muy alta calidad	0.80 - 1.00
Alta calidad	0.60 - 0.79
Moderada calidad	0.40 - 0.59
Baja calidad	0.20 - 0.39
Muy baja calidad	0.00 - 0.19
Déficit	-1.00 – 0.00

El valor normalizado de los ICS se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$V_n = (I_m - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

Dónde, V_n : valor normalizado del indicador; I_m : medida experimental del atributo considerado como indicador; I_{\min} : valor mínimo del atributo considerado como indicador; I_{\max} : valor máximo del atributo considerado como indicador. El indicador de calidad de suelo por sitio se obtuvo al promediar los valores normalizados de los ICS del CMD.

En los árboles de manzana en sistema MIAF y en monocultivo, se contabilizó el número total de frutos por árbol previo a la cosecha por medio de un contador manual. Con el fin de estimar

el rendimiento se pesaron, usando una báscula digital con capacidad de 4 kg, seis frutos de tamaño medio (80 a 100 g) de la rama sur y seis frutos de la rama norte, por árbol, de tres árboles por sitio. Para los cultivos anuales, una vez el maíz alcanzó la madurez fisiológica, se tomaron ocho plantas de maíz por sitio, de las cuales se colectó el total de mazorcas y vainas de frijol para registrar el número de éstas, así como el peso húmedo de grano, posteriormente se tomó una muestra de grano y se secó en una estufa de circulación de aire forzado a 105°C hasta peso constante, con el fin de ajustar el porcentaje de humedad y poder estimar los rendimientos.

La eficiencia relativa de la tierra (ERT) se calculó para los cultivos en sistema MIAF al ser comparados con los monocultivos, por medio de la siguiente ecuación (Francis *et al.*, 1982):

$$ERT = RMi/RMu + RFi/RFu + RGi/RGu$$

Dónde: ERT = Eficiencia relativa de la tierra; RMi, RFi, RAFi = Rendimiento del maíz, frijol y árbol frutal intercalados; RMu, RFu, RAFu = Rendimiento del maíz, frijol y árbol frutal en monocultivo.

Dado que en el presente estudio el sistema MIAF cuenta con tres cultivos: maíz frijol y manzano; cada cultivo abarca una tercera parte de la superficie del terreno, por lo que una $ERT \leq 0.33$ refleja que el sistema MIAF no cuenta con ninguna ventaja, en cuanto a rendimiento, sobre el monocultivo de la especie a comparar, y una $ERT \geq 0.33$ representa lo contrario. Si se compara el sistema MIAF contra el sistema en monocultivo una $ERT \geq 1$ significa una ventaja para el MIAF, ya que se requiere menor superficie de cultivo para obtener los mismos rendimientos que en el monocultivo. Para identificar diferencias en los atributos físicoquímicos del suelo entre los sitios de muestreo, se sometieron los datos a un análisis de varianza (ANOVA), y a continuación una comparación de medias por medio de la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para cada muestreo de suelo para identificar las variables con mayor importancia. Se correlacionaron con los valores de ICS y ERT del MIAF, para ambos genotipos de maíz, en los dos ciclos de cultivo. El paquete utilizado fue R (R-Core-Team, 2018).

Resultados y discusión

Los atributos fisicoquímicos del suelo estudiados mostraron diferencias en los sitios evaluados en el sistema MIAF o (Cuadro 12, Cuadro 13, Cuadro 14, Cuadro 15). En la interpretación de los atributos del suelo evaluados se utilizó lo propuesto por Catellanos *et al.* (2000). Los valores de densidad aparente registrados para los sitios evaluados en las diferentes fechas de muestreo variaron entre 0.92 a 1.81 g mL⁻¹, siendo los sitios en sistema MIAF los que mostraron valores más altos, y los sitios con monocultivo los valores más bajos. La humedad gravimétrica presentó su valor más alto (23.33%) en el sitio con maíz en monocultivo con manejo convencional, en el muestreo de primavera 2019, como un dato excepcional, ya que los valores más altos de humedad gravimétrica a lo largo de las distintas fechas de muestreo se presentaron en los sitios con manzano, independientemente si estaban en sistema MIAF o en monocultivo, lo anterior concuerda con Martínez-González *et al.* (2010), los cuales comentan que el tipo de cobertura vegetal influye en la humedad del suelo, en especial en temporada de secas, siendo los sitios sin cobertura vegetal los que pierden más humedad, en comparación con aquellos sitios con arbustos o algunas especies de árboles.

El porcentaje de materia orgánica oxidable alcanzó sus valores más altos en la segunda fecha de muestreo (otoño 2018), en los sitios con manzano (1.21 a 2.56%), tanto MIAF como monocultivo, y algunos con asociación maíz-frijol en sistema MIAF (1.91 a 2.38%), mientras que los valores más bajos se mostraron en el cuarto muestreo (verano 2019), con el valor más bajo (0.03%) en el sitio con maíz nativo blanco en monocultivo, seguido del maíz nativo blanco en asociación (0.60%). En general los valores de MOO fueron bajos a moderadamente bajos (Estrada-Herrera *et al.*, 2017), lo cual confirma lo expuesto por Juárez *et al.* (2008) sobre el bajo contenido de materia orgánica en la región (< 2%), esto debido a la extracción constante de nutrientes mediante la producción de granos y forraje durante más de 500 años, lo cual se puede evidenciar al comparar los valores de materia orgánica de las zonas boscosas que aún se preservan (5 a 7.3%). El carbono oxidable presentó el mismo comportamiento de la MOO.

El porcentaje de materia orgánica total, en las cuatro fechas de muestreo, presentó sus valores medios $\approx 3.5\%$, mientras que los valores bajos se consiguieron en los cultivos anuales, principalmente en los monocultivos ($\geq 2.31\%$), y los valores altos en los sitios con manzano, MIAF y monocultivo ($\leq 5.81\%$), siendo común encontrar valores de materia orgánica más altos en cultivos perennes que anuales según Medina-Méndez *et al.*, (2017), esto debido a la mayor adición de residuos orgánicos, mediante la agregación de distintas estructuras vegetales, como raíces finas, ramas y hojarasca (Cusack *et al.*, 2009), así como una menor roturación del suelo (McFarlane *et al.*, 2009).

Los valores de nitrógeno total fueron altos ($> 0.25\%$), teniendo sus mayores picos en el tercer muestreo (primavera 2019), lo cual podría ser explicado por la presencia de Fabaceas, las cuales tienen la capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico (González *et al.*, 2011), sin embargo, en los sitios con monocultivo de maíz también se consiguieron valores elevados de nitrógeno total. Fassbender (1987) documentó que es común una variación alta en el contenido de nitrógeno total en suelo (0.2 a 0.7%), lo cual puede explicar los valores obtenidos en los distintos sitios evaluados.

El nitrógeno inorgánico presentó valores bajos a medios (15.00 a 23.32 mg kg⁻¹), exceptuando algunos sitios con manzano y maíz en monocultivo, con el valor más bajo (1.17 mg kg⁻¹) en el sitio con maíz nativo blanco en monocultivo del segundo muestro (otoño 2018). Lo anterior contrasta con lo mostrado por Arriaga-Vázquez *et al.* (2020), quienes estudiaron los atributos químicos y biológicos en tres sistemas de manejo: MIAF, tradicional y labranza de conservación, en el municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, encontrando valores promedio de 79 mg kg⁻¹ de nitrógeno inorgánico, lo cual puede deberse al gradiente edafoclimático del área de estudio del presente trabajo y el mencionado.

Los valores de pH reflejan una naturaleza moderadamente alcalina (pH 7.31 a 7.70), lo cual coincide con lo asentado por González *et al.* (2018), quienes registraron un pH moderadamente alcalino (7.6) en suelos de la región de Huejotzingo en cultivos de chile poblano. La CE tiene valores bajos (0.42 a 1.16 mS/cm), posiblemente relacionado a que se

evaluó un sistema en condiciones de temporal o secano, descartando la presencia de salinidad antrópica a causa del riego (Lamz y González, 2013).

La concentración de calcio fue de baja a media para los distintos sitios y fechas de muestreo (5.33 a 20.67 meq L⁻¹) y el potasio mostró valores bajos (≤ 33.76 ppm) en todos los sitios y fechas de muestreo.

Cuadro 12. Atributos fisicoquímicos muestreo 1 (hoja bandera de maíz, verano 2018)

Sitio	DA g mL ⁻¹	w%	% MOO	% CO	% CBS	% MOT	% NT
A1	1.36 abc	5.11 ef	1.24 c	0.72 c	97.23 a	2.76 e	0.23 c
A2	1.32 abc	7.53 bcdef	1.92 a	1.11 a	95.70 a	4.30 ab	0.65 ab
A3	1.22 abc	9.49 abcde	1.61 ab	0.94 ab	92.36 a	4.18 abc	0.70 a
A4	1.33 abc	7.81 bcdef	1.35 bc	0.78b c	96.93 a	3.07 cde	0.51 abc
A5	1.35 abc	7.19 cdef	1.20 c	0.69 c	97.23 a	2.77 e	0.37 bc
A6	1.41 ab	6.06 cdef	0.74 d	0.43 d	97.25 a	2.75 e	0.47 abc
A7	1.42 a	4.96 ef	1.33 bc	0.77 bc	97.04 a	2.96 de	0.47 abc
A8	1.41 ab	4.32 f	1.37 bc	0.80 bc	97.13 a	2.88 de	0.51 abc
FM1	1.30 abc	10.72 abc	1.09 cd	0.63 cd	96.83 a	3.68 bcde	0.42 abc
FM2	1.34 abc	10.07 abcd	1.13 c	0.65 c	96.67 a	3.33 bcde	0.37 bc
FS1	1.13 c	13.60 a	1.05 cd	0.61 cd	95.98 a	4.02 abcd	0.47 abc
FS2	1.16 bc	12.15 ab	1.92 a	1.11 a	95.05 a	4.95 a	0.37 bc
M1	1.25 abc	9.13 abcde	1.90 a	1.10 a	95.79 a	4.21 abc	0.70 a
M2	1.46 a	5.76 def	1.20 c	0.70 c	97.30 a	2.70 e	0.51 abc
M3	1.39 abc	8.22 bcdef	1.63 ab	0.95 ab	96.28 a	3.72 bcde	0.47 abc
M4	1.14 c	13.08 a	1.81 a	1.05 a	96.64 a	3.36 bcde	0.61 ab
C.V.	6.449	18.320	8.642	1.888	11.175	1.888	21.822
MSD	0.256	4.688	0.368	0.211	5.506	1.166	0.324
ANOVA	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.194	0.000***	0.000***

Sitio	NI mg kg ⁻¹	pH	CE (mS/cm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)	K ⁺ (ppm)
A1	15.16 a	7.31 d	0.65 de	31.33 f	31.33f	6.00 g	34.00a
A2	18.66 a	7.45 cd	0.49 ef	32.67 f	32.67 f	9.33 efg	6.67 c
A3	16.33 a	7.49 bc	0.53 ef	50.33 cd	50.33 cd	15.33 bc	7.00 c
A4	22.17 a	7.56 abc	0.64 de	66.00 a	66.00 a	13.67 cd	7.00 c

A5	13.99 a	7.63 ab	0.43 f	39.33 ef	39.33 ef	9.33 efg	7.00 c
A6	15.17 a	7.62 ab	0.61 de	52.67 bcd	52.67 bcd	12.33 cde	7.00 c
A7	14.00 a	7.70 a	0.50 ef	31.67 f	31.67 f	7.33 fg	3.00 fg
A8	20.98 a	7.52 bc	0.95 bc	60.00 abc	60.00 abc	11.67 cde	2.00 g
FM1	22.17 a	7.56 abc	0.48 ef	18.67 g	18.67 g	9.00 efg	2.67 fg
FM2	5.83 a	7.56 abc	0.78 cd	47.00 de	47.00 de	14.67 c	6.00 cd
FS1	5.83 a	7.56 abc	1.16 a	60.67 ab	60.67 ab	19.00 ab	18.33 b
FS2	9.32 a	7.57 abc	1.01 ab	68.67 a	68.67 a	20.67 a	6.33 c
M1	16.33 a	7.60 abc	0.19 g	59.67 abc	59.67 abc	11.67 cde	4.67 de
M2	17.49 a	7.58 abc	0.44 f	51.67 bcd	51.67 bcd	15.00 bc	4.00 ef
M3	15.16 a	7.58 abc	0.44 f	52.00 bcd	52.00 bcd	10.33 def	2.67 fg
M4	18.66 a	7.69 a	0.42 f	54.33 bcd	54.33 bcd	12.67 cde	2.00 g
C.V.	39.215	0.733	9.223	6.967	6.967	10.690	6.648
MSD	18.347	0.168	0.170	10.239	10.239	4.005	1.514
ANOVA	0.045*	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); DA: Densidad aparente; w: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; A1: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A2: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A3: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A4: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A5: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A6: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A7: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A8: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; FM1: Frutal en MIAF orientación sur; FM2: Frutal en MIAF orientación norte; FS1: Frutal en monocultivo orientación sur; FS2: Frutal en monocultivo orientación norte; M1: Maíz HS2 en monocultivo; M2: Maíz nativo blanco en monocultivo; M3: Maíz HS2 en monocultivo con manejo convencional ; M4: Maíz nativo blanco en monocultivo con manejo convencional.

Cuadro 13. Atributos fisicoquímicos muestreo 2 (madurez fisiológica de maíz, otoño 2018)

Sitio	DA g mL ⁻¹	w%	% MOO	% CO	% CBS	% MOT	% NT
A1	1.44 abcd	9.63 abc	0.55 f	0.32 f	96.91 bcde	3.09 fghi	0.56 a
A2	1.22 bcd	9.94 abc	2.13 ab	1.24 ab	95.29 i	4.71 b	0.84 a
A3	1.36 abcd	7.62 abc	2.38 a	1.38 a	96.15 gh	3.85 cd	0.93 a
A4	1.13 d	14.29 a	2.36 a	1.36 a	96.63 def	3.37 efg	0.47 a

A5	1.74 a	4.49 c	1.91 abc	1.11 abc	97.35 ab	2.65 ij	0.75 a
A6	1.34 abcd	9.57 abc	0.68 f	0.39 f	97.03 bcd	2.97 ghi	0.47 a
A7	1.36 abcd	9.13 abc	0.76 ef	0.44 ef	97.63 a	2.37 j	0.65 a
A8	1.48 abcd	10.83 abc	0.82 ef	0.48 ef	97.11 bc	2.89 hi	1.03 a
FM1	1.34 bcd	12.24 ab	1.21 def	0.70 def	96.23 fgh	3.77 cde	0.47 a
FM2	1.36 abcd	12.27 ab	1.39 cde	0.81 cde	96.50 efg	3.50 def	0.47 a
FS1	1.55 abc	7.47 abc	1.52 bcd	0.88 bcd	95.79 h	4.21 c	0.47 a
FS2	1.18 cd	9.62 abc	2.56 a	1.49 a	94.19 j	5.81 a	0.56 a
M1	1.38 abcd	8.12 abc	1.07 def	0.62 def	96.91 bcde	3.09 fghi	0.75 a
M2	1.50 abcd	5.87 bc	0.57 f	0.33 f	97.68 a	2.32 j	1.03 a
M3	1.43 abcd	10.21 abc	0.76 f	0.44 ef	96.74 cde	3.26 fgh	0.93 a
M4	1.59 ab	6.14 bc	1.06 def	0.62 def	97.28 ab	2.72 ij	0.84 a
C.V.	9.31	27.68	16.06	15.98	0.156	4.418	38.73
MSD	0.394	7.721	0.660	0.381	0.456	0.456	0.821
ANOVA	0.000***	0.004**	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.071
A							

Sitio	NI mg kg ⁻¹	pH	CE (mS/cm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)	K ⁺ (ppm)
A1	15.16 a	7.59 a	0.94 b	43.67 f	23.67 a	12.33 c	33.67 a
A2	16.33 a	7.40 a	1.08 a	31.67 g	22.33 a	12.00 c	6.33 cd
A3	13.99 a	7.57 a	0.45 gh	54.67 cd	23.33 a	14.00 bc	6.00 cd
A4	14.00 a	7.49 a	0.65 def	72.33 a	24.00 a	14.33 abc	7.33 c
A5	22.17 a	7.57 a	0.55 efg	66.33 ab	23.33 a	14.00 bc	7.00 cd
A6	18.67 a	7.42 a	0.45 gh	72.00 a	24.00 a	18.67 a	5.33 cd
A7	18.66 a	7.47 a	0.44 h	74.67 a	26.00 a	16.00 abc	5.67 cd
A8	22.17 a	7.44 a	0.75 cd	62.33 bc	20.67 a	14.00 bc	5.67 cd
FM1	15.17 a	7.53 a	0.64 bc	45.88 g	24.79 a	13.79 ab	5.96 cd
FM2	11.66 a	7.46 a	0.62 ef	39.00 fg	24.33 a	12.67 bc	6.67 cd
FS1	16.32 a	7.57 a	0.45 gh	46.00 def	23.33 a	13.00 bc	13.33 b
FS2	16.32 a	7.63 a	0.93 b	53.00 de	26.67 a	12.67 bc	7.00 cd
M1	5.83 a	7.55 a	0.66 de	43.00 f	22.00 a	11.67 c	5.00 cd
M2	1.17 a	7.42 a	0.55 fg	74.67 a	26.67 a	15.33 abc	3.00 d
M3	9.33 a	7.54 a	0.46 gh	34.00 g	25.67 a	12.00 c	3.33 cd
M4	17.48 a	7.52 a	0.64 ef	44.33 ef	25.33 a	16.00 abc	3.00 d
C.V	50.413	1.41	5.49	5.52	12.40	10.39	17.38
MSD	22.361	0.320	0.108	8.827	9.051	4.435	4.099

ANOV 0.105 0.240 0.000*** 0.000*** 0.530 0.000*** 0.000***
 A

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); DA: Densidad aparente; w: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; A1: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A2: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A3: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A4: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A5: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A6: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A7: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A8: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; FM1: Frutal en MIAF orientación sur; FM2: Frutal en MIAF orientación norte; FS1: Frutal en monocultivo orientación sur; FS2: Frutal en monocultivo orientación norte; M1: Maíz HS2 en monocultivo; M2: Maíz nativo blanco en monocultivo; M3: Maíz HS2 en monocultivo con manejo convencional ; M4: Maíz nativo blanco en monocultivo con manejo convencional.

Cuadro 14. Atributos fisicoquímicos muestreo 3 (previo a la siembra, primavera 2019)

Sitio	DA g mL ⁻¹	w%	% MOO	% CO	% CBS	% MOT	% NT
A1	1.47 a	8.84 cdef	0.57 d	0.33 c	97.23 abcd	2.77 defg	1.21 bcd
A2	1.37 a	7.02 def	0.69 d	0.40 c	96.89 abcd	3.11 defg	1.40 abc
A3	1.29 ab	11.74 bcde	0.59 d	0.34 c	96.46 bcd	3.54 def	1.59 ab
A4	1.35 ab	8.01 cdef	0.74 d	0.43 c	97.37 abc	2.63 efg	1.03 cd
A5	1.50 a	15.19 abcd	1.47 abc	0.85 ab	97.69 a	2.31 g	1.21 bcd
A6	1.45 a	9.08 cdef	1.58 abc	0.92 ab	97.52 a	2.48 g	1.31 abcd
A7	1.59 a	2.39 f	1.28 c	0.74 b	97.44 ab	2.56 fg	1.03 cd
A8	1.59 a	5.68 ef	1.523 abc	0.88 ab	97.64 a	2.36 g	1.68 a
FM1	1.31 ab	15.73 ab	1.58 ab	0.85 a	96.33 d	3.67 d	1.06 d
FM2	1.46 a	19.12 ab	1.63 c	0.73 b	96.27 de	3.73 cd	0.93 d
FS1	1.30 ab	16.63 abc	1.63 abc	0.88 ab	94.90 fg	5.10 ab	1.12 cd
FS2	1.21 ab	19.08 ab	1.47 a	0.98 a	94.19 g	5.81 a	1.03 cd
M1	1.63 a	6.06 def	1.36 bc	0.79 ab	96.37 cd	3.63 de	0.93 d
M2	1.42 a	11.68 bcde	1.26 bc	0.79 ab	97.09 abcd	2.91 defg	1.21 bcd
M3	1.31 ab	11.51 bcdef	1.39 abc	0.82 ab	95.29 ef	4.71 bc	1.12 cd
M4	0.92 b	23.33 a	1.44 abc	0.84 ab	97.27 abcd	2.73 defg	1.21 bcd
C.V.	10.77	25.22	8.55	8.53	0.35	10.08	11.82

MSD	0.450	9.249	0.325	0.188	1.031	1.031	0.424
ANOVA	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

Sitio	NI mg kg ⁻¹	pH	CE (mS/cm)	NO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺
				(ppm)	(ppm)	(meq L ⁻¹)	(ppm)
A1	18.67 a	7.48 a	0.47 c	32.00 g	18.61 d	5.33 g	11.33 b
A2	22.16 a	7.48 a	0.59 abc	36.33 fg	19.83 cd	8.33 efg	7.00 cd
A3	22.16 a	7.65 a	0.68 abc	40.33 f	25.33 abc	13.33 cd	6.67 cde
A4	17.50 a	7.49 a	0.83 a	60.33 b	28.17 ab	13.33 cd	7.33 c
A5	18.65 a	7.46 a	0.69 abc	39.00 f	29.67 a	8.33 efg	7.67 c
A6	13.99 a	7.48 a	0.51 bc	51.00 de	21.00 cd	12.00 cdef	6.67 cde
A7	19.82 a	7.60 a	0.57 bc	25.00 h	22.33 bcd	8.00 fg	3.67 efg
A8	11.66 a	7.42 a	0.49 bc	61.00 b	25.67 abc	11.33 cdef	2.33 g
FM1	17.50 a	7.51 a	0.58 bc	51.54 i	25.71 ab	14.50 defg	6.04 fg
FM2	12.83 a	7.60 a	0.60 abc	46.33 e	29.67 a	14.33 c	6.00 cdef
FM3	17.50 a	7.40 a	0.46 c	62.33 b	21.00 cd	19.33 ab	16.67 a
FM4	15.16 a	7.57 a	0.64 abc	71.67 a	22.33 bcd	20.00 a	7.67 c
M1	23.32 a	7.49 a	0.73 ab	58.67 bc	25.67 abc	12.67 cde	3.67 efg
M2	15.16 a	7.57 a	0.61 abc	52.00 d	28.17 ab	15.33 bc	4.67 cdefg
M3	9.33 a	7.45 a	0.47 c	49.00 de	29.67 a	12.00 cdef	4.00 defg
M4	7.00 a	7.47 a	0.59 abc	54.00 cd	21.00 cd	12.67 cde	2.67 g
C.V.	44.516	1.412	14.413	3.941	8.441	11.724	16.329
MSD	22.105	0.321	0.257	5.647	6.329	4.348	3.121
ANOVA	0.315	0.224	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); DA: Densidad aparente; w: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; A1: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A2: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A3: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A4: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A5: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A6: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A7: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A8: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; FM1: Frutal en MIAF orientación sur; FM2: Frutal en MIAF orientación norte; FS1: Frutal en monocultivo orientación sur; FS2: Frutal en monocultivo orientación norte; M1: Maíz HS2 en monocultivo; M2: Maíz nativo blanco en monocultivo; M3: Maíz HS2 en monocultivo con manejo convencional ; M4: Maíz nativo blanco en monocultivo con manejo convencional.

Cuadro 15. Atributos fisicoquímicos muestreo 4 (hoja bandera de maíz, verano 2019)

Sitio	DA g mL ⁻¹	w%	% MOO	% CO	% CBS	% MOT	% NT
A1	1.33 defg	5.44 ef	2.05 a	1.19 a	95.96 ab	4.04 ab	0.28 d
A2	1.62 abcd	6.30 def	1.56 ab	0.90 ab	95.62 a	4.38 a	0.61 abc
A3	1.65 abc	7.35 cdef	1.79 a	1.04 a	96.03 ab	3.97 ab	0.65 ab
A4	1.67 abc	6.39 def	1.79 a	1.04 a	96.79 ab	3.21 ab	0.47 bcd
A5	1.74 ab	5.79 ef	0.60 de	0.35 de	96.54 ab	3.46 ab	0.37 bcd
A6	1.81 a	4.78 f	0.77 cde	0.45 cde	96.66 ab	3.34 ab	0.47 bcd
A7	1.50 abcde	4.83 f	0.95 cd	0.55 cd	96.79 ab	3.21 ab	0.42 bcd
A8	1.47 bcdef	5.71 ef	0.70 cde	0.41 cde	95.91 ab	4.09 ab	0.51 abcd
FM1	1.27 efg	10.37 abc	0.82 de	0.48 de	95.82 ab	4.18 ab	0.48 bcd
FM2	1.35 cdefg	9.99 abcd	0.61 de	0.35 de	95.62 a	4.38 a	0.33 cd
FM3	1.12 g	13.53 a	1.08 bcd	0.62 bcd	96.20 ab	3.80 ab	0.47 bcd
FM4	1.19 efg	12.15 ab	1.19 bc	0.69 bc	96.20 ab	3.80 ab	0.42 bcd
M1	1.26 efg	9.13 bcde	1.05 bcd	0.61 bcd	96.15 ab	3.85 ab	0.79 a
M2	1.43 bcdefg	5.83 ef	0.30 e	0.18 e	96.17 ab	3.83 ab	0.51 abcd
M3	1.36 cdefg	8.22 cdef	0.77 cde	0.45 cde	96.92 b	3.08 b	0.42 bcd
M4	1.18 fg	13.40 a	0.96 cd	0.56 cd	96.12 ab	3.88 ab	0.51 abcd
C.V.	7.36	15.66	16.46	16.58	0.45	11.46	20.82
MSD	0.319	3.838	0.523	0.306	1.312	1.312	0.300
ANOVA	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.009**	0.009**	0.000***

Sitio	NI mg/kg	pH	CE (mS/cm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)	K ⁺ (ppm)
A1	15.74 a	7.31 e	0.65 d	32.00 f	27.67 abcd	5.33 h	10.00 a
A2	20.42 a	7.45 de	0.48 g	33.33 f	29.00 a	9.00 fgh	6.67 bcd
A3	17.48 a	7.47 cd	0.51 efg	49.33 cde	21.00 cde	14.00 bcd	6.33 cde
A4	22.40 a	7.54 abcd	0.62 de	64.67 a	21.67 bcde	13.33 cde	6.67 bcd
A5	14.70 a	7.62 abc	0.43 g	39.67 ef	24.67 abcde	9.00 fgh	6.00 cdef
A6	15.85 a	7.62 abc	0.61 def	52.33 bcd	28.33 ab	12.00 cdef	7.00 abc
A7	14.45 a	7.69 a	0.50 efg	30.67 f	29.33 a	7.00 gh	3.67 defg
A8	21.00 a	7.53 bcd	0.93 b	59.33 abc	25.33 abcde	11.00 cdefg	2.00 g
FM1	14.02 a	7.56 bcd	0.64 g	51.13 f	25.44 abc	14.08 efg	4.79 g
FM2	6.88 a	7.57 abcd	0.77 c	46.00 de	30.00 a	14.33 bc	5.67 cdef
FM3	6.88 a	7.59 abcd	1.06 a	60.33 ab	20.67 bcde	18.00 ab	9.67 ab

FM4	9.21a	7.49 cd	1.01 ab	68.00 a	21.67 de	20.67 a	6.33 cde
M1	17.37 a	7.57 abcd	0.48 fg	59.00 abc	25.67 abcde	12.67 cdef	4.00 cdefg
M2	17.03 a	7.55 abcd	0.45 g	51.67 bcd	27.67 abcd	14.67 bc	4.00 cdefg
M3	13.99 a	7.56 abcd	0.44 g	52.33 bcd	29.67 a	10.00 defg	3.33 efg
M4	19.82 a	7.65 ab	0.42 g	53.33 bcd	20.00 e	13.00 cdef	3.00 fg
C.V.	34.689	0.680	6.758	7.005	9.384	11.395	19.030
MSD	16.688	0.155	0.126	10.211	7.290	4.169	3.121
ANOVA	0.023*	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); DA: Densidad aparente; w: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; A1: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A2: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A3: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A4: Maíz HS2 asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A5: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A6: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=12.5 mil plantas por hectárea) con orientación norte; A7: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación sur; A8: Maíz nativo blanco asociado con frijol (densidad=25 mil plantas por hectárea) con orientación norte; FM1: Frutal en MIAF orientación sur; FM2: Frutal en MIAF orientación norte; FS1: Frutal en monocultivo orientación sur; FS2: Frutal en monocultivo orientación norte; M1: Maíz HS2 en monocultivo; M2: Maíz nativo blanco en monocultivo; M3: Maíz HS2 en monocultivo con manejo convencional ; M4: Maíz nativo blanco en monocultivo con manejo convencional.

El ACP generó cinco componentes que representan el 75.85% de la varianza total de los datos originales (Cuadro 16). Del primer componente principal (CP1), que representa el 28.89% de la varianza explicada, las variables con mayor contribución son: MOT (-0.34), DA (0.32), CBS (0.32), W (-0.31) y Ca (-0.30). En el CP2 (17.04%) los ACFN (-0.36) y el Na (0.32) son los de mayor contribución. Y en el CP3 (12.35) los H (-0.45), el HA (0.40), el pH (-0.39) y las L (-0.36) mostraron los coeficientes más altos.

Cuadro 16. Resultados del ACP de los promedios de ICS del ciclo agrícola 2018 y 2019

Comp. principales	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
-------------------	-----	-----	-----	-----	-----

Valores propios	6.07	3.58	2.59	2.19	1.50
%Varianza explicada	28.89	17.04	12.35	10.42	7.16
%Varianza acumulada	28.89	45.92	58.27	68.69	75.85
Vectores propios	1	2	3	4	5
DA	0.32	0.09	0.18	0.13	0.17
W	-0.31	0.05	-0.11	-0.18	-0.08
MOO	-0.28	-0.23	0.00	0.25	-0.21
CO	-0.27	-0.24	-0.02	0.28	-0.18
CBS	0.32	0.20	0.05	-0.08	0.06
MOT	-0.34	-0.20	-0.06	0.00	0.00
NT	0.07	0.00	0.08	0.53	-0.15
NI	0.17	-0.23	0.15	0.35	-0.22
pH	-0.05	0.27	-0.39	0.07	-0.19
CE	-0.28	-0.12	0.26	-0.04	0.28
NO3	-0.18	0.23	-0.11	0.29	0.41
Na	-0.17	0.32	-0.07	0.22	0.29
Ca	-0.30	0.13	-0.21	0.10	0.29
K	0.00	-0.28	0.17	-0.35	0.34
ACT	0.18	-0.27	-0.13	0.18	0.29
ACFN	0.09	-0.36	-0.10	0.04	0.06
L	0.14	-0.28	-0.36	-0.08	0.00
H	0.01	-0.20	-0.45	-0.19	-0.01
BT	0.13	-0.23	-0.29	0.17	0.31
HMA	-0.23	0.05	0.03	-0.18	-0.23
HA	-0.19	-0.20	0.40	0.02	0.14

DA: Densidad aparente; W: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; NO3: Nitratos; Na: Sodio; Ca: Calcio; K: Potasio; ACT: Actinomicetos totales; ACFN: Actinomicetos fijadores de nitrógeno; L: Levaduras; H: Hongos; BT: Bacterias totales; HMA: Hongos micorrízicos arbusculares; HA: Índice de Shannon para arvenses.

Como se observa en el Cuadro 16, la materia orgánica es una variable con una contribución importante en el CP1, esto concuerda con lo expuesto por Villarreal-Núñez *et al.* (2013), los cuales obtuvieron un índice de calidad de suelo en áreas cultivadas con banano en pánama, encontrando que la materia orgánica es uno de indicadores más importantes al evaluar la calidad de suelo. Se aprecia que los grupos microbiológicos contribuyen en los CP2 y CP3, donde el CP2 (17.04%) se representa en mayor parte por los actinomicetos fijadores de nitrógeno y el CP3 (12.35) por, hongos y levaduras. Como comentan Julca-Otiniano *et al.* (2006) los microorganismos tienen un rol fundamental en distintos procesos del suelo, por lo que es de esperarse que tengan una contribución importante en el ACP. Por su lado el nitrógeno total y nitrógeno inorgánico no contribuyeron a ninguno de los tres CP que mayor explican la varianza. La densidad aparente y la humedad gravimétrica contribuyen relevantemente al CP1.

El CMD, derivado del ACP a partir de los valores promedios de los atributos de suelo evaluados en los cuatro muestreos de suelo (Cuadro 17), se conformó por 14 indicadores, eliminando el porcentaje de cenizas, a pasar de cumplir con los requisitos para formar parte del CDM, por tener colinealidad con el porcentaje de materia orgánica total (Cuadro 18). En la Figura 16 se puede apreciar el comportamiento de los atributos de suelo evaluados en los dos principales componentes, al considerar los cuatro muestreos de suelo, destacando la carga positiva para el primer componente principal de la densidad aparente, las cenizas y en menor medida los actinomicetos y nitrógeno inorgánico, mientras que del lado negativo la mayor carga se encuentra en la materia orgánica total, la humedad gravimétrica y la presencia de calcio. Para el componente principal dos se observa, del lado positivo, una mayor carga para el sodio y en menor medida el pH, los nitratos y las cenizas, en el lado negativo, los actinomicetos fijadores de nitrógeno, lo cual también se puede observar en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Resultados ACP de los promedios de ICS

Componentes	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
-------------	-----	-----	-----	-----	-----

Principales					
Val.p	6.07	3.58	2.59	2.19	1.50
% Var	28.89	17.04	12.35	10.42	7.16
% Var.acu	28.89	45.92	58.27	68.69	75.85
Vec.p	1	2	3	4	5
DA	0.32*	0.09	0.18	0.13	0.17
W	-0.31*	0.05	-0.11	-0.18	-0.08
MOT	-0.34*	-0.20	-0.06	0.00	0.00
NI	0.17	-0.23	0.15	0.35*	-0.22
pH	-0.05	0.27	-0.39*	0.07	-0.19
NO3	-0.18	0.23	-0.11	0.29	0.41*
Na	-0.17	0.32*	-0.07	0.22	0.29
Ca	-0.30*	0.13	-0.21	0.10	0.29
K	0.00	-0.28	0.17	-0.35	0.34*
ACFN	0.09	-0.36*	-0.10	0.04	0.06
L	0.14	-0.28	-0.36*	-0.08	0.00
H	0.01	-0.20	-0.45*	-0.19	-0.01
BT	0.13	-0.23	-0.29	0.17	0.31*
HA	-0.19	-0.20	0.40*	0.02	0.14

*Atributos seleccionados (vector propio $\geq | 0.3 |$) para formar el CMD; Val.p: Valores propios; %Var: Porcentaje de varianza explicada; %Var.acu: Porcentaje de varianza explicada acumulado; Vec.p: Vectores propios; DA: Densidad aparente; W: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; NO3: Nitratos; Na: Sodio; Ca: Calcio; K: Potasio; ACT: Actinomicetos totales; ACFN: Actinomicetos fijadores de nitrógeno; L: Levaduras; H: Hongos; BT: Bacterias totales; HMA: Hongos micorrízicos arbusculares; HA: Índice de Shannon para arvenses.

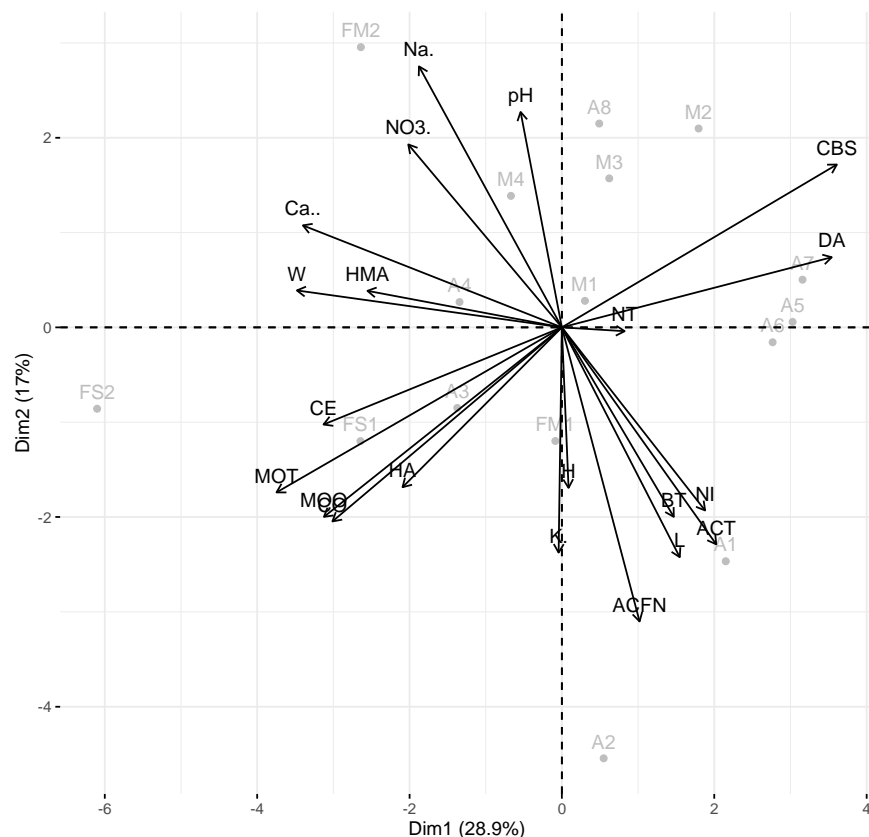


Figura 16. Distribución ortogonal del análisis de componentes principales (ACP) de los promedios de ICS para los cuatro muestreos de suelo

DA: Densidad aparente; W: Humedad gravimétrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono orgánico; CSB: Cenizas en base seca; MOT: Materia orgánica total; NT: Nitrógeno total; NI: Nitrógeno inorgánico; CE: Conductividad eléctrica; NO3: Nitratos; Na: Sodio; Ca: Calcio; K: Potasio; ACT: Actinomicetos totales; ACFN: Actinomicetos fijadores de nitrógeno; L: Levaduras; H: Hongos; BT: Bacterias totales; HMA: Hongos micorrízicos arbusculares; HA: Índice de Shannon para arvenses.

Cuadro 18. Indicadores propuestos para evaluar la calidad de suelos (ICS) a partir del CMD

Indicador	Unidad	Valor máximo (I_{max})	Valor mínimo (I_{min})
MOT	%	6.0	2.0
DA	$g\ mL^{-1}$	1.50	1.05
W	%	40	5
Ca	$meq\ L^{-1}$	500	220
ACFN	$UFC\ x\ 10^3\ g^{-1}\ suelo$	10,000.0	100.0
Na	ppm	391	92

H	UFC x 10 ³ g ⁻¹ suelo	1000.0	1.0
HA	-	0	2.5
pH	-	8.0	5.0
L	UFC x 10 ³ g ⁻¹ suelo	1,000.0	100.0
NI	mg kg ⁻¹	10	50
NO3	ppm	500	120
K	ppm	195	39
BT	UFC x 10 ³ g ⁻¹ suelo	10,000.0	100.0

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

La evaluación de la calidad de suelos de los sitios muestreados, considerando el número de indicadores mínimos o conjunto mínimo de datos (CMD) seleccionados, así como los valores únicos normalizados derivados para cada sitio evaluado (

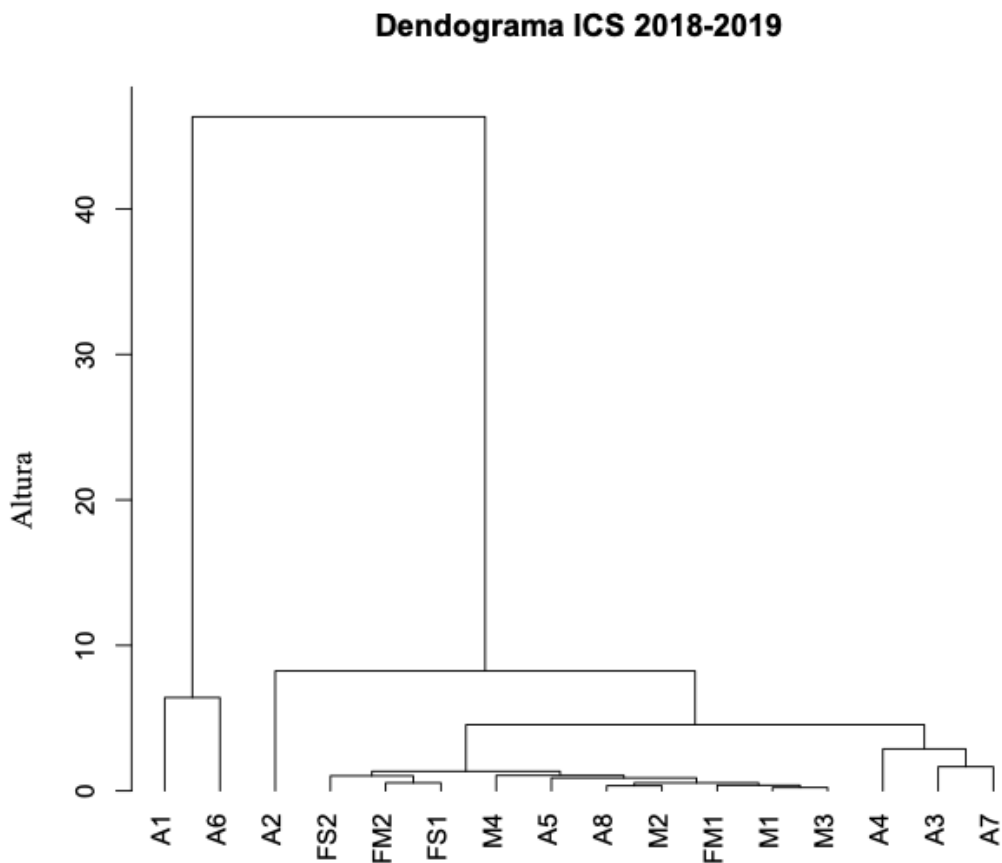


Figura 17. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.

Cuadro 19), mostró que el indicador que presentó un menor valor, en promedio para todos los sitios y todas las fechas de muestreo, fue la concentración de potasio (0.03), mientras que el valor más alto correspondió al pH (0.84). Los indicadores que presentaron mayor variación entre los ciclos agrícolas 2018 y 2019 fueron la abundancia de hongos (1.31 para 2018 y 0.14 para 2019) y levaduras (0.41 para 2018 y 0.01 para 2019) así como la diversidad de arvenses, medida por el índice de Shannon (0.48 para 2018 y 0.84 para 2019). Los demás indicadores presentaron valores similares en los dos años evaluados, con valores promedios para la concentración de potasio en la categoría de déficit. De humedad gravimétrica, calcio, sodio, nitrógeno inorgánico, actinomicetos fijadores de nitrógeno y bacterias totales en la categoría de muy baja calidad. De materia orgánica total, levaduras y nitratos en una clase de baja calidad. La densidad aparente, hongos y diversidad de arvenses como clase de alta calidad y el pH de muy alta calidad (

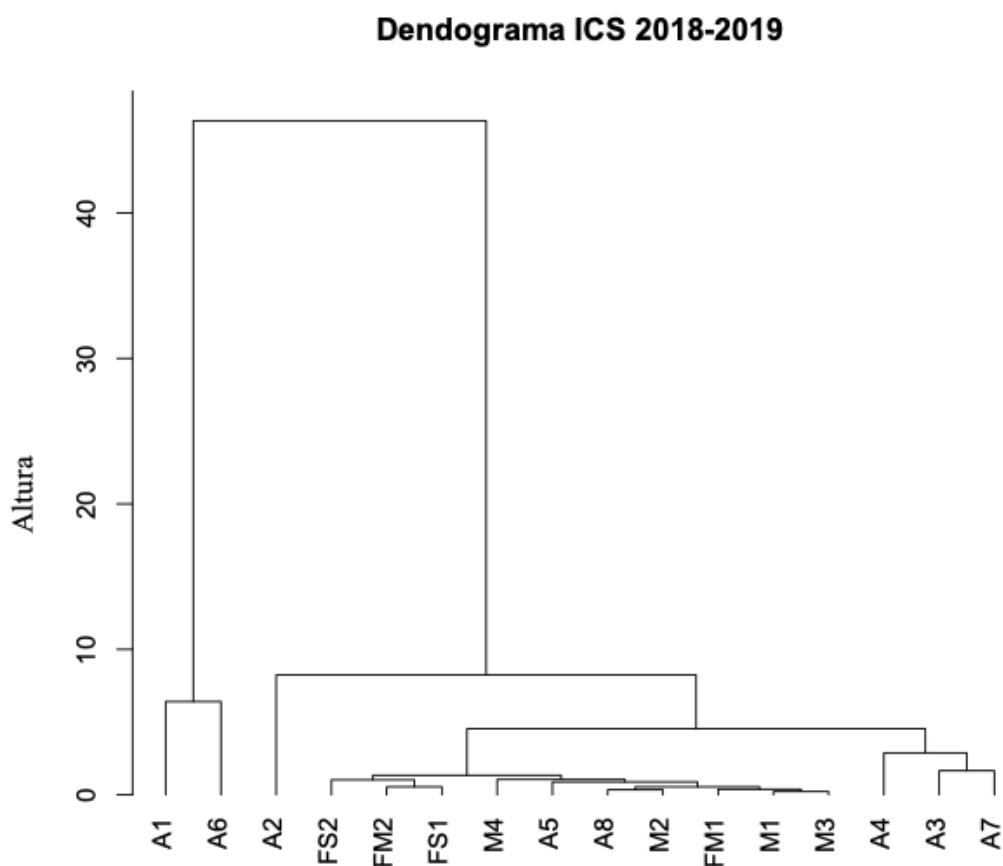


Figura 17. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.

Cuadro 19).

Los valores del índice de calidad de suelo para los sitios A1, A2, A4 y A6 se ubicaron en diferentes clases de calidad para el ciclo 2018 y 2019, mientras que los demás sitios mostraron valores similares para los dos años evaluados, con promedios para el sitio A1 ubicados en la categoría de moderada calidad y el sitio A6 en una alta calidad (Figura 17). Los demás sitios se ubicaron en la categoría de baja calidad (

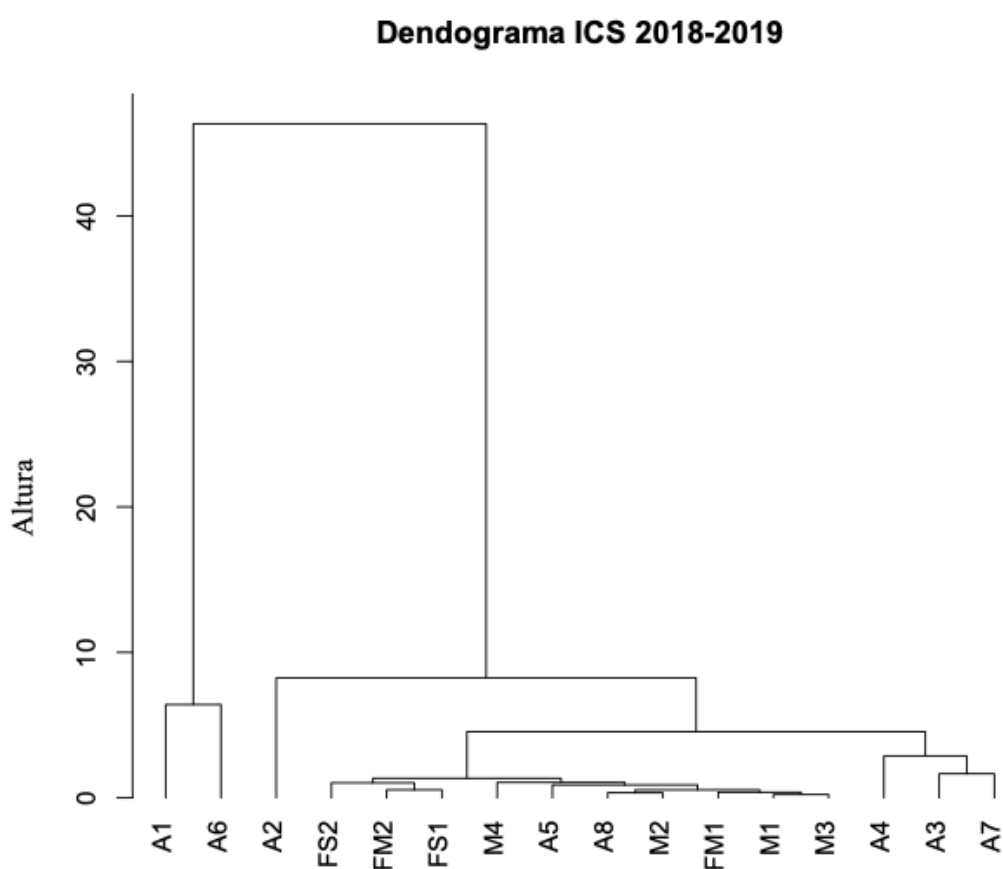


Figura 17. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.

Cuadro 19).

Dendograma ICS 2018-2019

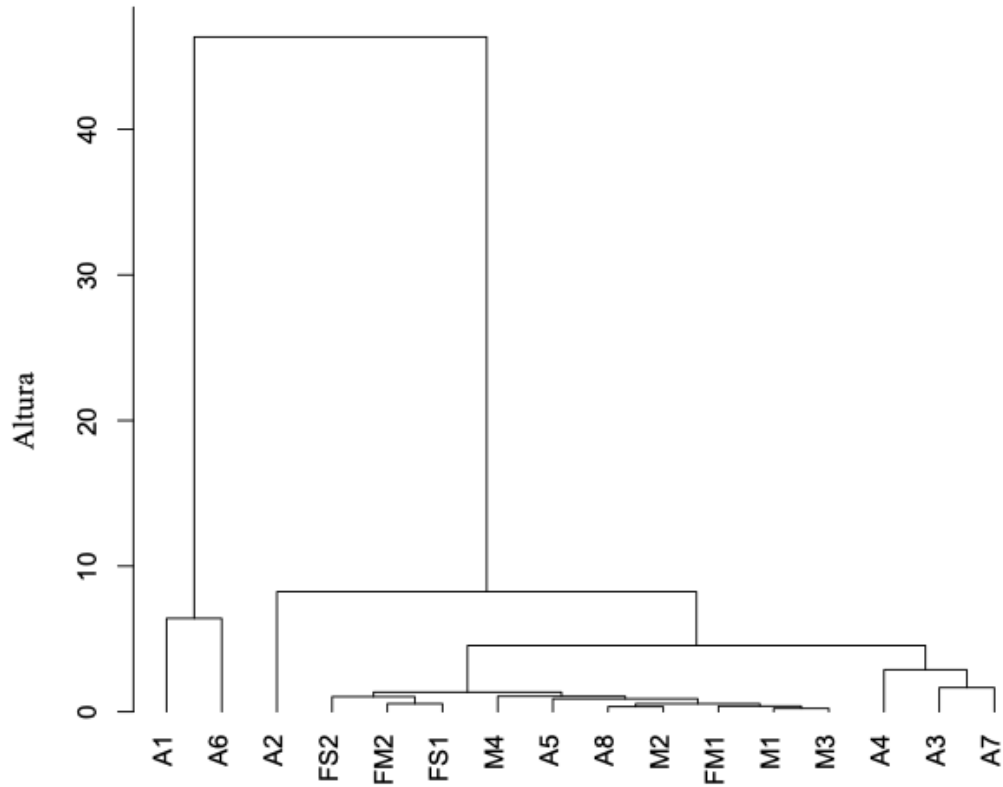


Figura 17. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.

Cuadro 19. Indicadores ICS para el ciclo agrícola 2018 y 2019

Valores promedios de ICS por indicadores para el ciclo agrícola 2018 y 2019

Sitio	MOT	DA	W	Ca	ACFN	Na	H	HA	pH	L	NI	NO3	K	BT	Media
A1	0.29	0.64	0.09	-0.27	0.04	0.08	3.65	0.70	0.81	0.08	0.15	0.14	0.46	0.03	0.49
A2	0.53	0.60	0.11	-0.10	1.32	0.07	0.44	0.73	0.81	0.43	0.23	0.13	-0.04	0.03	0.38
A3	0.47	0.60	0.16	0.23	0.01	0.05	0.48	0.74	0.85	0.48	0.19	0.32	-0.04	0.03	0.33
A4	0.27	0.58	0.16	0.19	0.04	0.21	1.28	0.70	0.84	0.35	0.23	0.55	-0.02	0.00	0.38
A5	0.20	0.97	0.13	-0.06	0.00	0.06	0.00	0.69	0.86	0.26	0.18	0.29	-0.03	0.06	0.26
A6	0.22	0.82	0.09	0.20	0.03	0.12	3.98	0.58	0.84	1.16	0.15	0.43	-0.04	0.06	0.62
A7	0.19	0.76	0.01	-0.10	0.01	0.07	0.98	0.53	0.87	0.91	0.17	0.22	-0.12	0.05	0.32
A8	0.26	0.79	0.07	0.07	0.00	0.08	0.00	0.70	0.83	-0.11	0.22	0.48	-0.15	0.02	0.23
FM1	0.46	0.46	0.29	0.13	0.02	0.12	0.07	0.71	0.85	-0.08	0.18	0.23	-0.09	0.03	0.24
FM2	0.43	0.60	0.31	0.21	0.01	0.17	0.23	0.73	0.85	-0.03	-0.02	0.27	-0.06	0.20	0.28

FS1	0.57	0.41	0.31	0.45	0.02	0.10	0.24	0.73	0.84	-0.03	0.04	0.44	0.21	0.27	0.33
FS2	0.77	0.24	0.33	0.54	0.01	0.07	0.02	0.70	0.85	-0.08	0.06	0.54	-0.03	0.02	0.29
M1	0.42	0.60	0.12	0.08	0.00	0.08	0.15	0.63	0.85	0.01	0.14	0.41	-0.11	0.02	0.24
M2	0.23	0.73	0.09	0.29	0.00	0.12	0.05	0.64	0.84	-0.02	0.07	0.44	-0.12	0.00	0.24
M3	0.42	0.59	0.18	0.01	0.02	0.13	0.11	0.53	0.84	0.05	0.05	0.30	-0.14	0.00	0.22
M4	0.29	0.28	0.36	0.18	0.01	-0.02	0.01	0.56	0.86	-0.03	0.14	0.36	-0.16	0.00	0.20
Media ICS	0.38	0.60	0.18	0.13	0.10	0.10	0.73	0.66	0.84	0.21	0.14	0.35	-0.03	0.05	0.32

MOT: Materia orgánica total; DA: Densidad aparente; W: Humedad gravimétrica; Ca: Calcio; ACFN: Actinomicetos fijadores de nitrógeno; Na: Sodio; H: Hongos; HA: Índice de Shannon para arvenses; L: Levaduras; NI: Nitrógeno inorgánico; NO3: Nitratos; K: Potasio; BT: Bacterias totales.

Los rendimientos de maíz en monocultivo, para ambos genotipos y en los dos ciclos agrícolas, alcanzaron alrededor de las ocho toneladas por hectáreas (7.92 a 8.51 t ha⁻¹), mientras que los rendimientos de maíz en bajo sistema MIAF, se acercaron a las nueve y media toneladas por hectáreas (8.79 a 9.87 t ha⁻¹). Osorio-García *et al.* (2015) comentan que los rendimientos promedios de maíz en la región del Valle de Puebla son superiores a 2.3 t ha⁻¹, con un potencial de 8 t ha⁻¹, por lo que, tanto en MIAF como en monocultivo, el maíz presentó altos rendimientos. Los rendimientos del cultivo de frijol en monocultivo dieron valores (1.12 a 2.01 t ha⁻¹) superiores al frijol en sistema MIAF (1.02 a 1.50 t ha⁻¹), comparado con un rendimiento promedio de la región de 0.67 t ha⁻¹ en condiciones de temporal (Garza-García *et al.*, 2010). Los rendimientos de manzano en monocultivo fueron inferiores (6.31 a 10.87 t ha⁻¹) al compararlo con el manzano en sistema MIAF (6.89 a 18.09 t ha⁻¹), comparado para el ciclo 2018, con un rendimiento de 5.26 t ha⁻¹ de manzana en el estado de Puebla (SIAP, 2020). Cabe mencionar que para el ciclo agrícola 2018, los rendimientos de manzano fueron inferiores que en 2019, asociado posiblemente a que las condiciones ambientales fueron más benignas para el manzano en el ciclo 2019, ya que las condiciones de manejo fueron las mismas en ambos años (Cuadro 20).

Cuadro 20. Rendimientos promedio y ERT en MIAF

Ciclo agrícola 2018

Cultivo	Maíz HS2			Cultivo	Maíz nativo blanco		
	MIAF	CS	ERP		MIAF	CS	ERP
	t 0.33 ha ⁻¹	t ha ⁻¹			t 0.33 ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Maíz	3.11	7.92	0.39	Maíz	3.29	8.49	0.39
Frijol	0.50	1.33	0.38	Frijol	0.34	2.01	0.17
Manzano	2.30	6.31	0.36	Manzano	2.30	6.31	0.36
ERT			1.14	ERT			0.92

Ciclo agrícola 2019

Cultivo	Maíz HS2			Cultivo	Maíz nativo blanco		
	MIAF	CS	ERP		MIAF	CS	ERP
	t 0.33 ha ⁻¹	t ha ⁻¹			t 0.33 ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Maíz	2.93	8.51	0.34	Maíz	3.23	8.51	0.38
Frijol	0.39	1.12	0.35	Frijol	0.37	1.12	0.33
Manzano	6.03	10.87	0.55	Manzano	6.03	10.87	0.55
ERT			1.25	ERT			1.26

MIAF: Rendimientos de MIAF se expresan sobre la base de un tercio de hectárea: t 0.33 ha⁻¹ que es el área efectiva ocupada por cada uno de los cultivos en el arreglo topológico del sistema MIAF; CS: Cultivo simple, los rendimientos de cultivo simple se expresan en t ha⁻¹, que es el área ocupada por cada especie; ERP: Eficiencia relativa parcial del cultivo, dividiendo el rendimiento en MIAF en un tercio de hectárea entre el rendimiento del cultivo simple en una hectárea; ERT: Eficiencia relativa de la tierra obtenida por la suma de las ERP de los tres cultivos, sotocultivo (frijol), mesocultivo (maíz) y epicultivo (manzano).

La ERT mostró valores superiores a la unidad, exceptuando el caso del sistema MIAF con maíz nativo blanco (ERT = 0.92), lo cual, al observar las eficiencias relativas parciales (ERP), se explica a los bajos rendimientos de frijol en sistema MIAF (ERP = 0.17) y no al maíz (ERP = 0.39) o manzano (ERP = 0.36). Al tener ERT con valores mayores a la unidad se puede afirmar que para obtener los mismos rendimientos del MIAF en monocultivo, se requiere una mayor superficie de cultivo (Cuadro 20). Torres *et al.* (2008), encontraron valores de ERT = 1.10 para un sistema MIAF con durazno en la región de Huejotzingo, Puebla en el año 2004, mientras que Muñoz-Ruíz *et al.* (2018) encontraron una ERT = 1.74

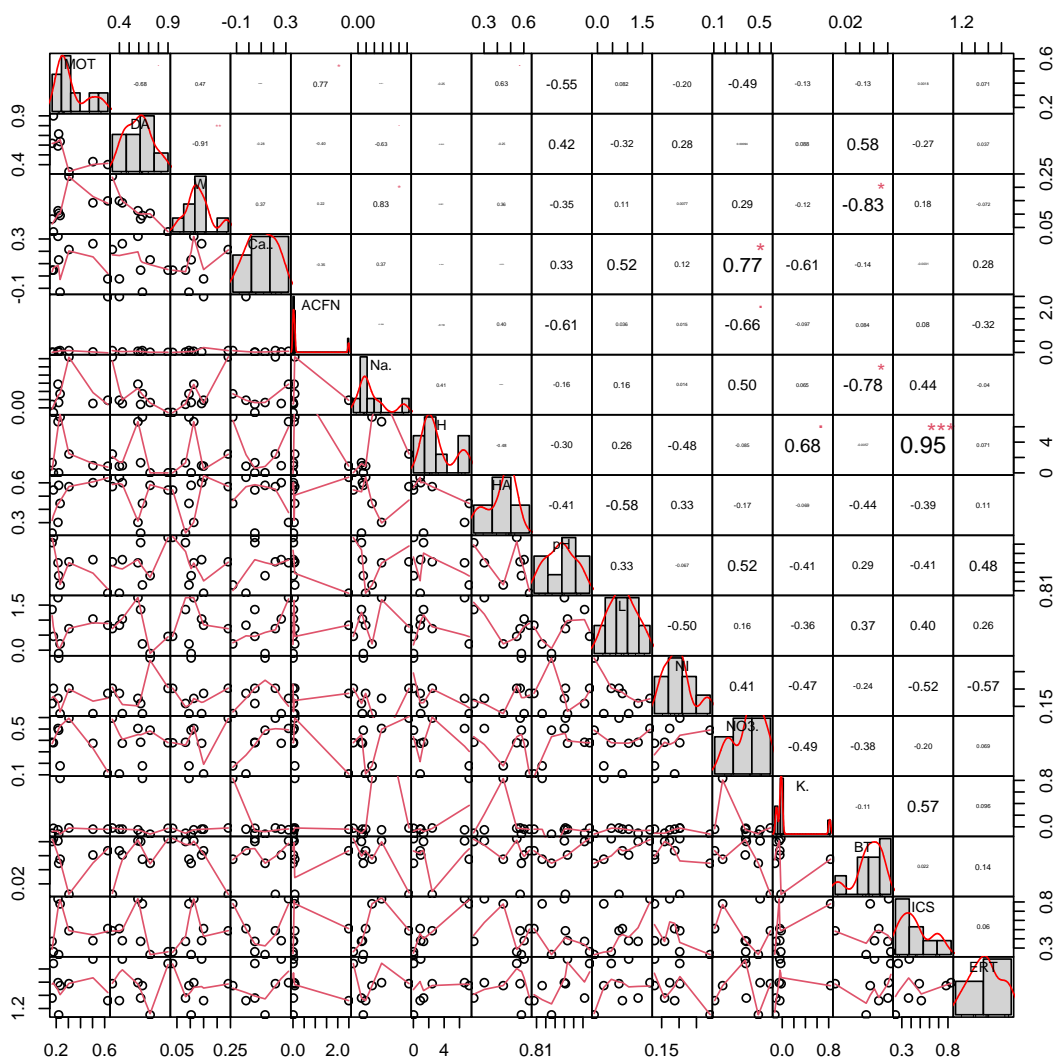
en 2015 y de 1.41 en 2016 en un sistema MIAF con manzano var. “Gala” en una comunidad mazahua del Estado de México.

No se encontró una correlación significativa para la ERT y el ICS, para el promedio de 2018 y 2019, de igual manera no se observó una correlación entre la ERT y algún atributo del suelo (Cuadro 21); de manera que, la correlación entre la ERT y el ICS no presento significancia estadística en los ciclos de cultivo evaluados. A diferencia de lo indicado por Navarro *et al.* (2008), quienes, al evaluar las propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de los cultivos de haba, maíz y frijol, en rotación con labranza de conservación, destacan al contenido de materia orgánica y la conductividad hidráulica saturada como los indicadores que determinan el rendimiento de los cultivos estudiados.

Sin embargo, de acuerdo con algunos autores como Sojka y Upchurch (1999) y Singer y Ewing (2000), el concepto de calidad edáfica suele ser subjetivo y se modifica de acuerdo con el contexto, por lo que se requiere un consenso de criterios de dicho concepto, así como definir su relevancia y medición. En este sentido Bautista *et al.* (2004) consideran que son pocos los estudios sobre calidad edáfica que abordan de manera objetiva y simultánea los posibles resultados tengan un carácter positivo o negativo, del total de indicadores utilizados en el estudio.

Es de resaltar la correlación significativa observada entre el ICS y H (0.95***), BT con Na (-0.78*) y W (-0.83*), así como entre ACFN y MO en los dos ciclos de cultivo evaluados.

Cuadro 21. Tabla de correlación para ERT e ICS 2018 y 2019



MOT: Materia orgánica total; DA: Densidad aparente; W: Humedad gravimétrica; Ca: Calcio; ACFN: Actinomicetos fijadores de nitrógeno; Na: Sodio; H: Hongos; HA: Índice de diversidad de Shannon para arvenses; L: Levaduras; NI: Nitrógeno inorgánico; NO₃: Nitratos; K: Potasio; BT: Bacterias totales; ICS: Índice de calidad de suelo; ERT: Eficiencia relativa de la tierra. * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$.

Conclusiones

De acuerdo con el análisis de componentes principales, los índices del suelo que más influyen en la calidad son: la densidad aparente y la materia orgánica, seguidos de los nutrientes y la

abundancia de grupos microbiológicos, principalmente las levaduras y los actinomicetos totales.

Los índices más relevantes para la calidad de suelo presentaron valores más altos en los sitios bajo sistema MIAF, comparados con los monocultivos, pero no se observó correlación entre el ICS y la ERT.

El sistema MIAF se muestra como una alternativa para los agricultores campesinos con superficies de cultivo reducidas (<5 ha), posibilitando el establecimiento de un agroecosistema diversificado con especies agrícolas con una ERT mayor a la unidad, por lo que se requiriere de una menor superficie de cultivo para obtener los mismos rendimientos que un monocultivo.

Literatura citada

- Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. (1999). Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra*, 17(3), 179-191.
- Albino, G., Turrent, F., Cortés, F., González, E., Mendoza, C., Volke, H. y Santiago, M. (2016). Optimización económica de N, P, K y densidades de plantación en maíz y frijol intercalados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 993-1004.
- Álvarez-Sánchez, M., Maldonado-Torres, R., Nájera-Rosas, C. y Cristóbal-Acevedo, D. (2020). Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 741-752.
- Andrews, S., Karlen, D. y Mitchell, J. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25–45.
- Arriaga-Vázquez, A., Martínez-Menez, M., Rubiños-Panta, J., Fernández-Reynoso, D., Delgadillo-Martínez, J. y Vázquez-Alarcón, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa intercalada con árboles frutales. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 465-474.

- Astier, C., Maass, M. y Etchevers, B. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Bautista, C. A., Etchevers, B. J., del Castillo, R. F. y Gutiérrez, C. (2004). La calidad de suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Bautista-Cruz, A. y Etchevers, B. (2014). *Una Revisión sobre los Conceptos de la Calidad del Suelo: Sus Indicadores e Índices*. España : Editorial Académica Española, pp. 60.
- Bremer, E. y Ellert, K. (2004). *Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta*. Alberta Environmentally Sustainable Agriculture. Soil Quality Program. , Alberta Agricultura, Food and Rural Development. Alberta. Canada: Symbio AG Consulting. Lethbridge, pp. 32.
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H. y González-Cifuentes, J. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351-1361.
- Camargo-Ricalde, S., Montaña, N., De la Rosa-Mera., C. y Montaña, S. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista digital Universitaria*, 13(7), 3-19.
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J. y Schiviano, H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*, 25, 173-178.
- Castellanos, J., Uvalle, J. y Aguilar, S. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos 2a. Edición*. San Miguel de Allende, Guanajuato, México: Colección INCAPA. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola, pp. 226.
- Cusack, D.F., Chou, W.W., Yang, W.H., Harmon, M.E., Silver, W.I. y The Lidet Team. (2009). Controls on long-term root and leaf litter decomposition in neotropical forest. *Global Change Biol.*, 15,1339-1355.
- Cisneros, R., Sánchez, P. y Menjivar, F. (2016). Influencia de microorganismos solubilizadores de fósforo del suelo y su absorción por plántulas de café. *Bioagro*, 28(2), 95-106.
- De la Rosa-Mera, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Sánchez-Colín, M. y Franco-Ramírez, A. (2012). Aislamiento de consorcios de hongos micorrícicos arbusculares de plantas medicinales y su efecto en el crecimiento de vinca (*Catharanthus roseus*). *Revista chilena de historia natural*, 85(2), 187-198.

- Estrada-Herrera, I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, S., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51, 813-831.
- Evangelista, M., Quiñones, A. y Rincón, E. (2017). Potencial biotecnológico de las actinobacterias aisladas de suelos de México como fuente natural de moléculas bioactivas: compuestos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21(63), 39-51.
- FAO. (2019). *Suelos y Biodiversidad*. Recuperado el 20 de noviembre de 2019, de <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/285729/>
- Fassbender, H. W. (1987). *Química de Suelos, con énfasis en Suelos de América Latina*. 2a Edición. San José: Costa Rica, pp. 420.
- Francis, C., Prager, M. y Tejada, G. (1982). Density interactions in tropical intercropping. I. Maize and climbing bean. *Field Crop Res.*, 5, 163-176.
- Gałązka, A. y Furtak, K. (2019). Functional microbial diversity in context to agriculture. En S. Das y H. Dash, *Functional microbial diversity in the genomic era*. San Diego, CA, USA: Academic Press, pp. 347-358.
- Garza-García, D., Garza-García, R. y Jacinto-Hernández, C. (2010). Albicampo, variedad de frijol de temporal para Valles Altos de la Mesa Central. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(5), 693-697.
- Ghaemi, M., Astarai, A., Emami, H., Nassiri, M. y Sanaeinejad, S. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 987-1004.
- González, M. A., Almaraz, S. J., Ferrera, C. R., Roríguez, G. M., Taboada, G. O. Y Trinidad, S. A. (2018). Rizobacterias y hongos micorrízicos arbusculares asociados con chile poblano en la Sierra Nevada de Puebla, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(20), 4355-4365.
- González, R. H., Domínguez-Gómez, G. T., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Ramírez-Lozano, R. G., Pando-Moreno, M. y Fernández, C. J. (2011). Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology*, 212, 1747-1757.

- Govaerts, B., Sayre, K. y Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 163–174.
- Hosoya, K. y Sugiyama, S. (2017). Weed communities and their negative impact on rice yield in no-input paddy fields in the northern part of Japan. *Biological Agriculture & Horticulture*, 33, 215-224.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2016). *Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla*. Recuperado el 13 de agosto de 2017, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21074a.html>
- Jackson, M. L. (1964). *Análisis químicos de suelos*. Barcelona, España: Omega, pp. 662.
- Juárez, P., Tuñón, P., Winton, A. y Zapata, M. (2018). Relaciones socio-espaciales de género y participación de las mujeres en el proyecto Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Chiapas. *Revista interdisciplinaria de estudios de género de El Colegio de México*, 4(18), 1-37.
- Juárez, R. D., Fragoso, G. C., Turrent, F. A., Ocampo, M. J., Sandoval, C. E., Ocampo, F. I., Ferrera, C. R. Y Hernández, R. E. (2008). Mejoramiento del suelo en la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). *LEISA Revist de Agroecología*, 24(2), 30-31.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *IDESIA*, 24(1), 49-61.
- Marañón, T. y Madejón, E. (2017). Funciones del Suelo y servicios ecosistémicos: importancia de la materia orgánica. V Jornadas de la Red Española de Compostaje, pp. 13-16.
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F. y Ortíz-Mendel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 89-103.
- McFarlane, K.J., Schoenholtz, S.H. y Powers, R.F. (2009). Plantation on management intensity affects belowground carbon and nitrogen storage in Northern California. *Soil Sci. J.*, 73, 1020-1032.
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., Galvis-Spínola, A., Cortés-Flores, J. I. y Santiago-Cruz, M. J. (2017). Incremento de la materia orgánica del suelo y rendimiento de mango en Luvisoles, Campeche, México. *Agron. Mesoam.*, 28(2), 499-508.

- Mendoza-Herrera, Y., Ríos-Velasco, C., Cambero-Campos, J., De dios-Ávila, N., Pérez-Corral, D., Rodríguez-Guerra, R. y Estrada-Virgen, M. (2020). Actinomicetos antagonistas a *Colletotrichum* sp. Penz. en el cultivo de mango en Nayarit, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), 1-9.
- Muñoz-Ruíz, E., Santiago, M., Albino, G. y Rivera, P. (2018). El sistema milpa intercalada con árboles frutales incrementa la eficiencia relativa de la tierra en una comunidad mazahua del Estado de México. *Cadernos de Agroecología*, 13(1), 1-5.
- Navarro, B. A., Figueroa S. B., Martínez M. M., González C. F. y Osuna C. E. (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura técnica en México*, 34(2), 151-158.
- Lamz, P. A. y González, C. M. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42.
- Ocampo, G. y Urbina, L. (2017). Estrategias para garantizar la seguridad alimentaria en la región Altos de Chiapas. En P. Madera, R. Guzmán, T. Garrafa y Q. Salas, *México rural ante los retos del siglo XXI*. México: Asociación Mexicana de Estudios Rurales, A.C, pp. 47-62.
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Ramírez-Valverde, B., Gil-Muñoz, A. y Gutiérrez-Rangel, N. (2015). Producción de maíz y pluriactividad de los campesinos en el Valle de Puebla, México. *Nova scientia*, 7(14), 577-600.
- Parada, R., Marguet, E. y Vallejo, M. (2017). Aislamiento y caracterización parcial de actinomicetos de suelos con actividad antimicrobiana contra bacterias multidrogo-resistentes. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(2), 15-23.
- Pérez-Cordero, A., Tuberquia-Sierra, A. y Amell-Jímenez, D. (2014). Actividad in vitro de bacterias endófitas fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfatos. *Agron. Mesoam.*, 25(2), 213-223.
- Pérez-Corral, D., García-González, N., Gallegos-Morales, G., Ruíz-Cisneros, M., Berlanga-Reyes, D. y Ríos-Velasco, C. (2015). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonicos a *Fusarium equiseti*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1629-1638.
- Quiñones-Aguilar, E., Evangelista-Martínez, Z. y Rincón-Enríquez, G. (2016). Los actinomicetos y su aplicación biotecnológica. *Elementos*, 101, 59-64.

- R-Core-Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- SIAP. (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Recuperado el 09 de julio de 2020, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singer, M. J. y Ewing, S. (2000). Soil Quality. En M. E. Sumner, *Handbook of Soil Science. Chapter 11*. Boca Raton, Florida: CRC Press, pp. 271-298.
- Sojka, R. E. y Upchurch, D. R. (1999). Reservations Regarding the Soil Quality Concept. *Soil Science Society of America J.*, 63, 1039-54.
- Torres, Z. J., Cortés, F. J., Turrent, F. A., Hernández, R. E. y Muratalla, L. A. (2008). Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalados con milpa. *Terra Latinoamericana* 26, 265-273.
- Trinidad-Santos, A. y Velasco-Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52-58.
- Turrent, F., Cortés, F., Espinosa, C., Hernández, R., Camas, G., Torres, Z. y Zambada, M. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185.
- Velázquez-Gurrola, A. y Ramos-Alegría, M. (2015). Beneficios de microorganismos solubilizadores de P y K en la recuperación y mantenimiento de suelos agrícolas. VIII Congreso Mundial de la Palta, pp. 495-499.
- Villarreal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villaláz-Perez, J., Rosales, F. y Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 301-315.
- Walkley, A. J. y Black, I. A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37, 29-38.

CAPÍTULO IV. GRUPOS MICROBIANOS EN UN AGROECOSISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES EN VALLES ALTOS DE PUEBLA.

Resumen

Los microorganismos tienen un papel fundamental en la dinámica del suelo de agroecosistemas. Se determinó parámetros de calidad de suelo y la abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos en diferentes sitios contrastantes evaluados en un sistema MIAF y en monocultivos. En muestras compuestas de suelo se determinó densidad aparente, humedad, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de cenizas, materia orgánica oxidable, carbono oxidable, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico y nutrientes (NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} y K^+), al igual que la abundancia de actinomicetos totales, actinomicetos fijadores de nitrógeno, levaduras, hongos, bacterias y esporas de hongos micorrízicos arbusculares. Se realizó análisis de varianza, prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), correlación lineal, análisis de conglomerados y correlación canónica. Se observó mayor cantidad de actinomicetos totales ($>4 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo) y actinomicetos fijadores de nitrógeno ($>3.8 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo) y hongos ($>1.7 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo) en sistema MIAF respecto a los monocultivos. Para los sitios con asociación maíz-frijol en sistema MIAF se observó alta correlación positiva entre contenido de materia orgánica y actinomicetos fijadores de nitrógeno ($r=0.60$) y levaduras ($r=0.73$), así como con el porcentaje de nitrógeno total con las levaduras ($r=0.70$) y actinomicetos fijadores de nitrógeno ($r=0.75$). El sistema MIAF favoreció la abundancia de grupos funcionales, parámetros de calidad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo respecto a los sitios con monocultivo.

Palabras clave: Actinomicetos, Hongos, Maíz-Frijol, Manzano, Suelo.

Abstract

Microorganisms play a fundamental role in soil dynamics of agroecosystems. Soil quality parameters and the abundance of functional groups of edaphic microorganisms were determined in different contrasting sites evaluated in a MIAF system and in monocultures. Bulk density, humidity, pH, electrical conductivity, percentage of ash, oxidizable organic matter, oxidizable carbon, total nitrogen, inorganic nitrogen and nutrients (NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} and K^+) were determined in composite soil samples, as was the abundance of total actinomycetes, nitrogen-fixing actinomycetes, yeasts, fungi, bacteria, and arbuscular mycorrhizal fungal spores. Analysis of variance, Tukey's mean comparison test ($P \leq 0.05$), linear correlation, cluster analysis and canonical correlation were performed. A greater amount of total actinomycetes ($> 4 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) and nitrogen-fixing actinomycetes ($> 3.8 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) and fungi ($> 1.7 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) were observed in the MIAF system compared to the monocultures. For the sites with corn-bean association in the MIAF system, a high positive correlation was observed between organic matter content and nitrogen-fixing actinomycetes ($r = 0.60$) and yeasts ($r = 0.73$), as well as with the percentage of total nitrogen with yeasts. ($r = 0.70$) and nitrogen-fixing actinomycetes ($r = 0.75$). The MIAF system favored the abundance of functional groups, quality parameters and the availability of nutrients in the soil compared to the monoculture sites.

Keywords: Actinomycetes, Apple tree, Corn-bean, Fungus, Soil.

Introducción

La agroecología se muestra como una vía para conservar y optimizar el uso de la biodiversidad en los agroecosistemas (Altieri, 1999), los cuales son ecosistemas modificados por el hombre para obtener un producto o servicio (Altieri *et al.*, 2014). En este sentido, los sistemas agroforestales (SAF) pueden ser considerados como un tipo de agroecosistema compuesto por una biodiversidad silvestre y domesticada (Moreno-Calles *et al.*, 2014), donde árboles se asocian deliberadamente con cultivos agrícolas de manera espacial y temporal, existiendo interacciones ecológicas y económicas entre los componentes del sistema, las

cuales son compatibles con las condiciones socioculturales (Murgueitio *et al.*, 2006), mostrado aportes relevantes como la reducción de la erosión (García *et al.*, 2015), incremento de la fertilidad del suelo, producción más estable y resiliente a inundaciones y sequías prolongadas (Gómez, 2014), beneficiando al agricultor y el ambiente (Moreno-Calles *et al.*, 2013). Intensificando las cosechas en espacio y tiempo, brindando beneficios a nivel biológico y agronómico (Muñoz *et al.*, 2017), al igual que en aspectos económicos y sociales (Pocomucha *et al.*, 2016), y son considerados como una expresión de la diversidad y patrimonio biocultural (Moreno-Calles *et al.*, 2014).

En este sentido, la Milpa Intercalada en Árboles Frutales (MIAF) es un tipo de agroecosistema que deriva de un modelo de intensificación de la milpa histórica (MH) desarrollado por productores tradicionales de la región de San Martín Texmelucan-Huejotzingo, en el estado de Puebla, donde se intercalan árboles frutales con la milpa. A este modelo se le añaden los beneficios de la tecnología de la terraza de muro vivo para laderas, al interceptar el agua de la escorrentía y conducirla a velocidades menos erosivas, proteger los caminos forestales y zonas de cárcavas activas, disminuir la longitud de la pendiente, y aportar materia orgánica (Turrent *et al.*, 2017). El MIAF al igual que cualquier otro SAF es un sistema multiobjetivo, buscando incrementar el ingreso neto y el empleo familiar sin dejar de producir alimentos básicos, y proteger el suelo contra la erosión sin eliminar su roturación, excepto en condiciones especiales (Turrent *et al.*, 2016; Turrent *et al.*, 2017) e incrementar la captura del carbono atmosférico y edáfico (Covaleda *et al.*, 2016).

El suelo es fundamental en el MIAF, debido a que aporta nutrimentos para el desarrollo de las plantas y les brinda soporte (Estrada-Herrera *et al.*, 2017), al menos una de las etapas de los ciclos biogeoquímicos que ocurren en los agroecosistemas tiene lugar en el suelo (León *et al.*, 2011). El papel y las funciones que tienen los microorganismos en el suelo son tan amplios y variados como lo son ellos mismos (Parra-Cota *et al.*, 2018); la ausencia de estas comunidades representaría el colapso de los agroecosistemas (García de Salamone, 2011), ya que ellos brindan servicios ecosistémicos vitales para la sustentabilidad de los agroecosistemas, y son los principales agentes en procesos ecológicos (Soria, 2016; FAO, 2019). Los atributos de la microbiota edáfica, principalmente los asociados con el flujo de

energía y el ciclo de nutrientes, han mostrado ser sensibles a perturbaciones de las condiciones del suelo previo a condiciones fisicoquímicas como el carbono oxidable, de manera que la biota microbiana se presenta como un potencial indicador sobre las alteraciones de la calidad del suelo y del agroecosistema (Paolini-Gómez, 2017), ya que la abundancia de microorganismos como las bacterias, hongos y actinomicetos, depende de las condiciones fisicoquímicas del suelo (Soto *et al.*, 2012).

En el MIAF, y en los agroecosistemas en general, los grupos microbiológicos son sensibles a las condiciones de cultivo, teniendo las prácticas de manejo un impacto en la abundancia de grupos con un papel relevante como las levaduras, hongos (10^4 a 10^6 UFC g^{-1} de suelo seco; donde UFC=Unidad Formadora de Colonias) y actinomicetos (10^6 a 10^7 UFC g^{-1} de suelo seco). Las levaduras tienen participación en el ciclo del carbono al degradar la hemicelulosa y están asociadas con procesos de agregación de suelo (Valenzuela *et al.*, 2014); algunas especies favorecen la simbiosis entre plantas y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), uno de los grupos microbianos del suelo más relevantes por las funciones que desarrollan en los agroecosistemas y ecosistemas naturales (Nelson y Nelson, 2015), los HMA están asociados a cerca del 90% de las plantas terrestres, en todos los ecosistemas del mundo (Soto *et al.*, 2012; Santillana y Toro, 2018). Los actinomicetos siendo heterótrofos saprófitos participan en ciclos biogeoquímicos, producen antibióticos capaces de inhibir el crecimiento de fitopatógenos, al igual que enzimas extracelulares con la facultad de degradar materia orgánica de origen vegetal y animal; además de liberar sideróforos, sustancias promotoras del crecimiento vegetal *in vitro*, y fomentar la nodulación y asistir a bacterias *Rhizobium* en la absorción de hierro requerido para la fijación de nitrógeno en fabáceas (Franco-Correa, 2009; Pérez-Corral *et al.*, 2015). Los actinomicetos se distribuyen en la capa superficial del suelo, entre 2 y 15 cm de profundidad, y el tamaño de la comunidad es susceptible a cambios fisicoquímicos como contenido de materia orgánica y pH. El género más abundante de este grupo es *Streptomyces*; algunos otros como *Frankia* se han descrito como fijadores de nitrógeno atmosférico (Franco-Correa, 2009).

El objetivo del presente estudio fue determinar parámetros de calidad de suelo y la abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos en diferentes sitios contrastantes evaluados en un sistema MIAF y en monocultivos.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en 2018, en una parcela en sistema MIAF establecida en 2004 en la localidad de San Mateo Capultitlán, municipio de Huejotzingo, Puebla, en la cual se estudia la asociación maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) intercalada en árboles de manzano (*Malus domestica* Borkh) cv “agua nueva dos” en plena producción. En la región predominan los suelos tipo Arenosol (38%), Phaeozem (26%), Cambisol (8%), Andosol (8%) Fluvisol (4%) y Leptosol (3%), y el clima templado subhúmedo, con precipitación anual entre 900 y 1100 mm (INAFED, 2016). La parcela se ubica en suelo tipo fluvisol, en condiciones de temporal, pero cuenta con posibilidades de aplicación de riego de auxilio. Dentro de la parcela se seleccionaron ocho sitios contrastantes (Cuadro 22 y Cuadro 23); de estos, dos correspondieron al arreglo de maíz y frijol asociado dentro del sistema MIAF, dos con manzano en sistema MIAF, dos con maíz en monocultivo y dos con manzano en monocultivo. En 2018 se registró de manera semanal la temperatura atmosférica y humedad relativa por medio de un higrotermómetro analógico marca Taylor, así como la precipitación con un pluviómetro portátil marca Taylor. De igual manera, al momento de realizar los muestreos, se registró la temperatura de suelo con geotermómetro.

Cuadro 22. Sitios de muestreo de suelo en diferentes condiciones de cultivo. San Mateo Capultitlán, Puebla, 2018.

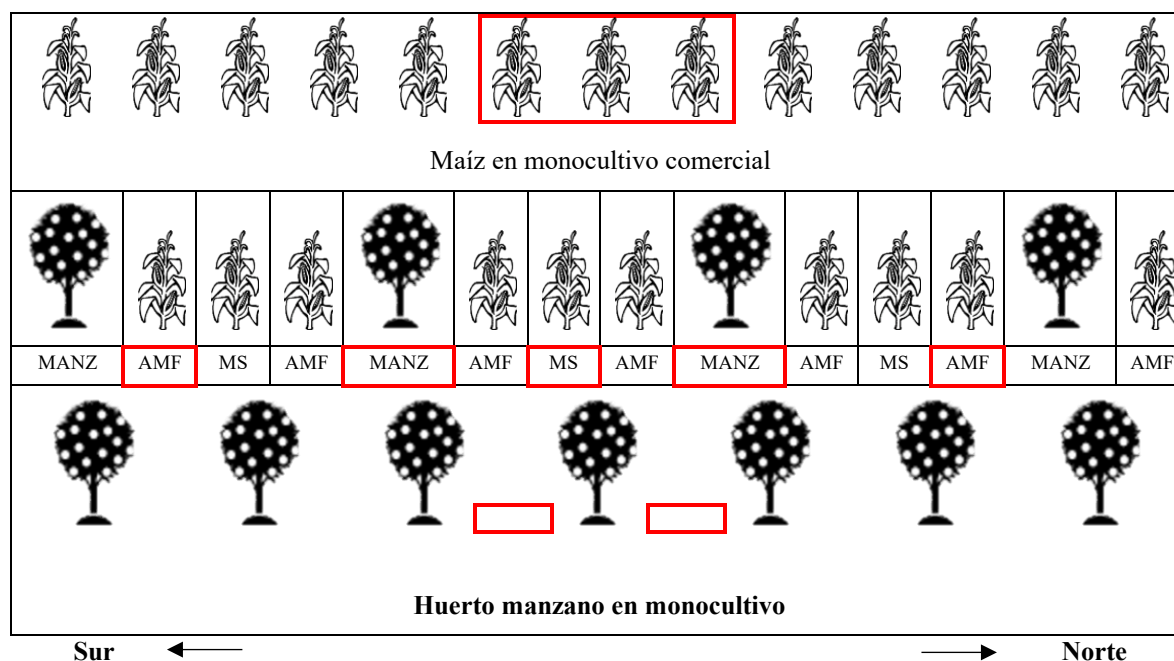
OSA: Orientación del surco respecto al árbol frutal; AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo

Sitio	Cultivo	Orientación respecto al árbol	Sistema
AS	Maíz-Frijol	Sur	MIAF
AN	Maíz-Frijol	Norte	MIAF
FMS	Manzano	Sur	MIAF
FMN	Manzano	Norte	MIAF
FSS	Manzano	Sur	Monocultivo
FSN	Manzano	Norte	Monocultivo
MSE	Maíz	N/A	Monocultivo
MSC	Maíz	N/A	Monocultivo

norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo comercial.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23. Croquis de la parcela experimental



Nota: Se muestran en color rojo los sitios muestreados, los cuales corresponden a los que se mencionan en el Cuadro 22. MANZ: Manzano, AMF: Asociación Maíz-Frijol, MS: Maíz en monocultivo, NB: Nativo Blanco.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un muestreo de suelo previo a la siembra de 2018, de acuerdo con la norma oficial mexicana para muestreo y análisis de suelos (NOM-021-RECNAT-2000). En muestras compuestas de suelo de los sitios indicados en la Cuadro 22, se determinó la abundancia de actinomicetos totales, actinomicetos fijadores de nitrógeno, hongos, levaduras, bacterias totales y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Los primeros cinco se determinaron por cuenta en placa; colocando 10 gramos de suelo húmedo de cada muestra en 90 mL de agua peptonada y se realizaron diluciones decimales (NOM-110-SSA1-1994). La siembra en placa fue por expansión con 200 μL de la dilución 10^{-3} a 10^{-6} . En la determinación de actinomicetos y bacterias totales se utilizó el medio de cultivo agar nutritivo (Evangelista *et al.*, 2017). En actinomicetos fijadores de nitrógeno se utilizó el medio formulado Ashby (Pérez-Corral *et al.* 2015), y para levaduras y hongos el medio de agar papa dextrosa (NOM-111-SSA1-1994). Todas las determinaciones se realizaron por duplicado. Las bacterias se incubaron a 37°C ; los demás grupos a 28°C , durante 48 horas, a excepción de los hongos que se incubaron por 120 horas. La determinación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares se realizó según Alarcón y Ferrera (1999) y De la Rosa-Mera *et al.* (2012), preparando una dilución de suelo húmedo y agua destilada (12.5:1) de cada muestra, la cual se tamizó y obtuvo el sobrenadante filtrando con papel filtro Whatman No 3. Cada papel filtro se guardó en refrigeración a 4°C , para realizar el conteo posterior de esporas con un microscopio estereoscópico. Con el fin de comparar la abundancia de microorganismos entre los sitios se consideró como referencia el valor obtenido en el sitio con maíz en monocultivo comercial, de manera que en dicho valor se muestra el eje horizontal de los gráficos.

Como indicadores de la calidad de suelo se determinó (García *et al.*, 2012): materia orgánica y carbono oxidable por el método Walkley y Black (NOM-021-RECNAT-2000), cenizas (NMX-AA-18-1984), nitrógeno total por el método Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000), nitrógeno nítrico y amoniacal por el método micro-Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000), textura mediante técnica Bouyoucos citado en la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000, conductividad eléctrica y pH (NOM-021-RECNAT-2000) utilizando un potenciómetro CONDUCTRONIC PC18 y nutrientes (NO_3^- , Na^+ , K^+ y Ca^{2+}) con un kit Laquatwin. Las determinaciones se realizaron por triplicado. La interpretación de los atributos fisicoquímicos

del suelo partió de los valores de referencia de la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

En el análisis de la información se utilizó el paquete estadístico R (R Core Team, 2018); éste correspondió a un análisis de varianza y, para las variables que resultaron significativas, se procedió a efectuar la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), así como análisis de correlación de Pearson para las variables microbiológicas y fisicoquímicas del suelo. Debido a que los datos de los grupos funcionales de microorganismos edáficos se obtuvieron por conteo en placa, éstos fueron estandarizados aplicando logaritmo natural. También se realizó un análisis de correlación canónica para los atributos fisicoquímicos del suelo y la abundancia de los distintos grupos microbiológicos, además de un análisis de conglomerados utilizando la distancia euclidiana como medida de asociación (Bocanegra-González *et al.*, 2015; Ballesteros-Correa *et al.*, 2019).

Resultados y discusión

De acuerdo con el registro de las variables ambientales la temperatura más alta se observó entre los meses de abril y mayo, mientras que la precipitación se distribuyó relativamente homogénea desde mayo hasta septiembre, y de junio a septiembre se presentó la mayor cantidad de lluvia (Figura 18).

En las propiedades físicas de suelo se observó diferencia significativa (Cuadro 24) entre los sitios para la densidad aparente, teniendo los valores más altos (1.43 g mL^{-1}) los sitios con asociación maíz-frijol con orientación sur y con monocultivo de maíz, y el valor más bajo (0.95 g mL^{-1}) en el sitio con manzano en monocultivo con orientación norte, esto puede deberse a que los suelos de los sitios con cultivos anuales se encuentran en un proceso de compactación por el paso de maquinaria agrícola, además de quedar desnudos una parte del año, al contrario de los sitios con manzano, donde el árbol les brinda sombra, conserva humedad y en general el sitio se ve menos alterado por practicas humanas. Los sitios con mayor porcentaje de humedad gravimétrica fueron aquellos con manzano en monocultivo, tanto en orientación sur (13.79%) y norte (14.36%), siendo menor en los sitios con

monocultivo de maíz (3.97% y 7.81%), cabe resaltar los valores obtenidos en los sitios con manzano en sistema MIAF, orientación sur (10.72%) y norte (10.07%).

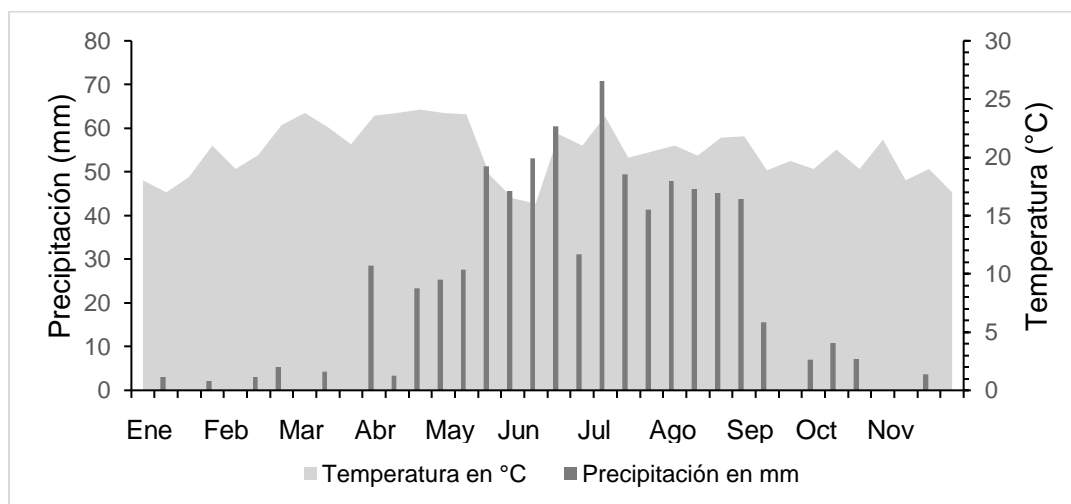


Figura 18. Climograma ciclo 2018 parcela MIAF en San Mateo Capultitlán, Puebla.

Fuente: Elaboración propia.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios muestreados para algunos atributos estudiados como densidad aparente, humedad gravimétrica, porcentaje de materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno inorgánico (Cuadro 24).

Todos los sitios muestreados presentaron valores cercanos a la neutralidad o moderadamente alcalinos (pH entre 7.06 y 7.69). La conductividad eléctrica se exhibió con valores depreciables de salinidad en todos los sitios, de manera que el pH y la conductividad eléctrica no representan un factor limitante para el desarrollo de los cultivos en todos los sitios muestreado (Cuadro 24).

Se aprecian (Cuadro 24) valores medios en contenido de materia orgánica oxidable en todos los sitios muestreados (1.72% a 2.86%), exceptuando el sitio con monocultivo de maíz comercial, el cual expuso un porcentaje bajo de materia orgánica oxidable (1.05%). Los niveles de nitrógeno inorgánico se exhibieron muy bajos para todos los sitios con manzano, a excepción del sitio con frutal en MIAF con orientación sur, el cual presentó un valor medio (22.17 mg kg⁻¹). Los demás sitios resultaron con valores bajos de nitrógeno inorgánico. El

contenido de nitrógeno total fue muy alto ($> 0.25\%$) para los sitios con asociación y frutales en sistema MIAF al igual que en el maíz en monocultivo dentro del experimento, los sitios con manzano en monocultivo contaron con valores muy bajos de nitrógeno total ($< 0.05\%$), y el sitio con maíz en monocultivo convencional indicó bajo contenido de nitrógeno total (Cuadro 24), dicha situación puede explicarse a que los sitios de monocultivo de maíz convencional y monocultivo de maíz en el experimento recibieron distintas dosis de fertilización. Se observó que los sitios muestreados en el sistema MIAF contaron con mejores valores de nitrógeno total y materia orgánica respecto a los monocultivos de maíz.

De los microorganismos edáficos evaluados en el estudio, los hongos contaron con menor abundancia en la mayoría de los sitios muestreados, destacando que el sitio con menor representación es el sitio con maíz en monocultivo comercial (Figura 19a). Por su lado, las bacterias se evidenciaron como uno de los grupos con mayor variación en los distintos sitios (Figura 19b). La abundancia de actinomicetos totales respecto al sitio con maíz en monocultivo comercial fue superior o similar en los demás sitios evaluados (Figura 19c), al igual que los actinomicetos fijadores de nitrógeno (Figura 19d), exceptuando los sitios con asociación frijol-maíz orientación norte y con frutal en monocultivo orientación sur.

Se observó diferencia en la cantidad de levaduras en los distintos sitios de muestreo, siendo menor en los sitios con asociación maíz-frijol y mayor en los sitios con frutal en sistema MIAF (Figura 19e). Los HMA fueron constantes en los distintos sitios evaluados a excepción de aquellos con manzano en sistema MIAF, teniendo mayor abundancia en la condición norte y menor en la sur (Figura 19f), esto puede deberse a la mayor cantidad de nitrógeno inorgánico en dicho sitio, así como con la variación entre sitios de la humedad gravimétrica (Cuadro 24) y con el uso de fertilizantes de síntesis química.

Cuadro 24. Análisis de Varianza de propiedades fisicoquímicas del suelo de los sitios muestreados en San Mateo Capultitlán

Sitio	Densidad g mL ⁻¹	Humedad w%	pH	C.E. (mS cm ⁻¹)	% de Cenizas	% MOO	% CO
AS	1.43 a	4.04 e	7.56 ab	0.56 bc	1.00 ab	1.72 ab	97.59 ab
AN	1.42 a	5.23 de	7.53 ab	0.64 b	1.17 ab	2.02 ab	97.25 abc
FMS	1.19 b	10.72 b	7.63 ab	0.53 bc	1.49 a	2.56 a	96.72 abc
FMN	1.28 b	10.07 bc	7.60 ab	0.69 b	1.40 a	2.42 a	96.47 bc
FSS	1.02 c	13.79 a	7.06 c	1.16 a	1.55 a	2.68 a	95.14 d
FSN	0.95 c	14.36 a	7.47 b	1.01 a	1.28 a	2.20 ab	96.19 cd
MSE	1.43 a	3.97 e	7.56 ab	0.44 c	1.06 ab	1.83 ab	97.62 a
MSC	1.21 b	7.81 cd	7.69 a	0.42 c	0.61 b	1.05 b	96.85 abc
C.V.	2.7478	10.6609	0.9857	9.7052	19.6139	19.6936	0.4107
MSD	0.0964	2.6364	0.2093	0.1872	0.6628	1.1470	1.1230
		2.85e-	6.16e-	1.29e-			
ANOVA	1.42e-11***	10***	07***	09***	0.31e-02**	3.28e-03***	1.73e-05***

Sitio	% Nt	Ni mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)
AS	0.39 ab	15.16 ab	136.67 cd	18.61 d	34.72 c	96.67 ab
AN	0.33 ab	18.66 ab	148.56 bcd	19.83 cd	51.61 c	101.83 ab
FMS	0.61 a	22.17 a	155.00 bcd	25.33 abc	34.50 c	95.00 ab
FMN	0.61 a	3.50 b	225.00 abc	28.17 ab	38.17 c	110.00 a
FSS	0.03 b	3.50 b	280.00 a	29.67 a	163.33 a	116.67 a
FSN	0.04 b	9.32 ab	266.67 ab	21.00 cd	98.67 b	85.00 ab
MSE	0.28 ab	16.33 ab	118.33 cd	22.33 bcd	17.17 c	92.00 ab
MSC	0.07 b	15.16 ab	69.67 d	25.67 abc	21.33 c	64.00 b
C.V.	53.2971	50.4450	23.9553	9.1984	25.9060	16.5608
MSD	0.0044	18.5022	118.4967	6.1954	42.0629	44.5423
			1.13e-	8.17e-	2.14e-	
ANOVA	7.16e-04***	0.0225*	04***	05***	08***	2.78e-02**

Medias con letra diferente son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$); AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo comercial; CE: Conductividad eléctrica; MOO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono oxidable; Nt: Nitrógeno total; Ni: Nitrógeno inorgánico; CV: Coeficiente de Variación; DMS: Diferencia Mínima Significativa.

Fuente: Elaboración propia

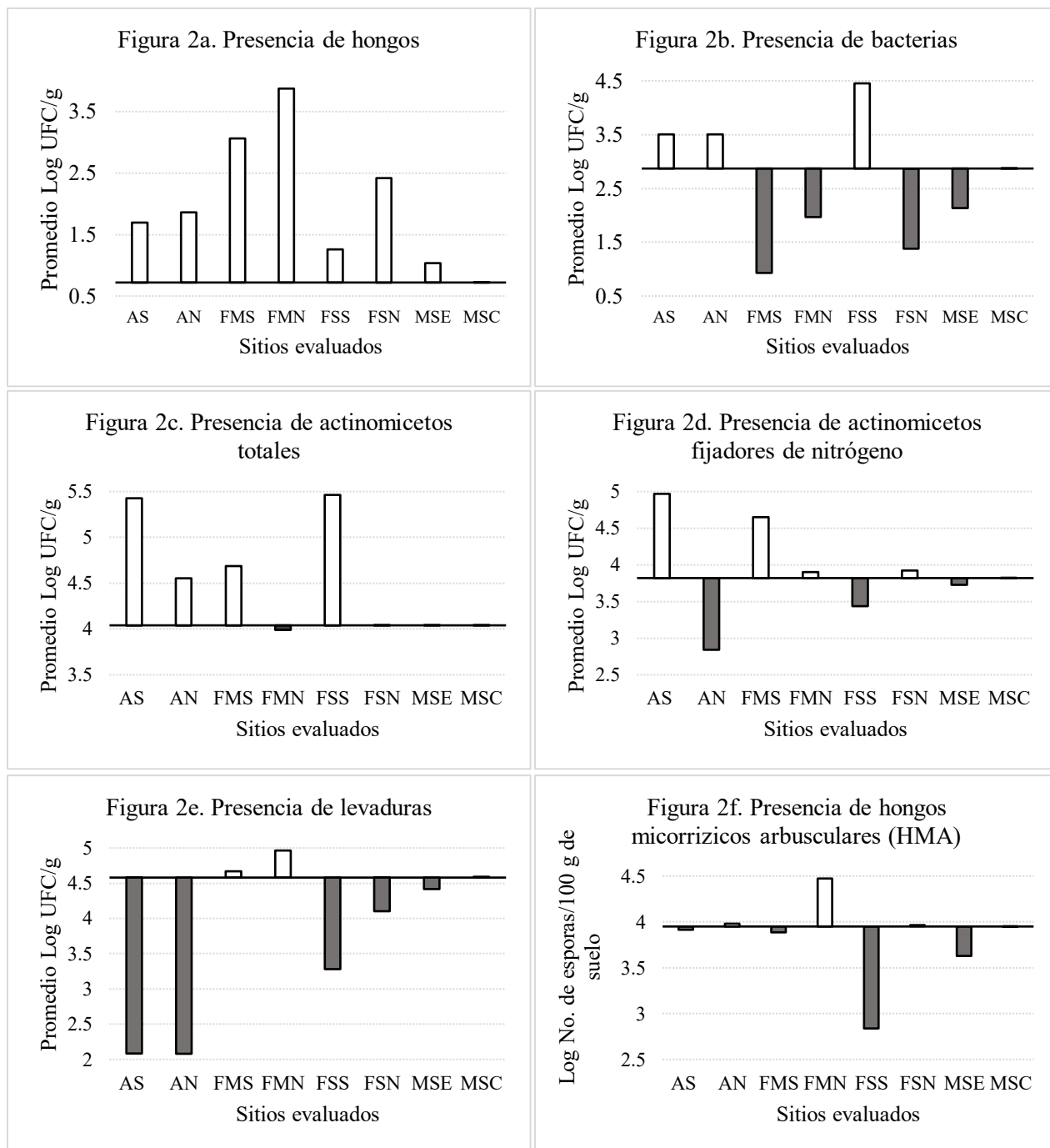


Figura 19. Abundancia de grupos microbianos edáficos en los sitios muestreados

Se muestra la abundancia de los seis grupos microbiológicos determinados en los ocho sitios de estudio. El eje horizontal muestra el valor de Log UFC g⁻¹ de suelo observado en el sitio con monocultivo de maíz comercial. AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo comercial.

Fuente: Elaboración propia.

Las levaduras y los actinomicetos fijadores de nitrógeno se correlacionaron con el porcentaje de materia orgánica, carbono oxidable y nitrógeno total. También se observó una correlación negativa entre las levaduras y hongos con el porcentaje de materia orgánica y carbono del suelo (Cuadro 25), lo cual no es común, ya que una mayor cantidad de materia orgánica beneficia la presencia de estos microorganismos. Una posible explicación sea el uso de fungicidas en manzano a finales del otoño para prevenir enfermedades invernales en el árbol frutal.

Cuadro 25. Correlación para cultivos en asociación

	Actinomicetos totales	Actinomicetos fijadores de N	Hongos	Levaduras	Bacterias totales
Orientación sur respecto al árbol frutal					
% MOO	-0.09	0.60	-0.20	0.73	-0.25
<i>P</i>	0.73	0.01	0.47	0.001	0.35
% CO	-0.09	0.60	-0.20	0.73	-0.25
<i>P</i>	0.73	0.01	0.47	0.001	0.35
% Nt	0.09	0.25	0.08	0.70	-0.14
<i>P</i>	0.73	0.35	0.76	0.002	0.61
Ni mg kg ⁻¹	-0.57	0.04	-0.14	0.22	0.24
<i>P</i>	0.02	0.87	0.60	0.40	0.37
Orientación norte respecto al árbol frutal					
% MOO	-0.31	0.11	-0.86	-0.80	-0.14
<i>P</i>	0.24	0.73	0.000	0.001	0.61
% CO	-0.31	0.11	-0.86	-0.80	-0.14
<i>P</i>	0.24	0.68	0.000	0.001	0.61
% Nt	-0.30	0.75	-0.12	-0.49	0.03
<i>P</i>	0.26	0.000	0.66	0.002	0.92
Ni mg kg ⁻¹	0.33	-0.68	-0.49	0.03	-0.13
<i>P</i>	0.21	0.004	0.52	0.40	0.62

Se muestra el valor del coeficiente de correlación con su valor de significancia ($P \leq 0.05$). MO: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono oxidable; Nt: Nitrógeno total; Ni: Nitrógeno inorgánico.

Fuente: Elaboración propia.

Con el análisis de correlación canónica (Figura 20), tras realizar la prueba estadística se observó una correlación positiva con la dimensión dos entre la materia orgánica y la

conductividad eléctrica, e inversa con el pH. Los actinomicetos fijadores de nitrógeno se correlacionaron negativamente con las bacterias en la dimensión uno.

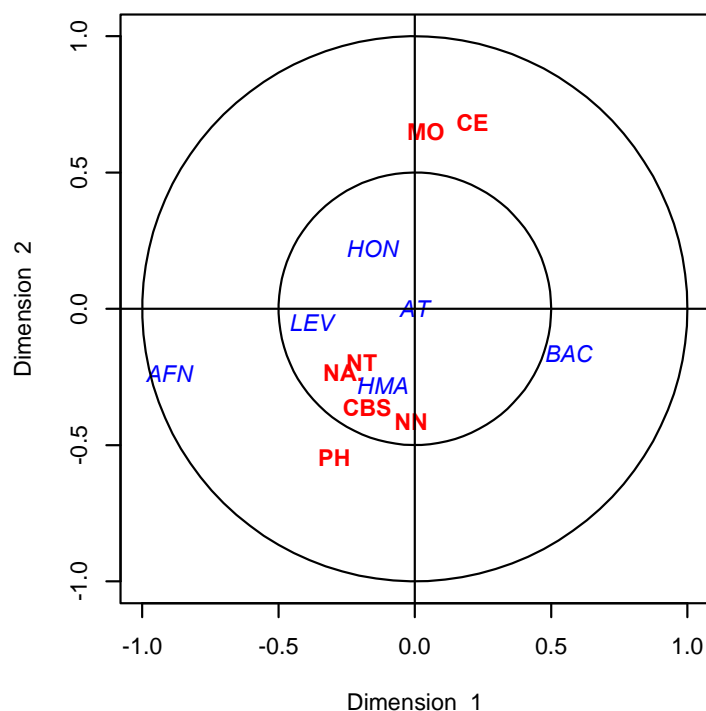


Figura 20. Diagrama de correlaciones para las propiedades fisicoquímicas del suelo y la abundancia de microorganismos

AT: Actinomicetos Totales; AFN: Actinomicetos Fijadores de Nitrógeno; HON: Hongos; LEV: Levaduras; BAC: Bacterias Totales; HMA: Hongos Micorrizicos Arbusculares; MO: Materia orgánica oxidable; CBS: Cenizas Base Seca; PH: Potencial de Hidrógeno; CE: Conductividad Eléctrica; NT: Nitrógeno Total; NA: Nitrógeno Amoniacal; NN: Nitrógeno Nítrico.

Fuente: Elaboración propia.

Se consideró conjuntamente la población de grupos microbiológicos y los parámetros fisicoquímicos de suelo para el análisis de conglomerados, a partir del cual se conformaron cinco grupos de sitios muestreados: AS-AN, FMS, FMN-FSN, FSS, MSE-MS (Figura 21). Se observó cómo los sitios con asociación se diferencian de los sitios con monocultivo de maíz, y todos estos a su vez con los sitios con árboles frutales, ya sea en sistema MIAF o monocultivo. De manera que se confirma la agrupación de los sitios con monocultivo o con asociación en el caso del cultivo de maíz, más no para los frutales, ya que los sitios con

orientación norte de frutal en sistema MIAF y monocultivo formaron un grupo, mientras que aquellos con orientación sur no formaron un grupo (Figura 21).

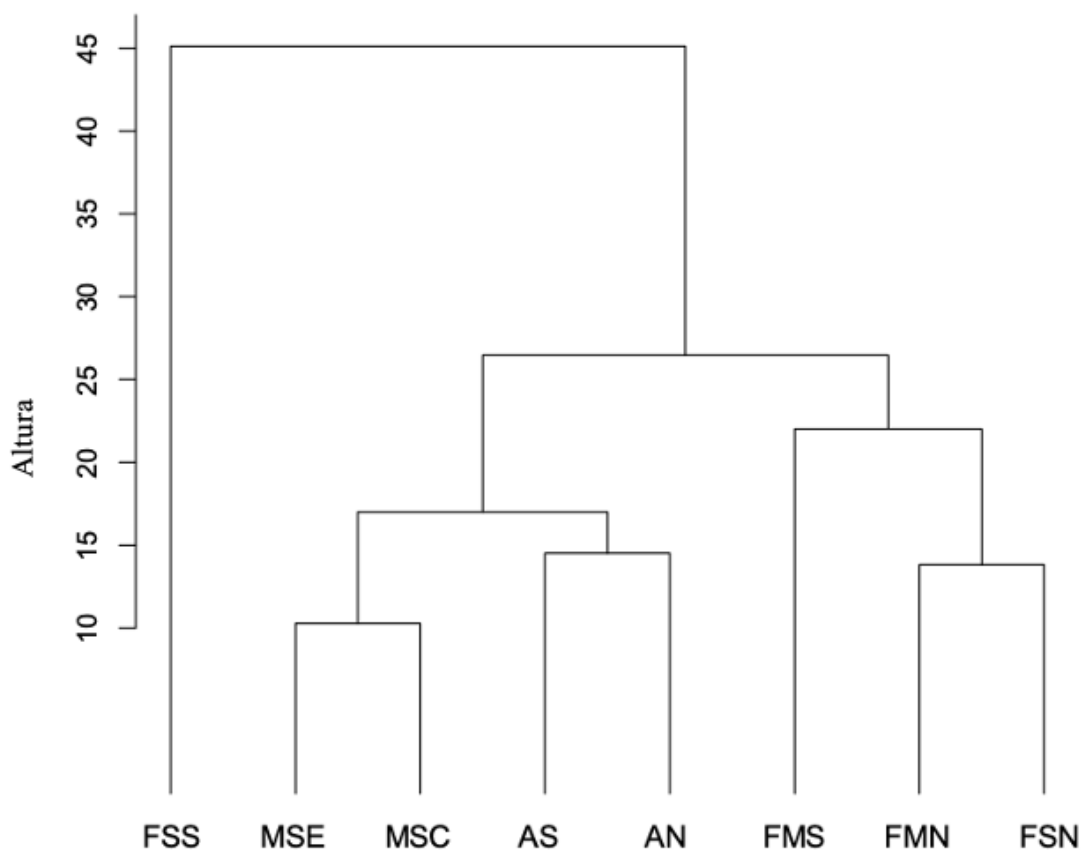


Figura 21. Análisis de Conglomerados para grupos de microorganismos y atributos fisicoquímicos del suelo

AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo comercial.

Fuente: Elaboración propia.

Dada la importancia de la densidad aparente con el crecimiento y desarrollo de los cultivos, principalmente de las raíces y la captación de humedad por el efecto de la resistencia y la porosidad del suelo (Hossne, 2008), se destaca que los sitios con cultivos anuales, tanto asociación como monocultivo, presentan una mayor densidad aparente respecto a los sitios con frutal en monocultivo o sistema MIAF, esto puede deberse a procesos de compactación

de suelo por el uso cíclico de maquinaria agrícola en los sitios con cultivos anuales, lo cual no sucede en aquellos con manzano (Cuadro 24).

La variación de la densidad aparente y humedad gravimétrica puede explicarse por la cobertura vegetal, como observaron Martínez-González *et al.* (2010), ya que la densidad y la cobertura vegetal influyen en la humedad del suelo al interceptar agua pluvial y radiación solar, a la vez que son un medio de salida de agua del agroecosistema mediante la transpiración; los valores de los sitios con manzano en sistema MIAF, orientación sur (10.72%) y norte (10.07%), pueden deberse a la distribución de raíces de los distintos cultivos componentes del sistema MIAF (Albino-Garduño *et al.*, 2015), teniendo un área de exploración mayor en el sistema MIAF que en monocultivo, y por lo tanto mayor aprovechamiento de la humedad del suelo.

A la par de los atributos fisicoquímicos del suelo, la población de grupos microbiológicos es crucial para los procesos biogeoquímicos y un buen desarrollo de los cultivos. Los actinomicetos son un grupo de la microbiota relevante debido al papel que desempeñan en la producción de metabolitos secundarios, degradación de material orgánico y la promoción del crecimiento vegetal (Franco-Correa, 2009; Pérez-Corral *et al.*, 2015), por lo que es interesante observar que la existencia de actinomicetos totales respecto al sitio con maíz en monocultivo comercial fue superior o similar en los demás sitios evaluados (Figura 19c), al igual que los actinomicetos fijadores de nitrógeno (Figura 19d), exceptuando los sitios con asociación frijol-maíz orientación norte y con frutal en monocultivo orientación sur. Yurkov *et al.* (2012) señalan que las levaduras del suelo son sensibles a las prácticas de manejo en suelos agrícolas, como remoción del suelo y aplicación de agroquímicos, lo cual reduce de manera notable su población. Por su parte Slavikova y Vadkertiova (2003) manifestaron que la abundancia de levaduras disminuye en suelos labrados comparados con suelos no labrados, pudiendo asociarse a la aplicación de pesticidas y fungicidas, lo cual puede explicar la abundancia de levaduras en los sitios evaluados (Figura 19e).

Los HMA en suelos agrícolas son de particular interés debido a que estos favorecen el reciclaje de nutrientes al igual que optimizan la fertilización, de manera que se puede reducir

el uso de químicos de síntesis para fertilización (Wilches *et al.*, 2019), en los sitios evaluados la abundancia de este grupo se mostró similar (Figura 19f). Respecto a la correlación entre el porcentaje de materia orgánica oxidable, carbono oxidable y nitrógeno total con la abundancia de levaduras y actinomicetos fijadores de nitrógeno (Cuadro 25), concuerda con Mantilla-Paredes *et al.* (2009), quienes mencionan la importancia de estos grupos para la dinámica de nutrientes al descomponer materia orgánica y favorecer la mineralización, impactan en la aireación de la capa superficial y mejoran la estructura física del suelo. Al igual que Simón *et al.* (2013), se observó una correlación entre la materia orgánica y la conductividad eléctrica en los distintos sitios evaluados (Figura 20)

El análisis multivariado (Figura 21) permitió la agrupación de sitios con características similares relacionadas con parámetros de calidad y microorganismos estudiados en el suelo, separando aquellos sitios con monocultivo de los cultivos en asociación en el sistema MIAF, a excepción del sitio con frutal en monocultivo con orientación sur. En contraste con lo observado por Gómez-González *et al.* (2019), quienes sí indican diferencias en el desarrollo de cultivos de acuerdo con la orientación.

Conclusiones

La población de grupos microbianos beneficiosos, exceptuando las levaduras, resultaron con mayor abundancia en los sitios de asociación maíz-frijol y manzano en sistema MIAF que aquellos con monocultivo de manzano y maíz. La mayoría de las propiedades fisicoquímicas del suelo se manifestaron similares o superiores en los sitios con sistema MIAF respecto los sitios con monocultivo de maíz y manzano.

Las relaciones observadas entre los hongos y levaduras con la materia orgánica oxidable y el carbono oxidable del suelo, así como de los actinomicetos fijadores de nitrógeno con el porcentaje de nitrógeno total y cantidad de nitrógeno mineral, confirman la importancia de estos grupos microbianos en la calidad y fertilidad del suelo.

El sistema MIAF muestra el potencial de favorecer la población de distintos grupos funcionales de microorganismos edáficos que se asocian con mejoras en las propiedades del suelo.

Literatura citada

- Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. (1999). Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra*, 17(3), 179-191.
- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, I., Livera-Muñoz, M. y Mendoza-Castillo, M. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513-531.
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 74, 19-31.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I. y Montalba, N. R. (2014). El papel de la biodiversidad en la agricultura campesina en América Latina. *LEISA revista de agroecología*, 30(1), 5-8.
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L. y Pérez-Torres, J. (2019). Composición y estructura vegetal de fragmentos de bosque seco tropical en paisajes de ganadería extensiva bajo manejo silvopastoril y convencional en Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 41(1), 224-234. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71320
- Bocanegra-González, K. T., Fernández-Méndez, F. y Galvis-Jiménez, J. D. (2015). Grupos funcionales de árboles en bosques secundarios de la región bajo calima (Buenaventura, Colombia). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 19(1), 17-40. doi: 10.17151/bccm.2015.19.1.2
- Covaleda, S., Paz, F. y Ranero, A. (2016). Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 97-112.
- De la Rosa-Mera, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Sánchez-Colín, M. y Franco-Ramírez, A. (2012). Aislamiento de consorcios de hongos micorrícicos arbusculares de plantas medicinales y su efecto en el crecimiento de vinca (*Catharanthus roseus*). *Revista chilena de historia natural*, 85(2), 187-198. doi: 10.4067/S0716-078X2012000200005

- Estrada-Herrera, I.R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz-Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831. doi: <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/nov-dic/art-1.pdf>
- Evangelista, M. Z., Quiñones, A. E. y Rincón, E. G. (2017). Potencial biotecnológico de las actinobacterias aisladas de suelos de México como fuente natural de moléculas bioactivas: compuestos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21(63), 39-51. doi: http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas63/T63_E011-2017.pdf
- Franco-Correa, M. (2009). Utilización de los actinomicetos en procesos de biofertilización. *Revista Peruana de Biología*, 16(2), 239-242. doi: 10.15381/rpb.v16i2.213
- García de Salamone, I. E. (2011). Microorganismos del suelo y sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista Argentina de Microbiología*, 43(1), 1-3.
- García, M. L., Valdez, H. J., Luna, C. M. y López, M. R. (2015). Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y bosques*, 21(3), 69-82. doi: 10.21829/myb.2015.213457
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Gómez, W. (2014). El Sistema Agroforestal Quensungual en El Salvador. Estudio de caso. *Multequina*, 23, 55-63.
- Gómez-González, A., Reyes-Contreras, J. G., García-Herrera, E. J., Pimentel-López, J. y Silos-Espino, H. (2019). Efecto de orientación y forma de contenedor sobre el crecimiento y desarrollo de chile ancho cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 22, 43-51. doi: 10.29312/remexca.v0i22.1857
- Hossne, G. (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 195-202.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2016). Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21074a.html>. Fecha de consulta 12 de enero de 2020.

- León, J. D., González, M. I. y Gallardo, J. F. (2011). Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(4), 1883-1894. doi: 10.15517/rbt.v59i4
- Mantilla-Paredes, A. J., Cardona, G. I., Peña-Venegas, C. P., Murcia, U., Rodríguez, M. y Zambrano, M. M. (2009). Distribución de bacterias potencialmente fijadores de nitrógeno y su relación con parámetros fisicoquímicos en suelo con tres coberturas vegetales en el sur de la Amazonia colombiana. *Revista de Biología Tropical*, 57(4), 915-927. doi: 10.15517/rbt.v57i4
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F. y Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 88-103. doi: 10.24850/j-tyca-imta
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M. y Casas, A. (2013). Agroforestry systems of Mexico: A biocultural approach. *Botanical Sciences*, 91(4), 375-398. doi: 10.17129/botsci.419
- Moreno-Calles, A. I., Galicia-Luna, V. J., Casas, A., Toledo, V. M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D. y Camou-Guerrero, A. (2014). La Etnoagroforestería: El estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*, 12(3), 1-16.
- Muñoz, G. J., Rousseau, G. X., Andrade-Silva, J., Charles, D. J. (2017). Taxones superiores de hormigas como sustitutos de la riqueza de especies en una cronosecuencia de bosques secundarios, bosque primario y sistemas agroforestales en la Amazonía Oriental, Brasil. *Biología Tropical*, 65(1), 279-291. doi: 10.15517/rbt.v65i1.23526.
- Murgueitio, E., Cuellar, P., Ibrahim, M., Gobbi, J., Cuartas, C. A., Naranjo, J. F., Zapata, A., Mejía, C. E., Zuluaga, A. F. y Casasola, F. (2006). Adopción de Sistemas Agroforestales Pecuarios. *Pastos y Forrajes*, 29(4), 365-381.
- Nelson, J. C. y Nelson, J. M. (2015). Uso y manejo de hongos micorrizicos arbusculares (HMA) y humus de lombriz en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), bajo sistema protegido. *Cultivos Tropicales*, 36(1), 55-64. doi: 10.1234/ct.v36i1.940
- Norma Mexicana NMX-AA-18-1984. Protección al ambiente-contaminación de suelo-residuos sólidos municipales-determinación de cenizas. Secretaría de Comercio. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-018-1984.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017

- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 2002. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994. Bienes y servicios, preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de octubre de 1995. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69533.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994. Bienes y servicios. Métodos para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 1995. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/111ssa14.html>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/285729/>. Fecha de consulta agosto de 2019
- Paolini-Gómez, J. E. (2017). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36, 12-22.
- Parra-Cota, F. I., Coronel-Acosta, C. B., Amézquita-Avilés, C. F., Santos-Villalobos, S. y Escalante-Martínez, D. I. (2018). Diversidad metabólica de microorganismos edáficos asociados al cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 431-442. doi: 10.29312/remexca.v9i2.1083
- Pérez-Corral, D. A., García-González, N. Y., Gallegos-Morales, G., Ruíz-Cisneros, M. F., Berlanga-Reyes, D. I. y Ríos-Velasco, C. (2015). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonistas a *Fusarium equiseti*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1629-1638. doi: 10.29312/remexca.v6i7.555
- Pocomucha, V. S., Alegre, J. y Abrego, L. (2016). Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología aplicada*, 15(2), 107-114. doi: 10.21704/rea.v15i2.750

- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Santillana, N. y Toro, M. (2018). Asociación micorrízica arbuscular en pastizales de la Comunidad Alto andina de Ccarhuaccpampa – Ayacucho. *Ecología Aplicada*, 17(2), 165-169. doi: 10.21704/rea.v17i2.1236
- Simón, M., Peralta, N., Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencias del Suelo*, 31(1), 45-55.
- Sláviková, E. y Vadkertiová, R. (2003). The diversity of yeasts in the agricultural soil. *Journal of Basic Microbiology*, 43(5), 430-436. doi: 10.1002/jobm.200310277
- Soria, M. A. (2016). ¿Por qué son importantes los microorganismos del suelo para la agricultura? *Química Viva*, 15(2), 3-10.
- Soto, A. H., Zavala, H. J., Pérez, M. J., Camargo, R. S. (2012). Estacionalidad de bacterias y hongos en la rizósfera de dos especies de plantas del Valle semiárido de Zapotitlán, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(6), 1231-1245. doi: 10.29312/remexca.v3i6.1374
- Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Thompson, C. y Mejía-Andrade, H. (2016). Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1727-1739. doi: 10.29312/remexca.v7i7.165
- Turrent, F. A., Cortés, F. J., Espinosa, C. A., Hernández, R. E., Camas, G. R., Torres, Z. J. y Zambada, M. A. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185. doi: 10.29312/remexca.v8i5.116
- Valenzuela, E. F., Díaz, P. N., Aranda, C. G., Martínez, O. V. y Godoy, R. B. (2014). Cultivo de cepas de levaduras de suelo trumao en Vinaza. *Boletín Micológico*, 29(2), 56-62. doi: 10.22370/bolmicol.2014.29.2.867
- Wilches, O. W., Ramírez, G. M., Pérez, M. U., Serralde, O. D., Peñaranda, R. A. y Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrizicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37, 175-184. doi: 10.28940/terra.v37i2.481

Yurkov, A. M., Kemler, M. y Begerow, D. (2012). Assessment of yeast diversity in soils under different management regimes. *Fungal ecology*, 5, 24-35. doi: 10.1016/j.funeco.2011.07.004

CONCLUSIONES GENERALES

El índice de área foliar y la biomasa aérea total de maíz, que son indicadores importantes del rendimiento de los cultivos, se vieron influenciados por la orientación de los cultivos anuales respecto al manzano, mientras que la calidad física de las semillas de maíz mostró relación con el genotipo de maíz. Para la calidad fisiológica de las semillas de maíz, no se evidenció que el sistema MIAF o los genotipos de maíz estudiados se relacionan con el porcentaje de germinación y viabilidad de las semillas. Es importante considerar estos factores al momento de establecer un huerto bajo sistema MIAF, con el fin de obtener la mayor productividad.

Uno de los beneficios del sistema MIAF es mejorar la calidad del suelo. Las condiciones edafoclimáticas que se generan bajo el MIAF mostraron un beneficio en los principales indicadores de calidad de suelo, como la materia orgánica, la densidad aparente, así como la presencia de nutrientes y de grupos microbiológicos beneficiosos, principalmente levaduras y actinomicetos totales, los cuales son microorganismos que tienen un papel importante en el flujo de nutrientes en el agroecosistema y la disponibilidad de estos para las plantas.

La población de algunos microorganismos, como los hongos y las levaduras resultó ser importante debido a la relación que guardan con aspectos fisicoquímicos del suelo, como el porcentaje de materia orgánica oxidable y el carbono orgánico, mientras que los actinomicetos fijadores de nitrógeno mostraron tener relación con el nitrógeno total, así como con el contenido de nitrógeno inorgánico del suelo.

En términos productivos, el MIAF resultó con una eficiencia relativa de la tierra superior a la unidad, por lo que se presenta una ventaja, en términos de rendimientos, respecto a los monocultivos. Esto al requerir una menor superficie de cultivo para obtener rendimientos iguales o superiores a los monocultivos.

En la presente investigación, se evidencia que el agroecosistema MIAF presenta diversos beneficios, tanto en términos ecológicos como productivos, presentándose como una

alternativa viable para la producción de maíz en familias campesinas con superficies pequeñas y resulta una opción con un enfoque agroecológico.

RECOMENDACIONES GENERALES

Se recomienda la implementación del sistema MIAF con prácticas agroecológicas, con el fin de mejorar las condiciones generales en las que viven las familias campesinas con unidades de producciones pequeñas, esto debido a que es una opción para la producción de maíz que promueve la conservación de la diversidad de los agroecosistemas, gracias a la diversificación de los cultivos y las sinergias que se dan entre éstos y otros componentes del agroecosistema.

Ampliar los estudios que se tienen sobre la biodiversidad de los sistemas MIAF y profundizar en las interacciones que se dan entre los componentes del sistema, pudiendo así diversificar las especies vegetales del agroecosistema y mejorar los atributos de éste.

Aumentar el conocimiento sobre grupos microbiológicos y el aporte de éstos al mejoramiento del suelo y la salud de los cultivos, así como prácticas de manejo amigables con la microbiota del suelo, la cual es la base de buena parte de los procesos ecológicos.

Reducir el uso de agroquímicos, los cuales son nocivos para poblaciones clave en los procesos del agroecosistema, como algunos microorganismos. Además de representar un riesgo sanitario para el ambiente y la salud de los productores y consumidores.

Si bien, en este estudio no se abordaron aspectos relacionados al conocimiento tradicional, se exhorta al rescate de éste para poder aplicarlo de manera conjunta al conocimiento científico, de manera que se puedan optimizar las prácticas agrícolas a través de innovaciones con una base agroecológica y sustentable, que conserve la diversidad y respete a los productores y consumidores.