



Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca

**"Abonos verdes asociados con maíz para
mejorar el manejo sustentable del suelo del
sistema maíz de temporal en Zaachila,
Oaxaca"**

**Doctorado en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de Recursos Naturales**

Protección y Producción Vegetal

Director de tesis: Dr. Jaime Ruíz Vega

Alumno: Alexandre Beaupré

Junio 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a 25 de enero del 2021

El Colegio de Profesores de Posgrado de **CIIDIR UNIDAD OAXACA** en su Sesión
(Unidad Académica)

ordinaria No. 10 celebrada el día 09 del mes noviembre de 2020, conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	Beaupré	Apellido Materno:		Nombre (s):	Alexandre
-------------------	---------	-------------------	--	-------------	-----------

Número de registro: A 1 7 0 3 5 2

del Programa Académico de Posgrado: **Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales**

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

“Abonos verdes asociados con maíz para mejorar el manejo sustentable del suelo del sistema maíz de temporal en Zaachila, Oaxaca”

Objetivo general del trabajo de tesis:

Caracterizar cinco leguminosas (tres locales y dos exóticas) intercaladas con maíz de temporal y evaluar su posible contribución a la sustentabilidad del agroecosistema.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: **Dr. Jaime Ruiz Vega** 2° Director:
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

CIIDIR Unidad Oaxaca, en la Línea de Investigación: Protección y Producción Vegetal

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis

2° Director de Tesis (en su caso)

Dr. Jaime Ruiz Vega

Aspirante

Beaupré Alexandre

Presidente del Colegio

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de

del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada

por el Colegio del

(CIIDIR UNIDAD OAXACA) para examinar la tesis titulada:

"Abonos verdes asociados con maíz para mejorar el manejo sustentable del suelo del sistema maíz de temporal en Zaachila, Oaxaca"

del alumno:

Apellido Paterno:	Beaupré	Apellido Materno:		Nombre (s):	Alexandre
-------------------	---------	-------------------	--	-------------	-----------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Aprovechamiento de Recursos Naturales.

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene **3.0%** de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

El porcentaje de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a la fuente original. Se excluyó internet porque ahí aparece el artículo publicado por el alumno.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes: Cumple con requisitos de formato y de redacción y por presentar resultados y conclusiones originales.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. Jaime Ruiz Vega
Director de Tesis
Nombre completo y firma

Dr. Celerino Robles Pérez
Nombre completo y firma

Dra. Elvira Durán Medina
Nombre completo y firma

Dr. Teodulfo Aquino Bolaños
Nombre completo y firma

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo
Nombre completo y firma

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
Nombre completo y firma

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 27 del mes de enero del año 2021, el que suscribe **Beaupré Alexandre** alumno del Programa de **Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales** con número de registro **A170352**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Jaime Ruiz Vega** y cede los derechos del trabajo titulado: **“Abonos verdes asociados con maíz para mejorar el manejo sustentable del suelo del sistema maíz de temporal en Zaachila, Oaxaca”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **alexbeaupre297@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Beaupré Alexandre

Nombre y firma



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

TABLA DE CONTENIDO

	AGRADECIMIENTO	5
	RESUMEN	7
	SUMMARY	9
I	INTRODUCCIÓN	11
1.1	MARCO TEÓRICO	15
1.1.1	SEQUÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO	15
1.1.2	MANEJO AGRONÓMICO PARA PALIAR EL ESTRÉS HÍDRICO	16
1.1.3	ABONOS VERDES	18
1.1.4	EL AGROECOSISTEMA	20
1.1.5	MARCO PARA LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE MANEJO DE RECURSOS NATURALES INCORPORANDO INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD (MESMIS)	22
1.1.6	VULNERABILIDAD DE LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES	25
1.1.7	MODERNIZACIÓN DEL CAMPO	26
1.1.8	FACTORES SOCIO ECONÓMICOS QUE LIMITAN LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES DE MAÍZ	30
1.1.9	FACTORES AMBIENTALES QUE AMENAZAN A LOS AGROECOSISTEMAS	33
1.1.10	ALTERNATIVAS DE LOS AV/CC DESDE LA AGROECOLOGÍA	36
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	39
1.3	JUSTIFICACIÓN	42

1.4	HIPÓTESIS	45
1.5	OBJETIVOS	46
1.6	METODOLOGÍA	46
II	CARACTERIZACIÓN SOCIOAMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA VILLA DE ZAACHILA	56
2.1	FACTORES SOCIALES	56
2.2	FACTORES ECONÓMICOS	57
2.3	FACTORES AGRARIOS	59
2.4	FACTORES AMBIENTALES	60
2.5	FACTORES DE MANEJO AGRÍCOLA	63
2.6	CARACTERÍSTICAS DE UN BUEN ABONO VERDE EN EL SISTEMA DE MAÍZ DE TEMPORAL	67
III	PERTINENCE OF EXOTIC AND LOCAL GREEN MANURES FOR SUSTAINABLE MAIZE POLY CULTURE IN OAXACA, MEXICO	70
3.1	ABSTRACT	71
3.2	INTRODUCTION	72
3.3	MATERIALS AND METHODS	74
3.4	RESULTS	83
3.5	DISCUSSION	98
3.6	CONCLUSIÓN	101
3.7	REFERENCE	102
IV	ANEXOS	111

MANUAL DE ABONOS VERDES

SIP 13

SIP 14

Carta Cesión de derechos

V	BIBLIOGRAFÍA	139
---	---------------------	-----

FIGURAS

Figura 1	Mapa de suelos de la Villa de Zaachila	62
Figura 2	Characterization of the local rainfed agroecosystem, its critical points and outcomes as potential indicators	76
Figura 3	Maize yield for both years (a) and both soil types (b). Green manure yield for both years (c) and both soil types (d)	87
Figura 4	LER for both years (a) and both soil types (b)	89
Figura 5	Interspecific competition between maize and the different types of green manure	90
Figura 6	Dry green manure biomass for both years (a) and soil types (b)	92
Figura 7	Heatmap of normalized decomposition rate, dry biomass, yield, organic matter percentage, and survival rate for each type of green manure	94

Figura 8 Integrative comparison among local and exotic green manures in 96
polyculture with maize

TABLAS

Tabla 1	Experimental design	76
Tabla 2	Main attributes for maize sustainability analysis	85
Tabla 3	Two-Ways ANOVA results	88
Tabla 4	Survival Index for each green manure for all the plots	95
Tabla 5	Multifunctionality of each green manure	96

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Jaime Ruiz-Vega, así como a todo el comité tutorial por haberme aconsejado en todo este andar del doctorado, siempre dispuesto a ayudarme para seguir adelante en estos laberintos de la ciencia y de la investigación. Al CONACYT por otorgar la beca que me permitió concentrarme en mis investigaciones a tiempo completo.

A mi esposa María Guadalupe León Velasco que me apoyó de forma incondicional en estos 4 años, aunque este trabajo nunca se valora y visibiliza en las sociedades modernas de las sociedades campesinas *Binnidza*. Le doy gracias por haber compartido esta gran aventura y por las que siguen. También agradezco a mis suegros, Doña Paola y Don Nacho, y a mi cuñada Juana por abrirme las puertas de sus hogares.

A mis papás que siempre me apoyaron sin dudar nunca. A mi papá Michel Beaupré, que me inculcó el amor a la ciencia y a lo desconocido, y a mi mamá Jacqueline Dufresne, por transmitirme el amor a la naturaleza y a la lectura.

A mi compañero de aventuras agroecológicas en la Villa de Zaachila, el maestro-campesino Raymundo Aguilar, por haber abierto las puertas de su tierra donde hice mis experimentos y donde él ha experimentado por ya más de 5 años con el dolicho. Ahí también hicimos muchos talleres agroecológicos con campesinos y estudiantes a lo largo de muchos años.

Al CBTA núm. 78 por haber prestado una parcela durante dos ciclos de producción y por haber compartido sus instalaciones para hacer encuentros

agroecológicos y talleres para promover el uso de abonos verdes y la agricultura sustentable en la Villa de Zaachila.

Al Molote Agroecológico, integrado por Mariana, Emilio, Tania, Fernanda, Luis, Checo, Cristina, Cecilia, Adriana, Mauricio y Benito, y a todos y todas las demás que nos han venido acompañando desde la UNAM con talleres, conocimiento y demás para promover la agroecología en la Villa de Zaachila.

A los campesinos y las campesinas de la Red Agroecológica de la Villa de Zaachila, como doña Yolanda, don Heliodoro, el mismo Raymundo, don Mario, don Francisco Tejada y demás, con los cuales hemos trabajado en los surcos de la agroecología promoviendo una agricultura sustentable y sana para la tierra, para sus familias y para la comunidad.

A don Polo, por su amor a la tierra y con quien trabajé algunos años. En su terreno descubrí la planta de dolicho, con la cual empecé a trabajar desde la licenciatura.

A los maestros de la especialidad del ITVO, sobre todo al Ing. Gabriel Córdoba y su granja integral donde nació mi vocación de Agroecólogo. A los maestros y campesinos cubanos que me han inspirado con su vocación, su nivel de compromiso y de conciencia para promover la agroecología.

Al Espacio Estatal en Defensa del Maíz Nativo de Oaxaca por haberme mostrado lo sagrada que es la conservación de las semillas de maíz nativas y la defensa de los derechos de los campesinos.

RESUMEN

La multifuncionalidad de las leguminosas ha sido parte de las estrategias campesinas y de un enfoque agroecológico para mejorar los agroecosistemas del maíz de temporal, por lo cual en los Valles Centrales de Oaxaca se evaluaron cinco especies de abonos verdes tanto locales como exóticos para promover su uso dentro de los sistemas campesinos.

Se establecieron dos parcelas experimentales, una en un suelo Fluvisol en planicie y la otra en un suelo Cambisol en lomerío. Se utilizaron tres especies nativas y dos exóticas durante los ciclos de temporal 2017 y 2018. Se aplicó un análisis de procesos desde un enfoque agroecológico con el método MESMIS determinando indicadores de sustentabilidad para las asociaciones entre los abonos verdes y el maíz criollo bolita amarillo. Los abonos verdes exóticos *Crotalaria juncea* y el dolicho (*Lablab purpureus*) tuvieron una mayor producción de biomasa y por lo tanto un mayor potencial para la reincorporación de materia orgánica y de fijación de nitrógeno (USDA, 2012), así como una mayor resistencia a la sequía en los dos ciclo; sin embargo, las leguminosas nativas (*Phaseolus vulgaris* y *Phaseolus coccineus*) tuvieron mayor aceptación y mayor demanda y precio ya que son parte de la dieta básica campesina en la Villa de Zaachila. Se propusieron diferentes densidades de siembra para las diferentes leguminosas: en el caso de los *Phaseolus vulgaris* (frijol negro delgado) recomienda una densidad de 100,000 y de 20,000 plantas de maíz por ha para una producción media de 1 tonelada por ha, y de 30,000-40,000 para *Phaseolus vulgaris* (frijol de guía) con un rendimiento promedio de una tonelada por ha, el *Phaseolus coccineus* (frijol ayocote) con 30,000 plantas por ha produce 500 kg por

ha para el dolicho se recomienda 20,000 plantas por ha con un potencial de mas de 10 toneladas de biomasa seca. Para el *C. juncea* se recomienda 70,000-80,000 plantas por ha que pueden producir más de 10 toneladas de biomasa seca.

Los AV exóticos pueden tener diferentes funciones dentro del agroecosistema tales como AV/CC y como forraje mientras los AV locales son utilizados más para la seguridad alimentaria y la economía de las familias campesinas.

Los abonos verdes (AV) son una alternativa para el manejo sustentable del maíz de temporal, frente a condiciones adversas como el cambio climático y la pérdida de fertilidad del suelo. El cambio climático se manifiesta en una canícula seca cada vez más aguda, entre la mitad de julio y hasta la mitad de agosto en los Valles Centrales de Oaxaca, con la ausencia de lluvias en el momento más crítico del desarrollo fenológico de las plantas de maíz. El bajo contenido de materia orgánica se ha reflejado en la baja fertilidad de los suelos y degradación de sus propiedades físicas, lo cual ha sido provocado por no aplicar suficientes residuos de cosecha y estiércol a los suelos.

Palabras claves: abonos verdes, complementariedad, maíz de temporal, multifuncionalidad, sustentabilidad.

SUMMARY

Green manures (GM) can be an alternative to improve sustainability with native rainfed maize, in front of climate change and loss of fertility of the soils. Climate change manifests itself as a dry period between July and August during the rainy period of the year in the Central Valley of Oaxaca when the plants of maize or in a

critical period of development. And the loss of fertility of the soils with low percentage of organic matter that cause the deterioration of its physical property for the low organic matter from manure or harvest waste that has been reincorporated.

The multifunctionality of pulse has been part of the strategy of the peasant system and part of an agroecological approach, in this case of the rainfed maíz of the Central Valleys of Oaxaca. For this we have to evaluate the pertinence of 5 local and exotic GMs to find the best option inside the native and exotic pulse to promote it in the peasant system.

To evaluate such a proposal, we've been selecting two agroecosystem, one in the deeper soil Fluvisol and one in the hills poorest soil (Cambisol) of the municipality of Villa de Zaachila, Oaxaca with 5 pulses (3 natives and 2 exotics) within the cycle of 2017-2018. A process analysis was applied from an agroecological approach with the MESMIS method, applying sustainability indicators with the association between GM and yellow native maize. Exotic green manures (*Crotalaria junscea* and *Lablab purpureus*) have had a better development in biomass and therefore a greater potential for the reincorporation of organic matter and possible nitrogen fixation as well as greater resistance to drought in the second cycle, but the native legumes (*Phaseolus vulgaris* and *Phaseolus coccineus*) have greater acceptance and have greater economic output and are part of the rural food security in the Villa de Zaachila.

Key words: complementarity, green manure, multifunctionality sustainability, rainfed maize

1. INTRODUCCIÓN

Según el comisariado ejidal, durante la canícula seca del 2015 se perdieron 700 de las 900 hectáreas de maíz de temporal, eje de la subsistencia de muchas familias campesinas en municipio de la Villa de Zaachila. Esta investigación nace de la preocupación concreta de un agroecólogo que ha trabajado en la Villa de Zaachila durante varios años impartiendo talleres con los campesinos, ante la falta de respuesta del gobierno municipal o de otra institución frente a esta problemática.

En estos talleres se discutieron aspectos de la vulnerabilidad de los agroecosistemas debido a los efectos del cambio climático, el bajo porcentaje de materia orgánica en el suelo y el bajo rendimiento de los sistemas de cultivo tradicionales de maíz de temporal, así como la posibilidad de incorporar abonos verdes (AV) como estrategia de mejora. A partir de la implementación de lo propuesto en estos talleres, muchos de los campesinos de Zaachila, lograron resistir a la canícula seca y producir sus maíces nativos mediante la incorporación de materia orgánica y los cultivos de cobertura, al mejorar la condición de sus suelos (Ruíz-González *et al.*, 2019; Benítez-Keinrad *et al.*, 2016).

La variabilidad climática provoca cambios drásticos en los ciclos de lluvia, los cuales afectan directamente a los cultivos agrícolas, en especial a los de temporal (SEMARNAT, 2018). Las escasas lluvias de 2015 y las canículas prolongadas de los años anteriores son un ejemplo de la variabilidad climática y de la limitación que ella provoca en los sistemas de producción de maíz de temporal. El maíz nativo necesita aproximadamente 500 mm de agua de lluvia para completar su

ciclo, pero hay fases críticas en su crecimiento, en las cuales, la falta de lluvias puede afectar severamente los rendimientos. La canícula seca se presenta entre los meses de julio y agosto cuando las plantas de maíz están espigando y tienen un gran requerimiento de agua y nutrientes (200-250 mm). Entre otras cosas, la variabilidad climática hace cada vez más difícil predecir los patrones de lluvia y determinar las fechas de siembra (Ramírez-Córdova *et al.*, 2017; Ruíz-Vega, 1998).

En esta región se ha demostrado que la asociación de maíz y otras especies que sirven como cobertura del suelo pueden disminuir la evaporación del agua del suelo, además de que su reincorporación propicia una mayor humedad aprovechable (Ruíz-Vega *et al.*, 2003). Los AV pueden mejorar la resiliencia del sistema de maíz de temporal y aumentar los rendimientos (Meagan, 2016), disminuir la dependencia a los insumos externos, capturar carbono orgánico y contribuir a la mitigación y la adaptación al cambio climático desde una escala local (CIMMYT, 2018; Montiel *et al.*, 2015). Así, la siembra del maíz criollo con AV es una propuesta alternativa para evitar la degradación de los suelos agrícolas, mejorar los rendimientos y hacer frente a la variabilidad climática (Ruíz-González *et al.*, 2019).

El principal recurso que permite la reproducción del sistema de maíz de temporal es el suelo. Según la CONAFOR (2017), el 45.2 % de los suelos están en proceso de degradación, de los cuales 23.9 % se debe al sobrepastoreo, 18.8 % a la agricultura, 3.8 % a la deforestación, 0.9 % a la sobreexplotación y 0.5 % a la urbanización. En Oaxaca, 86 % de los suelos están en proceso de degradación de

la textura (40.4 % ligera, 11.9 % es moderada, 27.4 % es severa, 6.3 % es extrema y 14 % sin daños). Esta degradación de los suelos amenaza la seguridad alimentaria de las familias campesinas (INFORURAL, 2017).

El suelo puede mejorarse o degradarse según las prácticas agrícolas que se llevan a cabo. Hay formas de labranza y prácticas de manejo de los agroecosistemas que reducen la calidad del suelo y la eficiencia energética (EE) de sus sistemas de producción (Kazemi, 2016; Perin *et al.*, 2012; Ruíz-Vega *et al.*, 1999), la cual se puede definir como la proporción entre el flujo de energía de salida y el de entrada (Diego-Nava *et al.*, 2019). Esto fue demostrado en un estudio en los Valles de Oaxaca con tres métodos de labranza (Ruíz-Vega *et al.*, 1999), lo cual abrió el debate sobre los sistemas de manejo de suelo en el maíz de temporal. Algunas otras prácticas que pueden causar el deterioro acelerado de este recurso son, por ejemplo, la excesiva mecanización, el uso excesivo de agroquímicos sintéticos, al reducirla microbioma del suelo, la prolongada falta de cobertura del suelo que provoca erosión eólica e hídrica, y la no reincorporación de materia orgánica, la cual interrumpe los ciclos biogeoquímicos y limita la disponibilidad de nutrientes para las plantas (FAO, 2020; CIIFEN, 2017).

La insuficiencia nutritiva del maíz de temporal afecta directamente su capacidad productiva y por lo tanto el bienestar campesino. La agricultura convencional ha fomentado una dependencia cada vez mayor de fuentes nitrogenadas industriales con una alta huella ecológica (FAO, 2015c). Las leguminosas, por su capacidad de fijar el N₂ atmosférico al estar en simbiosis con la bacteria *Rhizobium*, pueden sustituir a esta fuente externa de insumos y aumentar el rendimiento del maíz

(García *et al.*, 2000) y la eficiencia energética del agroecosistema, además de disminuir su contribución a la emisión de gases con efecto invernadero (Diego-Nava *et al.*, 2019; Valdés *et al.*, 2009).

El uso de fertilizantes sintéticos en los sistemas maiceros tradicionales es cada vez más incosteable por la relación de sus precios con la del petróleo. Por otro lado, el uso de abonos orgánicos como la composta requieren de mucho trabajo, por ejemplo, se necesita 20,000-25,000 kg ha⁻¹ de biomasa para mantener el nivel de materia orgánica necesaria en el suelo. En general, los pequeños productores tienen la capacidad de producir en promedio 2,000 kg de estiércol con una alta inversión de trabajo (hasta 20 jornales al año). Para producir la cantidad de materia orgánica necesaria antes mencionada, se necesitaría de 15 a 18 cabezas de ganado (Bunch, 2001), con las cuales no cuentan los pequeños productores oaxaqueños. Así, ni la fertilización convencional ni la tradicional han logrado mantener la fertilidad del suelo, su productividad biológica o elevar el porcentaje de materia orgánica (Bunch, 2006).

En el estado de Oaxaca se siembran 532,187 ha anuales de maíz, con un rendimiento promedio de 1,170 kg ha⁻¹, producción que deja un déficit de 150,000 toneladas y supone un problema para la seguridad alimentaria del Estado. El déficit en la Villa de Zaachila ha sido en los últimos años de 3,200 toneladas (Mora-Van-Cauwelaert, 2017). El 90% de la siembra en el estado se hace con maíces nativos y criollos (478,968 ha) y el 10% restante utiliza variedades mejoradas (53,219 ha) (Aragón-Cuevas, 2011). La elección de variedades responde a criterios productivos, comerciales, gastronómicos y culturales. Por

ejemplo, en la Villa de Zaachila, el maíz criollo bolita amarillo es preferido por su mayor precocidad y tolerancia a la sequía, además de su alto valor comercial que se desprende de sus varios usos gastronómicos (Castillo-Tejero, 2007). Ante la falta de apoyo por parte de las políticas públicas que históricamente han excluido a los pequeños productores (OXFAM, 2014), ha sido con sus propios esfuerzos que los campesinos han buscado desarrollar sistemas de producción resilientes frente a la variabilidad climática, los bajos rendimientos y la degradación de los suelos. En el intento de acompañar estos procesos, se han desarrollado varios enfoques tanto de investigación básica como aplicada para poder aumentar la productividad de estos agroecosistemas con granos nativos (Toledo, 2001).

Y difundir los resultados de estas investigaciones agrícolas como es la siguiente sobre los abonos verdes y el maíz de temporal de forma vulgarizada a los productores y los técnicos que promueven técnicas agroecológicas (capítulo IV).

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 SEQUÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Dos de los fenómenos que han provocado una mayor vulnerabilidad de los agroecosistemas del maíz de temporal son de origen antrópico y afectan la agricultura a escala global: la pérdida de la fertilidad del suelo y el cambio climático (Darnhofer, 2010). El cambio climático se debe al aumento de gases con efecto invernadero inducidos por la actividad humana que han provocado un incremento de las temperaturas que afectan directamente a la agricultura, lo que provoca cambios en las arvenses las plagas y los regímenes de lluvias (Nelson *et*

al., 2009). Estos cambios de temperaturas también afectan los rendimientos del maíz y la seguridad alimentaria de las familias campesinas (*Ibid.*).

Las modificaciones del régimen de lluvia han provocado un incremento en la canícula seca en los Valles Centrales de Oaxaca (VCO), creando un mayor estrés hídrico sobre los cultivos en este lapso fenológico crítico (Ruíz-Vega, 1998). El estrés se produce durante una pérdida del balance hídrico, entre las ganancias de agua por absorción y sus pérdidas por transpiración. Este estrés hídrico se produce cuando se rompe la homeostasis intracelular dentro de la planta de maíz produciendo una situación de estrés por factores bióticos (temperaturas elevadas y ausencia de agua) que pueden afectar en las diferentes etapas de crecimiento de la planta (Darkwa *et al.*, 2016).

El estrés hídrico puede tener un fuerte efecto dependiendo la etapa fenológica de la planta de maíz, sobre todo en la etapa de floración y llenado de granos (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2008). Si el estrés hídrico se presenta durante la floración, entre 12 a 16 días sin lluvias, la fructificación podría afectarse hasta en un 90 %. Y si la canícula seca se prolonga durante más de 40 días, puede haber pérdidas total de las cosechas (Viguera *et al.*, 2017).

1.1.2 MANEJO AGRONÓMICO PARA PALIAR EL ESTRÉS HÍDRICO

Dos de las formas de manejo agronómico que pueden disminuir el estrés hídrico son la reincorporación de materia orgánica en el suelo, lo cual permite una mayor retención de agua en el suelo, y la cobertura del suelo que impide o disminuye la evaporación del agua (Bunch, 2012a; FAO, 2000). A través del manejo del suelo, se pueden mitigar algunos de los problemas provocados por el cambio climático,

particularmente en la Villa de Zaachila durante la canícula seca y ante el estrés hídrico que ésta provoca en las plantas de maíz (Lal, 2004).

La fertilidad del suelo es la capacidad de un suelo para proporcionar buenas condiciones de desarrollo y suministrar adecuadamente agua y nutrientes a las plantas. El abonamiento vegetal con AV, es una energía renovable que se transforma a través de la energía solar por medio de la fotosíntesis, y que regresa al suelo transformándose en materia orgánica, juega un rol clave para mantener y mejorar la fertilidad de los suelos (Brust, 2019; Romero-Martínez *et al.*, 2014).

La biomasa vegetal es parte central dentro del funcionamiento ecológico de los agroecosistemas. No sólo es imprescindible para el alimento humano y animal, sino que también lo es para el suelo (Brust, 2019; Romero-Martínez *et al.*, 2014).

La familia de las leguminosas tiene la ventaja de estar en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* que son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (Cullis *et al.*, 2017).

La degradación del suelo es también un problema global por los tipos de manejo generalizado impulsado desde la revolución industrial agrícola en Europa en el siglo XIX y reforzada desde la revolución verde en México a partir de los años 1950 (Torres-Torres *et al.*, 2018). Así, la incorporación de materia orgánica ha sido sustituida por fertilizantes sintéticos en muchas explotaciones agrícolas, causando una degradación del suelo que se caracterizan por (1) una pérdida de estructura del suelo, (2) una disminución de la materia orgánica, (3) erosión eólica e hídrica, y (4) pérdida de nutrientes (Bertoni *et al.*, 1985).

Estos procesos afectan a los pequeños productores de maíz que dependen de este grano para el sustento económico y alimentario de sus familias. El manejo del suelo es fundamental para incrementar o deteriorar su fertilidad (Sharma *et al.*, 2017; Bunch, 2016; Sanclemente-Reyes *et al.*, 2015; Bouthier *et al.*, 2014; Altieri *et al.*, 2013; Elfstrand *et al.*, 2007; Maiksteniene *et al.*, 2004). Es por esto que los AV son una alternativa como forma de abono vegetal (Ruíz-Vega *et al.*, 2003).

1.1.3 ABONOS VERDES

Los AV son plantas que se reincorporan al suelo para mejorar su fertilidad. Han sido ampliamente estudiados por su multifuncionalidad y su potencial para los pequeños productores (SAGARPA, 2016; Bunch, 2012*b*; García-Hernández, 2010; Cherr *et al.*, 2006; Pieters, 1927). Pueden ser intercalados con el cultivo principal o en rotación con él, dependiendo de las estrategias del productor y del sistema de producción. En tan sólo México y América Central se utilizan 14 especies de AV y de coberturas en 20 sistemas tradicionales manejados por 200,000 campesinos (Bunch, 2006).

La relación de los AV con la productividad de las gramíneas ha sido confirmada tanto por los propios campesinos como por numerosas investigaciones agrícolas (Bunch, 2016). Sin embargo, es fundamental realizar evaluaciones y caracterizaciones de los AV por zonas agroecológicas (SARD, 2006; Bunch, 2006).

Las investigaciones que estudian la interacción de AV con maíz de temporal también han demostrado sus posibles ventajas y limitaciones (Onwonga *et al.*, 2014; Bunch, 2012*b*). La asociación AV-maíz puede mejorar la sustentabilidad de este sistema. La incorporación de AV al suelo impide el crecimiento de las

malezas, los procesos de erosión hídrica y eólica, la evaporación del agua, además de ser una fuente de proteína y de forraje alternativo para el ganado. Los AV permitirían sustituir insumos externos por una tecnología adaptada a las condiciones agroclimáticas y reducir los costos de producción. Esto resultaría en una rápida adopción tecnológica, por lo cual la experimentación de diferentes AV en los Valles de Oaxaca es vital (García-Hernández *et al.*, 2010).

En el caso de los Valles Centrales de Oaxaca, la limitante principal para implementarlos podría ser la falta de espacio y de conocimientos sobre los AV por parte de los campesinos (Ruíz-Vega *et al.*, 2003).

Por lo tanto, es necesario profundizar el trabajo de investigación previo de AV intercalados con maíz en la zona considerando sus limitaciones (Ruíz-Vega *et al.*, 2003).

Las alternativas agroecológicas, como los AV en asociación con el maíz de temporal, tienen que nacer de un entendimiento integral del agroecosistema y sus características locales y así trazar estrategias que mejoren el desempeño sustentable del sistema. Los AV entonces se pueden considerar como parte de un concepto ampliado de la agricultura sustentable que incluye factores biofísicos, sociales, económicos y ecológicos (Wezel *et al.*, 2014; Altieri, 2001; García, 2000; Altieri, 1999). La agricultura sustentable se refiere en general “*a un modo de cultivar que intenta proveer una productividad sostenida a largo plazo a través del uso de tecnologías manejadas desde la ecología*” (Altieri, 2001).

El aumento de la eficiencia de estos agroecosistemas es necesario para seguir produciendo alimentos para una población creciente pero que procure no perjudicar las funciones ecológicas de los sistemas ni las bases productivas

naturales (Mungal *et al.*, 2016). Para ello y frente a una incertidumbre creciente como el cambio climático, es importante incrementar la biodiversidad, proteger la capa fértil del suelo (Sans, 2007); mantener y aumentar el flujo de nutrientes disponibles para las plantas (Tully *et al.*, 2017), y utilizar la diversidad genética de los cultivos para procurar su adaptabilidad (Altieri *et al.*, 2013).

1.1.4 EL AGROECOSISTEMA

El agroecosistema es el lugar en donde ocurren *“un conjunto de interacciones que suceden entre el suelo, las plantas cultivadas, los organismos de distintos niveles tróficos y las plantas adventicias en determinados espacios geográficos, cuando son enfocados desde el punto de vista de los flujos energéticos y de información, de los ciclos materiales y de sus relaciones sociales, económicas y políticas, que se expresan en distintas formas tecnológicas de manejo dentro de contextos culturales específicos”* (León-Sicard, 2014). Los agroecosistemas sustentables son menos dependientes de los insumos externos y son más complejos, pues se produce un sinergismo ecológico entre los elementos biológicos y socioculturales del sistema (Altieri, 2001).

La agroecología promueve *“una agricultura sustentable que mantiene en el tiempo un flujo de bienes y servicios que satisfagan las necesidades alimenticias, socioeconómicas y culturales de la población, dentro de los límites biofísicos que establece el correcto funcionamiento de los sistemas naturales modificados (agroecosistemas) que lo soportan”* (Sarandón *et al.*, 2009). La agroecología tiende a construir puentes entre el sistema de producción y su entorno

sociocultural, y construye senderos alternativos que permiten mejorar el entorno biofísico para regenerar el contexto sociocultural (Toledo, 2001).

Por lo tanto, la agroecología estudia los agroecosistemas tradicionales en los cuales se relacionan la diversidad biológica y las prácticas culturales (Gliessman *et al.*, 2002), desarrolla análisis comparativos de diferentes sistemas en una escala de tiempo y espacio *“extrayendo principios básicos que puedan ser aplicados en diferentes iniciativas locales”* (Tittonell *et al.*, 2011). Los sistemas de manejos simplificados que fueron creados a partir de los paquetes tecnológicos de la revolución verde tienen que volver a ser agroecosistemas complejos *“acoplándose a los ciclos de la naturaleza”* (Giraldo, 2015).

La agroecología nace desde una crítica a la ciencia convencional en los años 70's, desde la teoría de sistemas y desde los estudios de la complejidad, con ayuda de la Ecología y con la implementación de nuevos análisis para el diseño y manejo de los agroecosistemas (Giraldo, 2015). Los agroecosistemas son el objeto de estudio de la ciencia agroecológica (Altieri, 1999).

La medición de la sustentabilidad de los agroecosistemas permite evaluar propuestas alternativas para optimizar los sistemas de producción campesinos. Estas mediciones tienen que basarse en el estudio de las prácticas campesinas (tradicionales y/o alternativas) dentro de los agroecosistemas (Astier *et al.*, 2008). Hay que revalorizar estas prácticas y experiencias que promueven un manejo agroecológico del suelo, como por ejemplo, el abonamiento vegetal y su impacto dentro de la sustentabilidad del sistema de producción (Bunch, 2006).

Muchas propuestas institucionales y académicas han promovido diferentes esquemas de evaluación de la sustentabilidad dentro del sistema de producción, utilizando distintos indicadores (Astier *et al.*, 2012). La metodología empleada por Conway (1991), que utiliza indicadores de productividad, estabilidad, sustentabilidad y equidad, es un ejemplo de esto. También la FAO a través del FELSM (Marco de Evaluación del Manejo Sustentable de Tierras, por sus siglas en inglés) mediante indicadores como productividad, seguridad, protección, viabilidad y aceptabilidad, marcó una pauta para evaluar la sustentabilidad. Por otro lado, el Instituto Interamericano de Cooperación para La Agricultura (IICA) también contribuyó para avanzar en este tema (Hünнемeyer *et al.*, 1997; Mueller *et al.*, 1993). Finalmente, el Grupo interamericano para el Desarrollo Sostenible de la Agricultura y los Recursos Naturales (GIDSA, 1996) siguió profundizando esta evaluación de los agroecosistemas con los atributos de disponibilidad, adaptabilidad, robustez, resiliencia, estabilidad, capacidad de respuesta a cambios, autosuficiencia y potenciación de las capacidades locales.

1.1.5 Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS)

El Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) es una herramienta metodológica que permite un análisis a diferentes escalas y tiempos desde un enfoque multidisciplinario que permite una retroalimentación participativa y comparativa entre los sistemas actuales y las posibles alternativas (Astier *et al.*, 2012; Sarandón *et al.*, 2009). Según el MESMIS, existen siete atributos de un

agroecosistema que pueden medir su sustentabilidad: productividad, estabilidad, resiliencia, confiabilidad, adaptabilidad, equidad y autogestión. Estos atributos son parte de una visión holística del sistema de manejo o del agroecosistema que incluye las áreas social, económica y ambiental. Los atributos son las propiedades del agroecosistema que lo hacen sustentable, y necesitan indicadores para ser medidos. Los indicadores son medibles y deben reflejar los atributos de la sustentabilidad después de haber identificado los puntos críticos del sistema de manejo estudiado (Astier *et al.*, 2012).

La productividad “*es la capacidad del agroecosistema para brindar el nivel requerido de bienes y servicios*” (Astier *et al.*, 2008). En el caso del maíz de temporal, se refiere a la producción de maíz sostenida mientras que se mejora la calidad del suelo para mantener el rendimiento y se bajan lo más posible los costos de producción. La materia orgánica tiene un rol principal en los procesos de mejoramiento de las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Onwonga *et al.*, 2014). En este caso, también deben considerarse las posibles limitantes de la asociación maíz-AV, como la competencia interespecífica que puede afectar de forma negativa la productividad del maíz (Ruíz-Vega *et al.*, 2003).

La estabilidad está asociada con la constancia en la productividad a través del tiempo y el espacio, y puede lograrse manteniendo una buena cobertura sobre el suelo y mediante la reincorporación de materia orgánica para mejorar la capacidad de retención de humedad del suelo (Bautista-Cruz *et al.*, 2014).

La resiliencia se define como “*la propensión de un sistema a retener su estructura organizacional y su productividad tras una perturbación*” (Altieri *et al.*, 2013). La simplificación de los agroecosistemas campesinos y la pérdida de su biodiversidad los ha vuelto más vulnerables frente a cambios o perturbaciones, por lo que impulsar la resiliencia desde un manejo sustentable del suelo tiene que estar acompañado por una mayor biodiversidad de cultivos y microorganismos propios del suelo, propiciada por la incorporación de materia orgánica (Altieri, 1999).

La confiabilidad se refiere a la capacidad de un sistema de mantener su equilibrio productivo después de una perturbación (Astier *et al.*, 2008), como en el caso de la tolerancia de los cultivos frente al estrés (plagas, enfermedades, variabilidad climática) (Altieri *et al.*, 2013).

La adaptabilidad es la flexibilidad del sistema para adaptarse frente a nuevos contextos o ante perturbaciones (Astier *et al.*, 2012). Algunas formas de adaptarse a nuevas situaciones podrían ser: generar nuevos conocimientos o implementar prácticas frente a la crisis del maíz de temporal, el acceso a las semillas y el uso de los AV.

La equidad es la capacidad de repartir de manera justa los recursos naturales del agroecosistema, el trabajo y su producto. Ésta está relacionada a los costos de producción y la relación de beneficio/costo (Astier *et al.*, 2012).

La autogestión es la capacidad del agroecosistema de regular, articular e interactuar con el mundo exterior y se puede expresar como una mayor o menor dependencia hacia los insumos externos (Astier *et al.*, 2012). La disminución de la

dependencia hacia insumos externos puede aumentar la eficiencia energética del agroecosistema (Diego-Nava *et al.*, 2019).

Los pasos del análisis MESMIS son (1) determinación del objeto de estudio; (2) determinación de las fortalezas y debilidades que pueden incidir en la sustentabilidad del sistema; (3) selección de los indicadores; (4) presentación e integración de resultados y (5) conclusiones y recomendaciones (Astier *et al.*, 2012). Para elegir los indicadores en relación con los puntos críticos del sistema de maíz de temporal se tienen que tener claros los objetivos de la investigación. Por lo tanto, se tienen que elegir indicadores adecuados para medir la productividad, la estabilidad, la resiliencia, la resistencia, la adaptabilidad, la equidad y la autogestión en el manejo del suelo y el cultivo de maíz criollo asociado con AV, y así monitorear y medir sus efectos según los puntos críticos (Astier *et al.*, 2012).

1.1.6 VULNERABILIDAD DE LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES

La vulnerabilidad de los pequeños productores está en el centro de atención de esta investigación, ya que son el sector rural más abundante a nivel mundial y son los principales productores de alimentos para la población (Macías-Macías, 2013). La adopción de modelos erróneos por parte de los productores, como los impulsados por la revolución verde, han simplificado sus sistemas de manejo, haciéndolos más vulnerables frente a eventos externos, menos estables y más dependientes de insumos externos (Ceccon, 2008).

El conjunto de factores estructurales, políticos y económicos se conjuntan con la inestabilidad de los factores ambientales y debilitan los sistemas campesinos, marginalizados y provocando un éxodo hacia las ciudades o hacia EEUU, despoblando las comunidades rurales y poblando las periferias de las grandes urbes. Además, las políticas de crecimiento y de apertura económica bajo el paradigma neoliberal provocaron una erosión de las estructuras del campo en México y en el Estado de Oaxaca (CEMDA, 2016; Ceccon, 2008; González, 2004; Bautista-Martínez, 1998).

1.1.7 MODERNIZACIÓN DEL CAMPO

La modernización del campo empezó en la década de 1940 en México y otros países, con el objetivo de aumentar la producción de alimentos frente al aumento demográfico mundial. La revolución verde, orientada desde un enfoque productivista, empezó en 1943 en México con el Centro de Mejoramiento del Maíz y del Trigo (CIMMYT), bajo la dirección del doctor Norman Borlaug, y financiado por la Fundación Rockefeller. Paralelamente, inició también en Filipinas con el International Rice Research Institute (IRRI). Esta revolución agrícola se basó en un alto uso de insumos externos (semillas híbridas de alto rendimiento, mecanización, fertilizantes, agroquímicos y riego tecnificado).

La revolución verde fue impulsada en un primer momento por la Food and Agriculture Organization (FAO) en 1963 y por el World Plan for Agricultural Development, quienes promovieron variedades de alto rendimiento en todo el mundo. La investigación pública se difundió de forma masiva a través del Consultative Group on International Agriculture Research (CGIAR) a partir de

1971, con sus 15 centros de investigación internacionales especializados. Con el apoyo de las instituciones agropecuarias y los servicios de extensionistas, la revolución verde se difundió en todo el mundo favoreciendo a los sistemas de granjeros capitalizados y excluyendo a los pequeños productores pobres con sus sistemas más complejos de producción.

Esta revolución verde se fundó sobre una racionalidad económica costo/ beneficio dentro de la lógica capitalista donde la maximización de las ganancias dentro de las explotaciones agrícolas con trabajo asalariado era el paradigma dominante, dejando de lado la lógica campesina de producción que gira más en torno a la economía familiar con formas de trabajo no asalariado. *“La transformación de la agricultura puede ser muy buena para unos y un desastre para otros, pues la rápida acumulación del capital del cual ciertos sectores agrícolas e industriales se han beneficiado al mismo tiempo ha conducido la miseria creciente en la población de bajos recursos”* (Ceccon, 2008). La externalidad de los costos ambientales y sociales de tales sistemas se empezó a discutir hasta la década de 1970, con las crecientes preocupaciones ecológicas y la documentación de los daños colaterales de esa revolución agrícola.

El progreso científico permitió aumentar el rendimiento de los cultivos. Los altos rendimientos de esos sistemas modernos *“son el resultado de la aplicación de técnicas de selección genética que otorgan a las variedades de plantas tratadas la habilidad de beneficiarse de los subsidios de combustibles, más que la habilidad de utilizar la energía solar. Así, lo que se ha llamado el “milagro” del arroz y el trigo, en realidad consiste en plantas pigmeas con sistemas radiculares pequeños*

y con hojas y tallo apenas suficientes para absorber el máximo de energía utilizable” (Odum, 1996). Este modelo de agricultura cambió la energía solar como base energética del sistema por combustibles fósiles que requieren más insumos externos respondiendo a los intereses geopolíticos a nivel mundial de las grandes empresas transnacionales petroleras.

Este modelo de agricultura se difundió en todos los estratos de la agricultura mexicana debido a su alza en los rendimientos, pero también con grandes consecuencias ambientales. *“Este modelo de agricultura intensiva, además de selectivo y reducido es cada vez más costoso ambientalmente; la contaminación, la degradación de los suelos, la deforestación, la reducción de la diversidad biótica y el agotamiento progresivo de los recursos naturales son algunas de sus características”* (Gil-Méndez, 2015). Este modelo de agricultura se extendió bajo un nuevo enfoque político en los años 80 ‘s, que favoreció a un cierto sector de la agricultura y excluyó a los pequeños productores en lo que fue un proceso de globalización neoliberal que provocó reformas estructurales y la liberalización de las economías nacionales (Gil-Méndez, 2015). Con esto, el modelo neoliberal promovió una mayor concentración de las tierras y una precarización del trabajo en el medio rural.

La entrada de México en 1994 en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) provocó una serie de cambios estructurales en el campo mexicano. Estos cambios indujeron una reducción a los apoyos a los productores maiceros nacionales y un aumento de la importación de maíz de Estados Unidos. La agricultura de Estados Unidos bajo el Farm Bill subsidia la producción de grano

de maíz, y su importación por parte de México tuvo consecuencias negativas para los pequeños productores maiceros mexicanos que no pudieron competir con sus precios. Los bajos precios del maíz de Estados Unidos desplazaron la producción nacional del grano básico.

Según la OXFAM (2012), con 20 años de apertura económica ha habido un *“descenso de la inversión en el agro y reducción del crédito; desmantelamiento y abandono de las obras de infraestructura rural; bajo apoyo a la investigación agropecuaria y limitada asesoría técnica para los pequeños productores; pero más recursos destinados a paliar la pobreza más que al impulso de opciones productivas”*. Con las políticas públicas neoliberales, se profundizó la marginación y vulnerabilidad de los pequeños productores al fomentar prácticas agrícolas inadecuadas que redujeron la fertilidad de sus suelos y la biodiversidad agrícola de sus agroecosistemas. Los altos precios de los insumos externos y la disminución productiva de sus sistemas agrícolas han provocado la migración de muchos pequeños productores hacia las periferias de las grandes urbes (SEGOB, 2017; Gil-Méndez, 2015).

A partir de los años 70 's, una nueva revolución biotecnológica ha sido impulsada con la ingeniería genética y la creación de organismos genéticamente modificados (Ceccon, 2008). Esta segunda revolución agrícola, impulsada en gran parte por empresas transnacionales como Syngenta y Bayer (que compró Monsanto), amenaza la salud humana, provoca la contaminación genética de especies silvestres o agrícolas y genera resistencia en especies que se pueden convertir en plagas (FAO, 2008). Además, esta innovación tecnológica está siendo controlada

sólo por algunos monopolios y patenta la vida, (FAO, 2008). Por ello y ha sido rechazada tiene un rechazo en muchas regiones del mundo por parte de los consumidores.

En México, como se ha comprobado en la Sierra Norte de Oaxaca, esta segunda revolución agrícola amenaza la biodiversidad agrícola local de los maíces nativos que están en alto riesgo de contaminación genética por la polinización a cielo abierto de esta especie (Chapela *et al.*, 2001). Por tratarse del centro de origen del maíz, este descubrimiento científico creó un gran asombro en el sector académico así como preocupación dentro de las organizaciones campesinas e indígenas.

Es importante resaltar que ninguna de las dos revoluciones agrícolas tomó en cuenta la lógica de producción de los pequeños productores con sus sistemas complejos y con su poco uso de insumos externos. Pero el sector campesino se resiste a desaparecer y sigue siendo un pilar para la soberanía alimentaria de México (Vía Campesina, 2019). Ahora, más de cuatro décadas de políticas neoliberales han dejado al sector de los pequeños productores en una situación cada vez más difícil, con más pobreza, más desigualdad social (Ceccon, 2008), y ha exacerbado el problema del hambre en el mundo.

1.1.8 FACTORES SOCIOECONÓMICOS QUE LIMITAN A LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES DE MAÍZ

Los pequeños productores en el mundo están a cargo del 80 % de las 500 millones de explotaciones agrícolas y producen el 70 % de la alimentación, todo esto en predios pequeños de 4.1 hectáreas en promedio (FAO, 2016). Su papel en

el combate del hambre y la pobreza rural es por lo tanto primordial para lograr una producción continua de alimentos en una escala mundial. El mercado local de granos básicos y la diversidad de hortalizas ha sido garante de una cierta seguridad alimentaria para las comunidades marginadas (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2013).

La FAO (2016), en un análisis de las políticas agrícolas de diferentes países, encontró un patrón en el que no se favorece a los pequeños productores sino a los vendedores de insumos y a los grandes productores agroindustriales mediante los siguientes mecanismos:

- La mayoría de los insumos e incentivos se dan bajo la forma de agroquímicos y fertilizantes sintéticos, reforzando la dependencia a estos paquetes tecnológicos y la hegemonía de las empresas transnacionales y el modelo agroindustrial.
- Las políticas agrarias que dan seguridad en el ámbito de la propiedad de la tierra a los campesinos. Y muchos pequeños productores no tienen acceso a tierras de calidad que les dejan en condiciones ecológicas desiguales.
- Las políticas mercantiles que promueven la siembra de cultivos inadecuados para los pequeños productores pobres, desplazando la agricultura de subsistencia campesina.

En México, el 81.3 % de las 32,406,237 hectáreas de la superficie agrícola es trabajada por el sector campesino, es decir, 26,346,270 millones de hectáreas en total (INEGI, 2007). Mientras las políticas agrícolas mexicanas favorecen a los grandes productores (12 % de los productores) con el 50 % de los apoyos

gubernamentales, dejan al otro 88 % de los productores con el 50 % restante que se entrega en forma de programas asistencialista para “gestionar la pobreza” y no como fomento a la producción agrícola (valor campesino.org). Los pequeños productores de maíz de temporal mexicanos son básicamente excluidos de toda política agrícola aunque son el pilar fundamental de la seguridad alimentaria mexicana.

Según la FAO (2016), hay varios factores que afectan de forma negativa a los pequeños productores de maíz, los cuales operan a escala tanto nacional como mundial. Algunos de ellos son:

- El libre mercado y la competencia desleal, como en el caso del *dumping* de maíz de Estados Unidos hacia México, que invade el mercado nacional con maíz subsidiado por el Farm Bill el cual compite con los pequeños productores desprotegidos del sur.
- El acaparamiento de la tierra y el difícil acceso a tierras de calidad, particularmente a partir de las reformas de Carlos Salinas de Gortari en 1991 al artículo 27 de la Constitución Política Mexicana que fomentaron la privatización de la propiedad social de la tierra.
- El control del sistema alimentario por parte de algunas empresas transnacionales y el desplazamiento de la agricultura campesina y de los mercados locales.
- Políticas que favorecen la importación sobre la producción local, la exportación de la producción nacional y la siembra en sistemas de monocultivo. La mayoría de los pequeños productores tienen una lógica de

producción opuesta a estos principios, basada en la autosuficiencia y la venta de excedentes.

- Privatización de la investigación científica y del extensionismo, limitando su acceso por parte de los pequeños productores, y falta de fondos para proyectos de investigación y desarrollo de una agricultura sostenible para el sector campesino.

Muchas de las comunidades rurales todavía viven un rezago sistemático, que se acentúa con las reformas estructurales de las últimas cuatro décadas. Esto se puede ver reflejado en la falta de acceso a la educación, a la salud, a otras oportunidades económicas, al crédito y a servicios de extensionismo, que dejan a los pequeños productores en desventaja frente a las explotaciones capitalistas agrícolas.

La vulnerabilidad socioeconómica de los pequeños productores se traduce también en un manejo de sus sistemas de producción cada vez más dependiente del uso de insumos externos que deterioran sus recursos naturales. Esto fomenta que se abandonen las prácticas campesinas que incorporan materia orgánica en los suelos y se sustituyen por paquetes tecnológicos que deterioran este recurso.

1.1.9 FACTORES AMBIENTALES QUE AMENAZAN A LOS AGROECOSISTEMAS

En 2015, la FAO celebraba el año del suelo con un panorama desolador ante la degradación, desertificación y erosión de los suelos en el mundo. La degradación de los suelos provoca una menor productividad de los sistemas agrícolas y una

mayor vulnerabilidad de los agroecosistemas. “*La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios*” (FAO, 2015a).

Estos procesos de degradación del suelo se reflejan en los aspectos físicos, químicos y biológicos del suelo. En los Valles Centrales de Oaxaca, la mayoría de los suelos tienen menos del 1 % de materia orgánica y muestran síntomas de degradación y fertilidad reducida (SEMARNAT, 2008).

El cambio climático actual es un cambio en los patrones locales y globales del clima por la actividad antrópica y las emisiones de CO₂, que amplía el efecto invernadero por la presencia de otros gases como el metano en la atmósfera y contribuye al calentamiento global (Cambio climático global, 2019; García, 1980). En México, la mayoría del maíz es producido bajo un régimen de temporal y depende totalmente del clima. Es importante entender los efectos que tienen el calor y el estrés hídrico sobre la planta de maíz para poder entender cómo el cambio climático afecta al maíz de temporal (Leng *et al.*, 2009).

Cuando la planta se desarrolla a una temperatura por encima de 25° C necesita más humedad, y a los 35° C sufre de estrés hídrico, además de que con el calor se alteran los procesos de polinización de las plantas. Es así que el incremento del calor y de la canícula seca afectan directamente su rendimiento y una disminución del número de granos producidos (SEMARNAT, 2015; SEMARNAT y PNUD, 2015). La canícula se puede dividir en seca, cuando hay una ausencia

prolongada de lluvias durante el temporal, y húmeda, cuando solamente hay ausencia de lluvias durante un periodo de tiempo muy corto (Ruíz-Vega, 1998).

El estrés hídrico se da en la etapa fenológica con mayor demanda de agua, cuando la planta necesita de 200 a 250 mm de ésta para su proceso de floración, de fecundación y de desarrollo de granos. La capacidad de retención de agua del suelo es por lo tanto crítica para determinar la capacidad del agroecosistema para resistir al estrés hídrico producido por la canícula seca y el aumento sustancial en la temperatura.

El maíz de temporal es un cultivo vulnerable al cambio climático, sobre todo por dos aspectos: por un lado, la variabilidad del régimen lluvias en el periodo estival y por otro, la temperatura que se elevará afectando la fotosíntesis, la viabilidad del polen y la formación de granos en la planta (INE, 2010). Las propiedades del suelo también influyen en esta vulnerabilidad.

La vulnerabilidad puede ser entendida como *“la incapacidad de un sistema para absorber, mediante autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su ambiente, es decir, su inflexibilidad para adaptarse a ese cambio y la susceptibilidad que tiene de ser afectado o de sufrir una pérdida”* (Álvarez-Morales et al., 2014). La variabilidad climática no se puede controlar pero sí se pueden mejorar las propiedades del suelo para disminuir la vulnerabilidad del maíz ante una canícula seca prolongada.

La variabilidad climática se refleja en el fenómeno de la canícula seca, larga o corta, que dura de dos a siete semanas entre los meses de julio a agosto, durante

una etapa crítica del crecimiento de la planta de maíz (en etapa de floración). El suelo y su capacidad de retención de humedad se relaciona entonces directamente con su capacidad de aprovechamiento del agua y su resistencia frente a su ausencia (Ruíz-Vega *et al.*, 2003).

Un suelo con alto contenido de materia orgánica puede almacenar más agua por la capacidad de ésta de retener hasta veinte veces su peso en agua (FAO, 2015b). La biomasa vegetal de los AV/CC es una forma de combatir la sequía y disminuir la vulnerabilidad del agroecosistema por el gran aporte de materia orgánica que puede proveer al suelo. *“En primer lugar, puede aumentar la infiltración del agua de lluvias desde un 15 a un 50%, triplicando el agua retenida en el suelo después de una lluvia. Segundo, la capacidad del suelo de captar el agua aumenta hasta el 35% cuando el suelo contiene más materia orgánica”* (Bunch, 2012a). Las prácticas agrícolas sustentables que fomentan la incorporación de materia orgánica al suelo contribuyen a una mayor resiliencia del cultivo ante la canícula seca, que es cuando la planta de maíz requiere más agua y nutrientes (Álvarez-Solís *et al.*, 2010). *“El agua es retenida en el suelo, principalmente, mediante un proceso de adsorción (potencial matricial) sobre la superficie de las partículas minerales, cuya intensidad de reacción depende de la superficie específica del suelo (SE); la tensión con la que el agua es adsorbida variará según el tipo de suelo, la presencia de materiales orgánicos y el contenido de agua”* (Salcedo-Pérez, 2007).

1.1.10 ALTERNATIVAS DE LOS AV/CC DESDE LA AGROECOLOGÍA

La agroecología es una ciencia, un movimiento social y un conjunto de tecnologías que impulsan hacia una agricultura ecológica cada vez más sostenible. Se consideran sistemas sustentables aquellos que mantienen o aumentan su productividad, mejoran las funciones ecológicas y socioeconómicas e impiden el deterioro de los recursos que sostienen al suelo (Astier *et al.*, 1999).

La agroecología como ciencia estudia el agroecosistema a partir del conjunto de interacciones y procesos que ahí suceden desde un punto de vista ecológico. El estudio de los sistemas tradicionales indígenas y el reconocimiento de su importancia dentro de las ciencias agrícolas ha permitido salir de la lógica positivista de la ciencia convencional agronómica (ICRAF, 2009; Lanckaert *et al.*, 2007; Jiambio, 2006; Altieri, 2001). *“Al promoverse un diálogo de saberes e integrar elementos de las ciencias occidentales y las etnociencias locales, van surgiendo una serie de principios que de aplicarse a una región en concreto, tomarán diferentes formas tecnológicas según el contexto”* (Rosset *et al.*, 2019; Vía Campesina, 2019).

Un ejemplo de esto es la implementación del método de Campesino a Campesino en México y Centroamérica, con el cual estos principios agroecológicos se han masificado (Holt-Giménez, 2008). Los factores relacionados al deterioro ambiental y sus consecuencias sobre los agroecosistemas campesinos son parte de este enfoque, con una influencia decisiva de los movimientos ambientalistas de los años 70 's. Uno de los pilares de estas estrategias ha sido el manejo sustentable de los suelos ante los procesos de su degradación, frente a eventos climáticos cada vez más extremos y a la baja productividad de los sistemas simplificados.

La reincorporación de estiércol también es parte de las estrategias campesinas que incorporan materia orgánica al suelo, pero la llegada de fertilizantes sintéticos ha desplazado en muchos casos esta práctica y ha dejado los suelos con un bajo porcentaje de materia orgánica. Por otro lado, con la llegada de los tractores se desplazó la tracción animal y así una importante fuente de estiércol. Todo esto ha hecho que muchos campesinos no tengan la capacidad de incorporar la biomasa necesaria para mantener la fertilidad de sus suelos y aumentar el porcentaje de materia orgánica en ellos.

Los AV son una herramienta más eficiente y de bajo costo para la reincorporación de materia orgánica y el mejoramiento del suelo en la siembra de maíz de temporal (Quiñones-Vera *et al.*, 2010; Bunch *et al.*, 2004). La escasa investigación con un enfoque agroecológico que destaque atributos como la productividad, la estabilidad, la resiliencia, confiabilidad, adaptabilidad, equidad y autogestión, los cuales tienden hacia la sustentabilidad en este campo, hace necesario este tipo de trabajo. Además es importante investigar su posible impacto en un marco estratégico para el desarrollo de programas de investigación- extensión (Tittonell *et al.*, 2011). *“La agroecología no se basa en recetas técnicas, sino en principios; de ahí que no se trate de una agricultura de insumos, sino de procesos”* (Rosset *et al.*, 2019).

La siembra de leguminosas en asociación con el maíz o en rotación con éste ha sido parte de las estrategias campesinas desde hace cientos de años. Algunas de estas leguminosas que pueden ser observadas en los sistemas tradicionales campesinos de los Valles Centrales de Oaxaca son: el frijol negro delgado o de

guía (*Phaseolus vulgaris*), el cacahuate (*Arachis hipogea*), el garbanzo (*Cicer arietinum*), el chícharo (*Pisum sativum*), el frijolón (*Phaseolus coccineus*) y la alfalfa (*Medicago sativa*) como planta perenne (INTA, 2015), entre otros. Éstos permiten una incorporación significativa de N₂ atmosférico en el suelo a través de la simbiosis de *Rhizobium* con las raíces de las leguminosas.

Los AV han demostrado una capacidad de producir una gran cantidad de biomasa capaz de aumentar la materia orgánica en el suelo y mejorar el ciclo del nitrógeno. Así lo demuestran los estudios de Bunch *et al.* (2004; 2012b) donde la siembra de *Mucuna pruriens* con el maíz añade 70,000 kg ha⁻¹ de material verde, el frijolón y el frijol grueso añaden 60,000 kg ha⁻¹ de materia verde, el *Lablab purpureus* que añade 60,000 kg ha⁻¹ de materia verde, o el frijol negro delgado que añade 25,000 kg ha⁻¹ de materia verde finalmente, la *Crotalaria* añade 80,000 kg ha⁻¹ de materia verde, aumentando el porcentaje de materia orgánica. Se ha demostrado que esto mejora el rendimiento del sistema de maíz de temporal (Mzwandile *et al.*, 2016). La reincorporación de biomasa a los suelos también ayuda a capturar carbono orgánico, contribuyendo desde lo local a mitigar el cambio climático (Zavala-Sierra *et al.*, 2018).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La simplificación de los agroecosistemas campesinos y la pérdida de su biodiversidad los ha vuelto más vulnerables frente a cambios o perturbaciones (Gingrich *et al.*, 2018). Por ello, es necesario impulsar su sustentabilidad mediante un manejo sustentable del suelo. Esto se puede hacer favoreciendo una mayor

biodiversidad sobre el suelo e incorporando materia orgánica que fomente la presencia de los organismos que habitan en él (Altieri, 1999).

El presente trabajo estudia la introducción de los abonos verdes (AV) dentro del sistema de maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca y su posible aportación para la sustentabilidad del agroecosistema. Los dos principales factores que han perjudicado la producción de maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca son la pérdida de fertilidad del suelo y el incremento de la duración de la canícula seca debido al cambio climático. Entre otras cosas, estos factores provocan estrés hídrico en la etapa fenológica de mayor importancia para la producción de granos en la planta de maíz.

Los problemas de variabilidad climática y de porcentajes bajos de materia orgánica en los sistemas de maíz de temporal han obligado a buscar alternativas con un enfoque agroecológico que reduzcan la dependencia de insumos externos y reconozcan los aportes de los sistemas tradicionales de producción que conservan la agrobiodiversidad local (Diego-Nava *et al.*, 2019).

Esta investigación tiene como fin principal poner a prueba los AV/CC como alternativa frente a la baja productividad, los procesos de pérdida de materia orgánica y la canícula seca en los sistemas de maíz de temporal en la Villa de Zaachila. Los AV/CC permiten intensificar la producción y mejorar la sustentabilidad del sistema y la calidad de los suelos a largo plazo de forma sostenible. Es indispensable analizar las características de cada una de las leguminosas propuestas y evaluar su contribución a la sostenibilidad del sistema de maíz de temporal.

Los AV/CC pueden mejorar un conjunto de atributos dentro del agroecosistema, no sólo porque aumentan el porcentaje de materia orgánica con el abonamiento vegetal, sino que cumplen distintos propósitos. “*Esta condición es consistente con la observación de que los agricultores de las aldeas generalmente prefieren las tecnologías de uso múltiple*” (Bunch, 1996). Los abonos verdes retoman la lógica de la multifuncionalidad de los sistemas tradicionales mediante la complementariedad de los elementos utilizados. Entre otras cosas, estas especies contribuyen también a la seguridad alimentaria de las familias y/o pueden ser utilizadas como forraje para alimentar a los animales en su unidad de producción campesina (Bunch, 1996).

Las leguminosas evaluadas pueden sembrarse intercaladas dentro del manejo agrícola que tiene el sistema de maíz de temporal sin afectar el rendimiento de grano del maíz. En el caso del maíz de temporal, el objetivo es sostener la producción de maíz y mantener su rendimiento, al mismo tiempo que se disminuyen lo más posible los costos de producción; a partir de la incorporación de materia orgánica se mejoran las características físicas, químicas y biológicas de los suelos (Onwonga *et al.*, 2014).

Así pues, los AV/CC tienen que adaptarse a los sistemas existentes, tanto a nivel socioeconómico como a nivel ambiental, para poder contribuir al mejoramiento de la sustentabilidad en su conjunto (Mósquera *et al.*, 2012). En el caso del maíz de temporal en la Villa de Zaachila, se tienen que buscar especies de leguminosas que produzcan biomasa rápidamente en suelos pobres con estrés hídrico, y que

simultáneamente sean perennes para funcionar como CC y así evitar los suelos desnudos durante la temporada de secas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El uso de AV puede ser utilizada como una tecnología clave para una transición hacia formas de manejo del suelo más sustentable (Altieri, 2001). La evaluación de estos AV tanto con criterios de sustentabilidad (Astier, 2012), como de manejo campesino es esencial para su implementación dentro de alguna zona agroecológica específica (Bunch, 2012b).

Para esta evaluación hay que hacer experimentos agrícolas previos que permiten caracterizar e identificar posibles AV/CC para un sistema de producción como es el caso del maíz de temporal en la Villa de Zaachila.

El uso de AV tiene las siguientes ventajas dentro del agroecosistema de maíz de temporal:

- *Aumentar la cobertura de los suelos* (Buckles, 1999). La siembra en asociación con cultivos de cobertura y así disminuir la incidencia de malezas cubriendo las e inhibiendo su fotosíntesis. Esta cobertura impide una mayor erosión, en comparación con suelos desnudos en el mes de mayo, con las primeras lluvias del temporal. A la vez la cobertura del suelo disminuye la evaporación del agua del suelo impidiendo que los rayos del sol entren directamente, aumentando la disponibilidad de agua para el cultivo Para esto se necesita de un AV/CC que pueda resistir más de 6

meses sin lluvias con la humedad residual, para lo que se requiere un suelo con una rizósfera profunda y desarrollada.

- *Aumentar la materia orgánica del suelo.* La reincorporación de cultivos de coberturas aumenta la cantidad de materia orgánica (MO) en el suelo y puede ir acompañado con enmiendas de estiércoles o compostas (Mósquera *et al.*, 2012). También la incorporación de MO permite la captura de carbón orgánico permitiendo desde lo local contribuir a la mitigación del cambio climático y a la adaptación de los agroecosistemas a la variabilidad climática. Para aumentar el porcentaje de materia orgánica en el suelo se necesita un AV/CC que produzca una cantidad de biomasa seca importante.
- *Aumentar la infiltración y la retención de humedad* (Bunch, 2001). La reposición de materia orgánica con los cultivos de coberturas cambian las características físicas del suelo como son una mayor porosidad del suelo permitiendo una mayor infiltración del agua y una mayor retención de la humedad.
- *Reducir la escorrentía* (García *et al.*, 2002). Los AV/CC retienen con sus raíces y su biomasa vegetativa el suelo disminuyendo los procesos de erosión eólica e hídrica.
- *Mejorar la fertilidad del suelo y la productividad del cultivo de maíz* (Buckles, 1999). Los procesos de mineralización de la materia orgánica permiten aumentar la disponibilidad de nutrientes en el suelo para las plantas (Cotler *et al.*, 2016). En el caso de las leguminosas, su proceso de simbiosis con las bacterias de *Rhizobium* con la formación de nódulos permiten tener

nitrógeno disponible para los otros cultivos o para el próximo ciclo de cultivo. Además, permiten cosechar más de un producto en un mismo ciclo productivo. La disponibilidad mayor de nutrientes para las plantas permite una mayor productividad en los cultivos asociados o sembrados posteriormente.

- *Producir alimento humano y para los animales* (Bunch, 2012b). Las leguminosas producen granos y ejotes comestibles para el ser humano y es una de las fuentes más económicas de proteínas para las familias campesinas y también los AV pueden servir para forraje que se inserta dentro de la parte pecuaria de los sistemas de producción campesinos cómo es el caso de la milpa (Chiyev-Garwe, 2002).
- *Reducir los costos de producción* (Bunch, 1999). El uso de AV/CC reduce el trabajo de deshierbe, el número de riegos, la aportación de fertilizantes sintéticos, y aumenta la diversidad biológica en los cultivos disminuyendo así la incidencia de plagas y enfermedades permitiendo con este conjunto de factores una reducción sustancial de los costos de producción y de su dependencia a insumos externos.
- *Reducir la contaminación del suelo y del ambiente* (Montiel et al., 2015). Las prácticas alternativas relacionadas a los AV permiten disminuir o eliminar el uso de agroquímicos, fortaleciendo la resistencia y la resiliencia de los agroecosistemas.
- *Aumenta la biodiversidad dentro del agroecosistema* (Altieri, 1999). Los efectos de los AV/CC sobre la biodiversidad son de tres órdenes: (1) crear policultivos donde solo había cultivos simples, (2) atraer insectos benéficos

como polinizadores y depredadores que favorecen el control biológico (Wang *et al.*, 2002) y (3) aumentar la diversidad microbiana cuando se incorpora la materia orgánica en el suelo (Elfstrand *et al.*, 2007). Eso permitiría una disminución gradual de insumos externos dentro del sistema de maíz de temporal.

El manejo sustentable del suelo tiene por lo tanto que ser analizado con los atributos de los agroecosistemas que lo componen (Astier *et al.*, 2008). En el caso de la evaluación de AV/CC y de su manejo con maíz de temporal en los Valles de Oaxaca, hay pocos estudios como alternativa en esta zona (Ruíz-Vega *et al.*, 2003). Una evaluación de diversos AV/CC potenciales permitirá evaluar su desarrollo intercalado con el maíz amarillo y recomendar un sistema de producción alternativa para el maíz de temporal en la Villa de Zaachila evaluando los siete atributos de la sustentabilidad propuesto por el MESMIS y las características de manejo de las AV/CC.

Las ventajas del uso de las leguminosas como AV son múltiples y pueden convencer rápidamente a los pequeños productores de sus ventajas y lograr su adopción (Sosa-Rodríguez, 2014; Álvarez-Solís *et al.*, 2010; Astier *et al.*, 2006; Bunch, 2006; Randhawa *et al.*, 2005).

1.4 HIPÓTESIS

Los abonos verdes pueden contribuir al mejoramiento a la sustentabilidad del sistema del maíz de temporal desde un enfoque agroecológico.

1.5 OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Caracterizar cinco leguminosas (tres locales y dos exóticas) intercaladas con maíz de temporal y evaluar su posible contribución a la sustentabilidad del agroecosistema.

OBJETIVOS PARTICULARES

Evaluar la posible contribución de los indicadores como atributos de sustentabilidad con cinco leguminosas (tres locales y dos exóticas) asociadas con maíz como potenciales abonos verdes y CC en el ciclo 2017- 2018

Evaluar las características de cinco leguminosas (tres locales y dos exóticas) asociadas con maíz por su potencial abonos verdes y CC en el ciclo 2017- 2018.

Elaborar un manual sobre la implementación de abonos verdes con maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca (VCO) de forma vulgarizada para los técnicos agroecólogos y los campesinos.

1.6 METODOLOGÍA

Para fines de caracterización de los AV se determinó elegir las dos zonas agroecológicas más comunes de la Villa de Zaachila como lugares para hacer pruebas en campo durante dos ciclos y hacer ensayos en estas parcelas para poder identificar los potenciales AV/CC y sus posibles aportes a la sustentabilidad dentro del sistema de maíz de temporal.

Manejo cultural del experimento y leguminosas nativas y exóticas evaluadas

Se utilizó tractor para los laboreo del suelo y el deshierbe se hizo de forma manual en las dos parcelas. Las siembras se hicieron de forma manual a final de junio en los dos ciclos (2017-2018), así como también y la cosecha del maíz y de la biomasa verde y granos de los AV.

Se instalaron dos parcelas experimentales (manejo alternativo del suelo) con cinco tipos de abonos verdes en asociaciones con maíz bolita amarillo: frijol de guía (*Phaseolus vulgaris* L.), frijol negro delgado (*Phaseolus vulgaris* L.), frijol Ayocote (*Phaseolus coccineus* L.), dolichos (*Lablab purpureus*) y crotalaria (*Crotalaria juncea*) en los ciclos 2017-2018 de temporal.

Las semillas fueron inoculadas con *Azotobacter* y Micorriza (1 kg ha^{-1}) la noche antes de la siembra y no se utilizó ningún fertilizante sintético.

Diseño experimental

Las parcelas experimentales fueron establecidas bajo un diseño de bloques completamente aleatorizados (DBCA) con un total de 11 tratamientos (cinco asociaciones leguminosas-maíz, maíz simple de testigo y seis monocultivos de leguminosas) con tres bloques por un total de 33 unidades experimentales (Cuadro 2). Las unidades experimentales fueron de 75 m^2 ($3 \times 25\text{m}$), el total de superficie experimentado fue de 4950 m^2 en los dos ciclos 2017-2018 (Tabla 1).

Localización de los sitios experimentales

La Villa de Zaachila es un municipio del Estado de Oaxaca, México con 16 localidades y 28,003 habitantes localizado entre los paralelos $16^{\circ}52'$ y $17^{\circ}02'$ de latitud norte; los meridianos $96^{\circ}39'$ y $96^{\circ}52'$ de longitud oeste; altitud entre 1 400 y

2 300 m (INEGI, 2008). La temperatura promedio anual es de 16-22 °C con una precipitación de 600-800 mm de lluvia promedio por año.

El trabajo se implementó en dos parcelas experimentales en los ciclos 2017-2018 en el municipio de la Villa de Zaachila en la parcela del campesino Raymundo Aguilar Cristóbal (Parcela A) en un suelo Fluvisol y en un suelo de lomerío en el CBTA número 78 (Parcela B).

Caracterización de los suelos

Se hizo un muestreo del suelo antes de la siembra de las parcelas experimentales para saber su estado inicial y cómo se podrían comportar las AV/CC en asociación con el maíz en estos tipos de suelos.

La caracterización de los suelos se hizo en las dos parcelas experimentales de las cuales se hicieron los análisis físico-químicos correspondientes a 0-15 cm y 15-30 cm de profundidad.

VARIABLES A MEDIR DENTRO DE LOS TRATAMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN BUEN AV/CC DENTRO DEL SISTEMA DE MAÍZ DE TEMPORAL

Las variables han sido determinadas a partir de un análisis previo del sistema de producción para poder analizar el comportamiento de los AV en conjunto con el maíz de temporal para determinar los AV más adecuados en su manejo con el maíz de temporal retomando experimentos anteriores (Ruíz-Vega *et al.*, 2003, Ruíz-Vega *et al.*, 2010).

Fueron incluidas tres características esenciales de un buen AV en los Valles Centrales de Oaxaca (VCO): alta producción de biomasa vegetal, resistencia al

estrés hídrico y si se puede asociar con el maíz, es decir, si produce una ERT > 1.0. Estos fueron medidos dentro de experimentos como indicadores para utilizar el esquema MESMIS:

(1) La biomasa seca para aumentar el porcentaje de materia orgánica calculando la biomasa seca y verde de los AV.

(2) La resistencia a la sequía para poder resistir a la canícula seca como AV y la temporada seca como cultivos de coberturas en el ciclo de 2018 después de una canícula seca de 50 días.

(3) La eficiencia relativa de la tierra (ERT) para poder ser intercalados con el maíz mejorando la productividad del sistema con los rendimientos en granos del maíz y de las leguminosas.

Marco para la evaluación de la sustentabilidad (MESMIS)

Se utilizó el método MESMIS para medir la sustentabilidad de los AV con el maíz de temporal dentro de las parcelas experimentales y se mantuvo contacto con la realidad sociocultural de la Villa de Zaachila con recorridos de campo, datos estadísticos y talleres con los propios campesinos.

En un primer paso se identificó el objeto de la evaluación (sistema de manejo) y sus puntos críticos especificando el tiempo y el espacio del estudio. De estos atributos se buscan criterios de diagnóstico delimitando las líneas de evaluación para poder establecer el umbral de los indicadores. Los indicadores por su parte son elegidos en un primer momento desde la identificación de los puntos críticos, aportando información relevante para un criterio del diagnóstico. Cada indicador

corresponde a un área de la sustentabilidad: ambiental, social y económica (Astier *et al.*, 2012).

Este método consta de seis pasos:

En el **paso 1** después de un diagnóstico del sistema maíz de temporal (Figura 3) y un análisis FODA se evaluó el uso de AV para mejorar su sustentabilidad. En los **pasos 2 y 3** se identificaron los puntos críticos y los indicadores a medir en las parcelas experimentales (Tabla 2), Resultados por atributos (**paso 4**), Integración de los resultados (Figura 9) (**paso 5**) y Conclusiones (**paso 6**) (Ibid.).

Indicadores de productividad

Incluyen rendimiento de grano de maíz y de AV/CC, contenido de materia orgánica, biomasa seca, tasa de descomposición, eficiencia relativa de la tierra (ERT) y competencia inter-específica.

Rendimiento de grano de maíz y de AV/CC. El rendimiento de maíz y de AV/CC en grano y semilla fue evaluado con un muestro aleatorio dentro de la parcela con el peso obtenido de cinco plantas y lo mismo para el forraje.

Cálculos de forraje y de granos: Promedio del peso obtenido de cinco plantas por tratamiento* número de plantas por ha =kg ha⁻¹

Gráfica AMEBA: Menos de 1 ton ha⁻¹ (1); Entre 1 y 2 ton ha⁻¹ (5); Más de 2 ton ha⁻¹ (10).

Tasa de descomposición. Se enterraron 100 gr de cada AV en dos bolsas negras, a unos 15 cm de profundidad, en cada unidad experimental, y se

desenterró después de dos meses calculando el peso final para poder calcular el porcentaje de la tasa de descomposición de cada AV/CC (Ruíz-Vega *et al.*, 2010).

Biomasa seca. Se cosecharon cinco plantas de AV al momento de su floración, posteriormente se les secó al horno por 8 horas a 70 °C y después se midió el peso seco de cada tratamiento.

Gráfica AMEBA: Menos de 1 ton ha⁻¹ (1); entre 1-3 ton ha⁻¹ (5); más de 3 ton ha⁻¹ (10).

Porcentaje de materia orgánica. Se midió después de integrar los AV en un hoyo con un muestreo de 50 gr después de dos meses de suelo por tratamiento con el método de combustión seca a temperatura baja (Robinson, 1927).

ERT. En cada parcela se eligieron 10 plantas de maíz y de leguminosas para medir su producción de granos y se midió en relación con las densidades de siembra y su potencial productivo por superficie (Cruz-Ruíz, 2009). La eficiencia relativa de la tierra se midió a partir de los resultados obtenidos de la producción de granos de maíz y de AV (Kg ha⁻¹) con la formula siguiente:

$$ERT (Kg) = \sum_{i=1} \frac{x_{iJK}}{x_i} \quad ERT > 1.0 \text{ conviene policultivo, } ERT < 1.0 \text{ conviene monocultivo}$$

ERT= 1.0 no hay diferencia.

Grafica AMEBA: Si es menor a 1.0 (1); Entre 1 y 1.5 (5); Si es mayor a 1.5 (10)

Competencia interespecifica. Se midió a través del Coeficiente de Agresividad-A. Para este indicador, A=0, los cultivos son igualmente competitivos, A>0, dominancia de un cultivo; (+) dominante ó (-) dominado.

También, el componente que presente el coeficiente más alto será el cultivo dominante (Ruíz et al, 2010).

De acuerdo a la siguiente formula:

$$A = \frac{Y_{ij}}{(Y_{ii} \cdot \lambda_i)} - \frac{Y_{ji}}{(Y_{jj} \cdot \lambda_j)}$$

En terminos de RET:

$$A = \frac{L_i}{\lambda_i} - \frac{L_j}{\lambda_j}$$

En proporciones desiembra de 1:1 se tiene;

$$A = 2(L_i - L_j)$$

Dónde:

A: Razón equivalente de terreno

Y = Rendimiento por unidad de área

Y_{ij} y Y_{ji} = Rendimiento de los cultivos componentes i y j bajo asociación

Y_{ii} y Y_{jj} : Rendimiento de los cultivos componentes bajo unicultivo

L_i y L_j : son las RET parciales de los cultivos i y j

λ_i y λ_j : proporciones de siembra para el cultivo i y j

Indicadores de adaptabilidad

Para el atributo de adaptabilidad, el indicador principal es la multifuncionalidad de los AV para su uso dentro del sistema de maíz de temporal, es decir sus usos actuales y potenciales como leguminosas.

Multifuncionalidad de los abonos verdes

Se realizaron cinco talleres en las parcelas demostrativas y las parcelas experimentales campesinas para ver los conocimientos que se generaban sobre el uso potencial de alguna leguminosa para su uso como AV. Se hicieron recorridos de campo, y una revisión bibliográfica sobre el uso de leguminosas en los agroecosistemas campesinos de la Villa de Zaachila para evaluar el uso actual de leguminosas, considerando si los AV producen algún grano comestible y si el consumo es parte de las costumbres locales. Después se hizo un listado de los usos actuales y potenciales como leguminosas para poder evaluar los cinco AV listados.

Gráfica AMEBA: 1-3 funciones (1); 4-5 funciones (5); todas las funciones (10).

Indicadores de estabilidad, resiliencia y resistencia

Se calculó el índice de sobrevivencia de los AV en los diferentes tratamientos para poder evaluar su tolerancia al estrés hídrico y a la incidencia de plagas, calculando el número de plantas inicial (con su respectiva densidad de siembra) y el número de plantas al momento de la cosecha por unidad experimental. Después se contó el número de plantas que sobrevivieron después de la canícula seca que fue muy prolongada en el ciclo 2018 en la parcela A.

Gráfica AMEBA: más del 20 % de plantas con síntomas severos de marchitez (1); Entre 15-20 % de plantas muertas (5); Resistentes, más de 85 % de las plantas sobrevivieron (10).

Indicadores de equidad

En el atributo de equidad, se miden indicadores económicos como la relación beneficio/costo.

Relación beneficio/costo

Se midió en este caso con un precio estimado real del mercado local los precios de venta del grano de maíz, del forraje de maíz y de granos de los AV. A partir de los costos de producción estimados con datos de INIFAP (2015a, 2015b) ajustados por inflación (tasa de actualización) y posteriormente se calculó la relación beneficio/costo de los ciclos 2017-2018.

Los rangos de valor de la relación beneficio/costo netos obtenidos por unidad monetaria total invertida durante la vida útil del proyecto fueron; si el valor es menor que uno, indicará que la corriente de costos actualizados es mayor que la corriente de beneficios, y por lo tanto, la diferencia (B/C-1), cuyo valor será negativo, indicará las pérdidas por unidad monetaria invertida y viceversa cuando la B/C es mayor que uno, la diferencia (B/C-1), cuyo valor será positivo, indicará la utilidad por unidad monetaria invertida (Ayala *et al.*, 2013). La fórmula matemática para obtenerla fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{t=1}^T B_t (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^T C_t (1+r)^{-t}}$$

Dónde:

B_t= beneficios en cada período del proyecto

C_t= costos en cada período del proyecto

r= tasa de actualización

t= tiempos en años

(1+r)^{-t}= factor de actualización.

Gráfica de AMEBA: B/C menor a 5 (1); B/C es entre 5 y 10 (5); B/C es superior que 10 (10).

Indicadores de autogestión

El atributo de autogestión, midió la aportación actual o posible de los AV para la seguridad alimentaria de las familias campesinas y la comunidad de Zaachila.

Seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria en este caso se define desde la lógica de una agricultura campesina donde la disponibilidad de alimentos está directamente relacionada a su producción en la parcela que sustenta la unidad familiar y su autosuficiencia. Además, las leguminosas son una fuente barata y segura de proteínas para las familias campesinas. En este caso se evaluó la posibilidad que una parte de los granos por los AV puedan ser consumidos por las propias familias campesinas. En esta secuencia estas semillas tienen que ser adecuadas al contexto cultural y gastronómico, aunque una posible adopción de nuevas especies de leguminosas por parte de las familias campesinas es una posibilidad. Se evaluó si las semillas de AV son comestibles y si son parte de la gastronomía local. Las mediciones se hicieron de forma directa observando cuales semillas se encuentran en el mercado local y si los campesinos usan estas semillas en su dieta cotidiana.

Gráfica de AMEBA: Las semillas de AV no son comestibles (1); Las semillas de AV pueden ser comestibles, pero no son utilizadas por los campesinos de la región en sus alimentos (5); Las semillas de AV son comestibles y son utilizadas regionalmente como fuente de alimentos (10)

Análisis estadísticos de los datos

Se hizo un análisis estadístico con la prueba ANOVA para cada tipo de AV y para cada tipo de suelos y sus efectos combinados con los dos ciclos de producción. Se hizo la prueba con las siguientes variables de respuestas: competencia interespecífica, ERT, rendimiento de AV, biomasa seca y rendimiento de maíz. Donde se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$), se aplicó la prueba post-hoc de Tukey formando diferentes grupos significativos. Todos los datos fueron analizados con *R* software versión 3.5.1, y el *ggplot2*, *plyr*, *scales*, *BBmisc*, *reshape2*, *fmsb*, *classInt* y el paquete *DescTools* (R Core Team, 2014).

II CARACTERIZACIÓN SOCIOAMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA VILLA DE ZAACHILA

2.1 FACTORES SOCIALES

La Villa de Zaachila fue fundada en el siglo XIII d.C. como pueblo *Binnizá* (zapoteco), siendo la última capital después de la caída de Monte Albán. La palabra Zaachila significa, en zapoteco, "Primera hija de la tierra"; esta ciudad jugó un rol importante para esta cultura durante la época Clásica. Actualmente, existe un sitio arqueológico con una tumba del Posclásico que se puede visitar. El rey Cosijoeza gobernó esa capital con sueños y aspiraciones de expansión contra los mixtecos que, luego, invadieron los Valles Centrales de Oaxaca (INAFED, 2000).

Esta parte de la historia prehispánica *Binnidza* de la Villa de Zaachila se manifiesta en sus habitantes actuales, a través de un fuerte arraigo cultural donde se

mezclan las tradiciones indígenas y los ritos católicos en las fiestas y costumbres del pueblo (Ibid.). Las fiestas tradicionales son la Cena de los Concheros, el primer lunes de la Semana Santa; la Fiesta del Cerrito (*Laanii Roo Xten Daan Zaallil*) para festejar a la diosa del maíz (*Pitao Ko Shuub*), el último lunes de julio y la Fiesta de los Muertos, a principios de noviembre. Estas celebraciones coinciden con fechas clave del ciclo agrícola.

La Villa de Zaachila es conocida por su gastronomía. Los platillos tradicionales son la barbacoa, las tlayudas, el chichilo, el amarillo, el mole de guajolote con arroz, las guías, las carnitas, las empanadas, y las bebidas como el tepache, aguas frescas, nieves, tejate, chocolate atole, chocolate de espuma, mezcal, entre otros (INAFED, 2000), disponibles principalmente en el mercado Alarii y recientemente en el Mercado Gastronómico.

Con relación a su demografía, hay 43, 279 habitantes con 52.4% de mujeres y 47.6% de hombres (INEGI, 2007). El 46.27 % de la población se considera indígena y 1.11 % afrodescendientes, con 11.02 % de la población que hablan alguna lengua indígena (Ibid.). Existen 56 planteles educativos en el municipio de la Villa de Zaachila (Honorable ayuntamiento del municipio de la Villa de Zaachila, 2019). En cuanto a salud pública, sólo 1% de la población no tiene algún tipo de seguro de salud, mientras 74.9% tiene Seguro Popular, 14.7% es derechohabiente del IMSS y 9.8%, del ISSSTE (INEGI, 2007).

2.2 FACTORES ECONÓMICOS

En la Villa de Zaachila, el grado de marginación municipal pasó de “alto” en 2005 a “medio” en 2010. Asimismo, en 2014, 25.67% de la población presentaba niveles de inseguridad alimentaria, particularmente, en algunas colonias de alta marginación cifras confirmadas por el Programa de la Cruzada Nacional contra el Hambre, en 2014 (SEDESOL, 2018, CONEVAL, 2015).

Los principales sectores económicos son el comercial y el agrícola, con 67% de la población ocupada en actividades relacionadas con estos (INEGI, 2018). Los campesinos (que siguen una lógica económica de subsistencia) venden una gran parte de sus excedentes, los días de plaza en el mercado local (Guzmán-Sebastián *et al.*, 2018) lo cual contribuye a la seguridad alimentaria de sus familias y de la comunidad (Bonilla-Aparicio *et al.*, 2013; González-Chávez *et al.*, 2007).

En el caso de la Villa de Zaachila, la población que se dedica exclusivamente al campo se ha reducido a su mínima expresión, lo que se relaciona con que la mayoría de los programas de fomento agropecuario poseen un corte meramente clientelar. La mayoría de los campesinos tienen otra profesión además de trabajar en el campo. Éstos cultivan, en promedio, una hectárea de superficie temporal (Mora-Van-Cauwelaert, 2017). La mayoría de los ingresos del campesino se destina a la alimentación de las familias y el resto se comercializa en el mercado local, cada jueves (Gómez-Sosa *et al.*, 2018).

La estrategia económica campesina incluye una parte del trabajo asalariado y otra de actividades no asalariadas (realizado por miembros de la propia familia).

Los costos de producción del sistema de maíz de temporal se distribuyen entre los trabajos de labranza (con tractores o yuntas), el uso de fertilizantes y su aplicación, el deshierbe (que puede ser manual, con tracción animal, mecanizado, o con herbicidas) y la pizca, lo que implica, en muchos casos, trabajo asalariado de jornaleros. El salario de los jornaleros es de 150 pesos por día (seis horas de trabajo) e incluye el desayuno y la comida (Mora-Van-Cauwelaert, 2017).

2.3 FACTORES AGRARIOS

Los factores agrarios tienen que ver con las formas de propiedad de la tierra y la forma en que ésta se organizan los campesinos en torno a estas. En México, después de la lucha revolucionaria, se establecieron dos formas de propiedad social de la tierra, los ejidos y las tierras comunales (Morret-Sánchez *et al.*, 2017). Las dos principales formas de tenencia de la tierra en la Villa de Zaachila son la pequeña propiedad y la propiedad ejidal. Las personas que no poseen tierra suelen rentar parcelas, en algunos casos, a cambio de la mitad de la producción cosechada. Cuando el productor es dueño de la tierra que cultiva, se favorece la adopción de AV, ya que la seguridad de la tenencia puede motivar al campesino a mejorar la calidad de sus suelos. La pequeña propiedad campesina ha tenido una expansión desde la adopción del programa PROCEDE, en 2006, por el comisariado ejidal de la Villa de Zaachila. Esto ha formado parte de un proceso más amplio de privatización de la tierra, iniciado en 1992 por Carlos Salinas de Gortari, a través de la modificación del artículo 27° de la Constitución Política mexicana.

El ejido tiene 900 hectárea de temporal y 650 hectárea de riego tecnificado dividido en 12 unidades de riego con 12 pozos profundos. Cada socio de las unidades de riego tiene, en general, lo equivalente a una hectárea de parcela de riego y, como ejidatarios, tienen, además y en general, otra cantidad similar bajo temporal. También existe un número indeterminado de pozos de riego de apoyo en las parcelas individuales, lo cual permite sembrar todo el año. Con el apoyo del riego, se puede implementar la rotación de cultivo, utilizando AV antes y después del cultivo principal. Las fechas de siembra del maíz de temporal, van desde la mitad de mayo hasta la mitad de julio.

2.4 FACTORES AMBIENTALES

Los principales factores ambientales que deben considerarse en la selección de los AV son las condiciones agroclimáticas, la topografía, el régimen hídrico, los tipos y condiciones del suelo, la altura y los agroecosistemas y ecosistemas locales.

La canícula seca divide la temporada de lluvias, comprometiendo la productividad de muchos campesinos en su producción de maíz de temporal. El clima tiene una media anual de 20 °C al año, siendo semicálido subhúmedo y semiseco semicálido, con una precipitación anual de 915 mm que se concentran de mayo a octubre (Honorable Ayuntamiento del Municipio de la Villa de Zaachila, 2019).

Se considera al ciclo primavera-verano como el principal ciclo de producción a nivel nacional, el cual depende totalmente del clima, como lo demuestra la productividad obtenida en los ciclos 1996-2006, con 78.5 % del maíz producido en

este ciclo, 61.5 % de los cuales se produjeron bajo temporal (SIAP, 2013). La agricultura es, por lo tanto, vulnerable al cambio climático, tanto a nivel nacional como en el caso del Valle de Oaxaca, con la presencia de la canícula seca estacional durante las etapas fenológicas críticas de las plantas (SAGARPA/FAO, 2012). En 2015, se perdieron 28,000 hectáreas por sequía estival en Oaxaca, reflejando la vulnerabilidad del maíz de temporal frente al cambio climático (SAGARPA, 2016).

La altura promedio de la Villa de Zaachila es de 1520 msnm y su territorio se extiende sobre 54.86 km². Los suelos principales son el vertisol (30.69%), el regosol (23.65%), el leptosol (18.33%), el luvisol (14.35%), el phaeozem (9.36%) y el fluvisol (0.43%) (Ibid.). El vertisol tiene un alto contenido de arcillas expansivas como las montmorillonitas que forman grietas en las estaciones secas. Los luvisoles se caracterizan por el lavado de las arcillas de los horizontes superiores y su acumulación en los horizontes más profundos, se desarrollan principalmente sobre materiales no consolidados como depósitos glaciares, eólicos, aluviales y coluviales. Los phaeozem poseen una marcada acumulación de materia orgánica dentro del suelo mineral y por estar saturados con bases en su primer metro. Finalmente, los fluvisoles están formados a partir de sedimentos aluviales (fluviales, lacustres, marinos) (Figura 1).

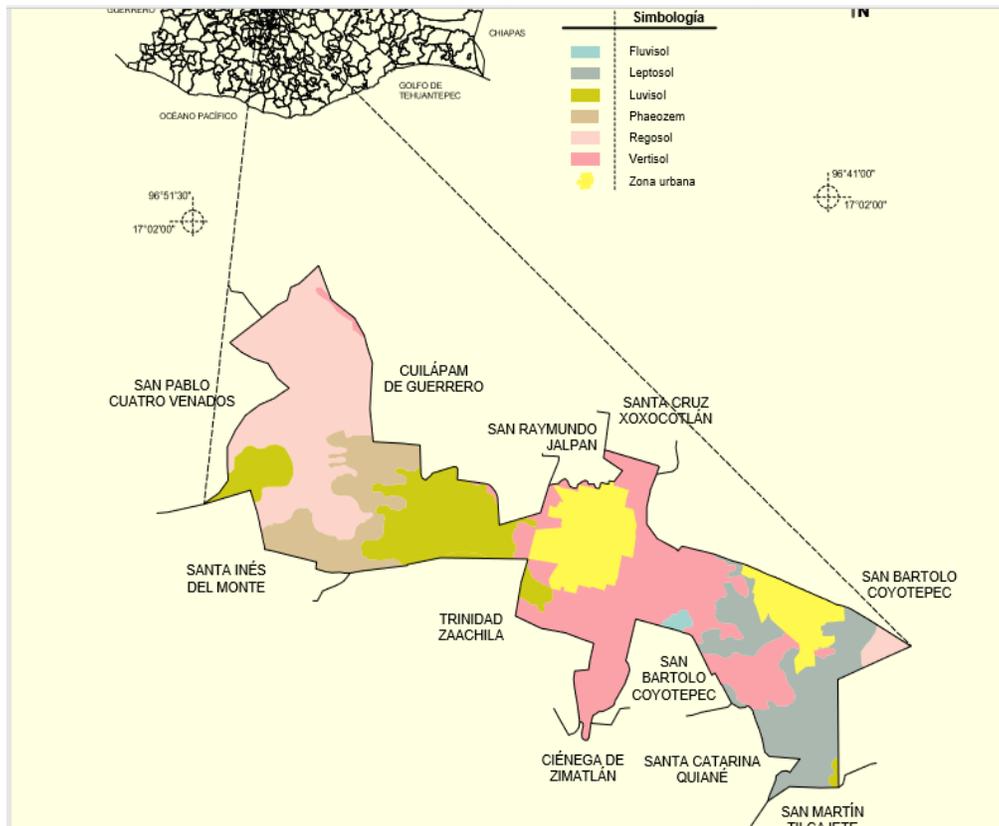


Figura 1. Mapa de suelos de la Villa de Zaachila

Fuente: INEGI, 2007.

La topografía agrícola de los suelos de Zaachila está principalmente compuesta por tierras planas y lomeríos. Según el INEGI (2007), los bosques ocupan todavía 16.14% del territorio municipal con árboles como pino (*Pinus*), encino (*Quercus*), madroño (*Arbutus unedo*), palo de águila (*Laelia superbiens*), cuatle (*Eysenhardtia polystachya*), fresno (*Fraxinus*), sabino, (*Taxodium huegeli*), ocote (*Pinus oocarpa* Schiede), pirul (*Schinus molle* L.), etc. Se ubica dentro de la región de la Cuenca del Río Atoyac, en cuyas riberas también crecen pastizales, sauces (*Salix humboldtiana*) y arbustos como chamizo (*Adenostoma fasciculatum*) y carrizo (*Phragmites australis*).

La fauna incluye tlacuaches (*Didelphis marsupialis*) conejos (*Oryctolagus cuniculus*), liebres (*Lepus europaeus*), lagartijas (*Psammotromus hispanicus*), etc. Estos ecosistemas locales de pastizales, de bosques encinos-pinos, pinos y de encinos (Rojas-Zarate *et al.*, 2016) interactúan con los agroecosistemas de maíces (*Zea maíz*), frijoles (*Phaseolus vulgaris* y *Phaseolus coccineus*), cacahuates (*Arachis hypogaea*), jitomates (*Solanum lycopersicum*), alfalfa (*Medicago sativa*), nogales (*Juglans regia*) y hortalizas, que crean un mosaico de paisajes dentro del territorio municipal.

2.5 FACTORES DE MANEJO AGRÍCOLA

Los factores de manejo agrícola que influyen en la aplicación y adopción de AV/CC son el tamaño de la parcela, el tipo de productores, los tipos de cultivos, las plagas y enfermedades, la disponibilidad de semillas de AV/CC, la rotación o asociación de cultivos y si éstos son mixtos, intercalados, asociados, para consumo humano o forraje. También es importante considerar el tipo de AV y/o cultivo de cobertura, el manejo del suelo (agricultura de conservación, tipos de labranzas), las fechas de siembra, la existencia de leguminosas locales y el acceso a riego.

En general, el tamaño de parcelas en la Villa de Zaachila es de una hectárea, lo que limita la rotación de cultivo con AV/CC dentro de la parcela y obliga a buscar arreglos topológicos intercalando maíz con AV/CC.

Se puede dividir a los productores por el tipo de labranza que utilizan y el tipo de insumos externos que usan, clasificándolos en tradicionales, semi mecanizados y

mecanizados. Los productores tradicionales utilizan todavía las yuntas para labrar las tierras mientras el deshierbe es manual y/o con las mismas yuntas. Mantienen la fertilidad de sus suelos con los estiércoles acumulados en casa, las semillas utilizadas son criollas o nativas y siembran en general policultivos como la milpa. Los productores semi mecanizados utilizan el tractor solamente para algunas de las labores de labranza y siguen sembrando y deshierbando a mano, utilizan, en general, pocos insumos como fertilizantes y herbicidas.

Los productores mecanizados hacen todo el trabajo de labranza con tractores, así como la misma siembra y el deshierbe, algunos realizan agricultura de conservación pero con el uso de herbicidas. La mayoría de estos siembran semillas híbridas o criollas mejoradas y siembran en cultivos simples. El reemplazo del maíz nativo por algunos maíces híbridos en las zonas de riego con una alta dependencia a insumos externos en la Villa de Zaachila es parte de esa lógica hegemónica dominante (Mora-Van-Cauwelaert, 2017)

La labranza convencional o tradicional, la labranza de conservación y la labranza “cero” son los tres tipos de labranzas utilizadas en la Villa de Zaachila. La labranza convencional o tradicional incide en los 15 primeros centímetros del suelo. Esta labranza afloja, airea y mezcla los residuos de cosecha, facilitando la penetración del agua, acelerando la mineralización de la materia orgánica y eliminando una parte de las plagas y enfermedades al romper sus ciclos de vida en el suelo, sin embargo, en los suelos desnudos aumenta la erosión eólica e hídrica e invierte los horizontes del suelo (Bouthier *et al.*, 2014); así como causar encostramiento y, en general, degradar su estructura.

La labranza de conservación, por su parte, deja los residuos en la superficie del suelo, minimizando su proceso de mineralización y reduciendo el proceso de erosión, además de disminuir la compactación del suelo y los costos de operación (Benítez *et al.*, 2016). Este tipo de labranza se puede hacer con implementos convencionales y depende en gran parte de la estructura del suelo y del clima (Ibid.). En este caso se podría utilizar el AV como mulch o con una ligera incorporación superficial de residuos, después de la cosecha o antes de la siguiente. Se podría aplastar primero el AV o cortarlo y después reincorporarlo (Astier *et al.*, 2006).

La labranza cero se puede hacer de forma muy rústica y todavía se practica, particularmente en las sierras de Oaxaca con la roza, tumba y quema, sembrando con estacas sobre los residuos o con la agricultura de conservación con implementos más especializados (Bertoni *et al.*, 1985). En el caso de la agricultura de conservación mecanizada, se siembra directamente en un corte vertical, hecho con una cuchilla, dentro de los mismos residuos de cosecha, permitiendo el contacto entre las semillas y el suelo húmedo. En este caso, se puede utilizar los AV para eliminar el uso de herbicidas en el suelo, reactivando la vida microorgánica. De este modo, no se deja el suelo desnudo, se siembran los cultivos de cobertura que servirán después para aplicarlos como mulch entre el cultivo principal (Ibid.).

Los principales cultivos son el maíz nativo en mayor proporción y criollo mejorado e híbrido en menor proporción (*Zea mays*), el frijol negro delgado, el frijol de guía y el de mata (*Phaseolus vulgaris*), el frijol ayocote y el frijolón (*Phaseolus*

coccineus), la alfalfa (*Medicago sativa*), el cacahuate (*Arachis hypogaea*), la jícama (*Pachyrhizus erosus*), la nuez (*Juglans regia*), el aguacate (*Persea americana*), el jitomate (*Solanum lycopersicum*), las calabazas (*Cucurbita máxima*), la higuera (*Ricinus communis*), y flores como el cempasúchil (*Tagetes erecta*). Asimismo, las hortalizas son parte de los cultivos principales sembrados en la Villa de Zaachila.

Las plagas principales del maíz de temporal son el gusano de alambre (*Agrotis lineatus*), la gallina ciega (*Phyllophaga* spp.), los nemátodos en el suelo (*Meloidogyne*, *Heterodera*, *Ditylenchus*), del follaje son los barrenadores del maíz (*Zeadiatraea grandiosella*), el gusano saltarín (*Eiasmopalpus lignosellus*), el gusano peludo (*Estigmene acrea*), los gusanos trozadores (*Agrotis ipsilon*, *Agrotis subterranea*, *Euxoa auxiliaris*, *Peridroma saucia*, y *Prodenia latifascia*), el pulgón del cogollo (*Rhopalosiphum maidis*), los trips negros (*Hercothrips phaseoli*), la chicharrita dalbulus (*Dalbulus maidis*), la diabrotica (*Díabrotica balteata*), las hormigas arrieras (*Atta cephalotes*), los gorgojos del maíz (*Sitophilus zeamais*) y el gusano cogollero (*Helicoverpa armigera*) (INEGI, 1997).

Las enfermedades principales del maíz son la pudrición rosa de la mazorca (*Diplodia zeae* Liv.), el carbón de la espiga (*Sphacelotheca reiliana* Clinton), el tizón de la hoja (*Helminthosporium* spp.), el mildiu del maíz (*Sclerospora* spp.) la podredumbre de la espiga (*Gibberella* y *Fusarium* spp.) y el achaparramiento del maíz, causado por un virus (Ibid.)

2.6 CARACTERÍSTICAS DE UN BUEN ABONO VERDE EN EL SISTEMA DE MAÍZ DE TEMPORAL

Los AV se esperan diversas cualidades, tienen que adaptarse a suelos pobres, producir grandes cantidades de biomasa seca, a resistir las canículas secas, a sincronizarse con la siembra del maíz y poder sembrarlo intercalado, a ser utilizado como forraje o para alimentos humanos, fijar nitrógeno y sincronizar su disponibilidad con el próximo cultivo, a limitar el crecimiento de malezas, etc. (Bunch, 2006), todas estas características son necesarias para que los AV puedan adaptarse al policultivo de milpa o de maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca.

Es primordial que los AVC/C se adapten a suelos pobres, ya que parte de sus funciones más importantes es mejorar la fertilidad de los suelos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, en condiciones adversas. Para eso se tiene que producir una gran cantidad de biomasa que será reincorporada como materia orgánica. *“La incorporación se realiza cuando las plantas están en pleno desarrollo, antes de la madurez, cuando el tejido vegetal tiene su mayor concentración de nutrientes o cuando la planta alcanza aproximadamente el 30% de floración”* (García-Hernández *et al.*, 2010).

La producción de biomasa verde y seca determina en gran parte el aporte de materia orgánica al suelo y el mejoramiento de las mismas propiedades del suelo y de su fertilidad (Maiksteniene *et al.*, 2004). La cantidad de biomasa depende de su capacidad de interceptar y transformar la energía solar, a través de la fotosíntesis, en biomasa que se puede reincorporar al suelo, así como de la naturaleza de la biomasa fresca. También es importante considerar su proceso de descomposición y tasa de mineralización, a través de la actividad microbiana del

suelo, de su contenido de humedad y de la temperatura del mismo (Martínez-Romero *et al.*, 2014). La cantidad de biomasa del suelo puede ser determinada por la misma capacidad de la especie y por el régimen de lluvias (Ibid.).

Tienen que resistir también la sequía, asegurando la alimentación de las familias campesinas, a través de la sobrevivencia y producción de su cultivo principal, el maíz (Bunch, 2012a). Para poder resistir a zonas semisecas, hay que buscar especies que sean capaces de producir biomasa durante períodos donde no hay suficiente agua; en el caso de VCO no hay lluvia por aproximadamente seis meses del año (diciembre a mayo), contando con menos de 800 mm de agua anualmente.

También los AV/CC tienen que poder ser sembrados en asociación con el maíz durante el periodo de temporal sin competir con él. *“Si van a ser usadas en cultivos intercalados, deben tolerar la sombra y adecuarse al ciclo del cultivo principal”* (Bunch, 2006).

El uso para la alimentación humana o para alimentar los animales por los AV/CC es fundamental, ya que puede ser la razón principal para su adopción. También el beneficio económico por su venta en los mercados locales puede ser decisivo en cuanto a propiciar su adopción dentro del agroecosistema (Bunch, 2012b).

La fijación de N₂ en el suelo depende, en un primer momento, de la abundancia de las cepas de *Rhizobium* de las leguminosas nativas, pero la capacidad de simbiosis depende del mismo rizobio, de la planta hospedante y de la relación hospedante-bacteria. Existen algunas bacterias que solo pueden asociarse con un

hospedante y otras con varias especies de leguminosas. Los nódulos donde se hospedan las bacterias transforman el N_2 en amonio y lo vuelven disponible en el suelo. La disponibilidad de nitrógeno para el próximo cultivo depende de la abundancia de la infestación de la rizósfera por parte de las bacterias de *Rhizobium* y de la formación de nódulos en las raíces, así como de su liberación en el suelo para ser consumido por otros microorganismos o por otras plantas.

La sincronización con el otro cultivo es clave, ya que el nitrógeno se puede lixiviar o evaporarse antes de poder ser utilizado, como el caso de algunas leguminosas locales como *Phaseolus vulgaris* (Jamioy, 2018). Este componente del manejo con AV se dificulta en el sistema de temporal, ya que desde octubre deja de llover, con lluvias generalizadas hasta mayo del año siguiente (García-Hernández *et al.*, 2010). El AV puede ser reincorporado en el tiempo de floración después de cosechar el maíz o antes de la siembra en abril-mayo.

En el caso del control de las malezas, los AV ocupan el espacio donde normalmente las malezas se reproducen libremente o los espacios libres, como en el caso de un cultivo intercalado con AV. Al utilizar el AV como cultivo de cobertura, compite con las malezas por los nutrientes, el agua y la luz y reduciendo considerablemente el banco de semillas de estas plantas, presente en el suelo. Esta competencia interespecífica permite a los AV, que en general son especies de rápido crecimiento, desplazar a las malezas y crecer con mayor vigor (Hernández-Santiesteban *et al.*, 2009).

También en el caso de los cultivos como el *Lablab purpureus*, su comportamiento trepador sofoca las demás malezas y mueren por falta de fotosíntesis (Massawe *et*

al., 2016). La ocupación del espacio físico en sí evita la proliferación de malezas en estos mismos espacios. Tradicionalmente y del mismo modo que con los AV, el hecho de mantener una cierta cantidad de malezas dentro de la parcela ha sido parte del manejo tradicional campesino y permite una mayor diversidad de insectos incluyendo polinizadores y agentes de control biológico (González-González, 2018).

Hay muchas experiencias de la sociedad civil, de organizaciones campesinas y de instituciones académicas que se han propuesto estudiar los sistemas tradicionales de producción agrícola desde un enfoque ecológico y han propuesto alternativas para revertir estos procesos de degradación ambiental, promoviendo estrategias multifuncionales de bajo costo, como el caso del promotor Raymundo Aguilar, quien fue el primer campesino en utilizar el *Lablab* frente a la canícula seca y el proceso de degradación de sus suelos (Ibid.).

III PERTINENCE OF EXOTIC AND LOCAL GREEN MANURES FOR SUSTAINABLE MAIZE POLYCULTURE IN OAXACA, MEXICO

Alexandre Beaupré¹, Jaime Ruiz-Vega¹, Ernesto Castañeda Hidalgo², Mariana Bénitez³, Emilio Mora Van Cauwelaert³, Cecilia González González³

¹Programa de Doctorado en Ciencias y Aprovechamiento de los Recursos Naturales, Protección y producción vegetal, CIIDIR Oaxaca IPN, Oaxaca, México

²Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas, Cuerpo Académico Desarrollo Rural y Manejo Sustentable de Agroecosistemas, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México. ³Laboratorio Nacional de

Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México 04510, México.

3.1 ABSTRACT

Green manures are a promising alternative for achieving the sustainable production of maize in the face of low soil fertility and increasingly long canicule periods, particularly in rainfed systems associated with the reproduction of local agrobiodiversity. However, it is necessary to investigate what are the advantages and disadvantages associated with different species of native and exotic pulse, as well as their overall contribution to the sustainable production of maize landraces. In order to do so, we followed the MESMIS method to assess five species of pulse (three native and two exotic) grown with maize in two plots with different soil conditions. This was done in the seasons of 2017 and 2018 the municipality of Villa de Zaachila, Oaxaca, a site with remarkable biological, agricultural and cultural diversity. A fully randomized complete block design was implemented with eleven treatments and three repetitions in the two plots. The output variables of the experiment were: land equivalence ratio, interspecific aggressiveness, content of soil organic matter, decomposition rate, plant survival rate and plant dry biomass. We also evaluated quantitative or qualitative indicators of cost, adaptability and contribution to food security. For all the possible maize-pulse combinations, except for one, polyculture outperformed maize and pulse monocultures. Exotic pulses (*Crotalaria junscens* spp. and *Dolicho lablab*) had a better performance in biomass, reincorporation of organic matter and possible nitrogen fixation, as well as greater resistance to drought in the second cycle. The native pulses (*Phaseolus vulgaris*

and *Phaseolus coccineus*), however, had a greater acceptance and economic output and are important for the food security in our study site. Our results provide quantitative and qualitative elements to design combined schemes of green manures associated with maize that would help tackle current challenges regarding maize productivity, food security and response to climate change.

Key word

- green manure
- sustainability
- LER
- maize polyculture
- soil organic matter

3.2 INTRODUCTION

Maize is traditionally grown in Mexico and Mesoamerica in polyculture systems that have been recognized as invaluable repositories of biological and cultural diversity (García-Barrios et al., 2009; Altieri, 2001, 1999). Particularly, in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico, rainfed production of local maize landraces and associated crops (beans, squash, and chilli peppers, among others) supports peasant families, allows for animal husbandry and reproduces biocultural diversity (Blanckaert et al., 2007). Indeed, in this region pulse species traditionally associated with maize are a low-cost source of protein and are a fundamental part of the traditional local diet (FAO, 2016) (Figure 3).

However, this region exhibits a trend towards growing maize in monoculture and the region's food security is currently at risk due to environmental, economic and social conditions generated after decades of neoliberal policies (CEMDA, 2016; Gonzalez, 2004; Bautista-Martínez, 1998). Narrowly focused productivity-centered policies and programs have led to the prevalence of agricultural practices that favor soil loss, lower the percentage of soil organic matter and reduce overall soil quality in the long term (Ceccon, 2008; FAO, 2015; SEMARNAT, 2008). In turn, this compromises the resilience of rainfed maize production in the face of increasingly long canicule periods (Murray-Tortarolo et al., 2018; Ruíz-Vega et al., 1999).

Sustainable and agroecological strategies for maize production aim not only at high maize yields (Sakala, 2012), but also at: i) long term soil improvement (Ortiz et al., 2016) ii) agro- and biodiversity conservation, iii) resilience in the face of drought or other stressors (Nicholls-Estrada et al., 2013), and iv) the contribution to multifunctional strategies and local food security (Altieri et al., 2017; García-Hernández et al., 2010). The use of green manures may help attain all of these aims because they can improve soil fertility and reduce water evaporation and erosion by covering the soil and through the reincorporation of Nitrogen-rich organic matter. They can also provide food for livestock and human consumption (Astier et al., 2012; Sain et al., 1998), and increase biological and functional diversity within plots (Val et al., 2019; Nabel et al., 2018; Bunch, 2012). However, the adoption and pertinence of green manures largely depends on space availability (especially within small plots), the intensity of interspecific competition, seed availability and cost, and the cultural use of green manures (Bunch, 2012).

In the Central Valleys of Oaxaca there are pulse landraces that have been traditionally grown in association with maize as part of the so-called *milpa* system (González-González et al., 2020; Ebel et al., 2017). These are the black bean (*Phaseolus vulgaris*), the climbing bean (*Phaseolus vulgaris*) and the ayocote bean (*Phaseolus coccineus*). Also, some exotic species have been sporadically used in the region, *Dolicho lablab* and *Crotalaria junscens* spp (Ruíz-Vega et al., 2003). However, the pertinence and sustainability of each of these green manures has not been jointly assessed for maize polycultures in this area. In particular, it is necessary to evaluate how they perform in association with a widely used maize landrace, whether or not there is competition among maize and each type of pulse, to what extent they can contribute to soil improvement, and whether or not they contribute to multifunctional strategies and food security.

In order to address this question, we systematically tested five different types of green manure (three local and two exotic) in the municipality of Villa de Zaachila, in the Central Valleys of Oaxaca, in the seasons of 2017 and 2018. We assessed the performance of each green manure when associated with a local maize landrace and followed the MESMIS method to assess each type of green manure in terms of the overall contribution to sustainability.

3.3 MATERIALS AND METHODS

MESMIS method

We used the MESMIS method (Astier et al., 2012; Sarandón and Flores, 2009; Astier et al., 2008) in order to evaluate the sustainability of five types of green

manure associated to native maize in rainfed agriculture in Oaxaca, Mexico. The method consists of six steps, which we describe below.

Steps 1-3. Diagnostic of the local rainfed system, identification of critical points and potential indicators.

This study was conducted at Villa de Zaachila (Zaachila hereafter), in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. The most represented land use type in this municipality is agriculture (48 % of its total area) (Urrutia et al. 2020). According to official data, the municipality is composed of 1,669 ha which are distributed among 1,521 peasants, which is to say every peasant family has around 1 ha of land. This small-scale agricultural scheme combines with the fact that 90 % of the plots are rainfed (INEGI 2007). The history of landscape management of Zaachila begins with the Zapotec people, about 3500 years ago. Today, agricultural plots exhibit qualitatively different types of management, ranging from rainfed and low-input plots aimed mostly at family consumption, to irrigated and high-input agriculture aimed mainly at regional markets (González-González et al., 2020). Historically, Zaachila has been an important point for regional commerce, as its traditional market has existed since the time of the Zapotecs and still it gathers farmers and peasants from all the surrounding villages every Thursday (Mora Van Cauwelaert, 2017; Fuentes-Aguilar et al., 1979). The characterization of the local rainfed maize production and the identification of critical points and potential indicators were performed on the basis of: 1) recent studies characterizing the management of Zaachila rainfed maize plots (González-González et al., 2020) and the motivations and family-level economy associated with maize production (Mora Van

Cauwelaert, 2017), and 2) field observations and participatory observation, both in the Thursday market and around local plots (Figure 2 and Table 1).

Figure 2. Characterization of the local rainfed *milpa* (maize-based polyculture) agroecosystem, its critical points and outcomes as potential indicators.

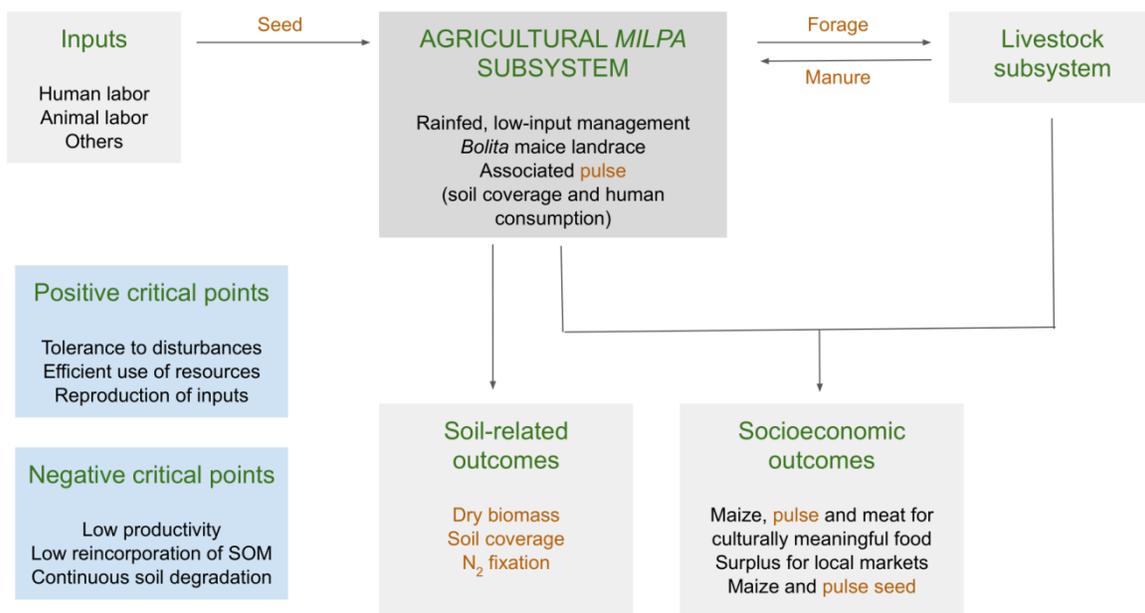


Table 1. Experimental design.

Factor 1	Factor 2	
Green Manure and Maize	Year	Soil depth
M + AB		
M + BB		
M + CB		
M + Cr	Short (A17)	Deep Soil (A17)
M + Do		
AB		
BB	Long (A18)	Shallow Soil (B17)
CB		
Cr		
Do		
M		

AB: Ayocote Bean, BB: Black Bean, CB: Climbing Bean, Cr: Crotalaria, Do: Dolicho. Maize (M) + Green Manure with its different treatments were used as factor 1. The year or the soil depth were used as the Factor 2, with two levels each. A17, A18 and B17 stand for the different plots (see main text).

Step 4. Measurement of variables associated with indicators

Step 4.1 Study sites

Indicators were selected as described in Step 1 and quantified by means of a field experiment and literature reviews (Table 1 and 2). We conducted an experiment aimed to assess the performance of five types of green manure in association with native maize. It took place in two experimental plots in two different years (2017 and 2018). One of the plots (Plot A) is located on a flat zone near a river and the other (Plot B) on a hill with signs of laminar erosion (Ruíz-Vega, 1998). Both plots were initially characterized from soil samples at 0-15 cm and 15-30 cm. Plot A was a fluvisol with sandy loam texture, with slightly alkaline pH (0-15 cm, 7.17; 15-30 cm, 7.30), low content of organic matter (0-15 cm, 0.95; 15-30 cm, 0.97%), low total N (0-15 cm, 0.051; 15-30 cm, 0.053%), very low total P (0-15 cm, 4.96; 15-30 cm, 4.27 mg/kg) and low total K (0-15 cm, 112.71; 15-30 cm, 101.01 mg/kg). Plot B had a sandy clay texture with slightly acid pH (0-15 cm, 5.18; 15-30 cm, 5.06), low to very low content of organic matter (0-15 cm, 0.95 %; 15-30 cm, 1.05%), low total N (0-15 cm, 0.053; 15-30 cm, 0.056%), moderately low total P (0-15 cm, 14.01; 15-30 cm, 19.62 mg/kg) and a medium amount of total K (0-15 cm, 184.08; 15-30 cm, 193.05 mg/kg).

Step 4.2 Biological material

Five types of pulse were chosen as green manure. Three of them were the local landraces black bean (BB, *Phaseolus vulgaris*), climbing bean (CB, *Phaseolus vulgaris*) and ayocote bean (AB, *Phaseolus coccineus*), and two of them were exotic species, *Dolicho lablab* (Do) and *Crotalaria junscens* spp (Cr). Green manures were grown in association with a local maize landrace (*yellow bolita*). *Phaseolus vulgaris* is the most common bean in Mexico, with an average yearly consumption of 9.9 kg per capita (SAGARPA, 2016). In Zaachila, BB is usually grown with irrigation during the dry season (SIAP, 2016). CB is grown next to the maize plants and it climbs on its cane. AB is also originally from and commonly consumed in Mexico (Vargas-Vásquez et al., 2011), and in Zaachila it is mainly grown in rainfed systems. On the other hand, Do is from Ethiopia and is commonly consumed in Asia and Africa as human food, forage and green manure (Ruiz Espinoza et al., 2007; CIAT, 2006). It has been reported to have great potential as green manure due to its resistance to drought and its high N₂ fixation capacity (Ruíz-Vega et al., 2010; Murphy et al., 1999). Lastly, Cr is from Pakistan and other parts of Asia and is widely used as forage and green manure due to its fast development (Li, 2012).

Step 4.2 Experimental design

A fully randomized complete block was established with experimental units of 3 x 25 m (75 m²) by plot, with a total area of 2475 m² covering 11 treatments (Table 1). Treatments were 5 for maize in association with each type of green manure, 5 for each type of green manure in monoculture, and 1 for maize in monoculture. Each

of the 11 treatments were grown in two consecutive rainy seasons (2017-2018) in plots A and B, with three replicates in every case. Overall, we should have had 132 data points (11 combinations x 2 plots x 2 years x 3 replicates), but the treatments in plot B did not survive the long 2018 canicule, so data for plot B 2018 (B18) do not exist.

4.3 Plot management

The preparation of plots A and B was done mechanically, while the planting and weeding were done manually. The grooves had a 75 cm width, and there were 80 cm between the holes for maize seeds, with three seeds per hole. This rendered a maize density of approximately 37 000 plants per ha⁻¹. The density of green manures was: BB 40 000 plants ha⁻¹, Cr 60 000 plants ha⁻¹, Do 25 000 plants ha⁻¹, CB y and AB 30 000 plants ha⁻¹. In order to guarantee a high germination and survival rate, all seeds were inoculated one night before planting with Azotobacter and Mycorrhiza (1kg ha⁻¹) provided by the company NOCON (<http://www.nocon.mx/empresa.php>). No synthetic fertilizer or pesticides were used at any point.

4.4. Assessment of critical indicators

4.4.1. Maize and Green manure yield. (R) (t ha⁻¹). We randomly chose 5 maize plants within each experimental unit and weighted their dry grains. The yield per ha was estimated considering the plant density.

4.4.2. *Dry biomass.* (Bs) (kg ha⁻¹). We randomly chose 5 green manure plants within each experimental unit at the flowering time. The plants were weighed after they were dried in an oven for 8 hours at 70°C.

4.4.3. *Content of organic matter in soil.* (OM) (%). Green manures were incorporated into the soil after two months of growth. Two random samples of 50 g of the first 15 cm of soil were taken two months after the incorporation. These samples were analyzed following the dry combustion method proposed by Robinson (1927).

4.4.4. *Decomposition rate.* We incorporated the green manures to the soil after two months of planting. After two months of the incorporation, we took 2 random samples of 10 g from the first 15 cm of soil in each experimental unit. Then, we estimated the percentage of weight lost by each sample after 3-5 weeks (Ruíz-Vega et al., 2003).

4.4.5 *Land efficiency ratio.* (LER). We took a random sample of 10 plants of maize and 10 plants of green manure in each experimental unit. We estimated the grain yield in relation to the planting densities per ha with the following equation:

$$LER = \frac{YM_p}{YM_m} + \frac{YG_p}{YG_m}$$

where YM_p and YM_m are maize yield in polyculture and monoculture respectively, YG_p and YG_m are green manure yield in polyculture and monoculture, respectively. One of the assumed limitations of efficient intercropping is competition for light (or

space). If decrease in yield is directly proportional to decrease in space due to the intercropping, then LER=1.0 and it is concluded that monoculture or polyculture are equally productive. If LER<1.0 then monoculture is preferable. If LER>1.0 then polyculture is preferable (Cruz-Ruíz, 2009).

4.4.6 Interspecific competition. (Aggressivity coefficient - A). This was estimated with the grain yield data as in Ruíz-Vega et al (2010) following the next equation:

$$A = \frac{Y M_p}{Y M_m \cdot \lambda_M} - \frac{Y G_p}{Y G_m \cdot \lambda_G}$$

where λ_M and λ_G are the proportion of land area occupied at intercropping compared to sole crop for Maize and Green Manure respectively (Anna-John et al., 2005). In this study planting densities were similar in monoculture and polyculture, so λ_M and λ_G were set to 1.

For this indicator $A=0$ means that the two crops are equally competitive, $A > 0$ means that there is dominance of maize over green manure, $A < 0$ means there is dominance of green manure over maize.

4.4.7. Multifunctionality. This trait was considered as an indicator of adaptability and it refers to current and potential uses of green manures within the whole system depicted in Figure 1. This was done by searching published information regarding the use of each type of green manure (SAGARPA, 2016; Bunch, 2012; Sircely et al., 2012; Li, 2012; Vargas-Vásquez et al., 2011; Ruíz-Vega et al., 2010; Murphy et al., 1999 ;) and by participatory observation in the Thursday market and

in the rainfed plots. The uses were classified in human food, forage and green manure.

4.4.8. Green manure survival. This trait was considered as an indicator of stability, resilience and resistance, especially because of the challenge that prolonged canicules and potential pests pose to local rainfed agriculture. In order to calculate the survival rate, we obtained for each experimental unit the percentage of green manure plants that survived the 2018 canicule, which was unusually long.

4.4.9. Benefit-cost ratio. This trait was considered as an indicator of equity because it is assumed to reflect if green manures may increase the utilities associated with the whole system depicted in Figure 1. It was estimated as the relation between the costs associated to local maize cultivation (INIFAP, 2015a, INIFAP, 2015b) and the price at which the produced maize grain, maize forage and green manure seed (per ha⁻¹) can be sold in the local market (participatory observations at the Thursday market).

4.4.10. Role in food security. This trait was considered as an indicator of autonomy of the peasant families in Zaachila. We evaluated if the produced green manure grain could be consumed by the peasant families. From a literature review and participatory observation, we classified each type of green manure as not consumable, consumable but not used in local gastronomy, or consumed in local gastronomy.

4.5. Steps 5 and 6. Data integration, discussion and conclusion

In order to integrate the indicators in a common framework, we used a spider plot considering indicators of productivity (LER, dry biomass), resilience (green manure survival), equity (benefit-cost ratio), autonomy (food security), and adaptability (multifunctionality). The values for all the indicators were normalized in a range of 0 to 20. The spider plot depicts how each type of green manure performs in the different axes of sustainability. This integrative visualization allowed us to discuss the potential sustainability of each type of green manure (and possible combinations) in the context of the whole system depicted in Figure 1. Data are further integrated and discussed in the Discussion section.

4.6. Statistical analysis

We performed two-way ANOVA tests for both the combined effects of each green manure association with the soil type, and the combined effects of each green manure association with the year in turn. We tested the following response variables: interspecific competition, LER, green manure yield, dry biomass and maize yield. Where we found significant differences ($p < 0.05$), we also performed post-hoc Tukey tests and formed significantly different groups. All data was analyzed with the *R* software version 3.5.1, and the *ggplot2*, *plyr*, *scales*, *BBmisc*, *reshape2*, *fmsb*, *classInt* and *DescTools* packages (R Core Team 2014).

3.4 RESULTS

Characterization of the agricultural system (steps 1-3)

The rainfed maize agricultural system in Zaachila, Oaxaca, is based on the use of familiar and sporadically paid workforce, and both mechanical and animal traction.

It also uses some external inputs (mostly fertilizers and herbicides) and self-produced manure and native maize seeds of the white and yellow *Bolita* landrace (González-González, 2020; participatory observation). This landrace is relatively resistant to drought and largely used for local gastronomy (Mora Van Cauwelaert, 2017; INIFAP, 2015a) and is often grown in association with pulse or squash (González-González, 2020; participatory observation). According to INIFAP (2015a), the average yield for rainfed maize agriculture in the Central Valleys of Oaxaca is 800 kg ha⁻¹. While some families keep their own animals, their number has diminished, partly due to the costs associated with their alimentation. Thus families lack sufficient animal manure to apply to their plots, which often exhibit soil degradation (SEMARNAT, 2008; participatory observation). The seemingly increasing length of the canicule is one of the factors currently challenging this agricultural system, especially because it is likely to overlap with the flowering time of the *Bolita* landrace (Ramírez Cordova et al., 2017; Van Cauwelaert, 2017; Ruíz-Vega, 1998; Vásquez et al., 1995).

The association of maize with green manure may increase functional and biological diversity in the system and help deal with some of the challenges faced by small agriculture in Zaachila, namely, low productivity and low content of soil organic matter, both partly caused by the substitution of biodiversity by external inputs (Critical points in Figure 3). Green manures may halter degradation and increase soil fertility by providing dry biomass, fixating N₂, and preventing erosion and evaporation by covering the soil, which would eventually result in an increase in productivity. On the basis of the system characterization (Figure 3), we defined a

set of indicators that help assess the sustainability of different maize-green manure associations in an integral manner, this is, considering environmental, social, and economic aspects (Table 2).

Table 2. Main attributes for maize sustainability analysis. (SIAV)

Attribute	Critical Points	Criteria	Indicator	Area	MM	
Productivity	Low yield Low productivity Low organic matter %	Efficiency	<i>Polyculture</i>			
			Maize Yield	E	D	
			Green Manure Yield	E	D	
			Land Equivalency Ratio (LER)	E	D	
			Interspecific Competition	E	D	
				<i>Green Manure</i>		
				Dry Biomass	E	D
				Organic Matter	E	D
				Decomposition Rate	E	D
				Green Manure Yield	E	D
Resilience						
Resistance	Stress Intolerance	Ressource conservation	Survival	E	D	
Stability						
Adaptability	Unefficient use of available ressources	Capacity for change and innovation	Green Manure Multifunctionality	S/E	L	
Equity	Low rentability	Cost and benefit distribution	Cost/Benefit Relation	N	L	
Autonomy	High dependence on external inputs	Self-Sufficiency	Food Safety	S	L	

E: Environmental, S: Social, N: Economic, D: Experimental Design, L: Literature.

For each attribute its critical points, criteria and indicators measured are shown.

The Area and Method of Measurement (MM) are indicated. Source: modified from (Astier et al., 2008).

Indicator analysis (step 4)

i) Productivity and competition indicators in polyculture scheme

Maize and Green Manure Yield

M+AB had the highest maize yield in the same soil (A) for both years (1864 kg ha⁻¹ in 2017 and 1894 kg ha⁻¹ in 2018). The highest average yield in the same year

(2017) was for the M+Do association in shallow soil (2740 kg ha^{-1}), followed by the M+AB association in deep soil (1650 kg ha^{-1}) (Figure 3). However, the two-way ANOVA test showed no significant differences among any treatments for these comparisons (Table 3). As for green manure yield in the same soil (A), the M+CB association had the highest green manure yield during the short canicule year (1462 kg ha^{-1} in 2017), followed by the M+BB association on the same year (1175 kg ha^{-1}). During the long canicule year (2018), the M+Do and M+Cr associations had the highest yields (638 kg.ha^{-1} and 550 kg.ha^{-1} respectively) (Figure 3). The two-way ANOVA tests confirmed significant differences both in response to the year and in response to the interaction between year and green manure type (Table 3). The highest yields for green manure yield in the same year (2017) were once more in deep soil from the M+CB association (1462 kg ha^{-1}), followed by the M+BB association (1175 kg ha^{-1}). For shallow soil, M+Do and M+AB had the highest yields (414 kg ha^{-1} and 272 kg ha^{-1} , respectively) (Figure 3). The two-way ANOVA tests confirmed significant differences in response to soil alone, green manure type alone, and in response to the interaction between soil and green manure type (Table 3). Full data for all indicators are presented in Supplementary Table 1.

Figure 3. Maize yield for both years (A) and both soil types (B). Green manure yield for both years (C) and both soil types (D). Bars show the average yield calculated from three repetitions, black lines correspond to standard deviation. In the two-way ANOVA tests, maize yield (A, B) showed no significant differences in response to treatments; while green manure yield in different years (C) showed differences in response both to year and the interaction between green manure

type and year; and green manure yield in different soils (D) showed differences in response to green manure type, soil and the interaction between them (Table 3). Letters above bars represent significantly different groups as obtained from the Tukey post-hoc tests. M, maize; AB, ayocote bean; BB, black bean; CB, climbing bean; Cr, Crotalaria; Do, Dolicho.

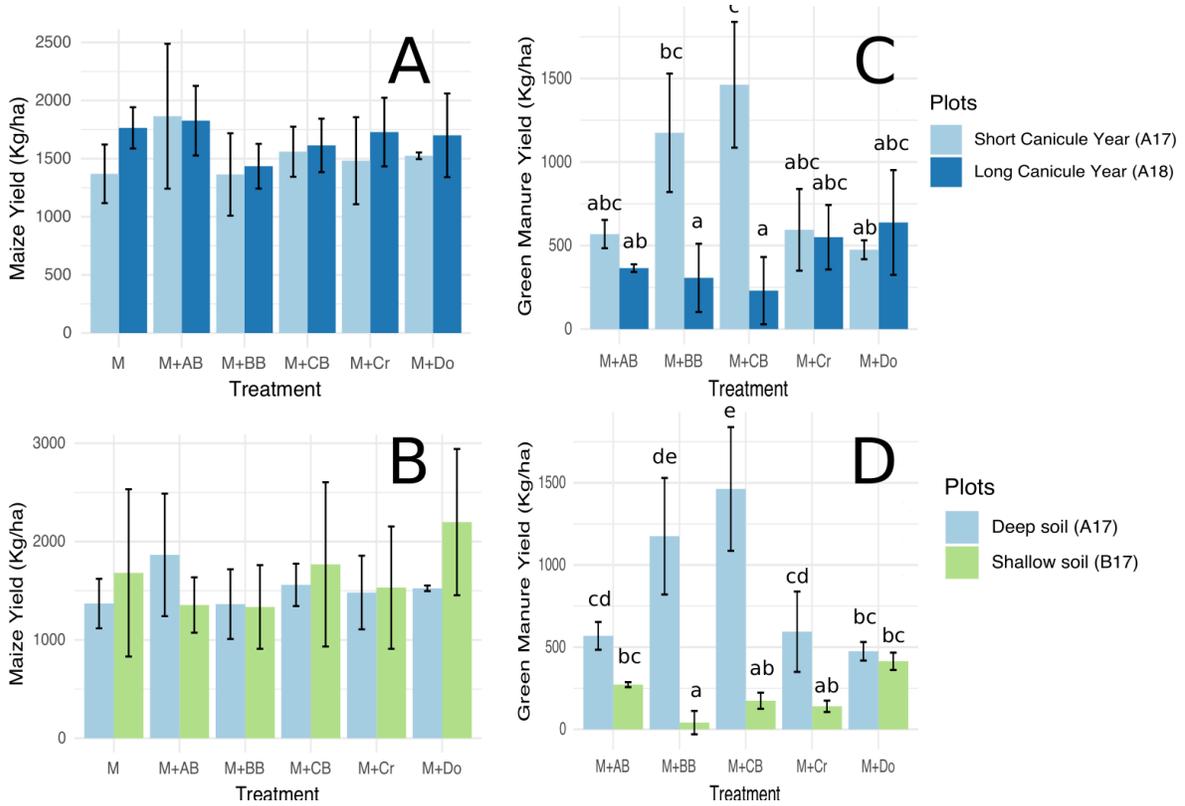


Table 3. Two-Ways ANOVA results.

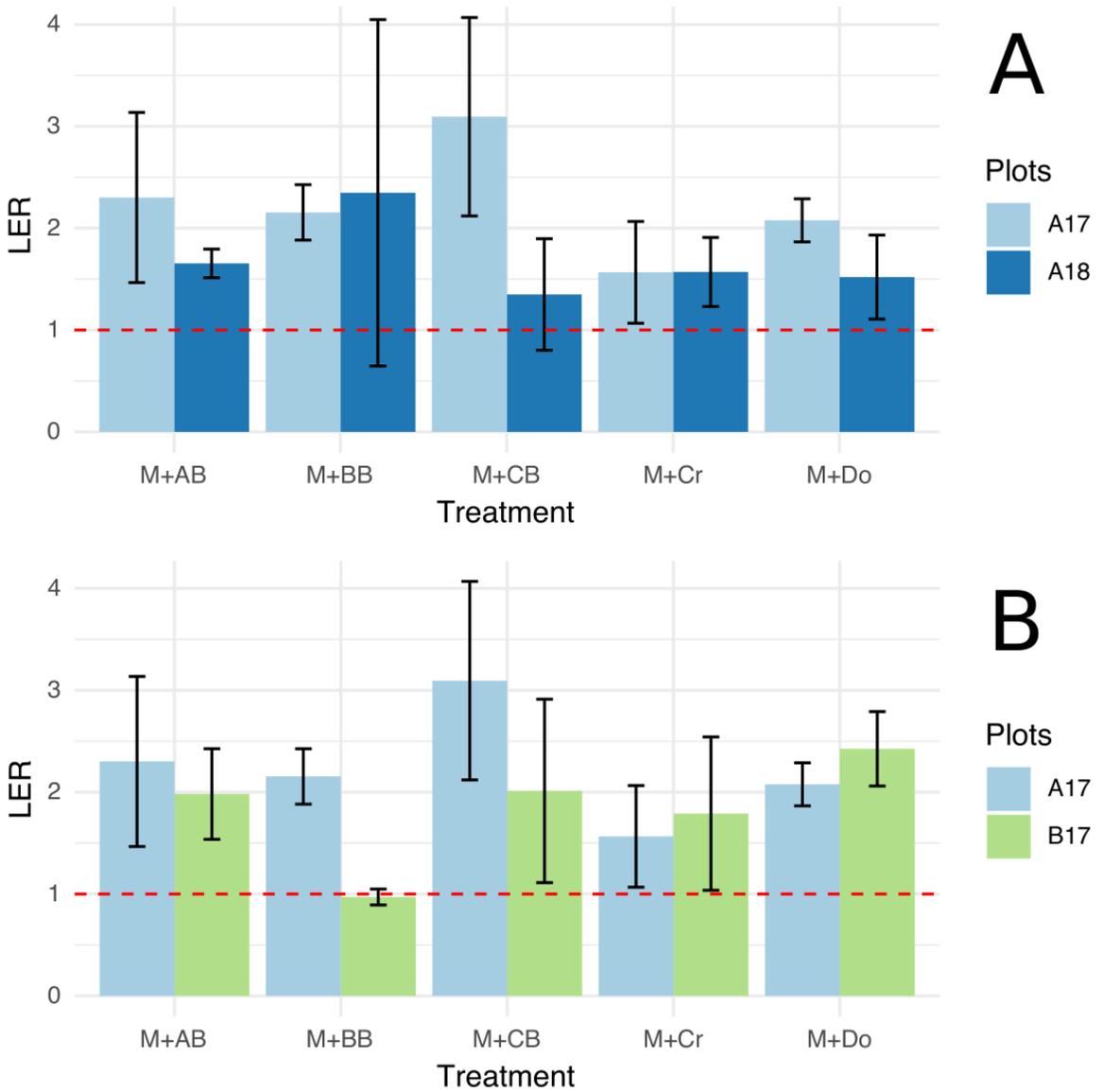
Same Soil				Same Year			
	Df	F value	P		Df	F value	P
Interspecific Competition				Interspecific Competition			
GM	4	2.204	0.105	GM	4	1.455	0.253
Year	1	0.058	0.812	Soil	1	0.473	0.500
GM*Year	4	1.581	0.218	GM*Soil	4	2.204	0.105
LER				LER			
GM	4	0.907	0.479	GM	4	2.725	0.058
Year	1	4.126	0.056	Soil	1	3.259	0.086
GM*Year	4	1.563	0.223	GM*Soil	4	2.046	0.126
GM Yield				GM Yield			
GM	4	0.548	0.702	GM	4	3.938	0.0162*
Year	1	21.343	1.65E-4***	Soil	1	128.985	3.6E-10***
GM*Year	4	7.469	7.4E-4***	GM*Soil	4	16.176	4.56E-6***
Dry Biomass				Dry Biomass			
GM	4	0.291	0.880	GM	4	3.614	0.0226*
Year	1	42.073	2.53E-6***	Soil	1	3.587	0.073
GM*Year	4	0.218	0.925	GM*Soil	4	1.832	0.162
Maize Yield				Maize Yield			
GM	4	1.374	0.278	GM	4	0.831	0.521
Year	1	0.708	0.410	Soil	1	0.178	0.677
GM*Year	4	0.168	0.952	GM*Soil	4	1.052	0.406

Two independent two-ways ANOVA were performed for each variable (interspecific competition, LER, GM yield, dry biomass and maize yield). Factor 1 was the GM treatment and Factor 2 was either the year (same soil) or the soil depth (same year). Degrees of freedom (Df), F values and *P* values are shown. Significant *P* values are indicated with asterisks (**P* < 0.05, ****P* < 0.005).

Land equivalent ratio (LER)

In general, LER averages were all above 1, with the only exception being M+BB in shallow soil. Values above 1 mean that the maize-green manure association outperforms yields produced by each crop planted separately in the same area. Two-way ANOVA test showed no significant difference between green manure types, soils, years or interactions (Figure 4, Table 3).

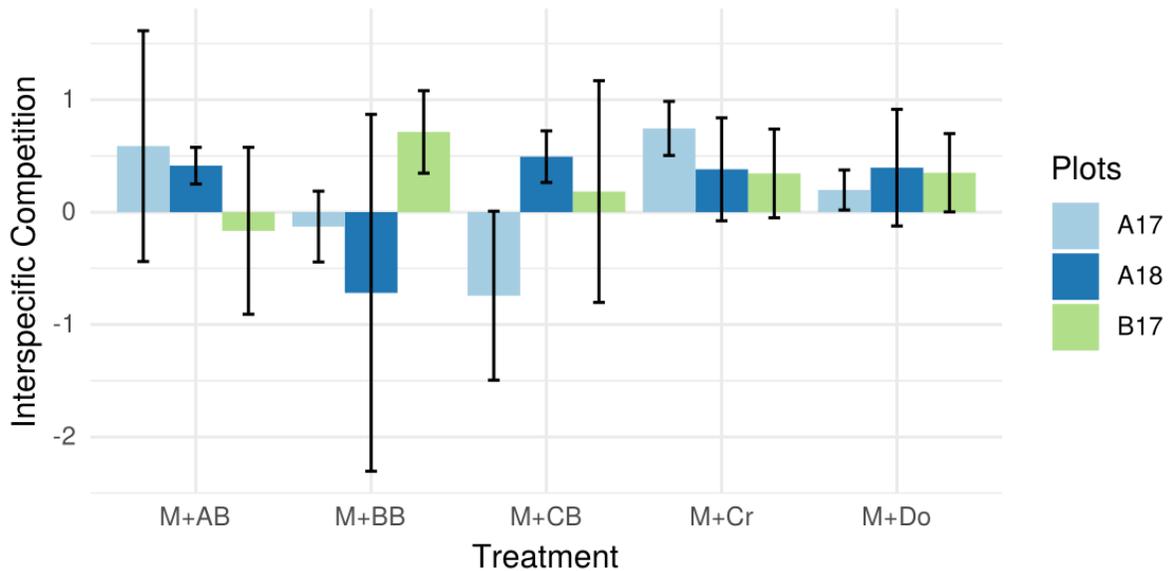
Figure 4. Land Efficiency Ratio (LER) for both years (A) and both soil types (B). Bars show the average LER calculated from three repetitions, black lines correspond to standard deviation. Red dotted line corresponds to LER = 1. No significant differences were found for any case. M, maize, AB, ayocote bean, BB, black bean, CB, climbing bean, Cr, Crotalaria, Do, Dolicho.



Interspecific competition

Almost all standard deviations intervals around the mean include the value $A=0$, suggesting no competition between the crops, except for M+BB association in B17, M+Cr and M+Do in A17 where A is higher than 0. Nevertheless, two-way ANOVA tests found no significant differences between green manure types, years, soils or interactions (Table 3, Figure 5).

Figure 5. Interspecific competition between maize and the different types of green manure. Bars show the average index calculated from three repetitions, black lines correspond to standard deviation. No significant differences were found for any case. M, maize; AB, ayocote bean; BB, black bean; CB, climbing bean; Cr, Crotalaria; Do, Dolicho.



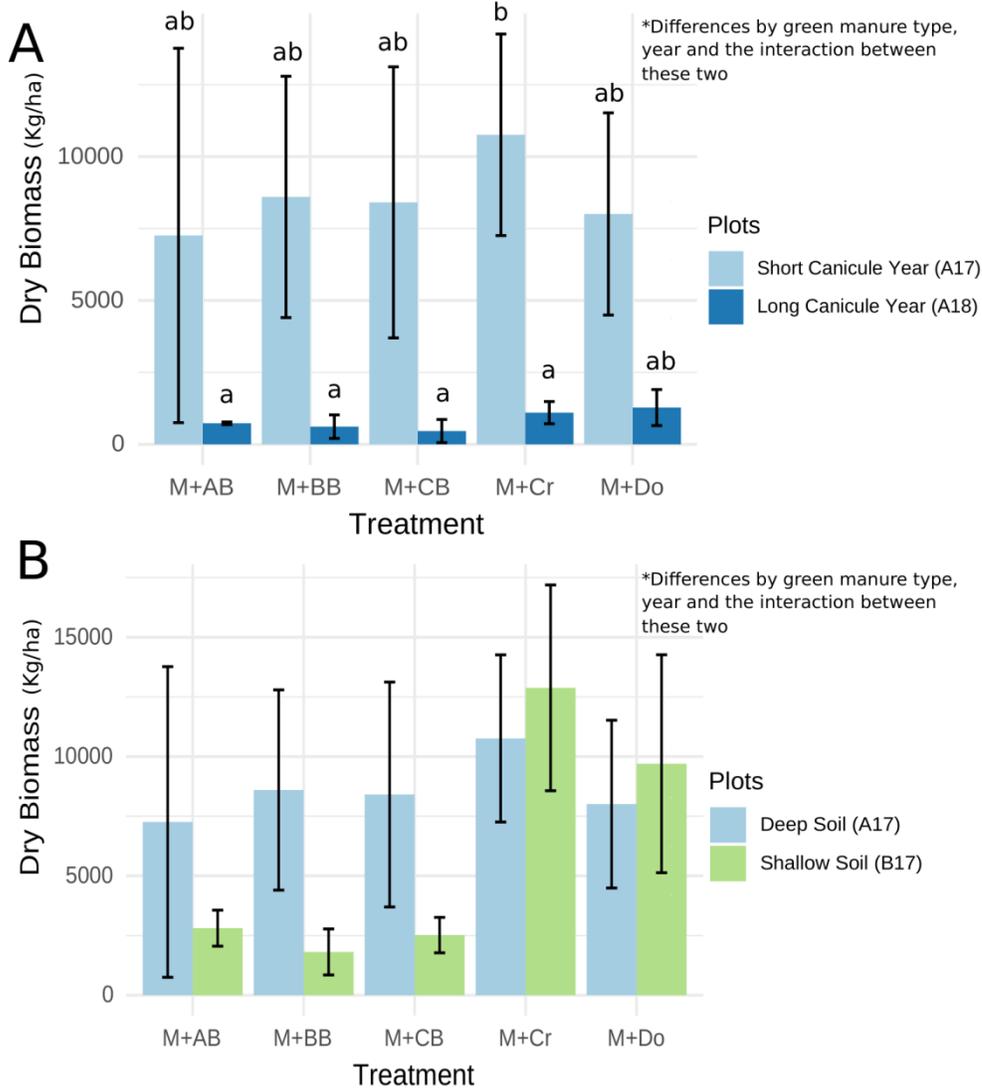
ii) Green manure efficiency indicators

Dry biomass

All values were higher for the short canicule year (2017), and the M+Cr association had the highest mean score among them (10760 kg ha⁻¹). All associations had low mean values in the long canicule year, with M+Do being the highest one (1276 kg ha⁻¹). The two-way ANOVA tests confirmed significant differences between both years, but no differences in response to green manure type or interaction between green manure and year. The M+Cr association showed the highest mean values in both soil types in 2017 (12880 kg ha⁻¹ in shallow soil and 10760 kg ha⁻¹ in deep soil), followed by M+Do in shallow soil (9700 kg ha⁻¹). The ANOVA tests confirmed significant differences among green manure types but found no difference between soils or the interaction of soil and green manure type (Figure 6, Table 3).

Figure 6. Dry green manure biomass for both years (A) and both soil types (B). Bars show the average dry biomass calculated from three repetitions, black lines correspond to standard deviation. In the two-way ANOVA tests, dry biomass in different years (A) showed significant differences in response to year, while dry biomass in different soil types (B) showed differences in response to green manure type (Table 3). Letters above bars represent significantly different groups as obtained from the Tukey post-hoc tests. M, maize; AB, ayocote bean; BB, black

bean; CB, climbing bean; Cr, Crotalaria; Do, Dolicho.

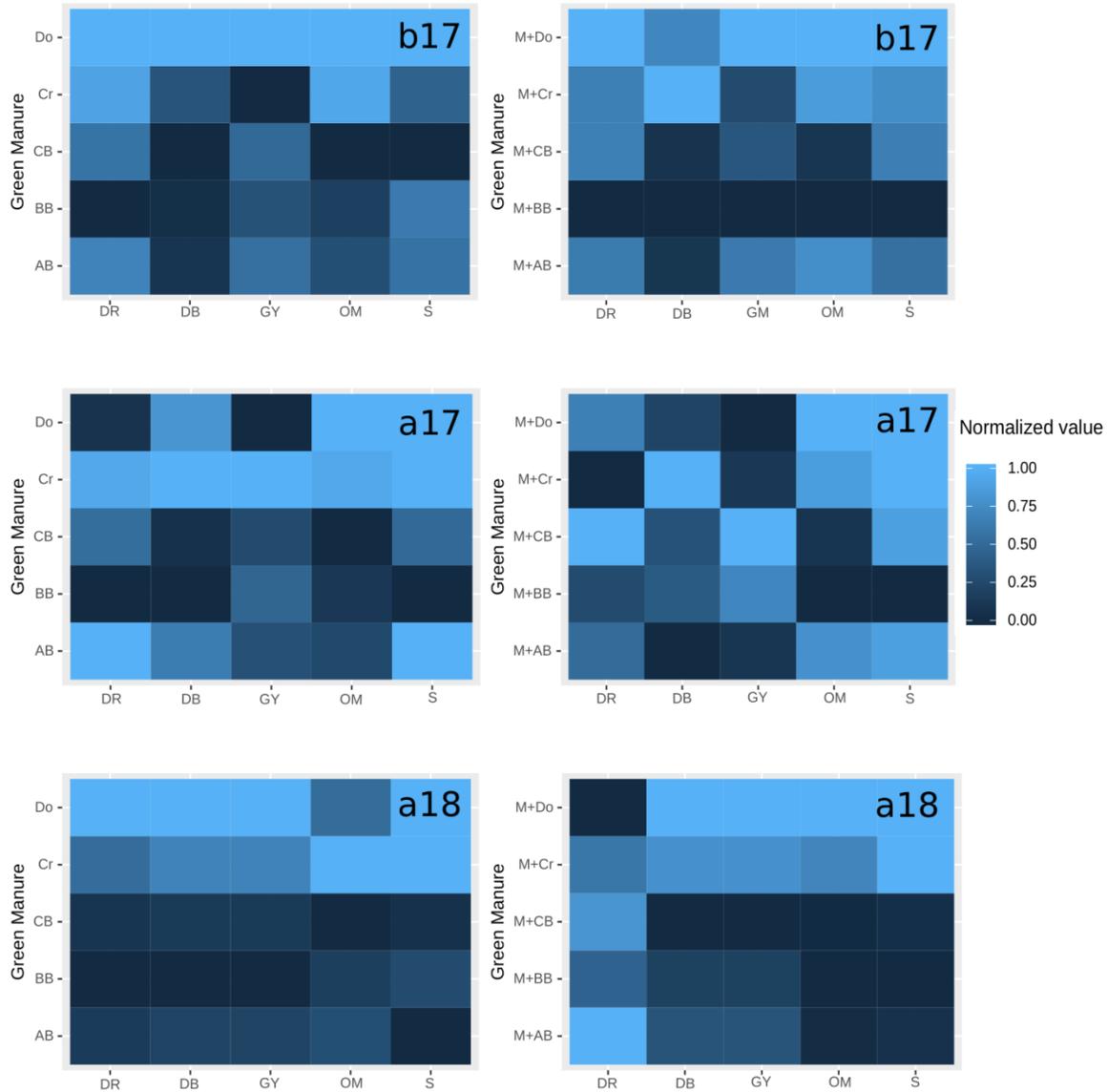


Organic matter content in soil and decomposition rate

Green manure types Dolicho and Crotalaria resulted in the highest organic matter contents, both in monoculture and polyculture schemes, across both years and soil types (Figure 8). For decomposition rate Black Bean had a low decomposition rate in all scenarios, followed by Climbing Bean who only performed well in deep soil,

short canicule and polyculture. Ayocote and Crotalaria showed medium to high values in all scenarios, mainly in the polyculture scheme for the first and monoculture scheme for the second. Finally, Dolicho had the highest values of decomposition rate, except for some particular scenarios (Figure 7).

Figure 7. Heatmap of normalized decomposition rate, dry biomass, yield, organic matter percentage, and survival rate for each type of green manure. The left row corresponds to green manure in monoculture and the right row corresponds to green manure in polyculture with maize. Plot and year is indicated in the upper right corner of each heatmap. In the horizontal axis, DR, decomposition rate; DB, dry biomass; GY, green manure yield; OM, organic matter; and S, survival rate; M, maize; AB, ayocote bean; BB, black bean; CB, climbing bean; Cr, Crotalaria; Do, Dolicho.



iii) Resilience and stability indicators

Green Manure Survival

Overall, the survival rate was higher for exotic than for native types of green manure (Table 4). In order to provide a comparative overview of green manure performance, we synthesized the results for green manure survival, dry biomass production, yield, organic matter contribution and decomposition rate, both in

mono- and polyculture (Figure 7). This comparison reveals that, overall, exotic green manures outperform native ones in terms of these indicators, although important differences are observed between specific types of green manure and between mono- and polyculture conditions.

Table 4. Survival Index for each green manure for all the plots.

Treatment	Initial Density (# plants/75m ²)	Mean Survival	SD Survival
AB	225	57.2	45.2
BB	300	61.6	35.9
CB	225	45.6	40.1
Cr	450	88.3	27.8
Do	187.5	98.9	3.3

Initial density was derived from planting density for the hectare (# plants/75m²).

The survival index was calculated for each plot (#final plants/#initial plants) *100.

Mean and Standard Deviations (SD) are shown.

iv) Indicator of adaptability

Multifunctionality

This indicator aims to assess the potential contribution of green manures to the adaptable response of the rainfed maize agriculture to diverse changes and stressors, be it as contributors to soil recovery or as a source of forage. Exotic pulses exhibited more multifunctionality than local ones (Table 5, Figure 9).

Figure 8. Integrative comparison among local and exotic green manures in polyculture with maize. Scores for the different indicators of sustainability were normalized between 0 and 20 for each indicator. M, maize; AB, ayocote bean; BB, black bean; CB, climbing bean; Cr, Crotalaria; Do, Dolicho.

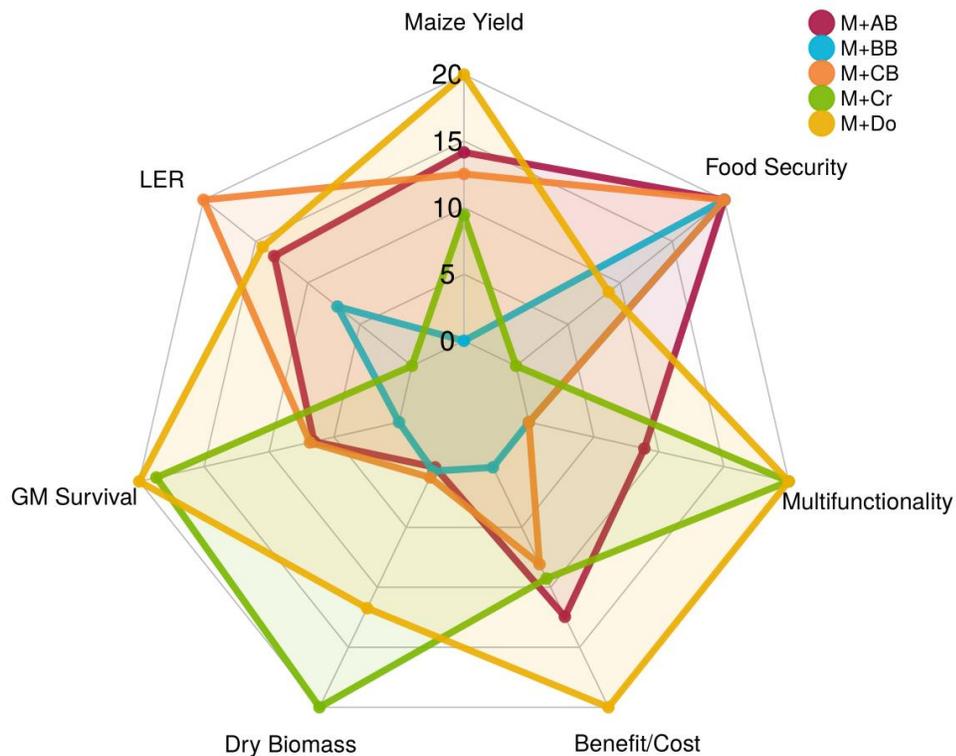


Table 5. Multifunctionality of each green manure.

Green Manure	N fixation	Eatable Seeds	OM reincorporation	Cover Crop	Fodder	Drought Resistance	Multifunctionality
AB	Low	Yes	High	No	No	High	5
BB	Low	Yes	Low	No	No	Low	1
CB	Low	Yes	Low	No	No	Low	1
Cr	High	No	High	No	Yes	High	10
Do	High	Foreign	High	Yes	Yes	High	10

For N fixation, Low stands for less than 60 kg ha⁻¹, and High for more than or equal to 60 kg ha⁻¹. The consumption of grain is categorized as local, foreign or non consumption. For Organic Matter (OM) reincorporation, Low is less than ** and

High is more than or equal to *. Cover Crop and Forage are categorized in Yes or No. Drought Resistance was categorized as Low when Yield significantly decreased with long canicule, and High when it did not (Fig. 8). Multifunctionality value was assigned according to the number of “High”, “Local”, or “Yes” in the 6 categories, for each green manure, 1: less than the three, 5: three, 10: more than three.

v) Indicator for equity

Benefit-Cost ratio

A high benefit-cost ratio is important to access diverse services and it is a driver of successful agroecological transitions. It is important to notice that, since it is directly related to yield and yield was particularly affected by the 2018 canicule and low fertility in plot B, this relation is much higher in plot A in 2017 (Figure 8).

vi) Indicator for autonomy

Food security

Local green manures have a significant contribution to the diet of families in Zaachila (SIAP, 2017; Guzmán-Sebastián et al., 2016). Pulses are a great source of protein (FAO, 2016) and local pulses are a central ingredient in local gastronomy in Zaachila. Currently, exotic green manures do not contribute to the diet of families in Zaachila, but Dolicho is edible and is consumed in other societies. Their use as forage, especially for Crotalaria, could indirectly increase the availability of meat and animal derived products (Figure 8).

Integration of indicators (step 5)

Representative indicators for the different areas in Table 2 were integrated in a joint visualization in Figure 8. This plot allows for a broad comparison among the local and exotic green manures and provides valuable qualitative information to design combined polyculture strategies that enhance sustainability in all its aspects. The proximity of each vertex of the polygons to the external perimeter is related to its performance in each indicator.

3.5 DISCUSIÓN

In this work we aimed to assess the pertinence and contribution to sustainable agriculture of five types of green manure in association with a local maize landrace in Zaachila, Oaxaca, Mexico. Following the MESMIS method, we identified critical points and problems that could be partially addressed with the use of different types of green manure (Figure 2). Due to the pressure on land and food requirements, we were interested in the scenario in which green manures were grown as part of a maize-based polyculture.

Results for green maize yield, manure yield, LER and interspecific competition suggest that maize-green manure association is convenient, and are in good agreement with previous studies (Figures 3-7; Karyoti et al., 2018; Cedric, 2014; Yilmaz et al., 2008; Turgut et al., 2005; Ruíz-Vega et al., 2003). Only climbing bean and black bean exhibited a small degree of interspecific competition in plot A in 2017, but it did not affect maize yield significantly in any of the plots or years. Maize yield is actually not diminished by the association with green manure (Figure 4), but since we studied only two cycles, the reported positive effects of green manure on maize yield were not observed (Massawe et al., 2016; Turgut et al.,

2005). We did not find significant maize yield differences due to soil or canicule, possibly due to the inoculation with azotobacter and mycorrhizae, which could also explain a relatively high maize yield (Ruíz-Vega et al., 2003). Local green manure yields in our experiment agreed with previous reports from other sites and were superior to reports in the region (Faure-Alvarez et al. 2014; Ruíz-Vega et al., 2003). In contrast to maize yield, there was a strong interaction effect between each type of green manure yield and the year, and green manure yield and the soil (Table 3 and Figure 3). Dolicho and Crotalaria were the most resistant to adverse soil or drought conditions.

Some green manures exhibited an important potential for improving soil conditions (Figure 7), in agreement with previous studies (Adebisi et al., 2004; Ruíz-Vega et al., 2003; García-Hernandez et al., 2002; Murphy et al., 1999). Dolicho and Crotalaria had generally high dry biomass production and their incorporation to the soil could significantly increase the amount of SOM after a few years. Dolicho and Crotalaria presented the highest SOM reincorporation values between the different green manures, even higher than in previous studies (Ruiz Espinoza et al., 2007; Muruoka et al., 2001). Regarding decomposition rate, exotic pulses also performed better in relation to native pulses except for Ayocote bean, which presented high values for some scenarios, in agreement with earlier studies (Ruíz-Vega et al., 2010). Overall, exotic pulses, and especially Dolicho bean, have important potential to restore and protect the soil and could be used both as cover crops and green manure. Future studies should measure decomposition rate as cover crop and effects for subsequent planting seasons. Ayocote bean is an important

candidate too due to its resistance to drought and shallow soil, but it may require management modifications.

The management of every maize-green manure combination was identical to the rest, so that the data were comparable. However, such homogenization may under- or over-estimate the performance of some combinations. For example, black beans are traditionally grown in Zaachila after the canicule has passed, guaranteeing a larger survival rate. In turn, Dolicho may require pruning to prevent it from climbing on the maize plants and therefore makes the process more labor-consuming. The phenology of each type of green manure is different and it would be convenient to program its planting accordingly. Our results provide a valuable basis to further design and program specific maize-green manure associations.

The local species of green manure significantly contribute to the families' food security at Villa de Zaachila. Indeed, 15% of the local production that is sold at the weekly local market is represented by beans like Black Bean, Climbing Bean and Ayocote Bean (Guzmán-Sebastián et al., 2016) and 135 ha are yearly dedicated to growing beans in this site (SIAP, 2017). Being a great source of proteins (FAO, 2016), local beans are an important part of Zaachila's gastronomy. Even though none of the native beans presented high multifunctionality values (except for Ayocote bean), their role in local food security and in maintaining biocultural diversity is an important argument to pursue studies with these legumes as green manures. Since traditional management involves the removal of most parts of the plant at harvesting, adapted managements that work both for providing food and improving the soil are to be explored. On the other hand, exotic green manures

had high biomass production and survival rates, even in drought conditions, and are not used as a food source in the locality. So they can be managed best as green manures and forage, and not as crops in themselves. It is important to note that the benefit-to-cost relation of the green manures and maize grains is variable throughout the year and the season, since their value changes with their availability in the local market (Mora Van Cauwelaert, 2017).

3.6 CONCLUSIÓN

Green manures are shown to contribute in different degrees to the incorporation of SOM to the soil and may also contribute to water retention and N fixation. Moreover, green manures showed potential to contribute to the development or maintenance of multifunctional strategies that increase local resilience and adaptability. Then, maize-green manure associations tested here certainly increase the sustainability of maize rainfed agriculture in our study site. Local green manures (*P. vulgaris* and *P. coccineus*) are particularly important in terms of food security and the reproduction of biocultural diversity in Zaachila, but ayocote bean showed to be also promising as green manure. Exotic green manures (*L. purpureus* and *C. junscens*) exhibited a great potential to resist drought and provide large amounts of dry biomass. In particular, Dolicho (*Lablab purpureus*) could help establish a soil cover throughout the whole year due to its semi-perennial or perennial nature and to the continuous deposition of dry leaves. Dolicho and crotalaria are also highly multifunctional due to its potential use as an abundant forage for equines and bovines, although their potential use as forage for small, local domestic species remains to be explored. It is worth mentioning that crotalaria was observed to be highly palatable to local ants and grasshoppers, and

that both Dolicho and crotalaria may require pruning or other management practices not to interfere with maize.

While this study shows that the use of green manures increases the sustainability of rainfed agriculture and overall is convenient for small farmers in Zaachila, and possibly in many similar sites, it cannot conclude with the recommendation of a specific type of association. Instead, we provide detailed information regarding the advantages and performance of different types of green manure with respect to different indicators, so that local producers, technicians and organizations can design strategies that select or combine the use of diverse green manures according to the edaphic, climatic, economic and sociocultural conditions and requirements. We foresee a complementary management in which local and exotic green manures can be used primarily as food crops in polyculture and mainly as green manures. This would maximize the system's multifunctionality as it would take care of both food security and soil fertility concerns.

3.7 REFERENCES

- Adebisi, A.A.; Bosch, C.H. (2004). Lablab purpureus (L.) sweet. En Grubben GJH and Denton OA (eds), *Plant Resources of Tropical Africa (PROTA), no. 2, Vegetables*. Wageningen, The Netherlands/Backhuys, Leiden, The Netherlands/CTA, Wageningen, The Netherlands: PROTA Foundation: 343–348.
- Altieri, M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74:19–31.

Altieri, M.A. (2002). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. In Sarandón SJ (ed.), *Agroecología: el camino hacia la agricultura sustentable*. Ediciones Científicas Americanas, pp. 27–34.

Altieri, M.A.; Nicholls, C.I.; Montalba, R. (2017). Technological approaches to sustainable agriculture at a crossroads: an agroecological perspective. *Sustainability* 9.

Anna John, S.; Mini, C. (2005). Biological efficiency of intercropping in okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *Journal of Tropical Agriculture* 43: 33–36.

Astier, M.; Maass, J.M.; Etchevers-Barra, J.D. Pena, J.J.; Leon Gonzalez, F. (2006). Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil and Tillage Research* 88, 153–159.

Astier, M.; Masera, O.; Galván-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. Spain: SEAE/CIGA/ECOSUR/CIEco/UNAM/GIRA/ Mundiprensa/Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable.

Astier, M.; García-Barrios, L.; Galván-Miyoshi, Y; González-Esquivel, C.; Masera, O.; (2012). Assessing the sustainability of small farmer natural resource management systems. A critical analysis of the MESMIS program (1995–2010). *Ecology and Society* 17.

Bautista-Martínez, E. (1998). El maíz en Oaxaca: las cosechas de las contradicciones used by the Mexican Government.

Blanckaert, I.; Vancraeynest, K. Swennen, R.L.; Espinosa-García, F.; Piñero-Dalmau, D.; Lira-Saade, R.; (2007). Non-crop resources and the role of indigenous

knowledge in their management in semi–arid crop production systems in Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 39–48.

Bunch, R. (2012). *Restoring the Soil. A Guide for Using Green Manure Cover Crops to Improve the Food Security of Smallholder Farmers*. Canada: Canadian Foodgrains Bank.

Ceccon, E. (2008). La revolución verde: tragedia en dos actos. *Ciencias* 91, 20–29.

Cedric, K. (2014). Use of green manure legume cover crops in smallholder maize production systems in Limpopo province, South Africa. *African Journal of Soil Science. International Scholars Journals* 2: 63–67.

CEMDA (2016). Informe sobre la pertinencia biocultural de la legislación mexicana y su política pública para el campo. El caso del programa de “Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional” (MasAgro). Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. México.

CIAT (2006). *Lablab purpureus. Una leguminosa multipropósito*. México: CIAT.

Cruz-Ruiz, M.A. (2009). Eficiencia relativa de la tierra y perspectivas de dos policultivos de temporal en Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca (Doctoral dissertation). IPN. CIIDIR.

Ebel, R; Pozas-Cárdenas, J.G.; Soria-Miranda, F.; Cruz González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimientos de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana* 35: 149–160.

FAO (2016). México y la FAO. Contribuyendo a la seguridad alimentaria a través del fortalecimiento de políticas públicas.

Faure-Alvarez, B.; Benítez-Gonzalez, R.; Rodríguez-Acosta, E.; Grande-Morales, O.; Torres-Martínez M and Pérez-Rodríguez P (2014) Guía técnica para la producción de frijol común y maíz. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical 22. La Habana, Cuba.

Fuentes-Aguilar, L.; López Huebe, R. (1979). Tipología agrícola del valle central de Oaxaca. *Investigaciones geográficas* 9: 209–253.

García-Barrios, L.; Galván-Miyoshi, Y.; Valdivieso-Pérez, I.A.; Maser, O.; Bocco, J.; Vandermeer, J. (2009). Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: the Mexican experience. *BioScience* 59: 863–887.

García-Hernández, J.L.; Murillo- Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Fortis-Hernández, M.; Márquez- Hernández, C.; Castellanos-Pérez, E.; García, M.; Álvarez, M.; Treto, E. (2002). Estudio comparativo de diferentes especies de abonos verdes y su influencia en el cultivo del maíz. *Cultivos Tropicales* 23: 19–30.

García-Hernández J,L.; Murillo-Amador. B.; Nieto-Garibay, A.; Fortis-Hernández, M.; Márquez-Hernández. C.; Castellanos-Pérez, E; Quiñones- Vera, J.J.; Avila-Serrano, N.Y. (2010). Avances en investigación y perspectivas del aprovechamiento de los abonos verdes en la agricultura. *Terra Latinoamericana* 28: 391–399.

Gonzalez-Gonzalez, C.; García, T.L.; Jardón-Barbolla. L.O.; Benítez, M. (2020). Linking coleopteran diversity with agricultural management of maize agroecosystems in Oaxaca, Mexico. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.01.07.897744>.

Gonzalez, C.G. (2004). Trade Liberalization, Food Security and the Environment: The Neoliberal Threat to Sustainable Rural Development. Seattle. USA.

Guzmán-Sebastián, K.C.; Velasco-Velasco, V.A.; Ruíz-Luna, J.; Campos-Ángeles, G.V.; Rodríguez-Ortiz, G.; Enríquez del Valle, J.R. (2016). Productos agroalimentarios comercializados en la “Plaza” de la Villa de Zaachila, Oaxaca. *México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 871–883.

INEGI (2007). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Villa de Zaachila, Oaxaca Clave geoestadística 20565..

INIFAP (2015a). Agenda Técnica Agrícola de Oaxaca. Maíz- Valles Centrales.: 117–124.

INIFAP (2015b). Agenda Técnica Agrícola de Oaxaca. Frijol de temporal- Valles Centrales: 39–46.

Karyoti, A.; Bartzialis, D.; Sakellariou-Makrantonaki, M.; Danalatos, N. (2018). Effects of irrigation and green manure on corn (*Zea mays* L.) biomass and grain yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18.

Li, Y. (2012). *Crotalaria Juncea*. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. USA.

Massawe, P.I.; Mtei, K.M.; Munishi, L.K.; Ndakidemi, P.A. (2016). Improving soil fertility and crops yield through maize-legumes (common bean and *Dolichos lablab*) intercropping systems. *Journal of Agricultural Science* 8.

Mora Van Cauwelaert, E. (2017). Diagnóstico del movimiento comercial del maíz y de las razones económicas y culturales-simbólicas para la siembra del maíz criollo

en la Villa de Zaachila, Oaxaca: un enfoque desde las familias campesinas (Master Dissertation). Universidad Internacional de Andalucía.

Murphy, A.M.; Colucci, P.E. (1999). A tropical forage solution to poor quality ruminant diets: a review of *Lablab purpureus*. *Livestock Research for Rural Development* 11..

Murray-Tortarolo, G.; Jaramillo, V.J. Larsen, J. (2018). Food security and climate change food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 253–254: 124–131.

Muruoka T., Ambrosano, E.J.; Zapata, F.; Bortoletto. N.; Martins A.L.M.; Trivelin, P.C.O.; Boaretto, A.E.; Scivittaro, W.B. (2001). Eficiencia de abonos verdes (crotalaria y mucuna) y urea, aplicados solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz. *Terra* 20: 17–23.

Nabel, M.; Schrey, S.D.; Temperton, V.M.; Harrison, L.; Jablonowski, N.D.; (2018). Legume intercropping with the bioenergy crop *Sida hermaphrodita* on marginal soil. *Frontiers in plant science* 9: 905.

Nicholls-Estrada, C.I.; Ríos Osorio, L.A.; Altieri, M.A. (2013). Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptándose al cambio climático. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Madrid (España) Red Iberoamericana de Agroecología para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático (REDAGRES) 9.

Ortiz, J.C.; Sánchez de Prager, M. (2016). Dinámica de la materia orgánica en el suelo propiciada por los campesinos mediante prácticas agroecológicas. *Leisa, Revista de Agroecología* 32.

Ramirez Cordova, A.L.; Espinosa Paz, N.; Espinosa Paz, H.; Ariza Flores, R.; Martinez Sanchez, J.; Maldonado María, H. (2017). Vigor de semillas de variedades criollas de maíz de los Valles Centrales de Oaxaca, bajo déficit hídrico. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. *Acta Fitogenética* 4, 17.

R Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available at <http://www.R-project.org/>.

Robinson, W. (1927). The determination of organic matter in soils by means of hydrogen peroxide. *Journal of Agricultural Research* 34: 339–356.

Ruiz-Vega, J. (1998). Agroecological zoning of rainfed maize in the Central Valleys of Oaxaca. I. Yield potential determination. *Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México* 16: 269–275.

Ruiz-Vega, J.; Loeza, G. (2003). Evaluación de abonos verdes en asociación con maíz de temporal en los Valles de Oaxaca, México. *Terra latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo* 21: 409–415.

Ruiz-Vega, J.; Silva Rivera, M.E. (1999). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca II. Determinación de las prácticas de producción adecuadas. *Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México* 17.

Ruiz-Vega, J.; Nuñez-Barrios, A.; Ruiz, M.A. (2010). Decomposition rates of green manure crops in Oaxaca, México. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences* 25(S-3): 212–216.

Ruiz Espinoza, F.H.; Marrero Labrador, P.; Cruz La Paz, O.; Beltrán Morales, A.; Díaz Viruliche. L; (2007). Métodos de labranza e incorporación de frijol dolidos

(*Lablab Purpureus*, Sweet.) como abono verde en la producción de semillas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en un Yermosol Háplico. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16: 90–94.

SAGARPA (2016). Frijol mexicano. Planeación Agrícola Nacional 2017–2030. Sain G and Buckles D (1998) *An Economic Analysis of the Abonera Maize Production System in the Atlantic Coast of Honduras*. Mexico: Economics, CIMMYT.

Sakala, W.D. (2012). The potential of green manures to increase soil fertility and maize yields in Malawi. *Biological Agricultural & Horticulture. An International Journal for Sustainable Production Systems* 21: 121–130.

Sarandón, S.J.; Flores, C.C. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología* 4: 19–28.

SEMARNAT (2008). Soil degradation in Mexico. Available at https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008_ing/03_suelos/cap3_2.html.

SIAP (2016). <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.

Sircely, J.; Naeem, S. (2012). Biodiversity and ecosystem multifunctionality: observed relationships in smallholder fellows in Western Kenya. *PLoS One* 7.

Turgut, I.; Bilgili, U.; Duman, A.; Acikgoz, E. (2005). Effect of green manuring on the yield of sweet corn. *Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA* 25, 433–438.

Urrutia, A.L.; Gonzalez-Gonzalez, C.; Van Cauwelaert, E.M.; Rosell, J.A.; Barrios, L.G.; Keinrad, M.B. (2020) Landscape heterogeneity of peasant-managed

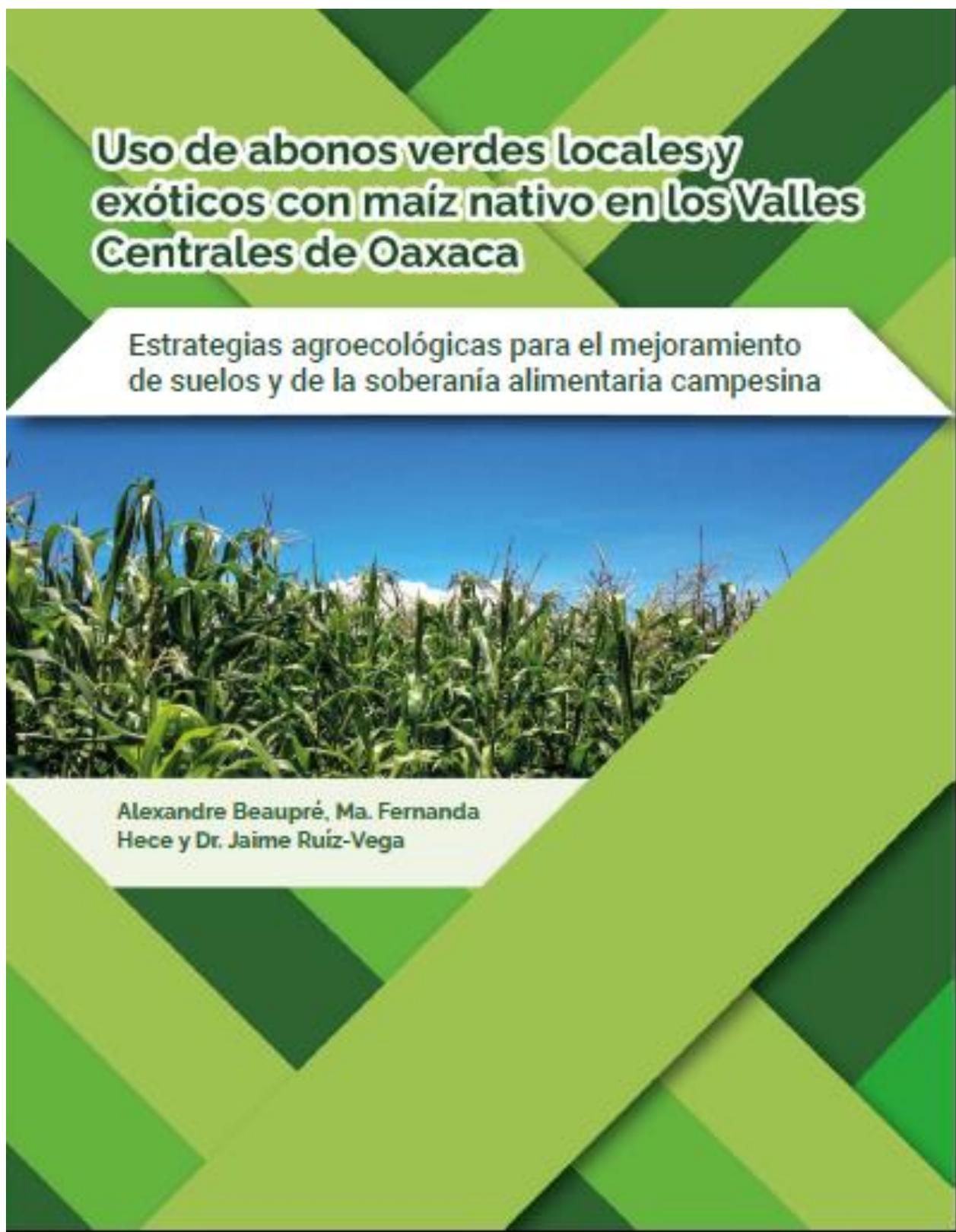
agricultural matrices. Cold Spring Harbor Laboratory. *Ecosystems & Environment*: 292.

Val, V.; Rosset, P.; Lomel, C,Z.; Giraldo, O.F.; Rocheleau, D. (2019). Agroecology and La Via Campesina I. The symbolic and material construction of agroecology through the dispositive of “peasant-to-peasant” processes. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43: 872–894.

Vargas-Vásquez P, Muruaga- Martínez JS, Martínez-Villareal SE, Ruiz Salazar R, Hernandez- Delgado, S.; Mayek- Pérez, N. (2011). Diversidad morfológica del frijol ayocote del Carso Huasteco de México. *Taxonomía y sistemática. Revista Mexicana de Biodiversidad*: 82.

Vásquez, V.; Nuño Romero, R. (1995). Evaluación del temporal en los Valles Centrales de Oaxaca (Master Dissertation). Universidad Autónoma de Chapingo.

Yilmaz, S.; Atak, M.; Erayman, M. (2008). Identification of advantages of maize legume intercropping over solitary cropping through competition indices in the East Mediterranean Region. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 32: 111–119.



La milpa y el maíz nativo en los valles de Oaxaca

La milpa en los Valles Centrales de Oaxaca se siembra año con año durante el periodo de lluvias en los ejidos, tierras comunales y pequeñas propiedades por los campesinos. El sistema milpa generalmente está asociado a una agricultura de subsistencia en la que se siembra maíz nativo, a veces en asociación con otras plantas, frecuentemente con algunos tipos de frijol.

Este tipo de agricultura trae muchos beneficios a los campesinos. Por un lado, los cultivos nativos están adaptados a las condiciones locales, por lo que son muy tolerantes al estrés y a las perturbaciones. Por otro lado, es una agricultura que necesita relativamente pocos insumos y produce bastante, por lo que hace un uso eficiente de los recursos. Además, muchos de estos insumos se producen localmente, muchas veces dentro de la familia campesina. También, la diversidad de cultivos provee de distintas fuentes de alimento a las familias campesinas, fundamentales para brindar seguridad alimentaria y para mantener la gastronomía local.

Sin embargo, la milpa está en riesgo. Está amenazada por la siembra de maíz en monocultivo, que ha ocasionado una degradación continua del suelo que se puede ver reflejado en la pérdida de suelo y en un bajo porcentaje de materia orgánica. Otros problemas que se han identificado en la práctica actual de la milpa de los Valles Centrales de Oaxaca son la variabilidad climática que se



Imagen 1. Milpa campesina en Zaachila, Oaxaca



Imagen 2. Diversidad de maíces nativos

manifiesta en canículas secas cada vez más largas, la baja productividad (aproximadamente 800 kg de maíz por hectárea) que eleva los costos de producción y obliga a los campesinos a adoptar paquetes tecnológicos.

Los costos ambientales de la producción en monocultivo se ven reflejados en grandes problemas en la salud humana y en los ecosistemas. Esto ha empujado a los productores, instituciones agropecuarias y otros actores a buscar nuevos caminos hacia una producción más sustentable que incluya los maíces nativos,

los conocimientos tradicionales y los nuevos aportes de la agroecología. La agricultura sustentable y agroecológica busca aumentar los rendimientos del maíz, mejorar el suelo en el largo plazo, conservar la agrobiodiversidad y generar resiliencia ante la sequía, al tiempo que contribuye a la seguridad alimentaria. El uso de abonos verdes puede ser una opción accesible y sencilla que ayude a reforzar las prácticas campesinas, al mismo tiempo que ayuda a caminar hacia una agricultura más sustentable.

La milpa campesina en los Valles Centrales de Oaxaca

Beneficios	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> ● Utiliza cultivos nativos muy tolerantes al estrés y a las perturbaciones. ● Requiere de pocos insumos. ● Usa los recursos eficientemente. ● Los insumos se producen localmente. ● Brinda seguridad alimentaria. ● Mantiene la gastronomía local. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Transformación en monocultivo. ● Degradación continua del suelo. ● Erosión o pérdida de suelo. ● Bajo porcentaje de materia orgánica. ● Canículas cada vez más largas. ● Baja productividad. ● Variabilidad climática. ● Costos de producción relativamente elevados.

La milpa y el maíz nativo e

La milpa en los Valles Centrales de Oaxaca se siembra año con año durante el periodo de lluvias en los ejidos, tierras comunales y pequeñas propiedades por los campesinos. El sistema milpa generalmente está asociado a una agricultura de subsistencia en la que se siembra maíz nativo, a veces en asociación con otras plantas, frecuentemente con algunos tipos de frijol.

Este tipo de agricultura trae muchos beneficios a los campesinos. Por un lado, los cultivos nativos están adaptados a las condiciones locales, por lo que son muy tolerantes al estrés y a las perturbaciones. Por otro lado, es una agricultura que necesita relativamente pocos insumos y produce bastante, por lo que hace un uso eficiente de los recursos. Además, muchos de estos insumos se producen localmente, muchas veces dentro de la familia campesina. También, la diversidad de cultivos provee de distintas fuentes de alimento a las familias campesinas, fundamentales para brindar seguridad alimentaria y para mantener la gastronomía local.

Sin embargo, la milpa está en riesgo. Está amenazada por la siembra de maíz en monocultivo, que ha ocasionado una degradación continua del suelo que se puede ver reflejado en la pérdida de suelo y en un bajo porcentaje de materia orgánica. Otros problemas que se han identificado en la práctica actual de la milpa de los Valles Centrales de Oaxaca son la variabilidad climática que se



Imagen 1. Milpa campesina en Zaachila, Oaxaca



Imagen 2. Diversidad de maíces nativos

En los valles de Oaxaca

manifiesta en canículas secas cada vez más largas, la baja productividad (aproximadamente 800 kg de maíz por hectárea) que eleva los costos de producción y obliga a los campesinos a adoptar paquetes tecnológicos.

Los costos ambientales de la producción en monocultivo se ven reflejados en grandes problemas en la salud humana y en los ecosistemas. Esto ha empujado a los productores, instituciones agropecuarias y otros actores a buscar nuevos caminos hacia una producción más sustentable que incluya los maíces nativos,

los conocimientos tradicionales y los nuevos aportes de la agroecología. La agricultura sustentable y agroecológica busca aumentar los rendimientos del maíz, mejorar el suelo en el largo plazo, conservar la agrobiodiversidad y generar resiliencia ante la sequía, al tiempo que contribuye a la seguridad alimentaria. El uso de abonos verdes puede ser una opción accesible y sencilla que ayude a reforzar las prácticas campesinas, al mismo tiempo que ayuda a caminar hacia una agricultura más sustentable.

La milpa campesina en los Valles Centrales de Oaxaca

Beneficios	Amenazas
<ul style="list-style-type: none">● Utiliza cultivos nativos muy tolerantes al estrés y a las perturbaciones.● Requiere de pocos insumos.● Usa los recursos eficientemente.● Los insumos se producen localmente.● Brinda seguridad alimentaria.● Mantiene la gastronomía local.	<ul style="list-style-type: none">● Transformación en monocultivo.● Degradación continua del suelo.● Erosión o pérdida de suelo.● Bajo porcentaje de materia orgánica.● Canículas cada vez más largas.● Baja productividad.● Variabilidad climática.● Costos de producción relativamente elevados.

¿Qué son los abonos verdes?

Los abonos verdes son plantas que se siembran con el propósito principal de reincorporarse al suelo, de forma que se vaya aumentando el porcentaje de materia orgánica y se mejore la fertilidad. Algunos abonos verdes también funcionan como cultivos de cobertura porque, como crecen de forma rastrera, ayudan a mantener la humedad del suelo y a evitar la erosión, especialmente en los meses en los que no se siembra ningún otro cultivo en la parcela.

Muchas de las plantas que se usan como abonos verdes son de la familia de las leguminosas. Esta familia incluye plantas de uso común como los frijoles, el cacahuete, la alfalfa, el guaje, el garbanzo, el chícharo y la soya. Algo muy especial de las leguminosas es que en sus raíces vive asociada una bacteria del género *Rizobium*, que se aloja en unas estructuras llamadas nódulos. Esta bacteria toma el nitrógeno de la atmósfera y lo fija en el suelo, de forma que queda disponible para que la misma planta lo use para crecer. De esta manera, las leguminosas producen materia orgánica rica en nitrógeno (N).



Imagen 3. Parcela de maíz nativo con un abono verde



Imagen 4. Nódulos de *Rizobium* asociados a la raíz de *Crotalaria*, un abono verde exótico

¿Cuál es el papel de la materia orgánica en el suelo?

La materia orgánica en el suelo tiene un rol fundamental pues mejora las propiedades físicas como la textura, la estructura y la porosidad. Estas propiedades permiten una mayor retención de agua en el suelo y un mejor desarrollo de las raíces de las plantas.

También mejora las propiedades químicas del suelo al llevar el pH a valores entre 6.5 y 7, lo que mejora la capacidad de intercambio catiónico. Esto permite que los nutrientes estén más accesibles alrededor de las raíces de las plantas para que éstas puedan tomarlos más fácilmente.

El papel de la materia orgánica en la actividad biológica del suelo es esencial, dado que es el alimento de diferentes hongos, bacterias, insectos y lombrices que la van transformando en nutrientes para las plantas.

Los abonos verdes también brindan beneficios que responden a otras preocupaciones de los campesinos, como son su propia alimentación y la de sus animales. Algunos abonos verdes producen granos que ya están incorporados a y son parte fundamental de la dieta regional, como el frijol negro y el frijol trepador. Estos son una fuente accesible de proteínas que contribuye a la seguridad alimentaria de las familias campesinas y del pueblo mexicano en general. Además, cuando se siembran en asociación con el maíz nativo aumenta la agrobiodiversidad y la interacción entre las diferentes plantas evita que los nutrientes del suelo se agoten puesto que cada una los utiliza de distinta manera.

Por otro lado, la conservación de las semillas de abonos verdes, junto con la conservación de los maíces nativos, permite que los campesinos recuperen sus semillas en cada ciclo de siembra sin depender de comprar semillas híbridas ni agroquímicos, lo que fortalece aún más la agricultura campesina.



Imagen 6. Un abono verde exótico, *Crotalaria juncea*

Aspectos generales del uso y manejo de los abonos verdes

Hay distintas formas de manejar los abonos verdes. El que se elija una u otra variedad depende del tipo de suelo y de las características de la parcela, de si se siembra en asociación con maíz o no, además de las necesidades del campesino. Aquí sólo se mencionan cuestiones generales del manejo que reflejan la experiencia de algunos campesinos en la Villa de Zaachila, Oaxaca. En caso de que decidan usar los abonos verdes, el manejo deberá de adecuarse a las características locales de las parcelas y al conocimiento local que haya sobre los cultivos, pero esperamos que este manual sirva como guía para empezar a experimentar.

Las pruebas con los abonos verdes en la Villa de Zaachila han demostrado que se pueden sembrar intercalados o en rotación con el maíz de lluvias. Si se intercalan, los abonos verdes se pueden sembrar al mismo tiempo que el maíz o en el momento del deshierbe. Cuando se siembran al mismo tiempo que el maíz, algunos abonos verdes necesitan al menos una poda para que no crezcan por encima del maíz y compitan con él.



Imagen 7. Siembra de abonos verdes junto con maíz Bolita en la Villa de Zaachila, Oaxaca

El principal objetivo de los abonos verdes es ser reincorporados al suelo para aumentar el porcentaje de materia orgánica. Para lograr esto, después de cortar el abono verde, éste se entierra a unos 15 cm de profundidad o puede ararse para mezclarlo con el suelo. El mejor momento para cortar y reincorporarlos es durante su floración, cuando las plantas tienen el máximo de nutrientes dentro de ellas. Sin embargo, si no es posible mantener las plantas hasta el momento de la floración, la reincorporación puede hacerse prácticamente en cualquier momento, lo que ayudará a que poco a poco se vaya acumulando materia orgánica en el suelo.

Si el abono verde se sembró intercalado con el maíz, se debe de coordinar el tiempo de la floración del abono verde para que suceda después de la cosecha del maíz o del cultivo principal. También, como con los frijoles locales, la biomasa seca se puede regresar al suelo después de que son cosechados.



Imagen 8. Labiáb en parcelas 10 meses después de su siembra

Por otro lado, para usarse como cultivo de cobertura, el abono verde se puede dejar hasta el siguiente ciclo de cultivo. En este caso, entonces, los abonos verdes deben de reincorporarse antes de la siembra del maíz de lluvias. En experimentos realizados en parcelas experimentales en la Villa de Zaachila se observó que un abono verde exótico, el *Lablab*, todavía estaba en floración en mayo, después de un ciclo de 10 meses. Esto demuestra que este abono verde puede resistir los periodos secos y evita que el suelo quede desnudo y expuesto.

Los abonos verdes también sirven como *mulch* o cobertura vegetal. Para lograr esto, las plantas se cortan y se dejan en la superficie del suelo para formar una capa de materia seca. Esta capa beneficia al cultivo principal porque mantiene la humedad, lo que, a su vez, favorece la actividad microbiana y la participación de insectos descomponedores en la superficie del suelo. El proceso va liberando poco a poco los nutrientes

de la materia seca, abonando el suelo y aumentando su fertilidad.

Algunos campesinos en la Villa de Zaachila han probado los abonos verdes con cultivos perennes, como árboles de aguacate que asociaron con *Lablab*, del cual se hablará más adelante. En estos casos, la capa de biomasa que se va formando mantiene la humedad, lo cual reduce drásticamente la necesidad de riego.

Para obtener semillas para el siguiente ciclo de siembra, basta con reservar una fracción de la parcela cultivada con abonos verdes. El tamaño de esta fracción dependerá de la cantidad de semilla que se quiera obtener. En este pedazo de la parcela se puede reincorporar la biomasa seca después de la cosecha de los granos.

Abonos verdes en los Valles Centrales de Oaxaca

En los Valles Centrales de Oaxaca hay leguminosas nativas que, por su naturaleza, pueden ser usadas como abonos verdes. Tal es el caso del frijol negro, el frijol trepador y el frijol ayocote. También hay especies exóticas que se han empezado a incorporar a la agricultura sustentable de los Valles Centrales como el *Lablab purpureus* y *Crotalaria juncea*.

Con el objetivo de evaluar cómo se desarrolló cada uno de estos abonos verdes en asociación con una variedad de maíz nativo, se realizaron experimentos en la Villa de Zaachila en las temporadas de siembra de lluvias de 2017 y 2018. Estos experimentos se llevaron a cabo en dos zonas: en parcelas que estaban en planicies con suelos profundos y en parcelas en lomeríos con suelos erosionados. La variedad de maíz nativo que se sembró fue Bolita pues es la más usada en la zona. Se evaluó el desempeño del maíz en asociación con cada tipo de abono verde, así como la contribución que cada uno tenía al mejoramiento del suelo y a la alimentación de las familias campesinas.

Es importante aclarar que ninguno de los experimentos arrojó evidencia de que los

abonos verdes compitieron con el maíz o le afectaron negativamente. De hecho, en todos los casos, se encontró que los desempeños del maíz y el abono verde son mejores cuando se siembran en asociación que cuando se siembra cada uno por su parte. Esto fue confirmado al calcular el índice de Eficiencia Relativa de la Tierra (LER, por sus siglas en inglés).

Además, fue posible llevar a cabo un experimento "natural", ya que la canícula de la temporada de siembra del 2018 fue excepcionalmente larga, de forma que los resultados de los experimentos permiten comparar la eficiencia y los beneficios de los distintos abonos verdes en condiciones de sequía y plantear estrategias ante este tipo de situaciones que son cada vez más comunes.

A continuación, se presentan los resultados del estudio realizado en la Villa de Zaachila, Oaxaca para cada una de las cinco leguminosas con potencial de manejarse como abono verde. Se muestran los principales atributos productivos, así como su aportación a la vida campesina en aspectos como la economía y las alimentaciones humana y animal. También se incluye una valoración del potencial de cada leguminosa como abono verde y recomendaciones para su manejo.

Frijol Negro

El frijol negro delgado (*Phaseolus vulgaris*) es la leguminosa más sembrada en la Villa de Zaachila. Este frijol tiene un alto valor económico, pues es fundamental en la gastronomía local tradicional. Se siembra en dos temporadas: en febrero y en agosto.

El frijol negro se desempeña bien en parcelas de planicie con suelos profundos. En asociación con maíz nativo y bajo condiciones benignas, esta leguminosa puede producir, en promedio, 4.6 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos profundos y 1.8 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos poco profundas. Junto con el frijol trepador, esta leguminosa tuvo la mejor producción de grano (1.18 ton/ha) en el año de canícula corta.

Este frijol presenta algunas desventajas respecto a otros posibles abonos verdes, como una baja capacidad de fijación de nitrógeno, alta susceptibilidad al estrés hídrico y una alta incidencia de plagas y enfermedades. Además, fue el abono verde que tuvo la menor descomposición en el suelo tras dos meses de haberlo reincorporado, por lo que su efecto en la fertilidad del suelo puede ser relativamente bajo y lento.

Por estas razones, a pesar de no ser ideal como abono verde o como cultivo de cobertura, su siembra asegura la producción de un grano central en la alimentación básica y la economía de las familias campesinas.



Imagen 9. Maíz Bolita en asociación con frijol negro

Manejo del frijol negro *Phaseolus vulgaris*

Densidad de siembra

- Se recomienda sembrar a una densidad de 100,000 plantas por hectárea con 20,000 plantas de maíz por hectárea.

Tiempo de floración

- Alrededor de 2 meses.

Uso sugerido

- Reincorporar la biomasa seca al suelo después de la cosecha del grano.

Frijol trepador

El frijol trepador o frijol de guía (*Phaseolus vulgaris*) se siembra tradicionalmente en asociación con el maíz de lluvias para obtener el grano o los ejotes verdes. Este frijol es parte muy importante de la gastronomía local tradicional.

El frijol trepador se desempeña bien en parcelas de planicie con suelos profundos. En asociación con maíz nativo y bajo condiciones benignas, puede producir, en promedio, 5.1 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos profundos y 2.5 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos poco profundos. Fue el abono verde con mejor desempeño en el año de canícula corta (1.46 ton/ha de grano).

En las parcelas de los lomeríos, este frijol mostró ser susceptible al estrés hídrico y a las plagas. Además, tuvo valores bajos para la tasa de descomposición en el suelo tras dos meses de haberlo reincorporado.

Al igual que el frijol negro, su utilización como abono verde o como cultivo de cobertura no es idónea, pero su siembra asegura la producción de un grano central en la alimentación básica y la economía de las familias campesinas.



Imagen 10. Maíz nativo asociado con frijol trepador

Manejo del frijol trepador *Phaseolus vulgaris*

Densidad de siembra

- Se recomienda sembrar a una densidad de 30,000-40,000 plantas por hectárea con 37,000 plantas de maíz por hectárea.

Tiempo de floración

- Alrededor de 2 meses.

Uso sugerido

- Reincorporar la biomasa seca al suelo después de la cosecha del grano.

Frijol ayocote

El frijol ayocote (*Phaseolus coccineus*) también forma parte de la dieta local, además de que consistentemente tiene precios altos en el mercado. Es resistente a plagas y tolerante al estrés hídrico. En asociación con maíz nativo y bajo condiciones benignas, puede producir, en promedio, 11.5 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos profundos, aunque su producción de biomasa es muy inferior en los suelos poco profundos de lomeríos (2.8 ton/ha).

Fue el abono verde que más aumentó el rendimiento del maíz Bolita (hasta 1.9 ton/ha) en las parcelas de planicies con suelos profundos. Además, presentó valores altos en la tasa de descomposición después de dos meses de ser reincorporado a suelos profundos y a suelos erosionados.

De las leguminosas locales, es la que ha demostrado mayor potencial como abono verde por su resistencia a la sequía y su tasa de descomposición que, con el tiempo, se reflejará en un alto porcentaje de materia orgánica en el suelo y un aumento en su fertilidad. Además, su valor en el mercado contribuye a mejorar las condiciones económicas de la familia campesina y contribuye a la seguridad alimentaria.



Imagen 11. Ayocote sembrado en monocultivo

Manejo del frijol ayocote *Phaseolus coccineus*

Densidad de siembra

- Se recomienda sembrar a una densidad de 30,000 plantas por hectárea con 37,000-40,000 plantas de maíz por hectárea.

Tiempo de floración

- Alrededor de 3 meses.

Uso sugerido

- Sembrar como cultivo de cobertura en la temporada en la que el suelo queda desnudo. Cortar y dejar como mulch. O reincorporar al suelo como biomasa verde después de la cosecha del cultivo principal.

En asociación con maíz nativo y bajo condiciones benignas, esta leguminosa puede producir, en promedio, 13.3 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos profundos y 9.7 ton/ha de biomasa seca en parcelas con suelos poco profundos. Además de que es capaz de fijar al menos 200 kg/ha de nitrógeno. Es el abono verde que más biomasa seca produjo en el año de canícula larga (1.3 ton/ha).

Fue el abono verde que tuvo el mayor rendimiento en suelos poco profundos de lomeríos (414 kg/ha de grano). Junto con *Crotalaria*, se desempeñó bien en el año de canícula larga (638 kg/ha de grano). De hecho, se observó que, en abril de 2018, tras 7 meses sin casi nada de lluvia, las plantas de *Lablab* estaban floreciendo en las parcelas de las planicies.

En los experimentos, esta leguminosa fue la que más aumentó el rendimiento promedio del maíz Bolita (hasta 2.7 ton/ha). Además, fue el abono verde que presentó los valores más altos en la tasa de descomposición después de dos meses de ser reincorporado al suelo.

Esta leguminosa tiene un alto potencial como abono verde por su alta producción de biomasa seca y su resistencia a condiciones adversas, como suelos poco profundos y canículas largas.

Su gran resistencia a la sequía revela el potencial del *Lablab* como cultivo de

cobertura para no dejar el suelo al desnudo en la temporada de secas. Además, puede aportar forraje para el ganado y el grano puede ser consumido por el humano tras una cocción adecuada.

Manejo de la leguminosa exótica *Lablab purpureus*

Densidad de siembra

- Se recomienda sembrar a una densidad de 20,000 plantas por hectárea.

Tiempo de floración

- Alrededor de 4 meses.

Uso sugerido

- Sembrar como abono verde al mismo tiempo que la siembra de maíz o al momento del deshierbe.
- Realizar una o dos podas durante el ciclo del maíz para evitar la competencia y que estorbe demasiado durante la cosecha.
- La poda se hace en las guías del *Lablab* que suben sobre el maíz, para evitar que siga creciendo hacia arriba y así permitir que se extienda hacia abajo hasta el momento de la cosecha del maíz.
- Cortar y dejar como mulch, o dejarlo crecer como cultivo de cobertura y reincorporarlo en mayo, antes del siguiente ciclo de siembra.

Ventajas y desventajas de los abonos verdes disponibles en los Valles Centrales de Oaxaca

Abonos locales

Frijol negro

- ✓ Alta importancia económica
- ✓ Alto valor en gastronomía local
- ✓ Buena producción de grano en canícula corta
- ✓ Buen desempeño en suelos profundos
- ✗ Baja producción de biomasa
- ✗ Baja capacidad de fijar N₂
- ✗ Susceptible a estrés hídrico
- ✗ Alta incidencia de plagas
- ✗ Baja tasa de descomposición
- ✗ Bajo desempeño en suelos poco profundos

Frijol trepador

- ✓ Alto valor en gastronomía local
- ✓ Buena producción de grano en canícula corta
- ✓ Buen desempeño en suelos profundos
- ✗ Baja producción de biomasa
- ✗ Baja capacidad de fijar N₂
- ✗ Susceptible a estrés hídrico
- ✗ Susceptible a plagas
- ✗ Baja tasa de descomposición
- ✗ Bajo desempeño en suelos poco profundos

Frijol ayocote

- ✓ Forma parte de la dieta local
- ✓ Altos precios en mercado
- ✓ Resistente a plagas
- ✓ Tolerante a estrés hídrico
- ✓ Alta producción de biomasa
- ✓ Aumento considerable de rendimiento de maíz en suelos profundos
- ✓ Alta tasa de descomposición
- ✗ Baja producción de biomasa en lomeríos
- ✗ Baja capacidad de fijar N₂

Abonos exóticos

Crotalaria juncea

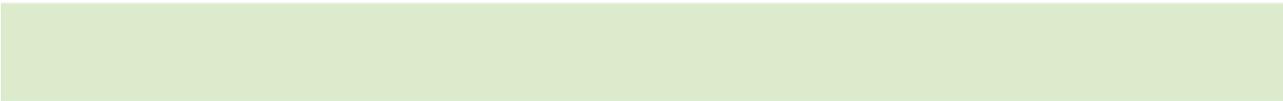
- ✓ Forraje para ganado
- ✓ Requiere poca agua
- ✓ Alta producción de biomasa
- ✓ Buen fijador de N₂
- ✓ Buen desempeño en canícula larga
- ✓ Alta tasa de descomposición
- ✗ No forma parte de la dieta local
- ✗ No tiene valor económico

Lablab purpureus

- ✓ Forraje para ganado
- ✓ Muy resistente a la sequía
- ✓ Potencial para consumo humano
- ✓ Alta producción de biomasa
- ✓ Buen fijador de N₂
- ✓ Buen desempeño en canícula larga y suelos poco profundos
- ✓ Alta tasa de descomposición
- ✓ Aumento considerable de rendimiento de maíz
- ✗ No forma parte de la dieta local
- ✗ No tiene valor económico



¿Cómo elegir qué abono verde sembrar?



En vista de que la agricultura campesina se está viendo cada vez más amenazada, es importante generar estrategias que la fortalezcan haciéndola más adaptable a los constantes y múltiples retos a los que se enfrenta. Por ello, es importante que al momento de decidir qué abono verde sembrar se consideren los aspectos productivos, pero también otros aspectos que aseguran la autonomía de la vida campesina. De esta manera, las estrategias planteadas son complementarias, es decir, buscan abordar los temas de fertilidad del suelo y resistencia a la sequía, al tiempo que también atienden la alimentación y mejoran la economía.

Una forma de visualizar esto es mediante la multifuncionalidad, que refleja la capacidad de una leguminosa de cumplir con los atributos productivos propios de un abono verde, pero también de contribuir al sustento de la familia

campesina. Para calcular este valor, se toman en cuenta las cualidades que nos interesa que tenga un abono verde, por ejemplo, su capacidad de fijar nitrógeno y de reincorporar materia orgánica, su resistencia a la sequía y si funciona como cultivo de cobertura. Además de estos factores, se incluyen características que contribuyen a los modos de vida campesinos, tales como su utilización como alimento para consumo humano y forraje para los animales.

De esta manera, se va calificando a la leguminosa de acuerdo con su desempeño en cada uno de estos aspectos. Por cada valor positivo que obtiene (es decir, por cada valor de "sí" o "alto" que aparece en la tabla) se le otorga un punto. Al final, se considera el puntaje obtenido con respecto al total de puntos posibles y se le asigna la calificación, que es el valor de multifuncionalidad.

Multifuncionalidad de los abonos verdes

Abono verde	Fijación de N	Reincorporación de materia orgánica	Resistencia a la sequía	Cultivo de cobertura	Semillas comestibles	Forraje	Valor de multifuncionalidad
Frijol negro	Bajo	Baja	Baja	No	Sí	No	1 / 6 = 2
Frijol trepador	Bajo	Baja	Baja	No	Sí	No	1 / 6 = 2
Frijol acoyote	Bajo	Alta	Alta	No	Sí	No	3 / 6 = 5
<i>Crotalaria juncea</i>	Alto	Alta	Alta	No	No	Sí	4 / 6 = 7
<i>Lablab purpureus</i>	Alto	Alta	Alta	Sí	Posible	Sí	6 / 6 = 10

En este sentido, en nuestro caso las leguminosas exóticas *Crotalaria juncea* y *Lablab purpureus* son las que obtuvieron un mayor valor de multifuncionalidad. Esto refleja la diversidad de usos que se les puede dar, ya sea para restaurar el suelo como abonos verdes, para protegerlo como cultivos de cobertura, como alimento para el ganado o, potencialmente, para consumo humano (sólo en el caso de *Lablab*). De las leguminosas locales, el ayocote es un buen candidato para ser un abono verde y un cultivo de cobertura porque aporta mucha materia orgánica y es resistente a la sequía y a los suelos poco profundos.

Las otras leguminosas locales (frijol negro y frijol trepador) presentan valores bajos de multifuncionalidad, lo que significa que no tienen una diversidad de usos. Sin embargo, tienen un papel muy importante en la alimentación local y en la economía campesina, por lo que se debe de buscar una estrategia de manejo complementaria que no las desplace. Una propuesta es que se regrese la materia seca después del despegue de los granos, de forma que contribuyan a ir aumentando el porcentaje de materia orgánica en el suelo. También se pueden hacer combinaciones entre los abonos verdes exóticos y el frijol negro o trepador, sembrando el abono verde en mayo



y reincorporándolo antes de sembrar el frijol en agosto o en febrero.

El diseño de estrategias de manejo complementarias debe tomar en cuenta los aportes que cada leguminosa puede otorgar para lograr contrarrestar la variabilidad climática y aumentar la fertilidad del suelo, y al mismo tiempo fortalecer la vida campesina autónoma. Para contribuir con ello, el siguiente gráfico muestra el desempeño que las leguminosas disponibles en los Valles Centrales de Oaxaca mostraron en distintos rasgos puestos a prueba mediante la experimentación. Para cada característica se ordenan los abonos verdes de mayor a menor desempeño.

Algunas de estas características se han discutido ampliamente a lo largo del manual, como el potencial de aportar materia orgánica al suelo, el aumento del rendimiento del maíz, la multifuncionalidad y la aportación a la alimentación. Otros, como la eficiencia del intercalado maíz-abono verde y relación costo-beneficio, apenas se presentan.

La eficiencia del intercalado maíz-abono verde está dada por el índice de Eficiencia Relativa de la Tierra (LER, por sus siglas en inglés) y muestra cuánto aumenta la producción del maíz cuando se siembra en asociación con el abono verde en comparación con su siembra en monocultivo. La diferencia con respecto al rendimiento del maíz es que éste se refiere a cuánto contribuye la presencia del abono verde a aumentar de forma

neta la producción del maíz, sin comparar el valor con la producción en monocultivo.

Por otro lado, la relación costo-beneficio puede utilizarse como un indicador de equidad puesto que refleja la capacidad de los abonos verdes de mejorar las utilidades del sistema milpa. Esta relación se estimó como la relación entre los costos asociados a la producción del maíz nativo y el precio al que se podrían vender en el mercado local el maíz producido como grano y forraje y la semilla del abono verde. Cabe notar, sin embargo, que, en el caso de los abonos verdes exóticos, su venta en el mercado local todavía es hipotética.

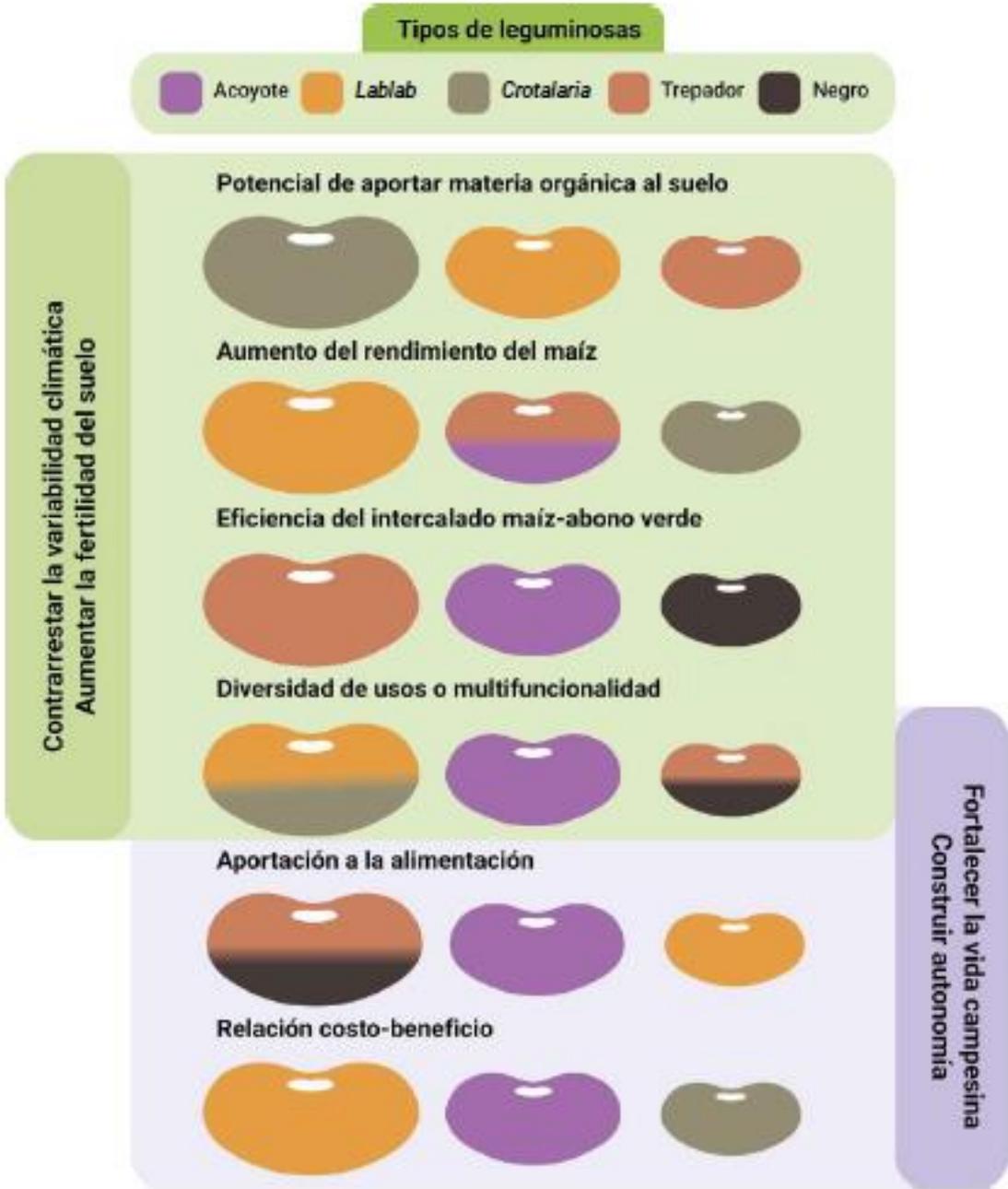


Imagen 14. Resumen del desempeño de los abonos verdes disponibles en los Valles Centrales de Oaxaca para las distintas características evaluadas mediante la experimentación. Entre más grande es el frijol, el desempeño del abono verde es mejor para cada una de las características.

Probar los abonos verdes en nuestras parcelas

Buena parte de la información que se presenta en este manual se generó mediante la experimentación en parcelas experimentales en la Villa de Zaachila, pero también se incluyen observaciones que surgieron de los mismos campesinos que han experimentado el uso de abonos verdes en sus parcelas desde hace algunos años. A pesar de ello, para seguir mejorando el manejo de las leguminosas locales y exóticas como abonos verdes y optimizarlo a las diferentes condiciones que se presentan en los Valles Centrales hay que seguir haciendo mucha experimentación a nivel local. Tenemos que considerar que los efectos de los abonos verdes sobre los suelos pueden ser lentos; se estima que toma entre 3 y 5 años llegar a ver efectos convincentes sobre la fertilidad de los suelos. Por eso, ¡no hay que esperar más para empezar a experimentar sobre las parcelas!

Es preferible que la experimentación se haga de una manera controlada, poco a poco y que no ponga en riesgo la producción completa de los campesinos. Se pueden ir definiendo los objetivos

que se quieren alcanzar y, con base en ello, elegir la leguminosa que mejor se desempeñe. Se sugiere ir probando con una leguminosa a la vez, sobre todo si nunca se ha trabajado con estos cultivos. Se recomienda empezar en pequeñas superficies (10 metros por 10 metros) para no experimentar o arriesgar toda la superficie cultivada. Trabajar en esta escala también permite dar seguimiento al efecto que tienen los abonos verdes sobre el cultivo y el suelo, de forma que también se puedan ir haciendo correcciones y adiciones.

Este manual de abonos verdes fue hecho para ser reproducido y compartido. Se espera, sobre todo, que motive a los lectores a experimentar con estos abonos verdes –¡y otros!– en sus parcelas o con los campesinos con quienes trabajen. También se busca animar a compartir las semillas de abonos verdes para que otros y otras experimenten y descubran las bondades de esas plantas. Así, juntos caminaremos hacia una agricultura más sustentable.

Agradecimientos

A.B. agradece profundamente al Instituto Politécnico Nacional (IPN) en el Centro Integral De Desarrollo Integral Interdisciplinario Regional de Oaxaca (CIIDIR), donde estudió el doctorado bajo la dirección del Dr. Jaime Ruiz Vega con el apoyo financiero de la beca CONACYT.

Ambos autores agradecen el apoyo del maestro campesino Raymundo Aguilar, pues él acogió la siembra del Lablab para mejorar su parcela de maíz de lluvias y, posteriormente, para realizar los experimentos de la tesis de A. B. Los autores agradecen también al CBTA núm. 78 por el préstamo de una parcela y por el apoyo brindado en diferentes fases de los experimentos.

A.B. y M. H. agradecen el apoyo incondicional de la Dra. Mariana Benítez Keinrad del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT (IN207819) y a todo el colectivo El Molote Agroecológico por su apoyo en la producción y concepción de este manual. M. H. agradece también a Cristina Alonso-Fernández por el apoyo incondicional y por las correcciones hechas a este manual.

A.B. agradece también a su esposa María Guadalupe León Velasco por el apoyo incondicional durante toda esta gran aventura agroecológica.



Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



Créditos de imágenes

Imagen de portada: Kyria Alexandra Valladares Rodríguez

Imagen 1: Dr. Lev Orlando Jardón Barbolla

Imagen 2: Diego Armando Contreras Peralta

Imagen 3: Alexandre Beaupré

Imagen 4: Alexandre Beaupré

Imagen 5: María Fernanda Herce

Imagen 6: Alexandre Beaupré

Imagen 7: Alexandre Beaupré

Imagen 8: Alexandre Beaupré

Imagen 9: Alexandre Beaupré

Imagen 10: Alexandre Beaupré

Imagen 11: Alexandre Beaupré

Imagen 12: Alexandre Beaupré

Imagen 13: Alexandre Beaupré

Esquema de Modalidades de uso y tipos de manejo de los abonos verdes (av) asociados al cultivo de maíz: María Fernanda Herce

Imagen 14: María Fernanda Herce

Diseño Editorial

Isza Beckel / Isaura Zamora López

Diseño de manual, esquemas, tablas e ilustraciones.

Fuentes bibliográficas

Beaupré, Alexandre; Vega, Jaime Ruiz; Castañeda, H. Ernesto; Benítez, Mariana; Van Cauwelaert, Emilio M.; González González, Cecilia. 2020. Pertinence of exotic and local green manures for sustainable maize polyculture in Oaxaca, Mexico. *Renewable Agriculture and Food Systems* 1–12. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000137>

Bunch, Roland. 2012. Restoring the soil. A guide for using green manure cover crops to improve the food security of smallholder farmers. *Canadian Foodgrains Bank*, Winnipeg, Canadá. 94 pp.

Holt-Giménez, E. 2008. Campesino a Campesino: Voces de Latinoamérica, Movimiento Campesino a Campesino para la Agricultura Sustentable. *Food First Books*, Oakland, California. 294 pp.

Ruiz-Vega, Jaime; Loeza, Gil. 2003. Evaluación de abonos verdes en asociación con maíz de temporal en los Valles de Oaxaca, México. *Terra latinoamericana* vol. 21, núm. 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México: 409-415.

V BIBLIOGRAFÍA

Adebisi, A. A.; Bosch, C. H. (2004). "*Lablab purpureus* (L.) Sweet." Record from PROTA4U. Grubben, G. J. H. y O. A. Denton (Eds). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Netherlands.

Álvarez Morales, Y.; Troyo Diéguez, E.; Nieto Garibay, A.; Beltrán Morales, F.A.; Murillo Amador, B.; Cruz Falcón, A.; Navejas Jiménez, J. (2014). Vulnerabilidad hidroclimática y degradación del suelo en regiones agrícolas semiáridas. *Terra Latinoamericana* 32 (1): 47-58.

Al-Snafi, A.E. (2017). The pharmacology and medical importance of dolichos lablab (*Lablab purpureus*) - A review. *IOSR Journal Of Pharmacy*. 7 (2): 22-30.

Altieri, M.A.; Nicholls, C.I.; Montalba, R. (2017). Technological Approaches to Sustainable Agriculture at a Crossroads: An Agroecological Perspective. *Sustainability* 9 (3) (349).

Altieri, M.A.; Nicholls, C.I.; Ríos-Osorio, A. (2013). Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptación al cambio climático. SOCLA, REDAGRES, CYTED, Universidad Nacional de Colombia.

Altieri, M.A. (2001). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. Agroecología: el camino hacia la agricultura sustentable, cap. 2. Ediciones Científicas Americanas: 27- 34.

Altieri, M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agriculture, Ecosystem and environment, University of California (74): 19-31.

Álvarez Morales, Y.; Troyo Diéguez, E.; Nieto Garibay, A.; Beltrán Morales, F.A.; Murillo Amador, B.; Cruz Falcón, A.; Navejas Jiménez, J. (2014). Vulnerabilidad hidroclimática y degradación del suelo en regiones agrícolas semiáridas. Terra Latinoamericana 32 (1).

Álvarez-Solís, D.J.; Gómez-Velasco, D.A.; León-Martínez, N.S.; Gutiérrez-Miceli, A. (2010). Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz. Agrociencia 44 (5): 575-586.

Aragón-Cuevas, F. (2011). Maíces nativos de Oaxaca. INIFAP/ SAGARPA, Oaxaca. CIBIOGEM.

Arlauskiene, A.; Jablonskyte-Rasce, D.; Velykis, A.; Toleikiene, M. (2017). Energetic evaluation of green manure preparation for organic farms. Engineering for rural development. Joniskelis Experimental Station, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Lithuania (17): 667-672.

Astier, M.; García-Barrios, L.; Galván-Miyoshi, Y.; González-Esquivel, C.; Masera, O. (2012). Assessing the sustainability of small farmer natural resource management systems. A critical analysis of the MESMIS program (1995-2010). *Ecology and society*, 17 (3): 25.

Astier, M.; Masera, O.R.; Galván-Miyoshi, Y. (2008). Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. SEAE/ CIGA/ ECOSUR / CIECO/ UNAM/ GIRA/ Mundiprensa/ Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable, España.

Astier, M.; Maass, J.M.; Etchevers-Barra, J.D.; Pena, J.J.; León-González, F. (2006). Short-term Green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil and tillage research* 88 (1-2): 153-159.

Avendaño-Arrazate, C.H.; Molina-Galan, J.D.; Trejo-López, C.; López-Castañeda, C.; Cadena-Iñiguez, A. (2008). Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*. Universidad de Costa Rica 19 (1): 27-37.

Ayala, G.A.V.; Schwentesius, R. R.; De la O Olán, M.; Preciado, R. P.; Almaguer, V. G., y Rivas, V. P. (2013). Análisis de rentabilidad de la producción de maíz en la región de Tulancingo, Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10 (4): 381-395.

Bautista-Cruz, A.; Etchevers-Barra, J. (2014). Una revisión sobre los conceptos de la calidad del suelo. Sus indicadores e índices. Editorial Académica Española, Alemania.

Bautista-Martínez, E. (1998). El maíz en Oaxaca: las cosechas de las contradicciones. Estudios Agrarios, UABJO. Oaxaca, México.

Benítez, J. R.; Bot, A. (2016). Agricultura de conservación: una práctica innovadora con beneficios económicos y medioambientales. Perú. Agrobanco. Leisa 2 (32): 5-7.

Benítez Keinrad, M.; Jardón- Barbolla, L. (2015). Agroecología y sostenibilidad: crear conocimientos desde el campo y la academia. INE. UNAM

Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (1985). Conservação do solo. Piracicaba. Brasil. Livroceres.

Blanckaert, I.; K. Vancraeynest, R.; Swennen, F.; Espinosa-García, D.; Piñero-Dalmau R. (2007). Biodiversity of useful non-crop resources and the role of indigenous knowledge in their management in semi-arid crop production systems in Mexico. Agriculture, Ecosystems and Environment 119: 39-48.

Bonilla-Aparicio, M.E.; Salcido-Ramos, B.A.; Paredes-Sánchez, J.A.; Aguirre-Álvarez, L.; Méndez-Cadena; M.E.; Hernández-Rodríguez, M.L. (2013). La diversidad hortícola para la seguridad alimentaria en municipios marginados del Estado de Puebla. Universidad Autónoma de México. Ra Ximhai 9 (2): 151-163.

Bouthier, A.; Villenave; Pelosi, C.; Pérès, G. (2014). Impact du travail de sol sur son fonctionnement biologique.

Brust, G.E. (2019). Management strategies for organic vegetable fertility. Safety and practice for organic food.

Buckles, D.; Gustavo, S. (1998). An economic analysis of the abonera maize production system in the Atlantic Coast of Honduras. Economics, CIMMYT, México.

Bunch, R. (2016) ECHO community. 5 años en África.
<https://www.echocommunity.org/es/resources/9dba4bea-d151-4f85-9784-0080641e5945>

Bunch, R. (2012a). ¿Cómo prohibir las sequías? Aprendiendo de los africanos que ya aprendieron de los latinoamericanos. Leisa 32 (2).

Bunch R. (2012b). Restoring the soil. A guide for using green manure/cover crops to improve the food security of smallholder farmers. Food Grains. Canadá.

Bunch, R. (2006). Adopción de cultivos de coberturas. Leisa revista de agroecología. 19 (4).

Bunch, R.; Kadar, A. (2004). La mucuna en los sistemas de agricultura de bajos insumos externos en Mesoamérica. Leisa Rev. Agroecol. 20 (1):16-18.

Bunch, R. (2002). Nutrient quantity or nutrient Access. A new understanding of how to maintain soil fertility in the tropics. Notas de desarrollo ECHO (EDN) 74.

Bunch, R. (1999). Adopción de abonos verdes y cultivos de cobertura. Leisa 19 (4).

Bunch, R. (1996). Logrando sostenibilidad en el uso de abonos verdes. *Leisa* 13 (3).

Cambio climático global (2019). Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero. www.cambioclimaticoglobal.com

Castillo-Tejero, A. (2007). El maíz y la arqueología. El maíz como producto cultural desde los tiempos antiguos. *Desgranando una mazorca. Orígenes y etnografía de los maíces nativos*. INAH. Suplemento 52.

Castro-Rincón, E.; Mojica-Rodríguez M. E., Carulla-Fornaguer J.E., Lascano-Aguilar C. (2017). Abonos verdes de leguminosas: integración en sistemas agrícolas y ganaderas del trópico. *Agron. Mesoam.* 29 (3): 711-729.

Ceccon, E. (2008). La revolución verde: tragedia en dos actos. UNAM. *Revista de cultura científica* 91: 20-29.

Cedric, K. (2014). Use of green manure legume cover crops in smallholder maize production systems in Limpopo province, South Africa. *African Journal of soil science. International scholars journals* 2 (3): 63-67.

Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA) (2016). Informe sobre la pertinencia biocultural de la legislación mexicana y su política pública para el campo. El caso del programa de “Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional” (MasAgro). Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C., México.

Centre de développement d'agrobiologie (1998). Engrais verts et cultures intercalaires.

Chapela, I.H.; Quist, D. (2001). Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature* 414 (6863): 541-543.

Cherr, C.M.; Scholberg, J.M.S.; McSorley, R. (2006). Green manure approaches to crop production: a synthesis. *Agronomy Journal* 98 (2).

Chiyev-Garwe, E. (2002). Smallholder dairy farming in Matebeleland South province of Zimbabwe: effects of feed supplementation on reproductive performance and milk yield in crossbred and indigenous cows. Tesis de doctorado.

Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) (2017). Ciclos biogeoquímicos.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2018). <https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/que-es-el-abono-verde-y-como-esta-ayudando-a-los-agricultores-de-maiz/>

Cotler, H.; Martínez, M.; Etchevers, J.D. (2016). Organic carbon in agricultural soils of Mexico: Research and Public Policy. *Terra Latinoamericana* 34 (1): 125-138.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017). Inventario nacional forestal y de suelos. Informes de resultados: 2009-2014.

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2015). Pobreza en México. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2014.aspx.

Conway, G.R. (1991). Sustainability in agricultural development: Trade-offs between productivity, stability and equitability. *Journal for Farming Systems Research Extension* 4: 1-14.

Cruz-Ruiz, M.A. (2009). Eficiencia relativa de la tierra y perspectivas de dos policultivos de temporal en Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. IPN. CIIDIR.

Cullis, C.; Kunert, K.J. (2017). Unlocking the potential of orphan legumes. *Journal of Experimental Botany* 68 (8): 1895–1903.

Darkwa, K.; Ambachew, D.; Mohammed, H.; Asfaw, A.; Blair, M.W. (2016). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for drought stress adaptation in Ethiopia. *The crop journal* 4 (5): 367-376.

Darnhofer, I. (2010). Strategies of family farms to strengthen their resilience. Thematic Session D5: Strategies for enhancing a system's resilience. 8th International Conference of the European Society for Ecological Economics, (Slovenia).

Diego-Nava, F.; Ruíz-Vega, J.; Martínez-Ruiz, O.; Pérez-Belmonte, N.M.; Ruíz-Ortiz, F. (2019). Eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero en dos agroecosistemas en Oaxaca, México. *Revista Ingeniería Agrícola* 9 (2): 39-44.

Ebel, R.; Pozas Cárdenas, J.G.; Soria Miranda, F.; Cruz González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimientos de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana* 35: 149-160.

Elfstrand, S.; Bath, B.; Martensson, A. (2007). Influence of various forms of green manure amendment on soil microbial community composition, enzyme activity and nutrient levels in leek, *Applied Soil Ecology* 36: 70-82, 610-621.

Faure, A.B., Benítez, G.R., Rodríguez A.E., Grande, M.O., Torres, M.M., Pérez, R.P. (2014). Guía técnica para la producción de frijol común y maíz. 1st ed. La Habana, Cuba: Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical 22.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). Guía técnica para la conservación del suelo.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). México y la FAO. Contribuyendo a la seguridad alimentaria a través del fortalecimiento de políticas públicas.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2015a). Los suelos en el ciclo del agua. Año internacional de los suelos.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2015b). Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Roma Italia.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2015c). Perspectivas para el medio ambiente. Agricultura y medio ambiente.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). Green manure covers crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms. Integrated crop management 2 (12).

Food and Agriculture Organization (FAO). (2008). El desarrollo científico-tecnológico de la agricultura: de la revolución verde a la revolución biotecnológica: continuidades y rupturas.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2000). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Fuentes-Aguilar, L.; López-Huebe, R. (1979). Tipología agrícola del valle central de Oaxaca. *Invest. Geog.* (9): 209-253.

García, E. (1980). Modificaciones al sistema climático de Köpper. Instituto de geografía. UNAM. Series Libros (6). México.

García, M.; Treto, E.; Álvarez, M. (2000) Los abonos verdes: una alternativa para la economía del nitrógeno en el cultivo de la papa. II. Efecto de la interacción abono verde- dosis de nitrógeno. *Cultivos tropicales* 21 (1): 13-19.

García-Barrios, L.; Galván-Miyoshi, Y.; Valdivieso-Pérez, I.A.; Masera, O.; Bocco, G.; Vandermeer, J. (2009). Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: the Mexican experience. *BioScience* 59 (10): 863-87.

García-Hernández, J.L.; Murillo-Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Fortis-Hernández, M.; Márquez-Hernández, C.; Castellanos-Pérez, E.; Quiñones-Vera, J.J.; Ávila-Serrano, N.Y. (2010). Avances en investigación y perspectivas del aprovechamiento de los abonos verdes en la agricultura. *Terra Latinoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo AC 28 (4): 391-399.

García, M.; Álvarez, M.; Treto, E. (2002). Estudio comparativo de diferentes especies de abonos verdes y su influencia en el cultivo del maíz. *Cultivos Tropicales* 23 (3): 19-30.

Grupo Interamericano para el desarrollo sostenible de la agricultura y los Recursos Naturales (GIDSA) (1996). *Recursos Naturales. Semillas para el futuro*.

Gil-Méndez, J. (2015). Neoliberalismo, políticas agrarias y migración, consecuencias de un modelo contra los productores. *Ra Ximhai* 11 (2): 145-162.

Gingrich, S.; Cunfer, G.; Aguilera, E. (2018). Agroecosystem energy transitions: exploring the energy-land nexus in the course of industrialization. *Regional Environmental Change* (18):929–936.

Giraldo, O.M. (2015). Agroecología y complejidad: Acoplamiento de la técnica a la complejidad ecosistémica. Centro de investigación sociedad y políticas públicas (CISPO). *Polis. Revista Latinoamericana* 41.

Gliessman, S.R.; Guadarrama-Zugasti, C.; Méndez, V.E.; Trujillo, L.; Bacon, C.; Cohen, R. (2002). *Agroecología: un enfoque sustentable a la agricultura ecológica*.

Gómez-Sosa, L.; Arellanes-Cancino, N. (2018). Del huerto al mercado: especies vegetales y comerciantes en la Villa de Zaachila, Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 5 (1): 43-54.

González-Chávez, H.; Macías-Macías, A. (2007). Vulnerabilidad alimentaria y política agroalimentaria en México. *Desacatos* (25): 47-78.

González, C.G. (2004). Trade liberalization, food security and the environment: The Neoliberal Threat to Sustainable Rural Development.

González-González, C. (2018). Caracterización de la diversidad de coleópteros como indicadora de tipos de manejo agrícola contratantes en la Villa de Zaachila, Oaxaca. Maestría en Ciencias Biológicas. UNAM. México.

Gundel, S.; Hancock, J.; Anderson, S. (2001). Scaling-up Strategies for Research in Natural Resource Management. A Comparative Review.

Guzmán-Sebastián, K.C.; Velasco-Velasco, V.A.; Ruíz, L.J., Campos-Ángeles, G. V.; Rodríguez-Ortiz, G.; Enríquez-del Valle J.; Guzmán, G. I., Aguilera, E.; García-Ruiz, R.; Torremocha, E.; Soto-Fernández, D.; Infante-Amate, J.; González de Molina, M. (2018). The agrarian metabolism as a tool for assessing agrarian sustainability, and its application to Spanish agriculture (1960-2008). *Ecology and Society* 23 (1).

Heide-Van-Der, J.; Hairiah, K. (1989). The role of green manures in rainfed farming systems in the humid tropics. *ILEIA* 5 (2).

Hernández-Santiesteban, Y.; Alfaro-Alfaro, E.; Mederos-Medros, D.; Rivas, F. (2009). Las coberturas

vivas en sistemas de cultivos agrícolas. Temas de Ciencia y Tecnología. Cuba 13 (38): 7-16.

Holt-Giménez, E. (2008) Campesino a campesino. Voices from Latin America's Farmer to farmer movement for Sustainable Agriculture.

Hünemeyer, J.A.; Camino, R.; Muller, S. (1997). Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. Serie investigación y educación en desarrollo sostenible (4).

InfoRural (2017). Degradación de suelos de Oaxaca amenaza la seguridad alimentaria.

International center of tropical agriculture (CIAT). (2006). *Lablab purpureus*. Una leguminosa multipropósito.

Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). Reporte de México sobre el cambio climático. Grupo II. Impactos, vulnerabilidad y adaptación.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2000). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Oaxaca. Villa de Zaachila.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria. Conociendo el campo de México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2007). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Villa de Zaachila, Oaxaca Clave geoestadística 20565.

Instituto nacional de estadística y geografía (INEGI) (1997). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Villa de Zaachila, Oaxaca Clave geoestadística 20565.

Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias (INIFAP) (2015a). Agenda agrícola de Oaxaca. Maíz- Valles Centrales: 117-124.

Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias (INIFAP) (2015b). Agenda agrícola de Oaxaca. Frijol de temporal- Valles Centrales: 39-46.

Instituto nacional de tecnología agropecuaria (INTA) (2015). Alfalfa: la reina de los forrajes perenne

Jamioy, D.D. (2018). Efecto de la aplicación de abonos verdes en el crecimiento y el rendimiento de *Phaseolus vulgaris*. *Agronomía Costarricense* 42 (2): 127-140.

Jiambo, L. (2006). Energy balance and economic benefits of two agroforestry systems in northern and southern China. *Agriculture Ecosystems & Environment* 3 (116).

Karyoti, A.; Bartzialis, D.; Sakellariou-Makrantonaki, M.; Danalatos, N. (2018). Effects of irrigation and green manure on corn (*Zea mays* L.) biomass and grain yield. *Journal of soil science and plant nutrition* 18 (18).

Honorable Ayuntamiento de la Villa de Zaachila (2019). Plan municipal de desarrollo del municipio de Zaachila (2019-2021).

Kazemi, H. (2016). Energy balance in modern agroecosystems; Why and How? *Agricultural Research in Technology* 5 (1).

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* (23): 1-22.

Lanckaert, I.; K. Vancraeynest; R. Swennen; F. Espinoza-Garcia; D. Piñero y R. Lira-Saade (2007). Crop resources and the role of indigenous knowledge in semi-arid production of Mexico. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 119 (1-2): 39-48.

- Leng, G.; Hall, J. (2019). Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and projected changes in the future. *Science of The Total Environment* (854): 811-821.
- León-Sicard, T. (2014). *Perspectiva ambiental de la agroecología: la ciencia de los agroecosistemas*. Serie IDEAS 23. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia.
- Li, Y. (2012). *Crotalaria Juncea*. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Macías-Macías, A. (2013) Introducción. Los pequeños productores agrícolas en México. *Económica Regional* 25 (111-112).
- Maiksteniene, S.; Arlauskiene, A. (2004). Effect of preceding crops and green manure on the fertility of clay loam soil.
- Mausolf, C.; Farber S. (1995). An economic analysis of ecological agricultural technologies for small peasant farmers in Honduras *Ecological Economics* 3 (12): 237-248.
- Martínez-López, L.; Ayala-Carrillo, M.R.; Zapata-Martelo, E.M.; Martínez-Corona, B.; Vásquez-Carrillo, J.; Jacinto-Hernández, C.; Espinosa-Calderon, A. (2018). Conocimiento práctico y teórico de maíz y frijol en la zona Triqui alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (1).
- Martínez-Romero, A.; Leyva-Galán, Á. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*. 35 (1): 11-20.
- Massawe, P.I.; Mtei, K.M.; Munishi, L.K.; Ndakidemi, P.A. (2016). Improving Soil Fertility and Crop Yields through Maize-Legumes (*Common bean and Dolichos lablab*) Intercropping Systems. *Journal of Agricultural Science* 8. (12).
- Meagan, S. (2016). Realizing resilient food systems. *Biocience* 66 (7).

Montiel, K; Ibrahim, M. (2015). Manejo integrado de suelos para una agricultura resiliente al climático. Sistematización del ciclo de foros virtuales. Año internacional de los suelos. IICA.

Mora-Van-Cauwelaert, E. (2017). Diagnóstico del movimiento comercial del maíz y de las prácticas económicas y culturales-simbólicas para la siembra del maíz criollo en la Villa de Zaachila, Oaxaca: un enfoque desde las familias campesinas. Universidad Internacional de Andalucía.

Morret-Sánchez, J.C.; Cosío-Ruiz, C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. Colegio de Postgraduados (14) 1.

Mósquera, M; Reyes, O; Sánchez-de-Prager, M; Gallego, J; Sánchez, D. (2012). Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. Agroecología 7 (1): 53-62.

Mueller, S.; V. de Camino, R. (1993) Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales. Base para establecer indicadores. IICA. Serie documentos de programas 38.

Murphy, A.M.; Colucci, P.E. (1999). A tropical forage solution to poor quality ruminant diets: A review of *Lablab purpureus*. Livestock Res. Rural Develop. 11 (2).

Murray-Tortarolo, G.; Jaramillo, V.J.; Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. Agricultural and Forest Meteorology 253-254: 124-131.

Mukuoka, T.; Ambrosano, E.J.; Zapata, F.; Bortoletto, N.; Martins, A.L.M.; Trivelin, P.C.O.; Boaretto, A.E.; Scivittaro, W.B. (2001). Eficiencia de abonos verdes (*Crotalaria* y *Mucuna*) y urea, aplicados solos o juntamente, como fuentes de nutrientes para el cultivo de arroz. Terra Latinoamericana. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo AC 20 (1): 17-23.

Mzwandile, P.M.; Oghene-Sabko, T.E.; Gideon, N.S. (2016). Effects of inorganic fertilizers and sunhemp (*Crotalaria juncea*) as a green manure crop on maize (*Zea mays*) growth, seed yield and labour cost. *American journal of agriculture and forestry* 4 (3): 56-63.

Nabel, M., Schrey, S.D.; Temperton, V.M.; Harrison, L.; Jablonowski, N.D. (2018). Legume Intercropping With the Bioenergy Crop *Sida hermaphrodita* on Marginal Soil. *Frontiers in plant science*. 9 (905).

Nelson, G.C.; Rosegrant, M.W.; Koo, J.; Robertson, R. Sulser, T.; Ringler, C.; Msangi, S.; Palazzo, A.; Batka, M.; Magalhaes, M.; Valmones-Santos, R.; Ewing, M.; Lee, D. (2009). Cambio climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Odum, E.P. (1996). Ecología: el vínculo entre las ciencias naturales y las sociales. Compañía editorial continental. México.

Onwonga, R.N.; Lelei J.J.; Friedel J.K.; Freyer, B. (2014). Soil nutrient status and maize (*Zea Mays* L.) Performance under Contrasting Legume-Maize Cropping Systems and Soils in Central Rift Valley, Kenya. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences* 3 (2): 241-263.

Ortiz, J.C.; Sánchez de Prager, M. (2016). Dinámica de la materia orgánica en el suelo propiciada por los campesinos mediante prácticas agroecológicas. *Leisa, revista de agroecología* 32 (3).

Oxford Committee for Famine Relief (OXFAM). (2014). Eliminar la desigualdad y luchar contra el cambio climático, claves para los nuevos objetivos desarrollados por Naciones Unidas.

Oxford Committee for Famine Relief (OXFAM). (2012). El lado oscuro del comercio mundial de cereales. El impacto de las cuatro grandes comercializadoras sobre la agricultura mundial.

Perin, L.M.; Martins, G.; Bueno, O.C. (2012). Simulation of the energy performance of maize production integrated to pig farming. Eng. Agríc. Jar. Boticabal. 5 (32).

Pieters, A.J. (1927). Green manure. Principle and practice.

Pishgar, K.S.H; Omid, M.; Davoud, H.M. (2013). On the study of energy use and GHG (greenhouse gas) emissions in greenhouse cucumber production in Yazd province. Energy 59: 63-71.

Ramírez-Córdova, A.L.; Espinoza-Paz, N.; Espinoza-Paz, H.; Ariza-Flores, R.; Martínez-Sánchez, J.; Hernández Maldonado, M. (2017). Vigor de semillas de variedades criollas de maíz de los Valles Centrales de Oaxaca, bajo déficit hídrico. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Acta Fitogenética 4: 17.

Randhawa, P.; Di, J.H.; Codron, L.M.; Sokrat, S. (2005). Effect of green manure addition on soil organic phosphorus mineralisation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73 (2): 181-189.

Robinson, W. (1927). The determination of organic matter in soils by means of hydrogen peroxide. *Journal Agric. Res.* (34): 339.

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.

Rojas-Zárate, Y.; Mondragón, D. (2016). Bromelias epífitas del distrito de Zaachila, Oaxaca, México. *Rev. Mex. Biodiv.* 87 (1).

Romero-Martínez, A.; Leyva-Galán, A. (2014) La biomasa de los cultivos en el agroecosistema, sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales* 35 (1): 11-20.

Rosset, P.; Altieri, M. (2019). *Agroecología: ciencia y política*. Universidad Autónoma de Zacatecas. México. Series Estudios críticos del desarrollo.

Ruiz-Espinoza, F.H.; Marrero-Labrador, P.; Cruz-La Paz, O.; Beltrán-Morales, A.; Díaz-Viruliche, L. (2007). Métodos de labranza e incorporación de frijol dolichos (*Lablab purpureus*) como abono verde en la producción de semillas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en un Yermosol Háplico. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16 (3): 90-94.

Ruíz-González, R. O.; Benítez-Keinrad, M. (2019). Aprendizajes en divergencia política: apropiación de sistemas agroalimentarios sostenibles de Zaachila, Oaxaca, México. Congreso Nacional de Educación Ambiental para la Sustentabilidad. Educación ambiental y movimientos socioambientales. ANEA.

Ruíz-Vega, J.; Nuñez-Barrios, A.; Ruiz, M. A. (2010). Decomposition rates of green manure crops in Oaxaca, México. *Anadolu J. Agric. Sci.* 25 (3): 212-216.

Ruíz-Vega, J.; Loaeza, G. (2003). Evaluación de abonos verdes en asociación con maíz de temporal en los Valles de Oaxaca, México. *Terra latinoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo 21 (3): 409-415.

Ruíz-Vega, J.; Silva-Rivera, M. E. (1999). Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca II. Determinación de las prácticas de producción adecuadas. *Terra Latinoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo 17 (4).

Ruíz-Vega, J. (1998). Agroecological zoning of rainfed maize in the Central Valleys of Oaxaca. I. Yield Potential Determination. *Terra Latinoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo 16 (3): 269-275.

Salcedo-Pérez, E.; Ypushima-Pinedo, A.L.; González-Cruz, R.; Zamora-Nátera, J.F.; Rodríguez-Macías, R.; Sánchez-Hernández, R. (2014). Efecto de las propiedades edáficas y el contenido nutrimental foliar sobre el crecimiento de la teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5 (24).

Sakala, W. D. (2012). The potential of green manures to increase soil fertility and maize yields in Malawi. *Biological Agricultural Et Horticulture. An International Journal for Sustainable Production Systems* 21 (2).

Sanclemente-Reyes, O.E.; Sánchez de Prager-Mosquera, M. (2018). Prácticas agroecológicas: micorrización y productividad del intercultivo maíz-soja (*Zea mays* L.- *Glycine max* L.) *IDESIA* 2 (36): 217-224.

Sanclemente-Reyes, O.E.; Patiño, C. (2015). Efecto de *Mucuna pruriens* como abono verde y cobertura, sobre algunas propiedades físicas del suelo. *Entramado* 11 (1): 206-211.

Sans, F.X. (2007) La diversidad de los agroecosistemas. *Ecosistema* 16 (1).

Sarandón-Santiago, J.; Flores, C. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología* 4: 19-28.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2016). Frijol mexicano. *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación / Food and agriculture organization (SAGARPA/FAO) (2012). México: el sector agropecuario antes del desafío del cambio climático.

Secretaría del Desarrollo Social (SEDESOL) (2018). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social.

Secretaría de Gobernación (SEGOB) (2017). Índice de intensidad migratoria. Estados Unidos-México.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2018). Programa Estatal de Cambio Climático de Oaxaca 2016-2022: 72-73.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2015). Sistema de apoyo para la planeación del PDZP. Villa de Zaachila.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (SEMARNAT/PNUD) (2015). Informe de la situación del medio ambiente. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores claves de desempeño ambiental y de crecimiento verde.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008). Soil degradation in Mexico.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2013). <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.

Sharma, P.; Laor, Y.; Raviv, M.; Shlomit, M.; Saadi, I.; Krasnovsky, A.; Bar-Tal, A.; Borisover, M.; Vager, M.; Levy, G.J. (2017). Green manure as part of organic management cycle: Effects on changes in organic matter characteristics across the soil profile. *Geoderma* 305: 197-207.

Sircely, J.; Naeem, S. (2012). Biodiversity and ecosystem multifunctionality: Observed relationships in smallholder fellows in Western Kenya. *PLoS One* 7 (11).

Sosa-Rodríguez, B.A.; Sánchez-de-Prager, M.; Sanclemente-Reyes, O.E. (2014). Influencia de abonos verdes sobre la dinámica de nitrógeno en un Typic Haplustert del Valle del Cauca, Colombia *Acta Agronómica* 4 (63): 343-351.

Sustainable Agriculture and Rural Development (SARD) (2006). Cultural Indicators for Food Security, Food Sovereignty and Sustainable Development. The 2nd Global Consultation on the Right to Food and Food Security for Indigenous Peoples. Nicaragua.

Tittonell, P.A; Baudron, F.; Klerkx, L.; Felix, G. (2011). Ecological Intensification: Local innovation to address global challenges. *Sustainable agriculture reviews* 19.

Toledo, V. M. (2001). Biodiversity and indigenous peoples. In: S. Levin, et al (Eds.). *Encyclopedia of Biodiversity*. Academic Press: 1181-1197.

Torres-Torres, F; Rojas-Martínez, A. (2018). Agricultural soil en México. Retrospection and prospective for food security. *INEGI* 9 (3).

Tully, K.; Ryals, R. (2017). Nutrient cycling in agroecosystems: Balancing food and environmental objectives. *Agroecology and sustainable food Systems* 7 (41).

Turgut, I.; Bilgili, U.; Duman, A.; Acikgoz, E. (2005). Effect of green manuring on the yield of sweet corn. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 25 (4): 433-438.

United States Department of Agriculture (USDA) (2012). Sunn hemp (*Crotalaria juncea*). Plant guide.

Urrutia, A.L.; González-González, C.; Mora-Van Cauwelaert, E.; Rosell, J.A.; Barrios-García, L.; Keinrad-Bénitez, M. (2019). Landscape heterogeneity of peasant-managed agricultural matrices. Cold Spring Harbor Laboratory.

Val, V.; Rosset, P. M.; Lomel, C.Z.; Giraldo, O.F.; Rocheleau, D. (2019). Agroecology and La Via Campesina I. The symbolic and material construction of agroecology through the dispositive of “peasant-to-peasant” processes, *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43: 7-8, 872-894.

Valor campesino.org. (2019). Valor al campesino: vida, nutrición y riqueza para México.

Valdés, N.; Pérez, D.; Márquez, M.; Angarica, L.; Vargas, D. (2009). Funcionamiento y balance energético en agroecosistemas diversos. *Cult. Trop.* 30 (2).

Vargas-Vásquez, P.; Muruaga-Martínez, JS.; Martínez-Villareal, S.E.; Ruiz-Salazar, R.; Hernández-Delgado, S.; Mayek-Pérez, N. (2011). Diversidad morfológica del frijol ayocote Huasteco de México. *Taxonomía y sistemática. Rev. Mex. Biodiversidad* 82 (3).

Vía Campesina (2019). Movimiento campesino internacional. [Vía campesina.org](http://viacampesina.org)

Viguera, B.; Harvey, C.A.; Martínez-Rodríguez, M.R.; Alpizar, F. (2017). Módulo 2. Impactos del cambio climático en la agricultura de centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación. Technical Report. CATIE. Conservation International.

Wang, K.-H.; Schmitt, D.P.; Brent, S.S. (2002). *Crotalaria* as a cover crop for nematode management: a review. *Nematropica* 32 (1).

Wezel, A.; Casagrande, M.; Celette; Vian, J.F.; Ferrer, A. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 34 (1):.1-20.

World agroforestry (ICRAF) (2009). Annual Report. World Agroforestry. Transforming lives.

Yilmaz, S.; Atak, M.; Erayman, M. (2008). Identification of advantages of maize legume intercropping over solitary cropping through competition indices in the East Mediterranean Region. *Turk J Agric For* 32: 111-119.

Zavala-Sierra, D.; Rodríguez-Ortiz, J.C.; Alcalá, J.; Ruiz-Espinoza, F.H.; González-Mancillas, R.; Rodríguez-Fuentes, H.; Delgado-Sánchez, P. (2018). Potential of five legume species as green manure in the highland area of San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (20).